



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação



Ferramenta Computacional para Seleção de Proteções em Parques Eólicos e S/E's

JOSÉ EDUARDO SEMEDO ROMÃO
(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica – Ramo de Energia

Orientadores:

Prof^ª. Cristina Inês Camus

Prof. Eduardo Adelino Mateus Nunes Eusébio

Júri:

Presidente: Prof. Luís Manuel dos Santos Redondo

1º Vogal: Prof^ª. Cristina Inês Camus

2º Vogal: Prof. João Herminio Ninitas Lagarto

Setembro de 2016



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação



Ferramenta Computacional para Seleção de Proteções em Parques Eólicos e S/E's

JOSÉ EDUARDO SEMEDO ROMÃO
(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica – Ramo de Energia

Orientadores:

Prof^ª. Cristina Inês Camus

Prof. Eduardo Adelino Mateus Nunes Eusébio

Júri:

Presidente: Prof. Luís Manuel dos Santos Redondo

1º Vogal: Prof^ª. Cristina Inês Camus

2º Vogal: Prof. João Herminio Ninitas Lagarto

Setembro de 2016

Dissertação realizada sob orientação de:

Professora Cristina Inês Camus

Professora Adjunta da Área Departamental
de Engenharia de Eletrotécnica de Energia e Automação

Professor Eduardo Adelino Eusébio

Professor Adjunto da Área Departamental
de Engenharia de Eletrotécnica de Energia e Automação

*Endurance is one of the most difficult disciplines,
but it is to the one who endures that the final victory comes.*

Buddha (563 BC-483 BC) Founder of Buddhism.

Resumo

O conjunto de procedimentos necessários para o dimensionamento de proteções num parque eólico e na subestação consequente é um processo complexo, no qual devem, obrigatoriamente, ser considerados diversos cálculos e consultadas variadas tabelas em documentos normativos.

Por se tratar de um processo trabalhoso, que inclui a execução e comparação de inúmeros cálculos e parâmetros, surge a necessidade de agilizar este processo através da criação de uma aplicação informática para o efeito.

Esta aplicação será capaz de processar instantaneamente cálculos que executados manualmente ocupariam muito tempo, e acarretariam uma grande probabilidade de erro. Incluirá também um ficheiro de resultados prático onde o utilizador poderá analisar, trabalhar e imprimir os cálculos processados anteriormente pelo programa.

A aplicação realizará os cálculos de correntes de curto-circuito seguindo as normas atuais para tal procedimento.

Palavra-chave: Proteções

Parque Eólico

Subestação

Corrente de Curto-Circuito

Aplicação Informática

Abstract

The necessary set of procedures to size protections in a wind farm and consequent substation is a complex process in which shall be mandatorily considered several calculations and consulted various tables in normative documents.

Because it is a hard process that includes, the execution and comparison of countless calculations and parameters, there comes up the need to streamline this process through the creation of a computer application for the purpose.

This computer application will be able to process instantly the calculations which otherwise, executed by hand, the task it would consume much more time, and it would have an enormous probability of error. This application will also include a practical result file, where the user will can analyze, work and print the calculations previously processed by the program.

The computer application will perform the calculations of short-circuit currents following the current rules for this procedure.

Keywords: Protection

Wind Farm

Substation

Short-Circuit Current

Computer Application

Agradecimentos

À minha mãe,

Pelos valores que me inculuiu, pela educação e pelas oportunidades que me proporcionou, o que se traduziu no que sou hoje.

Ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa,

Pelo orgulho de pertencer a esta instituição.

Aos meus irmãos e amigos,

Pela amizade, entretida e momentos passados ao longo da minha caminhada pela vida académica.

Aos meus orientadores, Cristina e Eusébio,

Pela disponibilidade, esforço e apoio que durante estes meses dedicaram a este trabalho permitindo assim, que este chegasse ao final com os objetivos traçados inicialmente cumpridos.

A todos os meus colegas, professores e funcionários do instituto,

que de uma forma ou de outra marcaram o meu percurso académico e contribuíram para que pudesse chegar aqui.

A toda a minha família,

por serem o pilar que me suporta nos bons e maus momentos.

Índice

ÍNDICE.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	XV
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XVI
1 INTRODUÇÃO.....	21
1.1 Enquadramento.....	21
1.2 Motivação.....	22
1.3 Objeto de Estudo.....	23
1.3.1 Objetivo/Hipóteses.....	23
1.4 Estrutura do Documento.....	23
1.5 Notação.....	24
2 ESTADO DA ARTE.....	29
3 INTRODUÇÃO ÀS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO.....	41
3.1 Definição.....	41
3.2 Cálculo da corrente curto-circuito.....	50
3.3 Método das Impedâncias.....	65
3.4 Método de cálculo de correntes de curto-circuito pela matriz de admitâncias nodais.....	69
4 DESCRIÇÃO DA APLICAÇÃO INFORMÁTICA.....	75
4.1 Base de Construção.....	75

4.2	<i>Programa de Desenvolvimento</i>	75
4.2.1	<i>Vantagens do programa escolhido</i>	76
4.2.2	<i>Desvantagens do programa escolhido</i>	76
4.3	<i>Aplicação Desenvolvida</i>	76
4.4	<i>Estrutura da aplicação</i>	77
4.4.1	<i>Análise da estrutura das tabelas da aplicação</i>	80
4.4.2	<i>Construção da aplicação</i>	84
4.4.3	<i>Processo de resolução do problema na ótica do utilizador</i>	85
4.4.4	<i>Processo de resolução do problema na ótica da aplicação</i>	92
4.4.5	<i>Ficheiro de Resultados</i>	93
5	<i>CASOS DE ESTUDO</i>	97
5.1	<i>Caso de Estudo 1</i>	97
5.1.1	<i>Cálculo da intensidade de corrente de curto-circuito máxima:</i>	100
5.1.2	<i>Cálculo da intensidade de corrente de curto-circuito mínima:</i>	101
5.2	<i>Caso de Estudo 2</i>	105
5.3	<i>Caso de Estudo 3</i>	111
6	<i>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</i>	117
6.1	<i>Conclusões</i>	117
6.2	<i>Desenvolvimentos futuros</i>	119
	<i>APÊNDICE 1 – CÁLCULOS DO CASO DE ESTUDO 1</i>	127
	<i>APÊNDICE 2 – CÁLCULOS DO CASO DE ESTUDO 2</i>	139
	<i>APÊNDICE 3 – DADOS SOBRE A REDE DO CASO DE ESTUDO 3</i>	157
	<i>APÊNDICE 3.1 – CÁLCULOS DO CASO DE ESTUDO 3</i>	165

Índice de Tabelas

<i>Tabela 3.1 - Fator de Correção da Tensão</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 5.1 - Dados Aerogerador Caso do estudo 1</i>	<i>97</i>
<i>Tabela 5.2 - Dados Transformador BT/MT do Caso de estudo 1</i>	<i>98</i>
<i>Tabela 5.3 - Dados Transformador MT/AT Caso de estudo 1.</i>	<i>98</i>
<i>Tabela 5.4 - Dados da Rede Caso de estudo 1.</i>	<i>98</i>
<i>Tabela 5.5 - Dados dos Cabos BT (B6-B5) do Caso de estudo 1.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabela 5.6 - Dados do Cabo MT (B4-B3) do Caso de estudo 1.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabela 5.7 - Dados do Cabo AT do Caso de estudo 1.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabela 5.8 - Resultados do caso de estudo 1</i>	<i>103</i>
<i>Tabela 5.9 - Dados Aerogerador Caso do estudo 2</i>	<i>105</i>
<i>Tabela 5.10 - Dados Transformador BT/MT do Caso de estudo 2</i>	<i>106</i>
<i>Tabela 5.11 - Dados Transformador MT/AT Caso de estudo 2.</i>	<i>106</i>
<i>Tabela 5.12 - Dados da Rede Caso de estudo 1.</i>	<i>106</i>
<i>Tabela 5.13 - Dados dos Cabos BT (B6-B5) do Caso de estudo 2.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabela 5.14 - Dados do Cabo MT (B7-B6, B11-B8, B5-B4) do Caso de estudo 2.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabela 5.15 - Dados do Cabo MT (B4-B3) do Caso de estudo 2.</i>	<i>108</i>
<i>Tabela 5.16 - Dados do Cabo AT do Caso de estudo 2.....</i>	<i>108</i>
<i>Tabela 5.17 - Resultados do caso de estudo 2</i>	<i>110</i>
<i>Tabela 5.18 - Resultados do caso de estudo 3.</i>	<i>113</i>

Índice de Figuras

<i>Figura 3.1 - Curto-circuito simétrico</i>	42
<i>Figura 3.2 - Curto-circuito monofásico</i>	42
<i>Figura 3.3 - Curto-circuito bifásico</i>	42
<i>Figura 3.4 - Esquema simplificado de uma rede</i>	43
<i>Figura 3.5 - Esquema simplificado de uma rede aquando de um curto-circuito</i>	44
<i>Figura 3.6 - Representação gráfica da decomposição da corrente durante um curto-circuito [22, p. 7]</i>	45
<i>Figura 3. 7 - Representação gráfica de um curto-circuito simétrico</i>	46
<i>Figura 3.8 - Representação gráfica de um curto-circuito assimétrico</i>	47
<i>Figura 3.9 - Representação gráfica do decaimento da componente contínua</i>	48
<i>Figura 3.10 - Corrente curto-circuito assimétrica, quando a falha acontece na proximidade da geração: (1) – corrente sob influência de X_d''. (2) – corrente sob influência de X_d'. (3) – corrente sob influência de X_d. (4) – Componente contínua ou aperiódica. (5) – Contribuição de todos os componentes [22, p. 9]</i>	49
<i>Figura 3.11 - Esquema de uma rede</i>	51
<i>Figura 3.12 - Esquema equivalente da rede</i>	51
<i>Figura 3.13 - Decomposição de um vetor em três componentes</i>	53
<i>Figura 3.14 - Sequência Direta (RST)</i>	54
<i>Figura 3.15 - Sequência Inversa (RTS)</i>	54
<i>Figura 3.16 - Sequência Homopolar</i>	54
<i>Figura 3.17 - Circuitos equivalentes: sequência direta, inversa e homopolar</i>	56
<i>Figura 3.18 - Curto-circuito Trifásico Simétrico</i>	57
<i>Figura 3.19 - Curto-circuito fase-fase</i>	59
<i>Figura 3.20 - Rede de componentes simétricos correspondentes ao curto-circuito bifásico</i>	60
<i>Figura 3.21 - Curto-circuito monofásico</i>	62
<i>Figura 3.22 - Rede de componentes simétricas correspondentes de um curto-circuito monofásico</i>	63
<i>Figura 4.1 - Logotipo da aplicação informática WFSC</i>	77
<i>Figura 4.2 - Exemplo de um desenho da rede a para implementar na aplicação</i>	77

<i>Figura 4.3 - Interface da aplicação com utilizador.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4.4 - Tabela de inserção de dados dos aerogeradores na aplicação.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4.5 - Tabela de inserção de dados dos Transformadores BT/MT na aplicação....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 4.6 - Tabela de inserção de dados dos Transformadores de Interligação MT/AT na aplicação.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 4 7 - Tabela de inserção de dados dos Cabos de Baixa Tensão na aplicação.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 4.8 - Tabela de inserção de dados dos Cabos de Média Tensão na aplicação.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4.9 - Tabela de inserção de dados dos Cabos de Alta Tensão na aplicação.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4.10 - Tabela de inserção de dados das Ligações à Rede.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4.11 - Tabela de inserção do nível de tensão dos barramentos.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 4.12 - Fluxograma do processo de utilização por parte do utilizador.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 4.13 - Introdução de dados nas tabelas da aplicação informática.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 4.14 - Resultado após pressionar o botão “Calcular Impedância” na tabela Aerogeradores.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 4.15 - Resultado após pressionar o botão “Calcular Impedância” na tabela Transformadores.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 4.16 - Botão usado pelo utilizador para que aplicação desenvolva as correntes de curto-circuito.</i>	<i>89</i>
<i>Figura 4.17 - Botão usado para a criação do ficheiro Excel com os resultados.</i>	<i>89</i>
<i>Figura 4.18 - Botão usado para a introdução dos componentes de um novo parque.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 4.19 - Botão usado para a desligar a aplicação.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 4.20 - Botão usado para recorrer à janela.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 4.21 - Janela de auxílio ao utilizador.</i>	<i>91</i>
<i>Figura 4.22 - Fluxograma do processamento dos dados da aplicação.</i>	<i>92</i>
<i>Figura 4. 23 - Exemplo de um ficheiro de resultados em Excel.</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5.1 - Rede do Caso de estudo 1.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 5.2 - Esquema da rede do Caso de estudo 1 com identificação dos barramentos onde os cálculos das impedâncias equivalentes será efetuado.</i>	<i>101</i>
<i>Figura 5.3 - Rede do Caso de estudo 1 inserida no interface da aplicação informática.</i>	<i>102</i>
<i>Figura 5.4 - Resultados do cálculo das correntes de curto-circuito máximas através da aplicação informática.</i>	<i>103</i>
<i>Figura 5.5 - Resultados do cálculo das correntes de curto-circuito mínimas através da aplicação informática.</i>	<i>103</i>

<i>Figura 5.6 - Rede de Caso de estudo 2.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 5.7 - Esquema da rede do Caso de estudo 2 com identificação dos barramentos onde os cálculos das impedâncias equivalentes será efetuado.</i>	<i>109</i>
<i>Figura 5.8 - Esquema da rede do Caso de estudo 3.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 5.9 - Esquema da rede do Caso de estudo 3 com identificação dos barramentos onde os cálculos das impedâncias equivalentes será efetuado.</i>	<i>112</i>

Lista de Acrónimos

- ❖ AT Alta Tensão
- ❖ BT Baixa Tensão
- ❖ IAR Interruptor Auto-Religador
- ❖ GUI Guide User Interface
- ❖ IEC International Electrotechnical Commission
- ❖ IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers
- ❖ MAT Muito Alta Tensão
- ❖ MT Média Tensão
- ❖ PVC Polyvinyl Chloride
- ❖ ROM Read Only Memory
- ❖ WFSC Wind Farm Short-Circuit
- ❖ XLPE Cross-Linked Polyethylene

Lista de Símbolos

Al	Material condutor (Alumínio)	
B	Inverso do coeficiente de temperatura da resistividade a 0°C	°C
B _k	Susceptância	S
c _{máx}	Fator de correção da tensão máximo	
c _{mín}	Fator de correção da tensão mínimo	
CO ₂	Dióxido de Carbono	
Cu	Material condutor (Cobre)	
f	Frequência	Hz
G _k	Condutância	S
I	Intensidade de corrente	A
I _{ac}	Componente alternada da intensidade de corrente	A
I _d	Componente direta da corrente	A
I _{dc}	Componente contínua da intensidade de corrente	A
I _h	Componente homopolar da corrente	A
I _i	Componente indireta da corrente	A
I _k	Corrente de curto-circuito	A
I _{kff}	Corrente de curto-circuito bifásico	
I _{kft}	Corrente de curto-circuito trifásico simétrico	A
I _p	Corrente de pico	A
I _R	Valor de corrente da fase R	A
I _S	Valor de corrente da fase S	A
I _s	Corrente de curto-circuito simétrica	A
I _{rT}	Corrente de serviço do transformador	A
I _T	Valor de corrente da fase T	A
I _z	Corrente máxima admissível	A
l	Comprimento	m
NO _x	Óxido de Nitrogênio	
P _{krT}	Potência de perdas nos enrolamentos do transformador	W
R	Resistência	Ω
R _c	Resistência do condutor	Ω
R _d	Componente direta da resistência	Ω
R _G	Resistência do gerador	Ω
R _h	Componente homopolar da resistência	Ω
R _i	Componente indireta da resistência	Ω
R _Q	Resistência da rede a montante	Ω
R _T	Resistência do transformador	Ω
R _{Th}	Resistência homopolar do transformador	Ω
s	Secção do cabo	mm ²
S _{kQ}	Potência de curto-circuito da rede a montante	VA
S _{rG}	Potência aparente do gerador	VA
S _{rT}	Potência aparente do transformador	VA
SO ₂	Dióxido de Enxofre	
t	Constante de tempo	s
T _a	Constante de tempo da componente contínua ou aperiódica	s
T _d '	Constante de tempo transitória	s
T _d ''	Constante de tempo sub-transitória	s
U	Tensão simples	V
U _n	Tensão nominal	V

U_{nQ}	Tensão nominal da rede a montante	V
U_{rT}	Tensão do transformador	V
V_d	Componente direta da tensão de fase	V
V_h	Componente homopolar da tensão de fase	V
V_i	Componente indireta da tensão de fase	V
V_R	Valor de tensão da fase R	V
V_S	Valor de tensão da fase S	V
V_T	Valor de tensão da fase T	V
X	Reatância	Ω
X_c	Reatância do condutor	Ω
X_d	Reatância síncrona	Ω
X_d'	Reatância transitória	Ω
X_d''	Reatância sub-transitória	Ω
X_Q	Reatância da rede a montante	Ω
X_T	Reatância do transformador	Ω
X_{Th}	Reatância homopolar do transformador	Ω
Y_k	Admitância	S
Z	Impedância	Ω
Z_d	Componente direta da impedância	Ω
Z_G	Impedância do gerador	Ω
Z_h	Componente homopolar da impedância	Ω
Z_i	Componente indireta da impedância	Ω
Z_Q	Impedância da rede a montante	Ω
Z_T	Impedância do transformador	Ω
α	Ângulo de defasagem entre o referencial e a tensão no início de um defeito	$^\circ$
α_c	Coefficiente de temperatura	$^\circ\text{C}^{-1}$
\bar{a}	Vetor operador	
θ_f	Temperatura máxima do isolamento do condutor	$^\circ\text{C}$
u_{kr}	Tensão de curto-circuito do transformador em percentagem	%
ρ	Resistividade elétrica do material	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
$\rho_{20^\circ\text{C}}$	Resistividade elétrica do material a 20°C	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
$\rho\theta_f$	Resistividade elétrica do material à temperatura máxima do isolamento do condutor	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
φ	Ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão	$^\circ$
χ	Decréscimo da componente contínua da corrente de curto-circuito	
x_d'	Reatância transitória direta em percentagem	%
x_h'	Reatância transitória homopolar em percentagem	%
x_i'	Reatância transitória indireta em percentagem	%

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo realiza-se uma abordagem à temática da utilização de aplicações informáticas na simplificação dos processos de dimensionamento. Faz-se um enquadramento da problemática em estudo, enuncia-se os principais pontos que motivaram a análise desta temática e refere-se qual o objeto de estudo implícito na mesma. Especifica-se a organização, bem como a notação utilizadas na elaboração deste documento.

1 Introdução

1.1 Enquadramento

O recurso a ferramentas informáticas no auxílio à execução de projetos de instalações elétricas, é cada vez mais uma constante. Pelo facto de ajudarem o projetista a exercer a sua função de forma mais rápida, visto que fazer cálculos morosos pode ser agora desnecessário, e eficaz, pois evitando cálculos complexos em tamanho e tempo anulamos em grande parte o fator de erro humano.

Através de algoritmos matemáticos aliados a interfaces gráficos, hoje em dia existem softwares capazes de alcançar resultados cada vez mais próximos da realidade e em menor espaço de tempo, comparativamente com os processos manuais.

Atualmente existem programas que, na maior parte dos casos, são desenvolvidos pelas empresas que, ou produzem ou vendem material elétrico relacionado com os projetos para os quais esses softwares são desenvolvidos. Muitas vezes estes, são softwares pagos ou com licenças grátis temporárias.

Apesar da vasta gama de softwares de apoio a projeto, dedicados às variadas áreas da eletrotecnia, em relação aos parques eólicos, para o público em geral, surgem poucas soluções informáticas dedicadas a cem por cento ao auxílio do projetista no planeamento, no que diz respeito a dimensionamento de proteções e barramentos.

Este software aqui desenvolvido procura satisfazer uma lacuna no universo dos programas para auxílio a projetos de subestações agregadas a parques eólicos. Com o objetivo de conseguir por parte do projetista um dimensionamento mais rápido e correto das correntes de curto-circuito.

1.2 Motivação

A exploração da energia eólica está em constante crescimento e cada vez mais tem vindo a ser implementada em Portugal e no Mundo. Sendo uma tecnologia que tem ainda muito para oferecer a humanidade a quantidade de potência instalada está em expansão e levará ao desenvolvimento de muitos parques eólicos.

Estes parques têm como condicionante a localização. A necessidade de locais com grandes deslocções de ar, para o bom rendimento das turbinas, obriga a que na maior parte dos casos o parque tenha agregado uma subestação elevadora de tensão, para daí se fazer o transporte da energia.

No dimensionamento do parque, assim como da subestação é necessário a execução de cálculos para os mais variados instrumentos e materiais destas. Sendo um dos cálculos indispensáveis para o seguimento do projeto, a determinação das correntes de curto-circuito.

As correntes de curto-circuito numa subestação são prejudiciais para infraestrutura elétrica, em especial para os barramentos e condutores. Podendo ainda por em perigo pessoas que estejam na área circundante. Para nos protegermos destas correntes indesejadas, são usados disjuntores que são interruptores com elevado poder de corte, estes são acionados por relés que são o “cérebro” de um sistema em que o disjuntor é o “músculo”.

Devido ao perigo que as correntes de curto-circuito representam para os técnicos que operam na subestação e para a própria infraestrutura, o seu cálculo prévio é da maior importância, visto que os dispositivos como os disjuntores e relés tem de ser escolhidos e parametrizados de acordo com este cálculo para atuarem de forma a impedirem que estas correntes possam causar grandes prejuízos.

O cálculo das correntes curto-circuito são longos e suscetíveis de erros graves. O intuito desta dissertação é o desenvolvimento de uma solução informática que permita ao utilizador de forma eficaz calcular estas correntes em cada ponto da instalação e permita que as proteções e barramentos sejam projetados da forma correta.

1.3 Objeto de Estudo

Numa primeira fase será analisado a solução de cálculo de correntes de curto-circuito numa situação em que tenhamos um parque eólico com uma subestação agregada.

Depois do estudo inicial estar cumprido será elaborado a solução matemática que melhor se poderá implementar como algoritmo de um software informático que permita alcançar os valores de corrente curto-circuito.

Posteriormente desenrolar-se-á a criação da aplicação informática, na qual, após a introdução das características da rede por parte do utilizador, esta automaticamente efetuará os cálculos para a resolução das correntes de curto-circuito. Estas serão entregues ao utilizador através de um relatório também efetuado pela aplicação.

O objetivo é que o software funcione tanto com parques eólicos radiais como com parques em anel.

1.3.1 Objetivo/Hipóteses

Este trabalho terá como principal objetivo desenvolver uma aplicação informática que permita ao utilizador/projetista ter uma solução que o faça poupar tempo e reduza a probabilidade de erro durante o dimensionamento de proteções num parque eólico e consequente subestação.

A ferramenta computacional permitirá calcular o valor das correntes de curto-circuito máximas e mínimas em qualquer ponto da rede à escolha do utilizador.

Traçar-se-ão várias hipóteses sejam estas manuais e informáticas para se poderem contrastar as duas vias. E por fim concluir, se a aplicação é versátil e uma solução viável em relação aos métodos precedentes.

1.4 Estrutura do Documento

A presente dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos metodicamente organizados, sendo iniciada com uma abordagem geral da problemática em estudo e do

estado da arte, algumas definições teóricas, métodos e procedimentos de cálculo manual e informático, passando por exemplos práticos e finalizando com conclusões e possíveis desenvolvimentos futuros.

No primeiro capítulo é realizado um enquadramento de recurso aos meios informáticos de auxílio a técnicos e projetistas, relevando-se a problemática do curto-circuito. É referida a motivação e objeto de estudo que despoletaram a realização da presente dissertação, e por fim é exposta a notação utilizada neste documento.

No segundo capítulo é elaborado o Estado da Arte, em que através de documentos e artigos anteriormente efetuados, é exposta a atualidade da temática da tecnologia eólica e a sua relevância no panorama do documento aqui realizado.

No terceiro capítulo é feita uma análise teórica ao conceito de curto-circuito, é referenciada a sua proveniência, o que pode provocar e como prevenir os danos resultantes deste. São exibidas as formas de cálculo do valor de corrente de curto-circuito, através da norma IEC 60909, para desta forma se proceder ao dimensionamento de componentes de proteção.

No quarto capítulo são enunciados os objetivos da ferramenta computacional, o motivo que levou a escolha do programa utilizado para o seu desenvolvimento. Por fim é explicado toda a estrutura e forma de utilização do programa.

No quinto capítulo são apresentados casos de estudo, que são obtidos resultados de cálculo de valores de corrente de curto-circuito através da forma convencional e pela aplicação informática. Posteriormente os resultados são comparados e analisados. Cada caso de estudo é representado por um parque eólico e consequente subestação de dimensão e complexidade distintas uns dos outros.

Por último, o sexto capítulo, são apresentadas as conclusões provenientes do estudo elaborado e são indicados possíveis desenvolvimentos futuros para a ferramenta computacional.

1.5 Notação

No presente documento a identificação de referências bibliográficas será apresentada entre parêntesis retos [], a numeração de expressões é apresentada com “Eq.” seguida do número que terá dois algarismos, o primeiro referente ao número do capítulo em que este

se encontra e o segundo representa o número da equação em cada capítulo. Em relação às figuras e tabelas estas são apresentadas igualmente com dois algarismos com referência ao capítulo em que são apresentadas e numeradas de forma sequencial. A seguir ao índice de tabelas e figuras são apresentadas as listas de acrónimos e símbolos. Expressões em língua estrangeira são apresentadas em formato itálico.

As referências bibliográficas estão apresentadas de acordo com a norma do *Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE*.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste capítulo é elaborado o Estado da Arte, em que através de documentos e artigos anteriormente efetuados, é exposta a atualidade da temática da tecnologia eólica e a sua relevância no panorama do documento aqui realizado.

2 Estado da Arte

A relevância da energia eólica no plano nacional e mundial está em crescimento, por um lado devido ao aumento do consumo energético, por outro, por fatores que se prendem com a sustentabilidade financeira e com a sustentabilidade ambiental.

Da necessidade dos países na produção de energia a custos mais baixos, mas também das preocupações cada vez prementes na qualidade ambiental, resulta a aposta nas potencialidades da energia eólica.

No início da implementação de parques eólicos, houve um certo ceticismo por parte das populações pelo impacto visual destes na paisagem, bem como pelo ruído que as primeiras torres eólicas emitiam. Em termos técnicos, a questão sonora foi sendo melhorada e dada a crescente consciência ambiental por parte cidadãos, foi também aumentando a receptividade social relativamente aos parques eólicos.

A sua versatilidade em termos geográficos, seja pelas posições offshore e onshore, ou mesmo pelos modelos inovadores, adaptáveis ao tipo de potência que se pretende retirar do aerogerador, fazem desta tecnologia uma solução para o horizonte macro mas também para o micro consumo.

Procurar-se-á sintetizar a importância, impacto e expansão ao longo do tempo desta fonte de produção energética, bem como sobre o avanço da tecnologia eólica, retratados em estudos e investigações sobre o tema.

Nos artigos seguintes esta realidade é relatada em factos e episódios que exibem o ponto em que a energia eólica se encontra atualmente:

Em [1] foi efetuado um estudo global acerca da potência instalada de energia eólica no mundo. Verificam-se como maiores detentores desta energia renovável a China, EUA, Alemanha, Espanha e Índia. A energia eólica é uma das energias renováveis em maior crescimento. O grande despertar para esta fonte de energia elétrica nasceu durante os anos 70 após a dura crise petrolífera, aquando da perceção por parte da humanidade da sua dependência de combustíveis fósseis. Neste estudo Portugal é referido pelo facto de ser o terceiro país do mundo com mais potência instalada de energia eólica per capita, tendo o valor correspondente a 0,37 kW de potência instalada por cada habitante. Como conclusão deste estudo considera-se que a energia eólica é a melhor alternativa a aplicar

no futuro próximo em que se irão conjugar as formas de produção energética existentes com as renováveis. Essa afirmação é confirmada pelos dados do crescimento desta tecnologia por todo o globo. Sendo que os cinco principais países detêm 74% da potência instalada a nível mundial.

Em [2] são discutidas as tendências da produção de energia eólica, num ambiente mundial que se revê maioritariamente dependente de combustíveis fósseis, enquanto estes se encaminham para a escassez total, e com uma situação ambiental global cada vez mais preocupante com os níveis das emissões de carbono para a atmosfera gradualmente mais elevados. Este artigo expõe a necessidade do desenvolvimento de alternativas renováveis e a capacidade de instalação de energia eólica a nível mundial. São estudados vários tipos de aerogeradores para variados tipos de potência, e soluções para as questões geográficas e demográficas como as existentes por exemplo nas áreas urbanas. Modelos como as turbinas de eixo horizontal mais comuns, mas também de eixo vertical tem sido desenvolvidas e melhoradas com o objetivo de retirar mais eficiência. Os maciços e alicerces que oferecem sustentação às torres eólicas principalmente em montagens offshore têm sido desenvolvidos por forma a conseguir implementar os aerogeradores em locais que até aqui não era possível, em que uma das soluções mais desenvolvidos tem sido as bases flutuantes que permitem que apenas seja necessário a ancoragem da base ao fundo do mar para as torres fiquem estabilizadas. Neste artigo é também referenciado a importância de cálculos e softwares para previsão da velocidade do vento e dessa forma considerar o nível de produção exatável. Neste momento a importância de incentivos e de políticas pró-renováveis são fundamentais para a mudança que a humanidade tanto necessita.

Em [3] é realizado uma avaliação ao potencial eólico do Chipre num estudo de sete anos (2007-2014). A importância da energia eólica para o Chipre é consequência do crescimento populacional e grande aumento do turismo no país que levaram a uma demanda crescente de consumo energético. O problema geográfico agrava a situação neste país, pois sendo uma ilha a sua rede energética está isolada. Outro constrangimento é a sua grande dependência de petróleo, na sua totalidade importado. A nível ambiental no Chipre, a preservação da beleza natural é um objetivo primordial, visto que, esta acaba por ser um fator com grande influência económica estando diretamente ligada ao turismo da região. Neste estudo conclui-se que a energia eólica é uma solução viável para a região.

Em [4] é estudado a situação atual da energia eólica nos Estados Unidos da América e estruturou-se o possível impacto que esta irá ter nas próximas décadas. Atualmente o país tem 61 GW de potência instalada em termos de energia proveniente do vento. Tem instalações em 39 estados contribuindo para 4,5% de toda produção de energia elétrica. Sendo que em alguns estados como Iowa e Dakota do Sul que em 2013 a produção excedeu os 25%, e outros sete estados alcançaram a marca dos 13%. Foi estudado o impacto que esta tecnologia teria se em 2020, 10% de toda a produção energética do país fosse eólica, em 2030, 20% e em 2050, 35%. Este estudo teve em conta o aumento do preço dos combustíveis fósseis que se prevêem que venham a suceder. Os resultados concluem que logo nas primeiras décadas o preço da eletricidade para os consumidores tem tendência a diminuir. Prevê-se também uma melhoria na qualidade do ar, saúde pública, diminuição do impacto ambiental pois constatou-se que se a evolução ocorrer exatamente desta forma ao longo das décadas com estas percentagens de energia eólica prevê-se uma inibição de 12,3 Giga toneladas de CO₂ que caso não existisse seriam enviados para a atmosfera com um custo associado de 400 mil milhões de dólares pelo impacto climático.

Em [5] está representado o caso de estudo efetuado na Malásia. Um olhar atento ao aumento do consumo energético com proporcional expansão da elevada emissão de dióxido de carbono. A Malásia é dos países com maior crescimento do valor de emissões de gases de efeito de estufa anualmente, isto provém, da não aposta nas energias renováveis e às pouco eficientes centrais a combustíveis fósseis que neste país existem. A falta de apoio por parte do estado malaio advém de estudos elaborados a mando deste e que resultaram numa resposta negativa, realçando o fraco potencial da região para a aplicação desta tecnologia. Estudos recentes, apontam para que os estudos anteriores estejam grosseiramente errados, pois foram feitas as análises ao vento apenas nas imediações dos aeroportos e demonstram que apesar de não ter as condições exímias, a Malásia tem capacidade para produção de energia através de aerogeradores. A principal dificuldade considerada neste artigo é a barreira política existente, que deve ser urgentemente derrubada pela necessidade deste país de alterar a sua situação ambiental a nível de emissões de gases de efeito de estufa.

Em [6] são estudadas as dificuldades sociopolíticas no sul de Itália, que a energia eólica recebeu durante alguns anos e as que perduram ainda hoje mas que cada vez mais tem tendência a ser ultrapassadas, tendo em conta o nível de informação e sensibilização que

cada vez mais chega às populações. Este estudo divide este problema em três categorias fundamentais da aceitação social, sendo estas a aceitação política, a aceitação do mercado e a aceitação da comunidade. O estudo tem como foco a evolução relativamente desde a década de 90 até à atualidade destas três categorias. No início as eólicas emitiam elevado ruído, suspeitava-se de influência negativa nos terrenos onde estavam implementadas e nas áreas circundantes e ainda o impacto visual que estas tinham nas paisagens. Com isto a comunidade não via como benéfico o crescimento desta tecnologia no país, como resultado disso a aceitação dos mercados, ou seja, dos consumidores não era a melhor e desta forma as políticas que poderiam incentivar o desenvolvimento da energia eólica não surgiram. Com o avanço dos anos e com a evolução da problemática ambiental mundial e da crise dos combustíveis fósseis, foi paralelamente, evoluindo a sensibilidade e conhecimento da população sobre esta temática. Assim e com o melhoramento das novas torres eólicas mais silenciosas e mais adaptadas às paisagens circundantes a comunidade foi vendo com melhores olhos esta tecnologia que é uma das principais soluções como alternativa à produção energética através de combustíveis fósseis. Daí o mercado ficou mais receptivo a uma energia um pouco mais cara pela contrapartida de o consumo energético ser mais limpo. Depois de ultrapassados as duas primeiras categorias a nível político seguiu-se a tendência e as medidas de incentivo surgiram como as tarifas bonificadas e facilitação de distribuição de licenças de produção.

Em [7] é executado um estudo sobre crescimento da produção de energia por via da tecnologia eólica na Índia, sendo este um dos países que tem investido mais neste tipo de energia renovável. Este desenvolvimento ocorre na tentativa de acompanhar o crescimento industrial e conseqüente aumento de consumo energético que se faz sentir neste momento no país, desta forma as medidas que estão a ser implementadas direcionam a Índia para uma solução de menor impacto ambiental e de maior sustentabilidade financeira. Através de incentivos fiscais assim como tarifas bonificadas o governo pretende estimular o investimento interno e externo em parques eólicos no país, isto partilhando o facto de que Índia apresenta várias regiões de excelente potencial para a aplicação de aerogeradores.

Em [8] é feito um estudo que mostra que apesar de a China ser o país com maior potência instalada de energia eólica do mundo ainda existe muito a fazer pois para a situação global da China ainda é um número reduzido tendo em conta toda a produção energética deste país. Contabilizando todos os processos associados, um parque eólico liberta 1/40 de CO₂

de uma central a carvão com a mesma potência instalada. Sendo que para os outros gases poluentes que reduzem exponencialmente a qualidade do ar como SO₂ e NO_x têm uma redução de 80%. Na China uma das prioridades é a melhoria da qualidade do ar sendo mesmo considerado urgente, pois a saúde pública tem sido bastante prejudicada e as multas pagas por emissões de CO₂ são de grande valor. Daí este estudo apontar para uma rápida ação por parte do estado chinês em medidas que resultem numa evolução na aposta de energias renováveis como a eólica.

Em [9] é desenvolvido um estudo que pretende descobrir formas práticas de reduzir o custo da energia eólica, isto é, torná-la mais barata para o consumidor final e ao mesmo tempo fazer com que a estagnação do investimento em parques eólicos onshore e offshore que se tem vindo a acentuar na Dinamarca, retroceda. Para solucionar estas questões neste artigo foram investigadas duas hipóteses, sendo que a primeira passa por aumentar o valor da energia eólica integrando o mercado de calor e de energia e assim assegurar que a energia eólica nunca é vendida a um preço superior do que a alternativa de calor mais cara. A outra hipótese passa por baixar o custo médio da energia eólica aumentando a potência instalada onshore, com modelos de propriedade local e regional facilitadores que aumentassem o nível de aceitação de eólicas onshore. Este artigo pretende buscar assuntos que devem ser debatidos como a crise económica, as condições difíceis de custo e preço da energia eólica com uma necessidade crescente de aceitação local e regional e integração das ainda altas ações da variável energia eólica.

Em [10] é estudado a evolução da energia eólica no panorama global e chinês, assim como as falhas mais comuns nos parques eólicos chineses. Os parques eólicos representam na China, a ponta da espada na procura por uma fonte energética mais sustentável. Até ao momento da publicação deste artigo existiam 318,5 GW de potência instalada a nível mundial de parque eólicos estando estes presentes em 103 países. E em que aproximadamente 91 GW estão instalados na China. Devido à cada vez mais importante produção energética pela via eólica as falhas nos parques de aerogeradores tem sido mais mitigadas de forma a manter a permanência de serviço.

Com o aumento da componente eólica na produção de energia a nível global é necessário que esta seja viável e não falhe, visto que cada vez mais, a sua contribuição é maior, desta forma é necessário que os seus componentes sejam fiáveis e que estes sejam dimensionados de forma correta. Isto obriga a que haja cuidados no dimensionamento de todo o parque eólico e não só das próprias torres eólicas. Toda a cablagem, barramentos,

proteções, transformadores, casas de comando entre outros. Entre estes, destacam-se as proteções pois evitam efeitos destrutivos de curto-circuitos ocasionais. Assim como os constituintes dos próprios aerogeradores que podem deixar um parque inoperacional e de alguma forma criar estigma de que a energia eólica não é viável. Nos seguintes artigos são demonstrados os efeitos negativos das avarias nos parques e os estudos que têm sido efetuados para prevenir as mesmas:

Em [11] são estudados os tipos de terra a estabelecer num parque eólico assim como os diferentes métodos de cálculo possíveis para calcular o valor de corrente curto-circuito no parque. A importância de uma rede de terra que permita a segurança de todos os equipamentos e pessoas no parque eólico é fundamental para a segurança e o bom funcionamento de toda a infraestrutura. O que nem sempre é possível pois pelas características da região poderá ser inconcebível a constituição de uma boa rede de terras. O cálculo das correntes de fuga é então da mesma importância de forma a ter proteções mecânicas capazes de minimizar os estragos possíveis.

Em [12] é desenvolvido um estudo em torno de curto-circuitos nos aerogeradores de indução duplamente alimentados. É uma temática que até aqui não teve grande atenção. A partir do comportamento de máquinas de indução foram retiradas equações que depois de adaptadas ao problema, foram usadas para calcular as correntes de curto-circuito desenvolvidas e então comparadas com uma simulação a três dimensões do comportamento real da máquina aquando de um curto-circuito. A diferença, entre ambos os métodos, é menor que 15% mas em todo o caso é diferente sendo que na simulação o seu valor é maior. Devido à tensão máxima no rotor que é permitida a impedância é baixa. Isto implica que este tipo de turbina forneça uma corrente de curto-circuito superior ao que é calculado pela forma considerada usual.

Em [13] é efetuado o estudo do envelhecimento dos parques eólicos e a sua deterioração ao longo do tempo. Em estudos anteriores contemplou-se a reabilitação de componentes individuais dos aerogeradores mas não foram alargadamente reportados os efeitos na produção energética. Através de comparação de dados ao longo dos anos dos parques eólicos no Reino Unido desenvolveram-se métodos para prever a degradação de um parque eólico ao longo dos anos, consoante a carga que este tem, a velocidade do vento na região, a altitude a que este se encontra. Foi também verificado que as turbinas com pás mais recentes tem um decaimento menor, do que as iniciais, menos desenvolvidas.

Em [14] é simulado uma anomalia no controlo de passo das pás do aerogerador e para o posterior estudo do transitório de estabilidade. Esta análise é importante pois este defeito irá criar problemas para a rede como um alto valor de harmónicas, influenciando a qualidade da energia com resultados negativos para os consumidores. É relevante a importância dada neste estudo à mitigação de anomalias a longo prazo em aerogeradores porque quando estes são offshore a reparação e assistência é financeiramente mais elevada e de mais difícil execução.

Em [15] é executada uma mitigação do efeito esteira nos parques eólicos, em terrenos acidentados em que apesar de existir um grande potencial em termos de energia provinda do vento, as dificuldades geográficas impedem por vezes o maior aproveitamento dos aerogeradores, pois não podem ser cumpridos os limites de distância mínima entre torres. Os aerogeradores não podem ser colocados no posicionamento desejável, chegando eles próprios a influenciarem negativamente no fluxo de vento dos seus homónimos. O estudo debruça-se sobre estas situações adversas e a partir de um software de fluidos simula o efeito esteira existente entre aerogeradores para que desta forma se possa identificar o melhor posicionamento das torres para obter o máximo rendimento destes.

Em [16] é estudado a solução de planeamento de um parque eólico através de um modelo de três dimensões. O objetivo deste estudo é minimizar o custo inicial do parque e maximizar a potência produzida. Aplicando um algoritmo genético para resolução desta temática no modelo tridimensional e bidimensional para o caso do estudo do efeito esteira. Concluiu-se que apesar de se considerar apenas o efeito esteira linear a utilizar aerogeradores com diferentes alturas poderá ser uma solução para melhorar o rendimento do parque. Para melhorar este estudo espera-se futuramente que inclua de forma completa o efeito esteira e as particularidades das topologias do terreno.

Em [10] são também estudados os tipos de falha que podem ocorrer em turbinas e os motivos que levam a tais acontecimentos. Anomalias nas pás dos aerogeradores como fraturas causadas por defeito de fabrico, acidentes durante o transporte, descargas atmosféricas, entre outros. Problemas nos sistemas de travagem, mais concretamente nos discos de travagem, a sujidade, problemas nos sensores de temperatura, velocidade e óleo podem ser as razões para os defeitos na travagem. A ressonância sub-síncrona criada pela troca de energia entre o gerador e a linha de transmissão pode criar estragos sérios ao gerador. A falta de normalização de materiais para os aerogeradores é um grave problema na China pode-se construir um aerogerador em que as peças de base para produção de

energia não sejam as mais aconselháveis para uma determinada situação. O grande e maior problema que surge neste país em termos de produção de energia eólica é a certificação de qualidade dos aerogeradores não ser obrigatória mas sim voluntária. O que torna as infraestruturas pouco viáveis. Outro problema é a falta de manutenção que é disponibilizada aos parques eólicos na China que irá resultar numa grande taxa de avarias e perdas na produção.

Em [17] é estudado o efeito de falhas criadas por descargas atmosféricas, falhas numa só fase e falhas em três fases num parque eólico. A arquitetura dos parques eólicos exige a que sua rede detenha muitas proteções e transformadores, tendo o elevado número de aerogeradores. Essa combinação de dispositivos resulta num grande conjunto de fontes potenciais de transitórios de sobretensões. A isso conjuga-se o elevado custo de reparação e substituição destes elementos constituintes do parque eólico. Devido a grande altura das torres eólicas estas encontram-se em risco de descargas atmosféricas no que pode resultar um aumento de potencial do parque, um decaimento da tensão ao longo do cabo e na destruição das pás dos aerogeradores. Neste artigo foram simulados estes três tipos de falhas num parque de dimensões idênticas aos reais. Em todos os tipos de falhas aqui testados os resultados podem ser catastróficos se não existir uma proteção imediata que iniba os transitórios de se prolongarem. Correntes excessivas e uma queda abrupta da tensão poderá causar o colapso de toda a rede do parque eólico.

Em [18] é estudado a melhor forma de exercer manutenção em parques eólicos com o objetivo de maximizar a produção e minimizar custos. Neste estudo foi tido em conta o comportamento estocástico do vento e as limitações em termos de recursos humanos nas equipas de manutenção. O estudo aponta que, para se alcançarem resultados mais conclusivos, deve-se ter em conta o nível de dificuldade de transporte das equipas ao longo do parque. Com este estudo apesar de não abranger todas as componentes inerentes a um parque eólico é conseguido uma redução de gastos que a longo prazo atinge valores consideráveis a nível financeiro.

Em [19] é estudada uma forma de prever avarias e renovação de componentes em parques eólicos offshore. Devido à dimensão deste tipo de parques que em grande parte das vezes são maiores que os onshore e à complexidade de operações de manutenção e reparação. Estes parques offshore estão a ser cada vez mais aplicados pois a sua capacidade de produção é maior, porque os níveis de velocidade do vento são superiores e não tem tantas limitações geográficas como no caso das montagens onshore. Outra das suas

desvantagens relativamente ao onshore é seu custo inicial elevado, pois devido à sua complexa implementação o seu valor ronda os 1.44 milhões € / MW enquanto o onshore é de 0,78 milhões €/MW. Através de um estudo de qualidade dos componentes dos aerogeradores e do restante parque e de probabilidade de avaria ao longo do tempo estipulou-se um plano de manutenção preventivo e de troca de componentes para que estas operações ocorram sempre de forma pontual e evitando avarias e falhas inesperadas.

Para garantir que os parques eólicos se mantêm em funcionamento o máximo tempo possível e para que se evitem algumas das situações acima referidas, deverá ter-se em conta um dimensionamento exímio que procure contabilizar todos os fatores que podem influenciar a boa ou má prestação do parque, tanto em termos de produção como em termos das proteções de toda a infraestrutura. Daí a importância da existência de softwares no dimensionamento da rede que permitam facilitar cálculo e que os resultados obtidos sejam o mais próximo da realidade. A minúcia que o cálculo das correntes de curto-circuito deve atingir é um exemplo da importância extrema do uso de softwares. O valor destas correntes é de extrema importância tanto para o dimensionamento de proteções como de todos os componentes que estão sujeitos a ser percorridos por estas correntes e desta forma possam suportá-las enquanto estas perdurarem. Os artigos seguintes revelam alguns softwares usados para dimensionamento de parques eólicos:

Em [17] como foi referido anteriormente foi feito o estudo a falhas numa fase, em três fases e em situações de descargas atmosféricas. O software utilizado é o EMTP-RV que permite fazer um estudo aprofundado em situações de transitórios deste tipo. Os resultados conseguidos são apresentados graficamente com a variação de corrente e tensão em função do tempo. Conclui-se que nesta situação o estudo efetuado pelo programa é fulcral para se poder estudar este tipos de fenómenos tendo em conta a sua evolução ao longo do tempo.

Em [15] o estudo foi executado com auxílio de um software de dinâmica de fluídos, com o objetivo de, para um caso de estudo real, projetar o posicionamento dos aerogeradores por forma destes terem o maior rendimento tentando anular o máximo de efeito de esteira entre eles. Com este software foi também possível concluir que uma alteração ligeira do ângulo das pás dos aerogeradores, para o caso em estudo, poderia dar um maior aproveitamento do vento naquela região.

Em [20] foram estudados os efeitos dos transitórios de energia em parques eólicos offshore de grande dimensão (72 aerogeradores), sendo que o estudo incidiu na

representação do efeito dos transitórios nas proteções do parque através de dois softwares idênticos, o PSCAD EMTDC e o DigSILENT Power Factory com o objetivo final de comparar os resultados de cada um. Os resultados alcançados foram idênticos nos dois programas que permitem com detalhe ver a evolução do transitório ao longo do tempo.

Para além destes softwares anteriormente apresentados ainda existem o Elaplan-Modul e o EasyPower que permitem estudar o trânsito de energia num parque eólico. São ferramentas essenciais para projetos de parques eólicos, offshore e onshore. A desvantagem destes softwares anteriormente referidos em relação ao cálculo manual e ao software desenvolvido nesta presente dissertação são os preços de licença elevados e exigem ao utilizador prática de utilização ou algum tempo de formação para que este consiga ter uma performance satisfatória na utilização destes softwares.

Capítulo 3

Introdução às Correntes de Curto-Circuito

Neste capítulo é elaborada a base teórica de um curto-circuito. São mostradas as razões que levam a estes acontecimentos bem como as variantes de curto-circuito existentes.

São exibidos e explicados dois métodos de cálculo que tem como objetivo determinar o valor da corrente de curto-circuito.

3 Introdução às correntes de curto-circuito

3.1 Definição

Designa-se por “Curto-Circuito” um percurso de impedância baixa, resultante de um defeito, através da qual se fecha uma corrente, geralmente bastante elevada. Trata-se de uma situação invulgar nas redes elétricas que requer uma resposta imediata, devido aos danos que dela provêm.

Os curto-circuitos podem surgir por variadas razões sendo que em particular as redes aéreas estão mais suscetíveis a estes acontecimentos pois estão fisicamente mais expostas. Descargas atmosféricas, a proximidade flora e da avifauna, são as principais causas de fenómenos de curto-circuito neste tipo de rede. Já em redes subterrâneas a deterioração do isolamento dos cabos e condutores é a causa mais natural, sendo que acidentalmente em aberturas de valas com máquinas, pode dar-se igualmente um curto-circuito.

Relativamente as descargas atmosféricas, os transitórios ultrarrápidos que delas resultam são sustidas, pois caso se cesse a corrente curto-circuito o fenómeno termina (isto é, devido a desionização e conseqüente recuperação das propriedades isolantes do ar envolvente após a interrupção da corrente) [21, p. 281]. Nestas situações através de descarregadores de sobretensão (DST's) as correntes são escoadas para a terra, e após a diminuição do valor de tensão, cessam a condução de corrente e o circuito volta ao funcionamento original.

Consideram-se como principais, os três seguintes tipos de curto-circuito (estando estes por ordem de maior valor de corrente resultante):

- Curto-circuito Trifásico (Figura 3.1) – este afeta simultaneamente as três fases do circuito, caso as impedâncias de defeito sejam iguais em cada fase, este é considerado *simétrico*, na situação em que a impedância de defeito seja nula é considerado um curto-circuito *franco*.

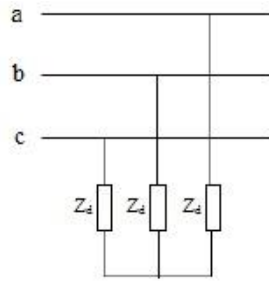


Figura 3.1 - Curto-circuito simétrico

- Curto-circuitos Assimétricos – estes podem afetar uma fase e a terra como exemplificado na Figura 3.2 (curto-circuito monofásico). Podem afetar duas fases representado em Figura 3.3 (curto-circuito bifásico).

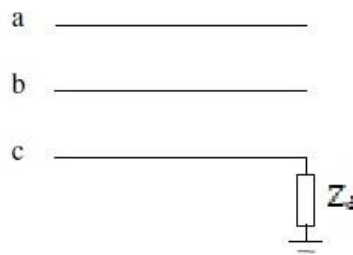


Figura 3.2 - Curto-circuito monofásico.

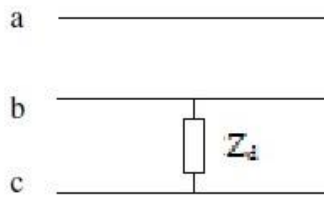


Figura 3.3 - Curto-circuito bifásico.

O curto-circuito mais frequente é o monofásico, cerca de 80% dos que acontecem são deste tipo, sendo que 15% são bifásicos e os mais raros são os trifásicos com 5% [22, p. 6].

As principais consequências destes fenômenos [22, p. 6]:

- Possível presença de arcos elétricos;
- Danos ao isolamento dos condutores;
- Possível presença de fogo, perigo à vida;
- Danos em redes próximas;
- Distúrbios em circuitos do controle/monitoração;
- Danos físicos em equipamentos;
- Aumento das perdas Joule;
- Distúrbios em circuitos do controle/monitoração.

Desenrolar de um curto-circuito:

Um circuito simplificado (Figura 3.4) com uma fonte de tensão AC de potência constante, um interruptor, uma impedância Z_b que representa todas as impedâncias a montante do interruptor e Z_c que simboliza a impedância da carga.

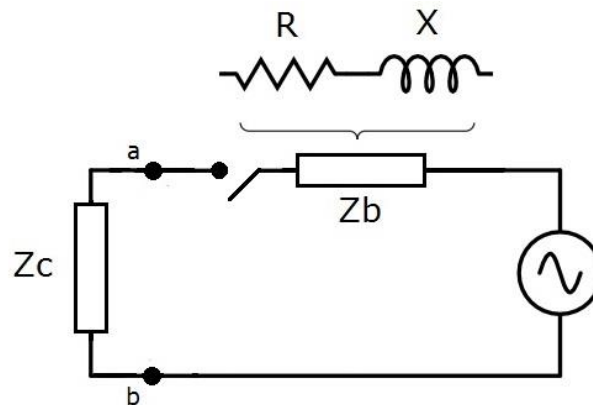


Figura 3.4 - Esquema simplificado de uma rede.

Numa rede a impedância de defeito é, toda impedância existente entre a fonte e o local de fecho da corrente curto-circuito. Esta impedância inclui a contribuição dos geradores, transformadores, cabos e barramentos associados à rede, considerando os vários níveis de tensão existentes.

Na Figura 3.4 na situação em que o interruptor está fechado a corrente resultante que circula pelo circuito ou corrente nominal é resultante da tensão aplicada pela fonte sobre as impedâncias da infraestrutura (Z_b) e de carga (Z_c).

Se ocorrer um defeito (Figura 3.5) entre os pontos “a” e “b”, uma corrente de curto-circuito elevada irá percorrer o circuito resultante que apenas está limitado pela impedância Z_b .

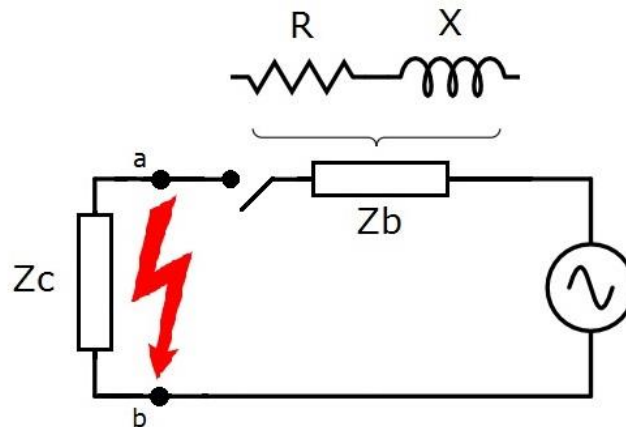


Figura 3.5 - Esquema simplificado de uma rede aquando de um curto-circuito.

A corrente de curto-circuito correspondente a situação da Figura 3.5 desenvolve-se dependendo da impedância Z_b ou seja da resistência R e da reatância X . Nas redes de distribuição habitualmente, o valor da reatância é muito superior ao valor da resistência. O rácio entre R/X é entre 0,1 e 0,3 [22, p. 7].

Esta relação pode contudo, verificar-se diferente caso o curto-circuito seja muito próximo da geração. Pois quanto mais próximo o defeito da fonte, mais baixo vai ser o valor da impedância a montante.

Na situação mais comum, em que o curto-circuito ocorre num local arredado do gerador, e o valor da impedância permite que a relação R/X seja a anteriormente referida, o circuito está sobre a imposição de uma tensão:

$$e(t) = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega t + \alpha) \quad \text{Eq.3.1}$$

Onde α representa a diferença em graus, da tensão a zero e o valor da tensão (e) no instante do curto-circuito.

A corrente por sua vez é dividida em duas componentes,

$$i = i_{ac} + i_{dc} \quad Eq.3.2$$

Sendo que a primeira componente i_{ac} é alternada e sinusoidal,

$$i_{ac}(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad Eq.3.3$$

Em que φ representa o defasamento entre a corrente e a tensão, e I é resultante,

$$I = \frac{E}{Zb} \quad Eq.3.4$$

A segunda componente i_{dc} , representa a parte aperiódica ou continua da corrente,

$$i_{dc}(t) = -\sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \quad Eq.3.5$$

O seu valor inicial depende da relação R/L, em que L é a indutância do circuito. Esta relação também influencia a forma como esta corrente irá decair ao longo do tempo.

Na Figura 3.6 está representado a decomposição da corrente (i) quando ocorre um curto-circuito, esta por definição inicialmente é igual a zero.

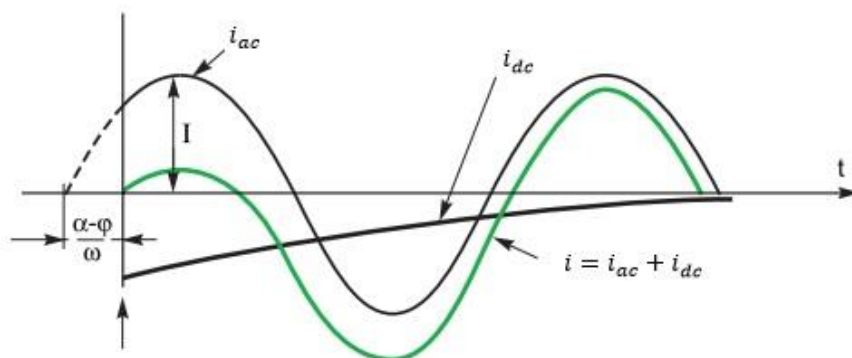


Figura 3.6 - Representação gráfica da decomposição da corrente durante um curto-circuito [22, p. 7].

O momento em que a falha ocorre ou momento de fecho de curto-circuito, em relação a tensão pode ser caracterizado pelo ângulo α . A tensão pode ser expressa por,

$$u(t) = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega t + \alpha) \quad \text{Eq.3.6}$$

Então a corrente que surge é,

$$i(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot E}{Zb} [\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi)e^{-\frac{R}{L}t}] \quad \text{Eq.3.7}$$

Composta pelas duas componentes em que a primeira periódica com uma defasagem da tensão de φ e a componente aperiódica que com o incremento temporal irá tender para zero.

Como podemos analisar da Figura 3.7, quando $\alpha = \varphi \approx \pi/2$, diz-se que o curto-circuito é simétrico.

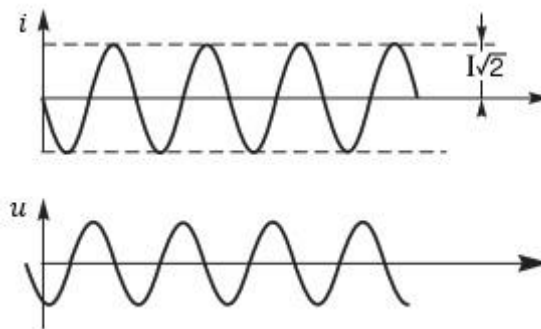


Figura 3. 7 - Representação gráfica de um curto-circuito simétrico.

A corrente de curto-circuito corresponde ao membro periódico da equação, ou seja não existirá componente contínua ou aperiódica. A corrente pode então ser definida por,

$$i(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot E}{Zb} \sin(\omega t) \quad \text{Eq.3.8}$$

Em que na situação inicial, tem a forma de onda correspondente as condições de pico $\frac{\sqrt{2} \cdot E}{Zb}$.

Quando $\alpha = 0$ podemos concluir que o curto-circuito é assimétrico. E a corrente pode ser definida por,

$$i(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot E}{Z_b} [\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\varphi)e^{-\frac{R}{L}t}] \quad \text{Eq.3.9}$$

Como podemos conferir na Figura 3.8 a existência de componente contínua faz com que esta assuma características assimétricas nos instantes seguintes à ocorrência do curto-circuito.

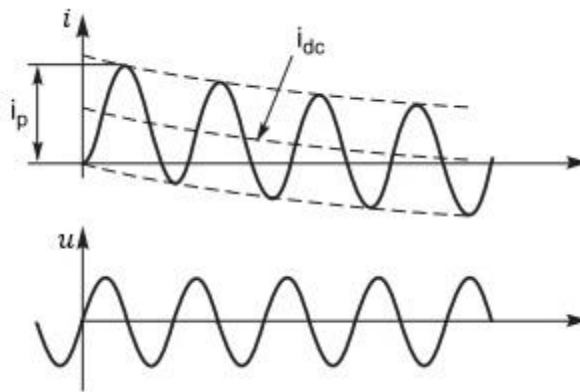


Figura 3.8 - Representação gráfica de um curto-circuito assimétrico.

Verifica-se que $e^{-\frac{R}{L}t}$ é proporcionalmente inverso ao amortecimento da componente contínua ou aperiódica, determinado por R/L ou R/X .

O valor de pico ou de crista (I_p) da corrente depende de φ , ou seja, na relação R/X que estipula o $\cos\varphi$ da rede.

O valor da corrente de crista tem portanto, de ser calculado previamente com o objetivo do poder de corte da proteção ser superior a este valor e para que a instalação possa suportar os efeitos eletrodinâmicos que desta corrente provêm.

O valor I_p resulta da corrente de curto-circuito quando esta alcançar o ponto de simetria (I_s), usando a seguinte expressão:

$$i_p = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot i_s \quad \text{Eq.3.10}$$

Em que χ é um fator empírico associado à máxima percentagem de componente contínua previsível, indicado pela curva na Figura 3.9 sendo este em função de R/X ou R/L, correspondente à expressão,

$$\chi = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{R}{X}} \quad \text{Eq.3.11}$$

Este factor traduz a maior ou menor rapidez de decaimento da componente contínua e é função da razão R/X vista do local de defeito [23, p. 101]:

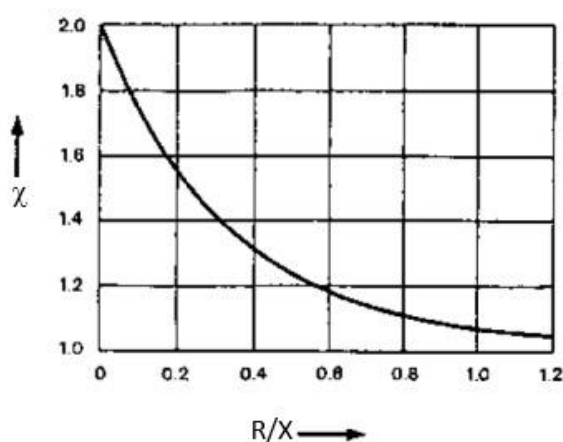


Figura 3.9 - Representação gráfica do decaimento da componente contínua.

Nos exemplos anteriores considerou-se impedância não variável mas no caso da proximidade dos geradores síncronos, sendo as principais fontes de corrente DC, apresentam um comportamento diferenciado no que respeita à sua indutância interna em diferentes momentos temporais.

Define-se então em três momentos a componente fundamental da corrente curto-circuito ao longo do tempo, como exemplificado na Figura 3.10:

Período sub-transitório (10 a 20 ms)[22, p. 8]– momento inicial, quando a corrente dc diminui drasticamente, como exemplificado na Figura 3.10

Período transitório (até 500 ms) – depois do primeiro momento, este é caracterizado por uma diminuição mais lenta por parte da componente DC até alcançar o valor permanente.

Período permanente – período em que a corrente curto-circuito atinge o seu valor estacionário (valor que em situação normal nunca é atingido, tendo em conta que as proteções são acionadas antes).

Isto ocorre porque a cada período está atribuída uma reatância diferente. Sendo respetivamente a reatância sub-transitória (X_d''), reatância transitória (X_d'), reatância síncrona (X_d). Sendo a primeira a que tem valor inferior e a última, valor superior, por esse motivo o valor de corrente ir diminuindo.

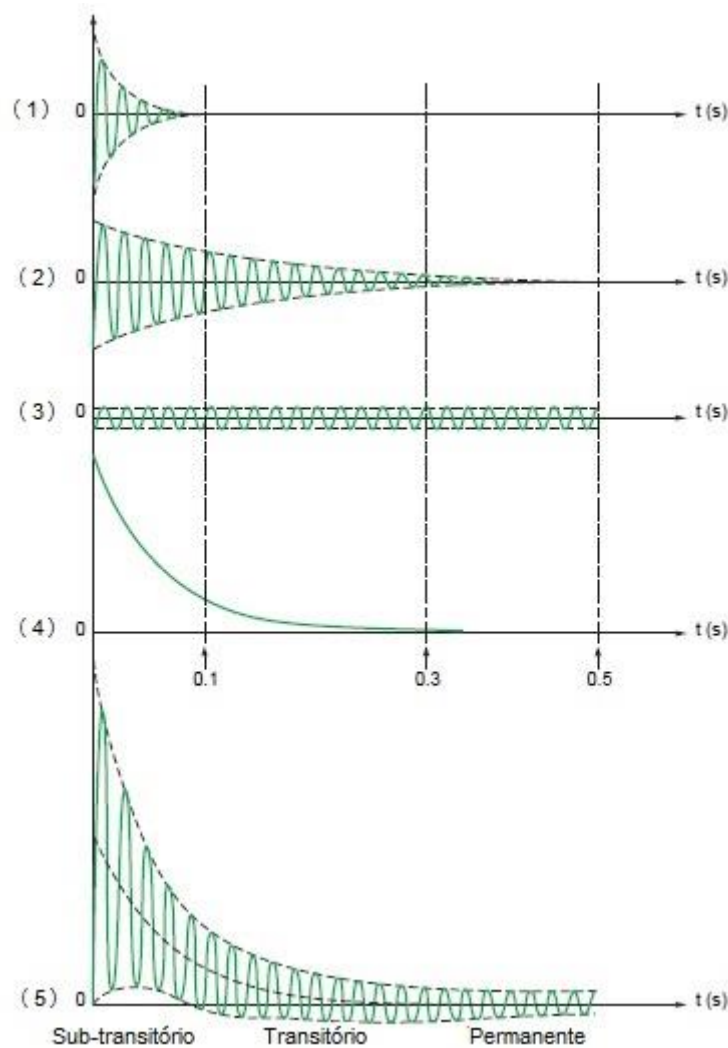


Figura 3.10 - Corrente curto-circuito assimétrica, quando a falha acontece na proximidade da geração: (1) – corrente sob influência de X_d'' . (2) – corrente sob influência de X_d' . (3) – corrente sob influência de X_d . (4) – Componente contínua ou aperiódica. (5) – Contribuição de todos os componentes [22, p. 9].

A contribuição de todos os componentes é matematicamente conseguida através da seguinte expressão:

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot E \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{1}{X_d} \right] \cos(\omega t) - \frac{\sqrt{2} \cdot E}{X_d''} e^{-\frac{t}{T_a}}$$

Eq.3.12

Onde:

E – Tensão simples eficaz aos terminais do gerador;

X_d'' – Reatância sub-transitória;

X_d' – Reatância transitória;

X_d – Reatância síncrona;

T_d'' – Constante de tempo sub-transitória;

T_d' – Constante de tempo transitória;

T_a – Constante de tempo da componente contínua ou aperiódica;

Em Baixa Tensão, devido à velocidade de disparo dos dispositivos de proteção, o valor do sub-transitório da corrente de curto-circuito, representada por I_k'' e o valor da corrente de pico I_p é suficiente quando se pretende determinar o poder de corte dos dispositivos e os esforços eletrodinâmicos em barramentos.

Em Alta Tensão e nas redes de distribuição de Média Tensão considera-se a corrente calculada I_k através da impedância em regime permanente X_d .

3.2 Cálculo da corrente curto-circuito

O cálculo de curto-circuitos deve ser efetuado para curto-circuitos em todos os barramentos da rede e requer o uso um programa de cálculo digital. Note-se, contudo, que para casos simples, é possível um cálculo rápido simplificado [21, p. 282].

O método mais comum de se efetuar o cálculo de curto-circuito é o “método das impedâncias”, é usado para calcular com eficácia a corrente de curto-circuito num determinado ponto.

Este método consiste no somatório de todas as resistências e reatâncias a montante do defeito, o que exige o conhecimento de todas as características dos componentes da rede. O cálculo da corrente provém da aplicação da Lei de Ohm:

$$I_k = \frac{U_n}{\sqrt{3} \sum(Z)} [A] \quad \text{Eq.3.13}$$

Este método segue o princípio do Teorema de Thévenin, o qual permite para uma rede elétrica vista de um nó de defeito, anular as fontes de tensão ou corrente e substituí-las por uma tensão de pré-defeito. A impedância total ou de Thévenin é vista a partir deste nó de defeito como podemos ver representado na Figura 3.12.

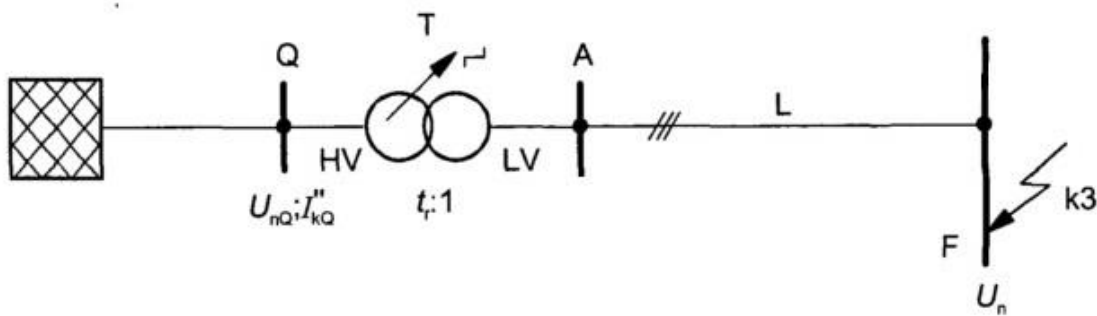


Figura 3.11 - Esquema de uma rede.

Podemos aplicar o Teorema de Thévenin ao circuito anterior e ficaremos com um esquema simplificado em que obteremos impedâncias e a tensão de pré-defeito, vistos do barramento F, desta forma conseguimos calcular a corrente de curto-circuito naquele barramento.

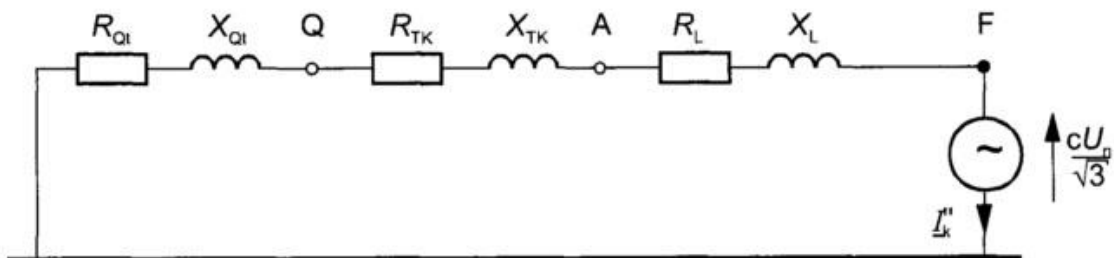


Figura 3.12 - Esquema equivalente da rede.

Se obtivermos o valor total da impedância,

$$Z_t = (R_{Qt} + R_{TK} + R_L) + j(X_{Qt} + X_{TK} + X_L) \quad \text{Eq.3.14}$$

Podemos então determinar o valor da corrente de curto-circuito (I_k),

$$I_k = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_t} [A] \quad \text{Eq.3.15}$$

Em c é o fator de tensão, de acordo com a Tabela 3.1, considerando que a tensão máxima num circuito em situação normal (pré-defeito) em média pode ser 5% ou 10% superior à tensão nominal do circuito dependendo se for em Baixa Tensão ou Alta Tensão respetivamente.

Tabela 3.1 - Fator de Correção da Tensão [23, p. 41].

Tensão Nominal	Fator de Correção da Tensão (c)	
	Para máxima corrente de curto-circuito	Para mínima corrente de curto circuito
	$c_{\text{máx}}$	$c_{\text{mín}}$
100 – 1000 V	1,05	0,95
> 1000 – 35 kV	1,10	1,00
> 35 kV		

Z_t representa a impedância total mas esta pode ser dividida em várias componentes simétricas. Consoante o tipo de curto-circuito a impedância total varia, pois o percurso que a corrente percorre é diferente. São conhecidas como principais topologias [24, p. 60]:

Z_d – Componente direta, define-se como a componente elétrica do quociente entre a tensão de fase-neutro e a corrente, quando o sistema é alimentado com um gerador síncrono trifásico em sequência direta (sequência R-S-T).

Z_i – Componente indireta, define-se como a componente elétrica do quociente entre a tensão fase-neutro e a corrente, quando o sistema é alimentado com um gerador síncrono trifásico em sequência inversa (sequência R-T-S).

Z_h – Componente homopolar, define-se como a componente elétrica do quociente entre a tensão de fase e a corrente quando o sistema está a ser alimentado mediante uma fonte de tensão alternada monofásica. Se as três fases (R-S-T) estão dispostas em paralelo constituem um caminho de ida da corrente, deve existir um quarto condutor que atue como retorno comum. Por este retorno circula uma corrente três vezes a corrente de componente homopolar correspondente a uma fase.

Esta explicação pode ser complementada através de vetores que corroboram a informação anteriormente descrita:

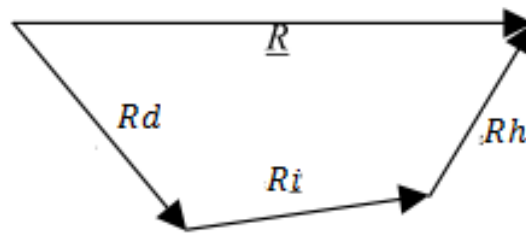


Figura 3.13 - Decomposição de um vetor em três componentes.

Se complementarmos cada uma destas componentes é possível formar um sistema trifásico equilibrado. Desta forma, a componente R_d pode formar um sistema trifásico de sequência direta(R,S,T) a componente R_i pode formar uma sequência trifásica indireta(R,T,S) e por fim R_h permite formar uma sequência trifásica homopolar. Por conseguinte podemos aplicar os três sistemas de componentes, no plano Gaussiano.

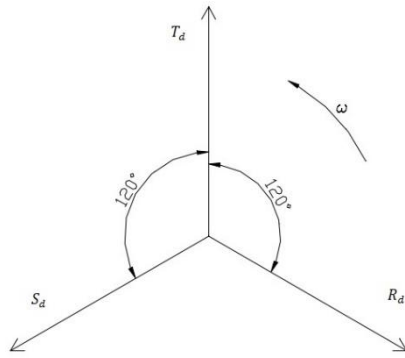


Figura 3.14 - Sequência Direta (RST).

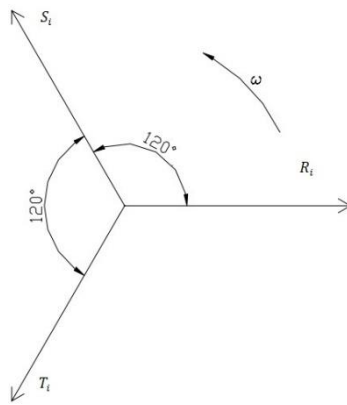


Figura 3.15 - Sequência Inversa (RTS).

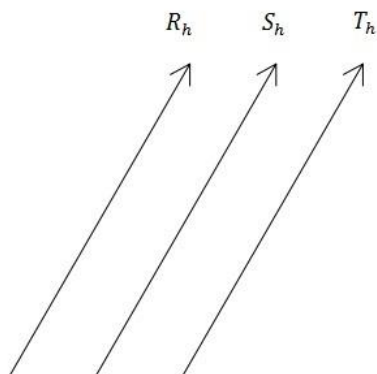


Figura 3.16 - Sequência Homopolar.

Para podermos iniciar os cálculos é necessário definir o vetor operador (\bar{a}), o qual permitirá representar as voltas de 120° aos vetores em plano de Gauss:

$$\bar{a} = \bar{a}^4 = (-0,5 + j0,87) = 1\angle 120^\circ \text{ equivale a uma volta de } +120^\circ$$

$$\bar{a}^2 = (-0,5 - j0,87) = 1\angle 240^\circ \text{ equivale a uma volta de } +240^\circ$$

$$\bar{a}^3 = (1 + j0) = 1\angle 0^\circ \text{ equivale a uma volta de } +360^\circ$$

Desta forma umas das primeiras relações que podemos obter a partir das Figura 3.14, Figura 3.15 e Figura 3.16 é usando a magnitude da corrente:

$$\begin{aligned} \bar{I}_R &= \bar{I}_{Rd} + \bar{I}_{Rl} + \bar{I}_{Rh} \\ \bar{I}_S &= \bar{I}_{Sd} + \bar{I}_{Sl} + \bar{I}_{Sh} = \bar{I}_{Rd}\bar{a}^2 + \bar{I}_{Rl}\bar{a} + \bar{I}_{Rh} \\ \bar{I}_T &= \bar{I}_{Td} + \bar{I}_{Tl} + \bar{I}_{Th} = \bar{I}_{Rd}\bar{a} + \bar{I}_{Rl}\bar{a}^2 + \bar{I}_{Rh} \end{aligned} \quad \text{Eq.3.16}$$

Isto acontece na situação de as componentes serem simétricas o que pode não acontecer sempre. No caso de não acontecer a relação que podemos retirar:

$$\bar{I}_R + \bar{I}_S\bar{a} + \bar{I}_T\bar{a}^2 = \bar{I}_{Rd}(1 + \bar{a}^3 + \bar{a}^3) + \bar{I}_{Rl}(1 + \bar{a}^2 + \bar{a}^4) + \bar{I}_{Rh}(1 + \bar{a} + \bar{a}^2) = 3\bar{I}_{Rd}$$

$$\bar{I}_R + \bar{I}_S\bar{a}^2 + \bar{I}_T\bar{a} = \bar{I}_{Rd}(1 + \bar{a}^4 + \bar{a}^2) + \bar{I}_{Rl}(1 + \bar{a}^3 + \bar{a}^3) + \bar{I}_{Rh}(1 + \bar{a}^2 + \bar{a}) = 3\bar{I}_{Rl}$$

$$\bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T = \bar{I}_{Rd}(1 + \bar{a}^2 + \bar{a}) + \bar{I}_{Rl}(1 + \bar{a} + \bar{a}^2) + \bar{I}_{Rh}(1 + 1 + 1) = 3\bar{I}_{Rh}$$

Por conseguinte,

$$\begin{aligned} \bar{I}_{Rd} &= \frac{1}{3}(\bar{I}_R + \bar{I}_S\bar{a} + \bar{I}_T\bar{a}^2) \\ \bar{I}_{Rl} &= \frac{1}{3}(\bar{I}_R + \bar{I}_S\bar{a}^2 + \bar{I}_T\bar{a}) \\ \bar{I}_{Rh} &= \frac{1}{3}(\bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T) \end{aligned} \quad \text{Eq.3.17}$$

O mesmo se aplica às tensões de cada fase, da mesma forma para componente (direta, inversa e homopolar).

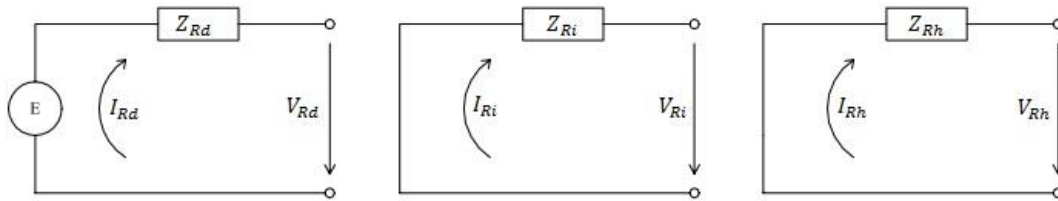


Figura 3.17 - Circuitos equivalentes: sequência direta, inversa e homopolar.

Com estes circuitos equivalentes (Figura 3.17) obtemos a teoria das componentes simétricas, a qual nos indica que uma rede formada por uma fonte de tensão (apenas no caso da sequência direta) e uma impedância em serie com a mesma, esta impedância de Thevenín da rede é vista do ponto onde se dá o curto-circuito.

Assim, e aplicando as Leis de Kirchoff, chegamos:

$$\begin{aligned}
 \overline{V_{Rd}} &= \overline{E} - (\overline{I_{Rd}} \cdot \overline{Z_d}) \\
 \overline{V_{Ri}} &= -(\overline{I_{Ri}} \cdot \overline{Z_i}) \\
 \overline{V_{Rh}} &= -(\overline{I_{Rh}} \cdot \overline{Z_h})
 \end{aligned}
 \tag{Eq.3.18}$$

Com isto podemos então avançar para um estudo mais aprofundado de cada tipo de curto-circuito, sendo que o trifásico simétrico advém:

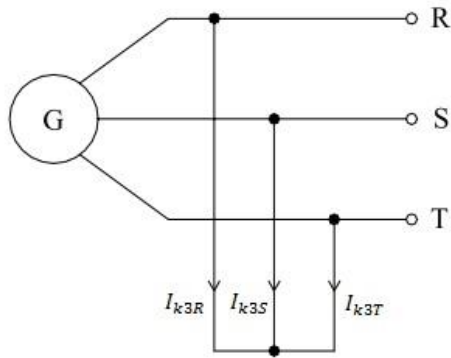


Figura 3.18 - Curto-circuito Trifásico Simétrico

Neste tipo de curto-circuito as condições iniciais que o definem são:

$$\overline{U}_R = \overline{U}_S = \overline{U}_T = 0 \quad \text{Eq.3.19}$$

Com estas condições iniciais as equações, referidas as tensão das componentes, obtemos os seguintes resultados:

$$\overline{V}_{Rd} = \frac{1}{3}(\overline{V}_R + \overline{V}_S \bar{a} + \overline{V}_T \bar{a}^2) = \frac{1}{3}(0 + 0 \cdot \bar{a} + 0 \cdot \bar{a}^2) = 0$$

\Leftrightarrow

$$\overline{V}_{Rl} = \frac{1}{3}(\overline{V}_R + \overline{V}_S \bar{a}^2 + \overline{V}_T \bar{a}) = \frac{1}{3}(0 + 0 \cdot \bar{a}^2 + 0 \cdot \bar{a}) = 0$$

Eq.3.20

\Leftrightarrow

$$\overline{V}_{Rh} = \frac{1}{3}(\overline{V}_R + \overline{V}_S + \overline{V}_T) = \frac{1}{3}(0 + 0 + 0) = 0$$

\Leftrightarrow

$$\Leftrightarrow \quad \overline{V}_{Rd} = 0$$

$$\Leftrightarrow \quad \overline{V}_{Rl} = 0$$

$$\Leftrightarrow \quad \overline{V}_{Rh} = 0$$

As tensões de linha e de fase são nulas o que obrigará as componentes simétricas a serem nulas,

$$\overline{V_{Rd}} = 0 = \overline{E} - (\overline{I_{Rd}} \cdot \overline{Z_d}) \Leftrightarrow$$

$$\overline{V_{Rl}} = 0 = -(\overline{I_{Rl}} \cdot \overline{Z_l}) \Leftrightarrow$$

$$\overline{V_{Rh}} = 0 = -(\overline{I_{Rh}} \cdot \overline{Z_h}) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \overline{I_{Rd}} = \frac{\overline{E}}{\overline{Z_d}}$$

$$\Leftrightarrow \overline{I_{Rl}} = 0$$

$$\Leftrightarrow \overline{I_{Rh}} = 0$$

Eq.3.21

Este resultados permitem comprovar teoricamente a expressão que caracteriza o curto-circuito trifásico simétrico. Daí neste curto-circuito somente ser necessário a utilização da componente direta, pois as restantes componentes são nulas,

$$I_{ktf} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_d} [A] \quad \text{Eq.3.22}$$

Podemos finalizar, calculando o valor para cada fase R-S-T estando cada uma das correntes desfasadas de 120°.

Exceto os curto-circuitos trifásicos simétricos, nos restantes tipos de curto-circuito não existe equilíbrio entre fases e por conseguinte será necessário as componentes inversa e homopolar.

No curto-circuito fase-fase ou bifásico sem fuga à terra, é produzido um desequilíbrio de cargas entre as três fases, sendo necessário incorporar nos cálculos, também, a sequência inversa.

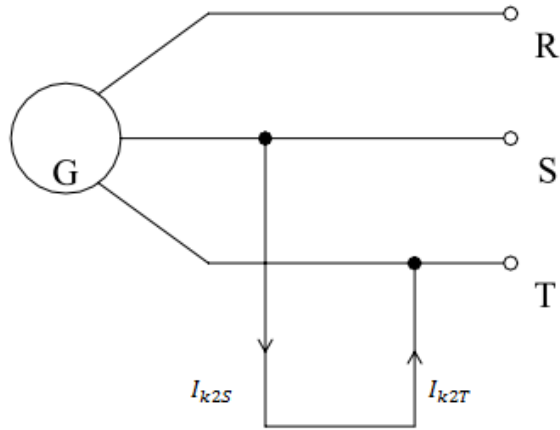


Figura 3.19 - Curto-circuito fase-fase.

As condições iniciais deste tipo curto-circuito caracterizam-se,

$$\begin{aligned}\bar{V}_T &= \bar{V}_S \\ \bar{I}_R &= 0\end{aligned}\tag{Eq.3.23}$$

Podemos então obter,

$$\begin{aligned}\bar{V}_S &= \bar{V}_{Rd}\bar{a}^2 + \bar{V}_{Rl}\bar{a} + \bar{V}_{Rh} = \bar{V}_{Rd}\bar{a}^2 + \bar{V}_{Rl}\bar{a} \\ \bar{V}_T &= \bar{V}_{Rd}\bar{a} + \bar{V}_{Rl}\bar{a}^2 + \bar{V}_{Rh} = \bar{V}_{Rd}\bar{a} + \bar{V}_{Rl}\bar{a}^2\end{aligned}\tag{Eq.3.24}$$

$$\Rightarrow \bar{V}_{Rd}\bar{a}^2 + \bar{V}_{Rl}\bar{a} = \bar{V}_{Rd}\bar{a} + \bar{V}_{Rl}\bar{a}^2 \Rightarrow \bar{V}_{Rd}(\bar{a}^2 - \bar{a}) = \bar{V}_{Rl}(\bar{a}^2 - \bar{a}) \Rightarrow \bar{V}_{Rd} = \bar{V}_{Rl}$$

Se as tensões entre as fases S-T são iguais também serão as suas componentes simétricas.

Deste resultado e pegando na segunda condição ($\bar{I}_R = 0$) obtemos:

$$\bar{I}_R = 0 = \bar{I}_{Rd} + \bar{I}_{Rl} + \bar{I}_{Rh} = \bar{I}_{Rd} + \bar{I}_{Rl} \Rightarrow \bar{I}_{Rd} = -\bar{I}_{Rl}\tag{Eq.3.25}$$

A este último resultado poderíamos de forma intuitiva alcançar o mesmo valor se aplicássemos um circuito equivalente como na situação anterior:

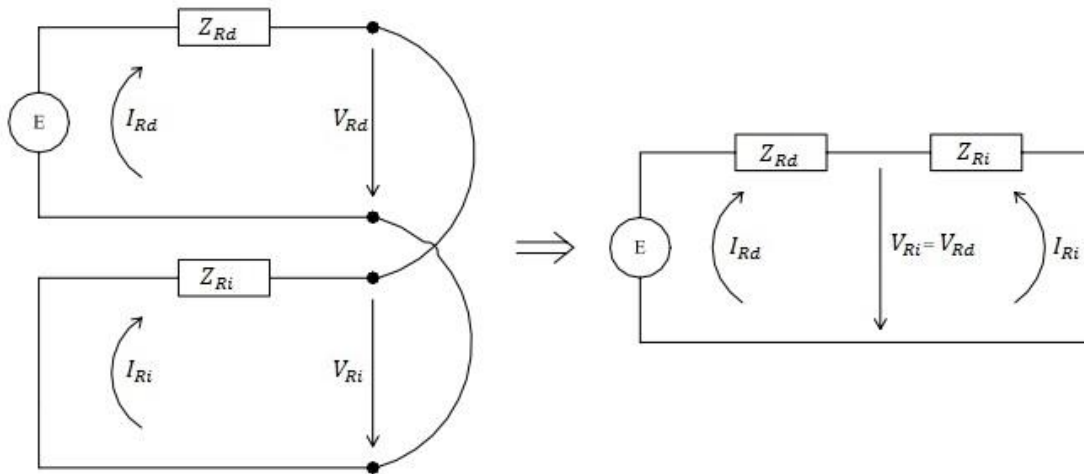


Figura 3.20 - Rede de componentes simétricas correspondentes ao curto-circuito bifásico.

Aplicando as Leis de Kirchoff, obtemos a expressão das intensidades da rede de sequência direta e indireta das componentes simétricas:

$$\bar{I}_{Rd} = -\bar{I}_{Ri} = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_i} \quad \text{Eq.3.26}$$

Se neste caso o curto-circuito bifásico afeta as fases S-T, e recordando que a relação das tensões entre fases é a mesma entre as correntes,

$$\begin{aligned} \bar{I}_R &= \bar{I}_{Rd} + \bar{I}_{Ri} + \bar{I}_{Rh} = 0 \\ \bar{I}_S &= \bar{I}_{Rd}\bar{a}^2 + \bar{I}_{Ri}\bar{a} + \bar{I}_{Rh} = \bar{I}_{Rd}(\bar{a}^2 - \bar{a}) \\ \bar{I}_T &= \bar{I}_{Rd}\bar{a} + \bar{I}_{Ri}\bar{a}^2 + \bar{I}_{Rh} = \bar{I}_{Rd}(\bar{a} - \bar{a}^2) \end{aligned} \quad \text{Eq.3.27}$$

Recordando a relação do vetor \bar{a} ,

$$\begin{aligned} \bar{a} &= 1\angle 120^\circ \\ \bar{a}^2 &= 1\angle -120^\circ \\ \bar{a} - \bar{a}^2 &= j\sqrt{3} \\ \bar{a}^2 - \bar{a} &= -j\sqrt{3} \end{aligned}$$

Chegamos então à expressão final das correntes:

$$\begin{aligned}\bar{I}_R &= 0 \\ \bar{I}_S &= \bar{I}_{Rd}(-j\sqrt{3}) = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_l}(-j\sqrt{3}) = \frac{\bar{U}_n}{\sqrt{3}(\bar{Z}_d + \bar{Z}_l)}(-j\sqrt{3}) \\ \bar{I}_T &= \bar{I}_{Rd}(j\sqrt{3}) = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_l}(j\sqrt{3}) = \frac{\bar{U}_n}{\sqrt{3}(\bar{Z}_d + \bar{Z}_l)}(j\sqrt{3})\end{aligned}$$

$$\rightarrow \bar{I}_R = 0$$

$$\rightarrow \bar{I}_S = \frac{\bar{U}_n}{(\bar{Z}_d + \bar{Z}_l)}[-90^\circ] \quad \text{Eq.3.28}$$

$$\rightarrow \bar{I}_T = \frac{\bar{U}_n}{(\bar{Z}_d + \bar{Z}_l)}[90^\circ]$$

Em resumo, os curto-circuitos bifásicos desenvolvem correntes de valor inferior aos curto-circuitos trifásicos simétricos.

O curto-circuito monofásico (fase-terra) é o curto-circuito mais frequente nas redes em que é feita a passagem do neutro pela terra e mediante uma impedância de valor reduzido. É também o curto-circuito onde o valor de corrente resultante é mais elevado, sendo de elevada importância o cálculo da tensão de contacto e tensões de passo para a determinação de interferências com outros sistemas de energia.

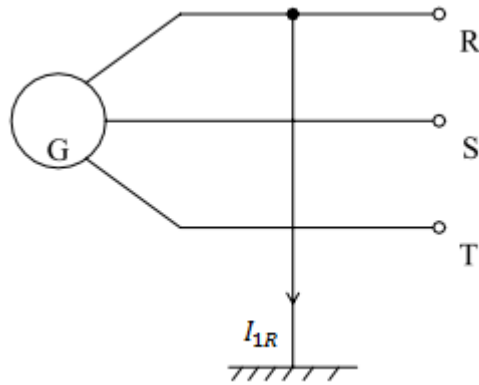


Figura 3.21 - Curto-circuito monofásico.

As condições iniciais que caracterizam este tipo de defeito,

$$\begin{aligned} \bar{I}_T = \bar{I}_S = 0 \\ \bar{V}_R = 0 \end{aligned} \quad \text{Eq.3.29}$$

Dado que apenas uma das fases sofre fuga à terra, o seu comportamento difere das restantes. Nesta situação teremos de contabilizar a componente direta (sempre que existe um circuito elétrico), componente indireta (é necessário sempre que existem desequilíbrios de fases) e componente homopolar (quando existem fugas à terra).

Por conseguinte, através das equações 3.17 e das condições iniciais do curto-circuito monofásico, podemos obter as expressões representativas das intensidades de corrente que circulam pelos circuitos e as respetivas componentes sequenciais.

$$\begin{aligned} \bar{I}_{Rd} &= \frac{1}{3}(\bar{I}_R + \bar{I}_S\bar{a} + \bar{I}_T\bar{a}^2) = \frac{1}{3}(\bar{I}_R) \\ \bar{I}_{Ri} &= \frac{1}{3}(\bar{I}_R + \bar{I}_S\bar{a}^2 + \bar{I}_T\bar{a}) = \frac{1}{3}(\bar{I}_R) \\ \bar{I}_{Rh} &= \frac{1}{3}(\bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T) = \frac{1}{3}(\bar{I}_R) \end{aligned} \quad \text{Eq.3.30}$$

$$\rightarrow \overline{I_{Rd}} = \overline{I_{Rl}} = \overline{I_{Rh}} = \frac{1}{3}(\overline{I_R})$$

Como não existe fluxo de intensidade nas fases S e T, todas as componentes simétricas das correntes serão iguais a um terço da intensidade de corrente na fase R.

Poderíamos alcançar um resultado idêntico, se retirássemos as expressões através de um esquema equivalente das componentes simétricas.

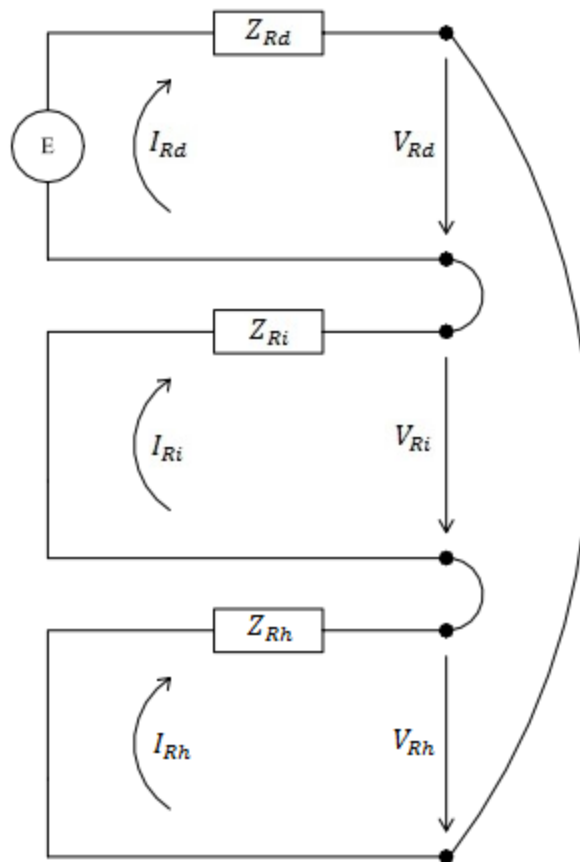


Figura 3.22 - Rede de componentes simétricas correspondentes de um curto-circuito monofásico.

$$\begin{aligned} \overline{V_R} = 0 &= \overline{V_{Rd}} + \overline{V_{Rl}} + \overline{V_{Rh}} = (\overline{E} - \overline{I_{Rd}}\overline{Z_d}) + (-\overline{I_{Rl}}\overline{Z_l}) + (-\overline{I_{Rh}}\overline{Z_h}) \\ &\Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \overline{E} = \overline{I_{Rd}}(\overline{Z_d} + \overline{Z_l} + \overline{Z_h}) \Leftrightarrow \end{aligned} \quad \text{Eq.3.31}$$

$$\Leftrightarrow \bar{I}_{Rd} = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_l + \bar{Z}_h}$$

Recorrendo às expressões das correntes de linha que circulam cada uma das fases da rede trifásica e utilizando as equações 3.16 conseguiremos saber a expressão final para o cálculo do valor da intensidade da corrente curto-circuito.

$$\begin{aligned} \bar{I}_S = \bar{I}_T = 0 \\ \bar{I}_R = \bar{I}_{Rd} + \bar{I}_{Rl} + \bar{I}_{Rh} = 3\bar{I}_{Rd} = 3 \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_l + \bar{Z}_h} = 3 \frac{c \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3}} \frac{1}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_l + \bar{Z}_h} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \bar{I}_R = \frac{c \cdot \bar{U}_n \cdot \sqrt{3}}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_l + \bar{Z}_h} \end{aligned} \quad \text{Eq.3.32}$$

Em resumo, os curto-circuitos unipolares com a terra são os mais frequentes. Normalmente o valor de corrente consequente é maior do que a corrente correspondente a um curto-circuito trifásico simétrico, dessa forma nas redes em que o neutro é feito pela terra é colocada uma resistência de baixo valor na ligação à terra do transformador para reduzir o valor da corrente resultante em caso de defeito e desta forma esta corrente ser de valor semelhante à de curto-circuito trifásico simétrico. Valor para o qual as proteções têm o seu poder de corte definido.

Por outro lado a relação do curto-circuito bifásico detém o valor de corrente mais baixo sendo que a relação entre as intensidades de corrente no curto-circuito trifásico simétrico e o bifásico é aproximadamente (numa situação em que o defeito seja afastado da geração e se considere a impedância indireta igual à impedância direta),

$$I_{kff} \approx \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot (Z_d)} \cdot I_{ktf} [A] \Leftrightarrow \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot (Z_d)} \quad \text{Eq.3.33}$$

$$\Leftrightarrow I_{kff} \approx \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{ktf} \Leftrightarrow$$

Em que I_{kff} e I_{ktf} são respetivamente as intensidades de corrente no curto-circuito bifásico e trifásico simétrico [22, p. 13].

3.3 Método das Impedâncias

Depois de explicado o conceito de curto-circuito e ter sido mostrado e de onde advém cada expressão de cálculo dos diferentes tipos de curto-circuito é necessário saber como alcançar o valor de impedância de cada componente. Nesta dissertação o objetivo é o cálculo dos curto-circuitos num parque eólico, desta forma os elementos aos quais serão calculados o valor de impedância serão apenas os que estão incluídos no parque e na subestação.

São estes, os aerogeradores, os transformadores, as linhas de baixa tensão, média e alta, e a impedância da rede a montante do parque.

Os aerogeradores são compostos por geradores síncronos, o que nos permite saber que, o seu cálculo [25, p. 31],

$$Z_G = R_G + jX'_d \quad \text{Eq.3.34}$$

Em que a componente resistiva R_G da impedância do gerador calculada a partir da seguinte expressão,

$$R_G = 0,12 \cdot X'_d \quad \text{Eq.3.35}$$

X'_d representa a reatância transitória do gerador, varia consoante o tipo de gerador, mais concretamente do número de polos deste. Nos catálogos, por norma, vem em percentagem e representa-se por x'_d e desta forma, pela seguinte expressão se retira X'_d ,

$$X'_d = \frac{U_n^2}{S_{rG}} \cdot \frac{x'_d}{100} \quad \text{Eq.3.36}$$

Caso os dados da resistência e reatância não estejam totalmente disponíveis podemos usar a seguinte expressão [25, p. 31].

$$X'_d = 30\% \cdot x'_d \quad \text{Eq.3.37}$$

Com este cálculo (primeira expressão) conseguimos determinar o valor da impedância direta, que nos é útil para o caso do curto-circuito trifásico simétrico, para outro tipo de curto-circuito deveremos ter em atenção que nos deverá ser fornecido o valor x'_i e x'_h ou seja, o valor da componente indireta e homopolar respetivamente. Caso não estejam disponíveis,

$$\begin{aligned} X'_i &= 30\% \cdot x'_i \\ X'_h &= 6\% \cdot x'_h \end{aligned} \quad \text{Eq.3.38}$$

Para o cálculo dos transformadores dos aerogeradores o cálculo de impedância utilizado é nos dado pela expressão [25, p. 32],

$$Z_T = \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \cdot \frac{u_{kr}}{100} \quad \text{Eq.3.39}$$

Em que U_{rT} é o nível de tensão do primário ou secundário (é usada a tensão correspondente ao local do curto-circuito), S_{rT} representa a potência nominal do curto-circuito e u_{kr} a tensão de curto-circuito em percentagem.

Para o cálculo da componente resistiva da impedância do transformador a expressão é:

$$R_T = \frac{P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2} \quad \text{Eq.3.40}$$

Em que P_{krT} são as perdas nos enrolamentos do transformador para a corrente estipulada, I_{rT} é a corrente estipulada para a alta ou baixa tensão.

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad \text{Eq.3.41}$$

Estas expressões são usadas para o cálculo da componente direta e inversa, pois estas são de igual valor.

Para um transformador com os enrolamentos do primário ligados em Triângulo e os do secundário colocados em Estrela,

$$R_{Th} = R_T \quad Eq.3.42$$

$$X_{Th} = 0.95 \cdot X_T$$

Para um transformador com os enrolamentos do primário ligados em Triângulo e os do secundário colocados em Triângulo ou Estrela e Triângulo respetivamente,

$$R_{Th} = 0.4 \cdot R_T \quad Eq.3.43$$

$$X_{Th} = 0.1 \cdot X_T$$

Para um transformador com os enrolamentos do primário ligados em Estrela e os do secundário colocados em Estrela,

$$R_{Th} = R_T \quad Eq.3.44$$

$$X_{Th} = 7 \dots 100 \cdot X_T$$

Da mesma forma se procede para os transformadores de interligação.

Para o cálculo da impedância de cabos de baixa tensão a expressão usada é [23, p. 41],

$$R_C = \frac{\rho \times l}{s} \quad Eq.3.45$$

Em que ρ representa a resistividade elétrica, l o comprimento do cabo e s a secção do cabo. A resistividade elétrica (ρ) assume diferentes valores com a variação da temperatura e do tipo de material condutor. Se calcularmos um curto-circuito máximo por exemplo, a temperatura será considerada de 20°C então para os dois tipos de material mais utilizados temos,

$$\rho_{20^\circ\text{C}-\text{Alumínio}} = 0,0278 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$$

$$\rho_{20^\circ\text{C}-\text{Cobre(puro)}} = 0,0173 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$$

Quando calculamos um curto-circuito mínimo por exemplo, a temperatura ao qual é calculado é a máxima que o isolamento do condutor tem capacidade de sustentar,

$$\theta_{f-XLPE} = 250^\circ\text{C}$$

$$\theta_{f-PVC} = 170^\circ\text{C}$$

Para se poder calcular o ρ para uma temperatura que seja diferente de 20°C a expressão utilizada é [23, p. 41],

$$\rho_{\theta_f} = [1 + \alpha_c \times (\theta_f - 20)] \times \rho_{20^\circ\text{C}} \quad \text{Eq.3.46}$$

Em que α_c representa o coeficiente de temperatura dado por,

$$\alpha_c = \frac{1}{B + 20} \quad \text{Eq.3.47}$$

Onde:

B representa o inverso do coeficiente de temperatura da resistividade a 0°C e assume o valor de 234,5°C para cobre e 228°C para alumínio.

A reatância do cabo vem expressa no catálogo fornecido pelo fabricante em $m\Omega/m$ ou caso não venha descrito deve-se assumir os seguintes valores.

Cabos multicondutores – $X_C = 0,08 m\Omega/m$

Cabos monocondutores em trevo – $X_C = 0,08 m\Omega/m$

Cabos monocondutores em esteira – $X_C = 0,09 m\Omega/m$

Para os cabos de média tensão é utilizada a mesma formulação, embora os valores usados anteriormente no caso de falta de informação por parte do fabricante não se puderem usar neste tipo de cabos.

Nos cabos de Alta Tensão da subestação despreza-se a reatância, e o valor de resistência é fornecido pelo fabricante em Ω/km .

Para todos os tipos de cabos, a componente indireta é igual a componente direta, não existindo componente homopolar.

No caso da rede a montante o cálculo da impedância segue a expressão seguinte [25, p. 48],

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}^2}{S_{kQ}} \quad \text{Eq.3.48}$$

Em que U_{nQ} representa a tensão da rede, c o fator de tensão e S_{kQ} a potência de curto-circuito da rede. Esta potência é facultada pelo fornecedor, tendo um valor máximo e

outro mínimo que são utilizados para o cálculo do curto-circuito máximo e mínimo respectivamente.

$$X_Q = 0,995 \cdot Z_Q \quad \text{Eq.3.49}$$

$$R_Q = 0,1 \cdot X_Q \quad \text{Eq.3.50}$$

Sabendo as impedâncias constituintes da rede, podemos por fim calcular a corrente curto-circuito em qualquer ponto da rede, um a um podemos saber antecipadamente que valor máximo ou mínimo que a corrente pode tomar.

Este método é o mais usual para quem executa estudo das correntes de curto-circuito sobre uma rede. É moroso e recorre numa grande probabilidade de erro por parte do executante, tendo em conta que os cálculos são extensos e exigem elevada atenção e minúcia. Para o desenvolvimento do software este não é o método mais indicado para desenvolver o algoritmo de cálculo.

3.4 Método de cálculo de correntes de curto-circuito pela matriz de admitâncias nodais.

Este método, é indicado para redes extensas, e em que o objetivo seja calcular a corrente de curto-circuito em todos os pontos existentes na rede [21, p. 291]. É o método mais indicado para aplicações computacionais que tenham como intuito o cálculo de impedâncias ou correntes. É usado em softwares que estudem os trânsitos de energia de redes. Nesta dissertação o foco será o uso do método para cálculo de correntes de curto-circuito, e dessa forma a seguinte explicação de procedimento será para aplicação apenas em caso de curto-circuito. Este método é pouco aconselhável para obtenção de valores de forma manual, porque em redes de grandes dimensões a possibilidade de erro humano é elevada.

Para este cálculo é necessário ter conhecimento das impedâncias de cada componente, da mesma forma que era um requisito no método anterior. Mas no desenvolvimento deste método grande parte do processo é feito através das admitâncias.

$$Z_k = R_k + jX_k \quad \text{Eq.3.51}$$

$$Y_k = \frac{1}{Z_k} \quad \text{Eq.3.52}$$

A admitância é igual ao inverso da impedância, inicialmente o objetivo é converter todas as impedâncias para esta grandeza, que é expressa em Siemens (S), e em que,

$$Y_k = G_k + jB_k \quad \text{Eq.3.53}$$

A admitância é constituída por duas grandezas G e B que representam a condutância e a susceptância respetivamente.

O processo de cálculo tem como objetivo inicial determinar a chamada matriz de impedâncias nodais, em que cada valor da diagonal desta matriz representa a impedância equivalente, de cada barramento ou nó da rede.

Primeiramente é necessário decidir os barramentos ou nós para posterior construção da matriz de incidência. Recorrendo à Figura 3.11 como exercício de exemplo.

Podemos então definir três barramentos ou nós, sendo eles Q, A e F. Esta escolha é ponto de partida. De seguida a construção da matriz de admitâncias primitivas. Devemos ter em atenção os elementos da rede, sendo que começamos por ter a rede, com uma admitância Y_Q , seguindo-se o transformador com um admitância Y_T e finalmente a linha que ligaria a uma possível carga e que tem uma admitância Y_L .

$$Y_P = \begin{bmatrix} Y_Q & 0 & 0 \\ 0 & Y_T & 0 \\ 0 & 0 & Y_L \end{bmatrix}$$

Depois de construída a matriz de admitâncias primitivas (Y_P), podemos contruir a nossa matriz de incidência que deve ser constituída com número de linhas igual à matriz anterior e com o número de colunas igual ao número de barramentos constituintes da rede. É necessário ter em atenção que a ordem dos elementos da rede não tem qualquer tipo de restrição tanto numa matriz como noutra, desde que seja igual em ambas.

A matriz incidência (A), representa as ligações dos elementos constituintes através das linhas da matriz, e em cada coluna está representado cada barramento da rede. O transformador por exemplo, tem início num determinado barramento, e fim noutra barramento, sendo que o início deve estar representado pelo número 1 e o fim por -1. Contudo existem exceções, sendo estas aplicadas aos geradores e à própria rede, pois estes elementos, por norma, agregados a apenas um nó, são representados, sempre, por -1.

Assim na situação da rede da Figura 3.11 em que as colunas representam os barramentos Q, A e F respetivamente será,

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Como é possível analisar, a rede está representada na primeira linha e está conectada a nó ou barramento Q que está representado na primeira coluna. Daí na posição (1,1) da matriz estar então, o valor de -1. O transformador que está representado pela segunda linha está ligado em Q e A. Sendo o sentido considerado de Q para F então na posição (2,1) está o valor de 1 e na posição (2,2) está -1. O mesmo acontece com a linha que se inicia em A e termina em F.

Por fim, devemos proceder ao cálculo da matriz de admitâncias nodais,

$$Y_{nod} = A^T \cdot Y_P \cdot A \quad \text{Eq.3.54}$$

Esta matriz resulta da multiplicação da matriz incidência transposta com a matriz de admitâncias primitivas, sendo multiplicada novamente pela matriz incidência.

Depois de obtermos a matriz de admitâncias nodais, para calcularmos a matriz de impedâncias nodais recorreremos à inversão da matriz

$$Z_{nod} = Y_{nod}^{-1} \quad \text{Eq.3.55}$$

O resultado será uma matriz que terá as dimensões iguais ao número de barramentos e que ao longo da sua diagonal terá representado o valor da impedância equivalente em cada barramento.

Esta formulação pode ser feita para a componente direta, inversa e homopolar.

Depois de calculadas as impedâncias podemos então recorrer às expressões de curto-circuito, para determinarmos o valor da corrente de curto-circuito em cada barramento.

Assim de forma mais simplificada e rápida conseguimos obter o valor das correntes curto-circuito numa rede, o que permite numa fase de planeamento saber os valores mínimos e máximos de corrente para dimensionarmos os dispositivos de corte, e barramentos de alta tensão na subestação.

Capítulo 4

Descrição da Aplicação

Informática

Neste capítulo será apresentada a aplicação computacional desenvolvida.

Serão expostos os objetivos a atingir pela aplicação e o programa de desenvolvimento utilizado para a sua construção. Através de fluxogramas será exposta a lógica dos seus processos de funcionamento. Seguidamente serão explicadas as funções de cada comando e exibidos diversos passos do interface da aplicação. Por fim serão enumeradas as funcionalidades da mesma.

4 Descrição da Aplicação Informática

4.1 Base de Construção

O desenvolvimento de uma aplicação informática é facilitado se for feito através de um programa desenvolvimento de softwares. Sendo que a aplicação criada, teria de concretizar cálculos para as mais variadas tipologias de rede, e desta forma ter capacidade para que fossem introduzidos cálculos de redes radiais e em anel com um qualquer número de aerogeradores, transformadores, linhas e barramentos.

Foi elaborada uma pesquisa genérica pelas aplicações existentes no mercado, como o EasyPower, o DigSilent Power Factory, o PSCAD EMTDC e o PSS/E que permitem desenhar os circuitos e calcular o valor das correntes de curto-circuito. Sendo que estes softwares não eram de acesso livre apenas foi conseguido adquirir uma licença mensal do EasyPower que apenas permite o cálculo de uma rede de dimensão limitada. O PSS/E por sua vez é um programa com um interface mais simples e com a mesma capacidade de resolução de redes de trânsito de energia, mas de difícil utilização quando direcionado a cálculos para parques eólicos.

Desta forma a solução projetada seria uma aplicação de interface simples que permitisse calcular as correntes de curto-circuito em todos os pontos de um parque eólico de qualquer dimensão de forma rápida e simples.

4.2 Programa de Desenvolvimento

Para a criação da aplicação era necessário que o programa utilizado para tal finalidade oferecesse a funcionalidade de criação de interface intuitivo de qualidade e que ao mesmo tempo permitisse desenvolver o algoritmo matemático para a resolução das correntes de curto-circuito.

Depois de uma pesquisa aprofundada em programas que poderiam permitir tal desenvolvimento como o LabView, Visual Studio, SimuLink entre outros. Alguns deles permitiam construir interfaces de grande qualidade mas não seriam as melhores soluções para a resolução do problema conseqüente. Outros permitiam a resolução do problema de cálculo com relativa facilidade mas a construção do interface era difícil e exigiria que a aplicação e a conseqüente dissertação tivesse um período de desenvolvimento muito maior.

A solução encontrada foi então o MatLab que através dos GUI (Guide User Interface) permite construir interfaces intuitos e de excelente operacionalidade e ao mesmo tempo é um programa que possibilita o desenvolvimento do algoritmo para se alcançarem os resultados desejáveis das correntes de curto-circuito.

4.2.1 Vantagens do programa escolhido

Para além destas vantagens o Matlab proporciona ainda o desenvolvimento de um ficheiro executável (.exe). Desta forma o utilizador prescinde da necessidade de ter instalado o próprio MatLab para a utilização da aplicação.

O MatLab possibilita também que a aplicação criada construa e grave os resultados em ficheiros de âmbito mais comum, como o *Excel*.

A construção do interface tem um grande grau de liberdade que permite ao programador criar exatamente o que pretende e desenvolver opções de ajuda e auxílio ao utilizador.

A aplicação permite a inserção de qualquer rede do tipo parque eólico, seja radial ou em anel. Permitindo ainda qualquer número de aerogeradores.

A aplicação não necessita de muito espaço de memória de um computador para poder ser instalada e é de fácil instalação.

4.2.2 Desvantagens do programa escolhido

Este interface não permite o desenho da rede, pelo que tem de ser inserido em tabelas os dados da rede e a sua composição.

4.3 Aplicação Desenvolvida

A ferramenta computacional elaborada foi então *WFSC* ou *Wind Farm Short-Circuit*.



Figura 4.1 - Logotipo da aplicação informática WFSC.

Este logotipo irá aparecer no computador do utilizador sempre que este iniciar a ferramenta.

4.4 Estrutura da aplicação

Antes de se realizar a implementação de uma rede na aplicação deve ser feito um esquema prévio numa folha de rascunho como auxílio à organização da rede.

Este esquema deverá conter os componentes da rede numerados assim com os pontos que desejarmos calcular o curto-circuito, que no programa serão chamados de “barramentos”.

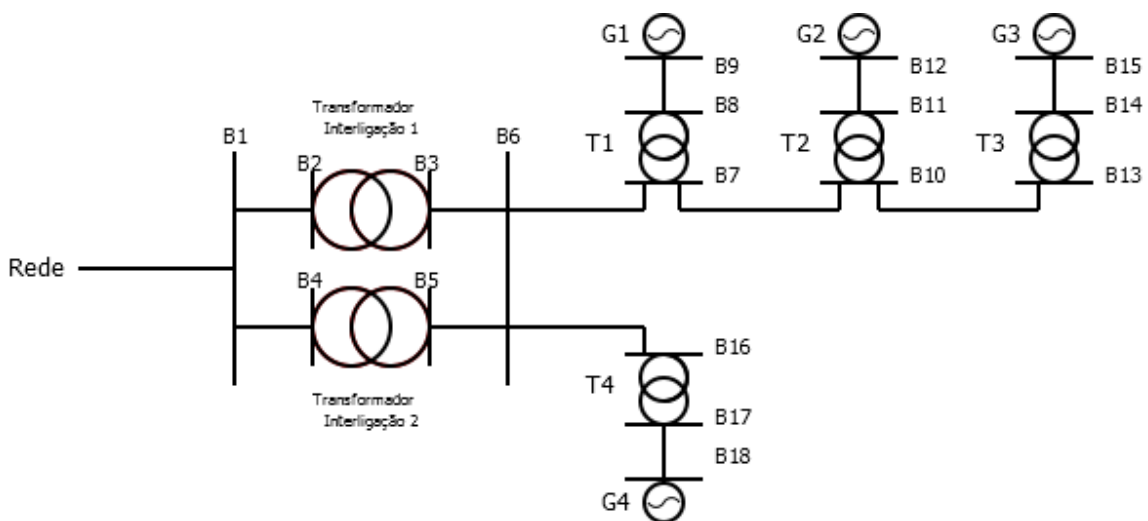


Figura 4.2 - Exemplo de um desenho da rede a implementar na aplicação.

Na Figura 4.2 está representado um exemplo de desenho que o utilizador deverá ter antes de colocar os dados na aplicação por forma a ser mais rápido e eficaz. Na Figura 4.2 os componentes representados por “G” e “T” traduzem os aerogerados e os transformadores BT/MT respetivamente. Os “B” são a representação dos chamados “barramentos” na aplicação que traduzem os pontos da rede aos quais, o utilizador pretende saber o valor da corrente de curto-circuito em caso de defeito.

De salientar também, que na elaboração deste desenho deverá ter-se em atenção que todos os componentes devem estar seguidos a montante e a jusante por barramentos, com exceção da Rede e dos aerogeradores que apenas tem um barramento para posterior ligação ao parque. Assim sendo os cabos que se encontram ao longo do parque também têm de cumprir a regra dos dois barramentos. Na Figura 4.2 é possível verificar que os cabos e os restantes componentes a montante dos barramentos 8, 11, 14 e 17 (entre estes barramentos e os aerogerados), tem uma tensão nominal de Baixa Tensão. Enquanto os cabos contidos entre os barramentos 7, 10, 13 e 16 pertencem à zona do parque que funciona em Média Tensão. Entre a Rede e os barramentos 2 e 4 é o parque da subestação que se encontra em Alta Tensão, pois os “Transformadores de Interligação” executam a elevação de tensão entre o barramento 3 e o 2 e 5 e 4.

É necessário ter em atenção que para mais fácil compreensão e preenchimento os valores no programa, que o utilizador deve considerar uma referência inicial, em que o início da rede é considerada nos aerogeradores e o seu término na ligação, ou ligações com a rede.

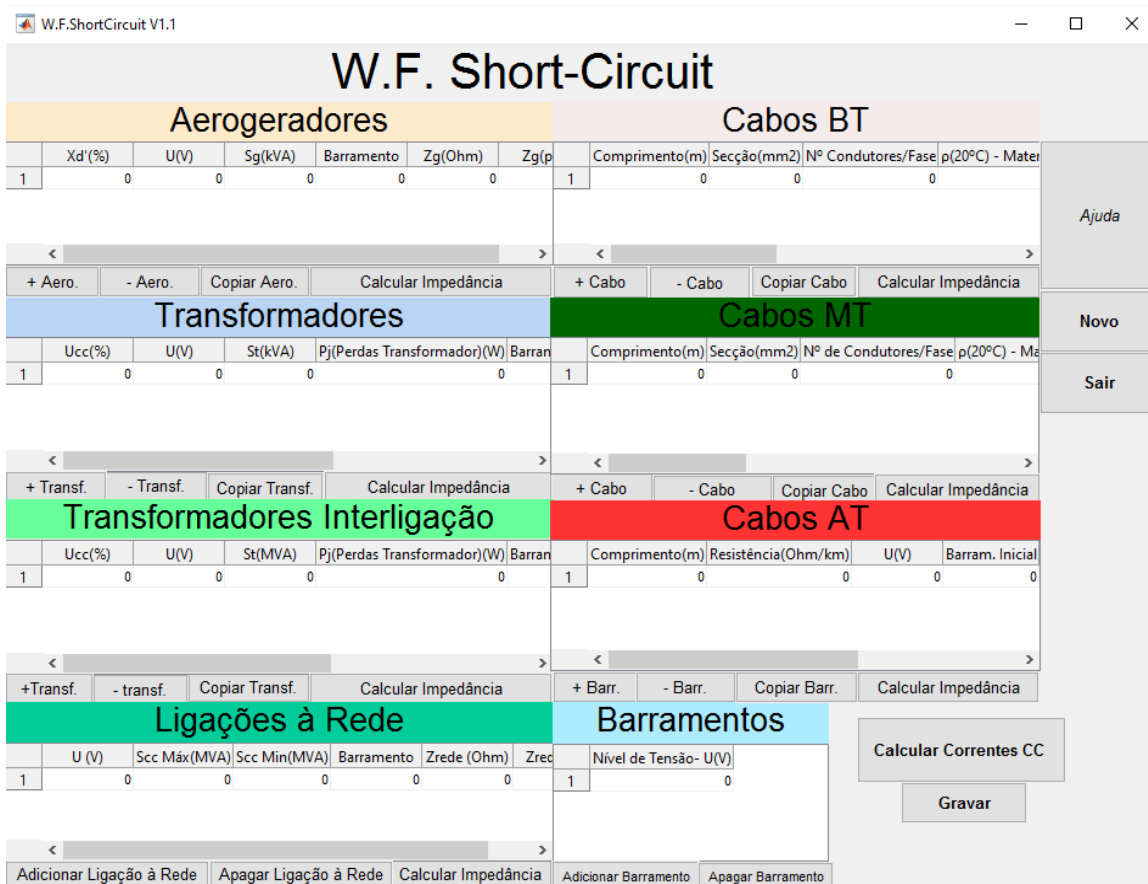


Figura 4.3 - Interface da aplicação com utilizador.

O interface da aplicação está dividido em oito tabelas onde serão inseridos as particularidades de cada componente da rede. Cada linha de cada tabela corresponde a um componente da rede. Nas tabelas “Aerogeradores”, “Cabos BT”, “Transformadores”, “Cabos MT”, “Transformadores Interligação” e “Cabos AT” têm quatro botões representados por “+”, “-“, “Copiar” e “Calcular Impedância”. Sendo que o primeiro adiciona uma linha a cada tabela para se poder, por exemplo acrescentar um aerogerador à rede. O botão “-“ executa a operação inversa, ou seja, elimina a última linha que anteriormente terá sido acrescentada à tabela. O botão “Copiar” adiciona uma linha à tabela com os mesmos dados que a linha anterior, permite poupar tempo quando se está a construir a rede. Por fim o Botão “ Calcular Impedância” executa a operação de calcular as impedâncias em Ohm e em pu, através dos dados inseridos anteriormente pelo utilizador. As tabelas “Ligações à Rede” e “Barramentos” tem menor número de botões apesar de os botões “adicionar” e “apagar” terem o mesmo objetivo dos botões “+” e “-“ respetivamente. O botão na tabela “Ligações à Rede” de “Calcular Impedâncias” tem o mesmo fim que os botões com o mesmo nome das tabelas anteriores.

O interface tem ainda o botão “Ajuda” em que uma janela é iniciada com a explicação dos procedimentos e dos cuidados a ter na utilização da aplicação. O botão “Novo” executa reset na aplicação, eliminando todos os dados até ali inseridos no programa. O botão “sair” efetua o encerramento da aplicação. O botão “Calcular Correntes CC” é utilizado para efetuar os cálculos das correntes curto-circuito após o preenchimento das características da rede nas tabelas. Por último o botão “Gravar” envia e grava os dados num ficheiro Excel para os dados poderem ser analisados.

4.4.1 Análise da estrutura das tabelas da aplicação

Podemos então no seguimento da introdução da estrutura da aplicação, ir além do global para vislumbrarmos as características de dados a inserir em cada tabela.

Nota: É necessário ter em atenção que as grandezas como potências, tensões, correntes e impedâncias podem, na aplicação, estar representadas por outra simbologia. Isto advém do facto de no desenvolvimento do programa não ter sido possível a colocação dos mesmos símbolos. No entanto na explicação conseqüente os novos símbolos estão devidamente identificados e clarificados.

Aerogeradores						
	Xd' (%)	U(V)	Sg(kVA)	Barramento	Zg(Ohm)	Zg(pu)
1	0	0	0	0	0	

< >			
+ Aero.	- Aero.	Copiar Aero.	Calcular Impedância

Figura 4.4 - Tabela de inserção de dados dos aerogeradores na aplicação.

A Figura 4.4 representa a tabela onde serão inseridos os dados de cada aerogerador da rede, sendo que cada linha representa um aerogerador. O utilizador deverá inserir o valor em percentagem da impedância transitória (Xd') característica do aerogerador. A tensão nominal (U), em Volt, a que este aerogerador está ao serviço. A potência aparente (Sg) em kVA. A célula da tabela correspondente ao “Barramento” como se pode observar na Figura 4.4 é o barramento no qual, o aerogerador se interliga com o parque. Após o

utilizador inserir os aerogeradores e todos os valores iniciais, ao pressionar o botão “Calcular Impedância” o valor das impedâncias “Zg” em Ohm e pu surgem instantaneamente. Estas duas últimas células não são diretamente editáveis pelo utilizador apenas apresentam resultados.

Transformadores								
	Ucc(%)	U(V)	St(kVA)	Pj(Perdas Transformador)(W)	Barramento Inicial	Barramento Final	Zt(Ohm)	Zt(pu)
1	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.5 - Tabela de inserção de dados dos Transformadores BT/MT na aplicação.

Na segunda tabela do programa o utilizador insere os transformadores que se destinam a converter a tensão de baixa para média. Como está representado na Figura 4.2 entre o barramento 8 e 7 por exemplo.

A primeira célula da linha 1 corresponde ao valor da tensão de curto-circuito (Ucc) em percentagem. A seguinte corresponde à tensão nominal (U) em Volt, esta pode ser tanto a tensão do primário como a do secundário do transformador. A potência aparente (St) do transformador em kVA. As perdas nos enrolamentos do transformador quando este está em carga (Pj) em Watt. Na célula do barramento inicial o utilizador colocará o valor do barramento inicial ou a montante do transformador. O mesmo acontece para o barramento final, em que o utilizador colocará o valor do barramento a jusante do transformador.

É necessário ter em atenção que para mais fácil compreensão e preenchimento das tabelas no programa, o utilizador deverá considerar uma referência inicial, em que por exemplo, o início da rede se considere nos aerogeradores e o seu término na ligação, ou ligações com a rede.

As últimas duas células (Zt) tem o funcionamento idêntico à tabela da Figura 4.5.

Transformadores Interligação								
	Ucc(%)	U(V)	St(MVA)	Pj(Perdas Transformador)(W)	Barramento Inicial	Barramento Final	Zti(Ohm)	Zti(pu)
1	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.6 - Tabela de inserção de dados dos Transformadores de Interligação MT/AT na aplicação.

A tabela dos transformadores de interligação de transformação de tensão de média para alta é idêntica à tabela dos transformadores de BT/MT, com uma única alteração na célula correspondente à potência aparente, pois no caso destes transformadores o valor inserido pelo utilizador é em MVA.

Cabos BT										
	Comprimento(m)	Secção(mm ²)	Nº Condutores/Fase	$\rho(20^{\circ}\text{C})$ - Material Condutor	U(V)	Temp. Máx	Barram. Inicial	Barram. Final	Zcabo BT(Ohm)	Zcabo BT(pu)
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4 7 - Tabela de inserção de dados dos Cabos de Baixa Tensão na aplicação.

A tabela “Cabos BT” representa os cabos que fazem ligação entre os aerogeradores e os transformadores BT/MT, como está representado na Figura 4.2 entre o barramento 8 e 9.

Na inserção dos dados da cablagem de baixa tensão, o utilizador inicia a introdução de dados pelo comprimento do cabo em metros, seguido pela sua secção em milímetros quadrados.

Dependendo do número de condutores por fase, o utilizador deverá inserir esse valor correspondente na terceira célula.

O ρ é a resistividade do material condutor em $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Normalmente esta célula assume valor de 0,028 quando o condutor é de alumínio e 0,017 quando é de cobre.

Na célula seguinte é a tensão de funcionamento do condutor, em Volt, que é igual ao valor da baixa tensão do parque eólico.

A célula correspondente a “Temperatura Máxima” exorta o utilizador a colocar a temperatura máxima que o isolamento do condutor consegue suportar. No caso de o isolamento ser em PVC a temperatura máxima é de 160°C e para XLPE é de 250°C. A aplicação irá necessitar deste valor para o cálculo das correntes de curto-circuito mínimos.

As células de inserção de barramentos tem a mesma forma de aplicação como nas tabelas dos transformadores.

Finalmente as impedâncias são, como nas situações das tabelas anteriores, células não editáveis e que apenas apresentam os resultados destas após o pressionar do botão “Calcular Impedância” por parte do utilizador.

Cabos MT											
	Comprimento(m)	Secção(mm2)	Nº de Condutores/Fase	$\rho(20^{\circ}\text{C})$ - Material de Condutores	X - Reatância (mOhm/km)	U(V)	Temp. Máx(°C)	Barram. Inicial	Barram. Final	ZcaboMT	ZcaboMT(pu)
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.8 - Tabela de inserção de dados dos Cabos de Média Tensão na aplicação.

A tabela de cabos de média tensão representa os cabos de média tensão que estão entre as celas dos transformadores de BT/MT e fazem o transporte de energia até ao transformador de interligação MT/AT. Como está representado na Figura 4.2 entre barramento 10 e 7 e entre o 7 e o 6 por exemplo.

Nesta tabela os procedimentos são idênticos, apenas varia com o incremento da célula “X - Reatância” em que o utilizador colocará o valor catalogado de reatância do cabo em Ω/km .

Cabos AT							
	Comprimento(m)	Resistência(Ohm/km)	U(V)	Barram. Inicial	Barram. Final	ZcaboAT(Ohm)	ZcaboAT(pu)
1	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.9 - Tabela de inserção de dados dos Cabos de Alta Tensão na aplicação.

A tabela de cabos de alta tensão é correspondente aos cabos que estão inseridos na subestação entre os transformadores de interligação e a ligação com a rede, como representado no Figura 4.2 entre os barramentos 2 e 1 e entre 4 e 1 por exemplo.

Ligações à Rede						
	U (V)	Scc Máx(MVA)	Scc Min(MVA)	Barramento	Zrede (Ohm)	Zrede (pu)
1	0	0	0	0	0	0

Figura 4.10 - Tabela de inserção de dados das Ligações à Rede.

A tabela das ligações à rede corresponde à ligação ou ligações exercidas entre o parque e a rede de distribuição. Na rede da Figura 4.2 existe uma única ligação com a rede no

barramento 1. As ligações com a rede sendo esta externa ao parque apenas apresenta um barramento de ligação com o parque.

Em primeiro lugar o utilizador tem de colocar a tensão, em Volt, à qual a rede de distribuição ou transporte está submetida. Depois nas células seguintes deverá inserir respetivamente a potência de curto-circuito máxima e mínima em MVA, esta informação é fornecida pelo operador da rede. Finalmente deverá ser inserido o barramento onde está efetuada a ligação da rede. Mais uma vez, as duas últimas células correspondentes à impedância não são editáveis e apenas apresentam os resultados após o cálculo.

Barramentos	
Nível de Tensão- U(V)	
1	0

Adicionar Barramento Apagar Barramento

Figura 4.11 - Tabela de inserção do nível de tensão dos barramentos.

Após a inserção dos dados nas tabelas anteriores o utilizador deverá inserir o número de barramentos e a tensão às quais estes estão submetidos. Visualizando a Figura 4.2 podemos tomar como exemplo os barramentos 2, 7 e 8 que estão inseridos em áreas em alta tensão, média tensão e baixa tensão respetivamente.

Nota: É importante que o utilizador após aplicação dos barramentos e dos seus níveis de tensão, pressione a tecla “Enter” do seu teclado para que o programa registe na sua base os dados inseridos. Esta nota está inserida no painel de ajuda que é apresentado, quando o utilizador pressiona o botão “Ajuda”.

4.4.2 Construção da aplicação

Na construção do interface, através da GUI do MatLab foram usadas funções para o comando e memorização dos dados por parte do programa.

O cálculo das correntes de curto-circuito nos barramentos, é desenvolvido no software usando o método das matrizes de admitâncias nodais como está representado no ponto 3.4 do presente documento.

4.4.3 Processo de resolução do problema na ótica do utilizador

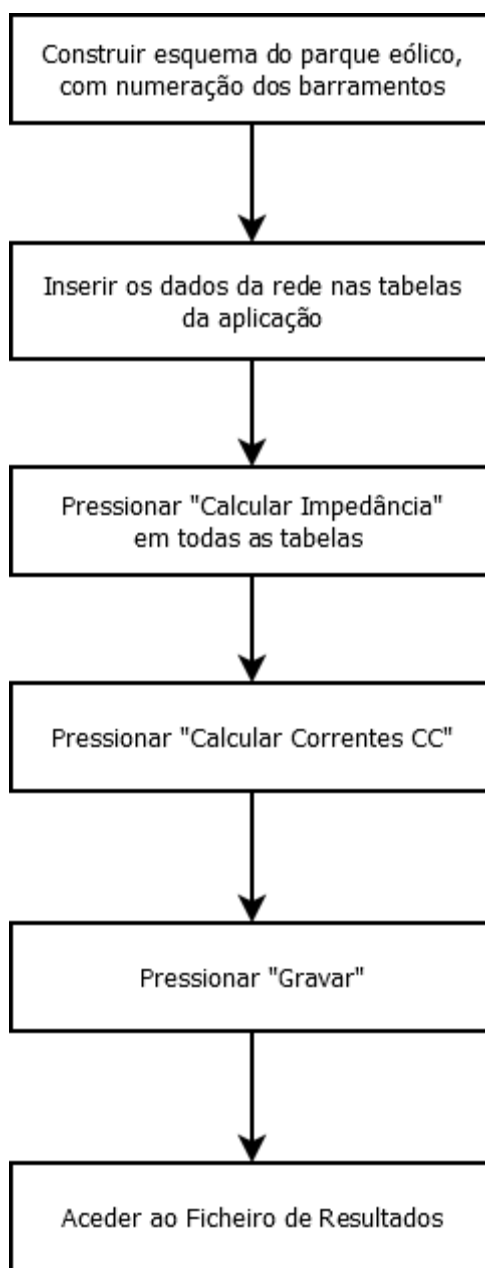


Figura 4.12 - Fluxograma do processo de utilização por parte do utilizador.

Como foi referido anteriormente, no início o utilizador deverá elaborar um esquema idêntico ao da Figura 4.2 tendo em atenção a numeração dos barramentos para que estes

tenham um número de identificação que seja único para cada barramento. Após este passo deverá preencher os dados de todas as tabelas, inserindo as características de cada componente.

W.F.ShortCircuit V1.1

W.F. Short-Circuit

Aerogeradores							Cabos BT			
	Xd' (%)	U(V)	Sg(kVA)	Barramento	Zg(Ohm)	Z	Comprimento(m)	Secção(mm2)	Nº Condutores/Fase	$\rho(20^{\circ}\text{C}) - \text{M.}$
1	10	690	3035	1	0		1	80	300	3
2	10	690	3035	4	0		2	80	300	3
3	10	690	3035	7	0		3	80	300	3

+ Aero.	- Aero.	Copiar Aero.	Calcular Impedância	+ Cabo	- Cabo	Copiar Cabo	Calcular Impedância
---------	---------	--------------	---------------------	--------	--------	-------------	---------------------

Transformadores						Cabos MT				
	Ucc (%)	U(V)	St(kVA)	Pj(Perdas Transformador)(W)	Bar	Comprimento(m)	Secção(mm2)	Nº de Condutores/Fase	$\rho(20^{\circ}\text{C}) - \text{M.}$	
1	8	690	3150		14000	1	250	50	1	
2	6	690	3150		14000	2	250	70	1	
3	6	690	3150		14000	3	250	70	1	
4	6	690	3150		14000	4	250	120	1	

+ Transf.	- Transf.	Copiar Transf.	Calcular Impedância	+ Cabo	- Cabo	Copiar Cabo	Calcular Impedância
-----------	-----------	----------------	---------------------	--------	--------	-------------	---------------------

Transformadores Interligação					Cabos AT					
	Ucc (%)	U(V)	St(MVA)	Pj(Perdas Transformador)(W)	Barram.	Comprimento(m)	Resistência(Ohm/km)	U(V)	Barram. Inicial	
1	16	30000	40		140000	1	30	0.0500	60000	14

+ Transf.	- transf.	Copiar Transf.	Calcular Impedância	+ Barr.	- Barr.	Copiar Barr.	Calcular Impedância
-----------	-----------	----------------	---------------------	---------	---------	--------------	---------------------

Ligações à Rede					Barramentos			
	U (V)	Sc Max(MVA)	Sc Min(MVA)	Barramento	Zrede (Ohm)	Zrec	Nível de Tensão- U(V)	
1	60000	3000	1500	15	0		1	690
							2	690
							3	30000
							4	690

Adicionar Ligação à Rede	Apagar Ligação à Rede	Calcular Impedância	Adicionar Barramento	Apagar Barramento
--------------------------	-----------------------	---------------------	----------------------	-------------------

Calcular Correntes CC

Gravar

Figura 4.13 - Introdução de dados nas tabelas da aplicação informática.

De seguida o utilizador deverá, em todas as tabelas, premir o botão “Calcular Impedância” para as células que até aqui estavam com valor 0, apresentem o resultado do cálculo da impedância dos componentes.

W.F.ShortCircuit V1.1

W.F. Short-Circuit

Aerogeradores

s)	U(V)	Sg(kVA)	Barramento	Zg(Ohm)	Zg(pu)
1	6.9000e+02	3.0350e+03	1.0000 + 0.0...	0.0019 + 0.0...	0.3954 + 3.2...
2	6.9000e+02	3.0350e+03	4.0000 + 0.0...	0.0019 + 0.0...	0.3954 + 3.2...
3	6.9000e+02	3.0350e+03	7.0000 + 0.0...	0.0019 + 0.0...	0.3954 + 3.2...

+ Aero. - Aero. Copiar Aero. **Calcular Impedância**

Cabos BT

	Comprimento(m)	Secção(mm2)	Nº Condutores/Fase	p(20°C) - M
1	80	300	3	
2	80	300	3	
3	80	300	3	

+ Cabo - Cabo Copiar Cabo **Calcular Impedância**

Transformadores

	Ucc(%)	U(V)	St(kVA)	Pj(Perdas Transformador)(W)	Bar
1	6	690	3150	14000	
2	6	690	3150	14000	
3	6	690	3150	14000	
4	6	690	3150	14000	

+ Transf. - Transf. Copiar Transf. **Calcular Impedância**

Cabos MT

	Comprimento(m)	Secção(mm2)	Nº de Condutores/Fase	p(20°C) -
1	250	50	1	
2	250	70	1	
3	250	70	1	
4	250	120	1	

+ Cabo - Cabo Copiar Cabo **Calcular Impedância**

Transformadores Interligação

	Ucc(%)	U(V)	St(MVA)	Pj(Perdas Transformador)(W)	Barran
1	16	30000	40	140000	

+Transf. - transf. Copiar Transf. **Calcular Impedância**

Cabos AT

	Comprimento(m)	Resistência(Ohm/km)	U(V)	Barram. Inicial
1	30	0.0500	60000	14

+ Barr. - Barr. Copiar Barr. **Calcular Impedância**

Ligações à Rede

	U (V)	Sc Max(MVA)	Sc Min(MVA)	Barramento	Zrede (Ohm)	Zrec
1	60000	3000	1500	15	0	

Adicionar Ligação à Rede Apagar Ligação à Rede **Calcular Impedância**

Barramentos

	Nível de Tensão- U(V)
1	690
2	690
3	30000
4	690

Adicionar Barramento Apagar Barramento

Calcular Correntes CC

Gravar

Figura 4.14 - Resultado após pressionar o botão "Calcular Impedância" na tabela Aerogeradores.

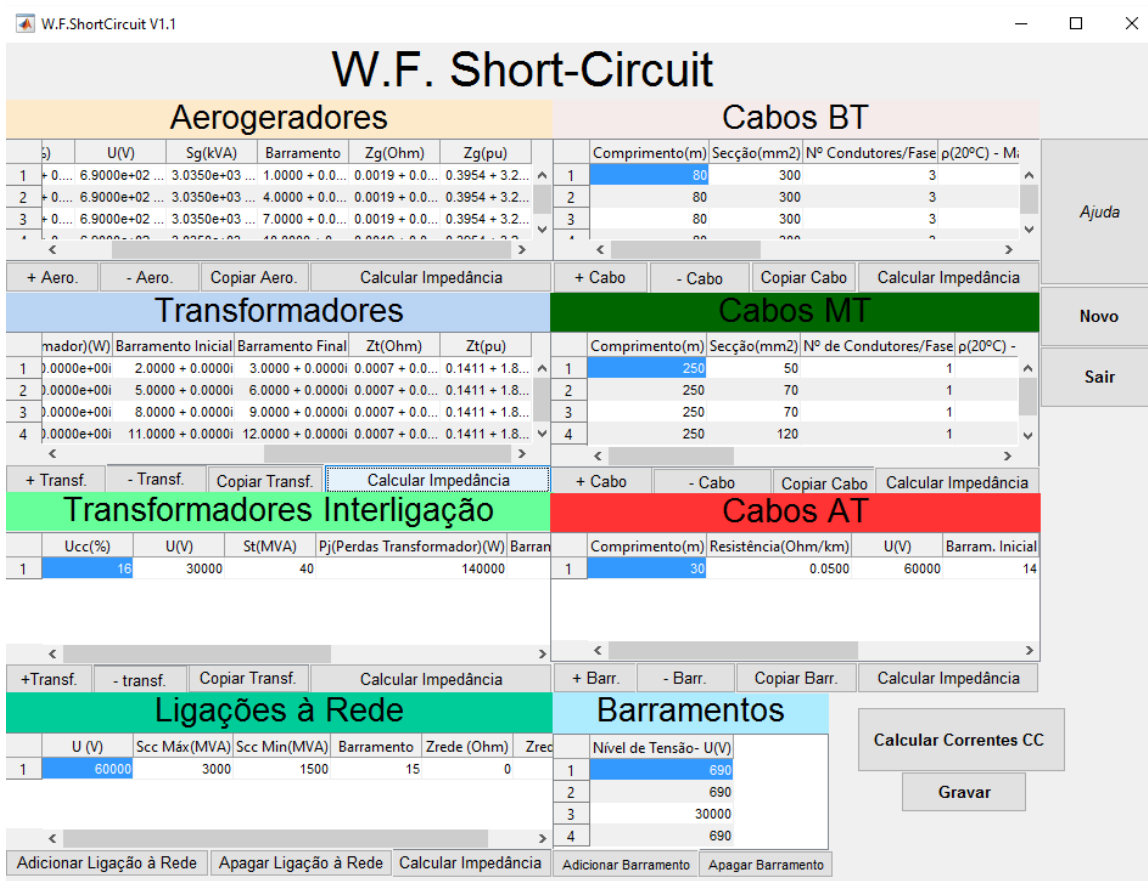


Figura 4.15 - Resultado após pressionar o botão “Calcular Impedância” na tabela Transformadores.

Na Figura 4.14 é pressionado o botão “Calcular Impedância” na tabela Aero geradores e os valores surgem nas colunas de Zg (Ohm) e Zg (pu) que representam respetivamente a impedância dos aerogeradores em Ohm e em pu. Podemos verificar que na tabela Transformadores o mesmo botão ainda não foi pressionado, desta forma os valores de Zt (Ohm) e Zt (pu) que representam respetivamente as impedâncias dos transformadores em Ohm e em pu, ainda se encontram a zero.

Na Figura 4.15 o botão “Calcular Impedância” na tabela Transformadores é pressionado e o valor de zero é substituído pelos valores de impedância de cada transformador.

O mesmo procedimento se deve tomar para todas as tabelas que tenham a mesma forma de funcionamento.

Em caso de erro a aplicação emitirá um sinal sonoro de aviso, os erros normalmente devem-se a falta de valores inseridos, em introdução de vírgulas no lugar de pontos quando se introduzem números decimais.



Figura 4.16 - Botão usado pelo utilizador para que aplicação desenvolva as correntes de curto-circuito.

A fase seguinte passa pelo utilizador pressionar o botão da Figura 4.16 para a aplicação calcular as correntes de curto-circuito. Se o sinal sonoro for emitido será porque as impedâncias não foram todas calculadas, ou seja, o passo anterior não se verificou em todas as tabelas. Ou então porque a tabela “Barramentos” não foi devidamente completada.

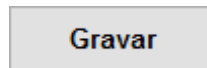


Figura 4.17 - Botão usado para a criação do ficheiro Excel com os resultados.

Se não for emitido nenhum sinal sonoro pelo computador o utilizador pode avançar para o próximo passo, em que pode pressionar o botão da Figura 4.17 para que os valores lhe sejam devolvidos num ficheiro Excel. Sempre que pressionar este botão, a aplicação vai substituir o ficheiro de resultados anterior. É importante reter que se o utilizador pretende fazer várias experiências na sua rede, alterando valores de componentes ou até mesmo adicionando ou retirando estes, a cada ficheiro de resultados que crie, deve alterar o seu nome para que este não seja substituído pelo seguinte.



Figura 4.18 - Botão usado para a introdução dos componentes de um novo parque.



Figura 4.19 - Botão usado para a desligar a aplicação.

Após retirar os resultados da aplicação, o utilizador pode usar o botão da Figura 4.18 para limpar todos os valores do interface e poder introduzir um novo parque.

Caso o utilizador dê por terminado o seu estudo na aplicação, pode pressionar o botão da Figura 4.19 para poder encerrar a aplicação.



Figura 4.20 - Botão usado para recorrer à janela.



Figura 4.21 - Janela de auxílio ao utilizador.

Em qualquer situação de dúvida/questão acerca do funcionamento do software o utilizador poderá recorrer ao botão da Figura 4.20, e será aberta uma janela idêntica à Figura 4.21, que permite guiar o utilizador no preenchimento das tabelas, e retirar as dúvidas que a este possam surgir.

4.4.4 Processo de resolução do problema na ótica da aplicação

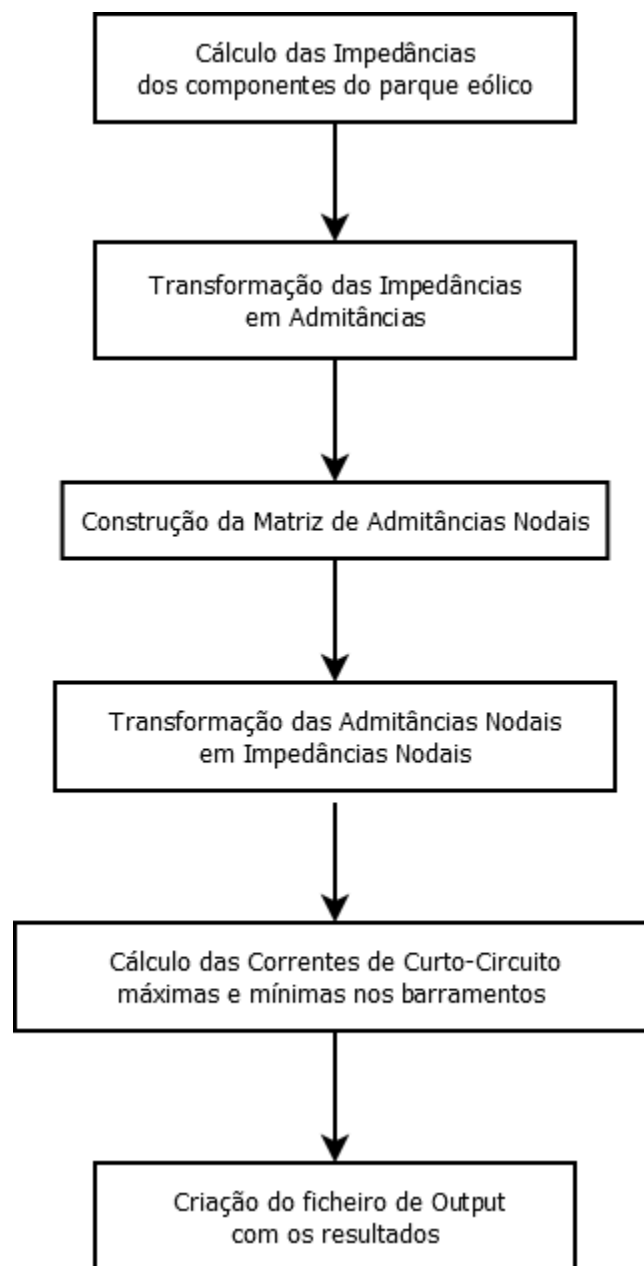


Figura 4.22 - Fluxograma do processamento dos dados da aplicação.

Para o cálculo das impedâncias dos componentes a aplicação necessita que, o utilizador insira todos os dados da rede nas tabelas. E que pressione o botão “Calcular Impedância” de todas as tabelas. Após este procedimento e caso não haja qualquer erro nos dados inseridos, a aplicação calcula as impedâncias de todos os componentes.

Em seguida o utilizador deverá pressionar o botão “Calcular Correntes CC”, após atuação deste botão o programa irá executar a transformação das impedâncias calculadas anteriormente, em admitâncias. Em seguida a matriz de admitâncias nodais é construída e as admitâncias dela resultante são transformadas em impedâncias nodais. Daí são calculadas as correntes de curto-circuito máximas e mínimas. Todo este processo ocorre instantaneamente.

Por fim o utilizador pressiona o botão “Gravar” e é criado um ficheiro *Excel*, nomeado “Correntes_Curto-Circuito”, onde serão registadas as correntes de curto-circuito máximas e mínimas de cada barramento que constitui a rede. Este ficheiro irá ser gravado no ambiente de trabalho.

4.4.5 Ficheiro de Resultados

Como foi explicado no ponto anterior, os resultados são apresentados num ficheiro *Excel*. Este ficheiro é constituído por duas folhas. A primeira apresenta as correntes de curto-circuito máximas e a segunda apresenta as correntes de curto-circuito mínimas. Em cada uma das folhas os dados estão inseridos nas primeiras três linhas. Em que na primeira linha estará representado o número do barramento, na mesma coluna mas na segunda linha está colocado o valor da corrente de curto-circuito nesse barramento em Ampere. Na terceira linha da mesma coluna estará o valor do nível de tensão nesse barramento em Volt.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
2	71827,79	72610,6	11582,61	11741,24	71652,1	72431,26	11078,96	11235,16	71462,78	72237,92	10565,26	10716,9	29243,43	28661,31	658,6912	10193,49	29243,43	28661,31	658,6912	12015,53	2924
3	690	690	30000	30000	690	690	30000	30000	690	690	30000	30000	690	690	30000	30000	690	690	30000	30000	
4																					
5																					
6																					
7																					
8																					
9																					
10																					
11																					
12																					
13																					
14																					
15																					
16																					
17																					
18																					
19																					
20																					
21																					
22																					
23																					
24																					
25																					
26																					
27																					
28																					

Figura 4. 23 - Exemplo de um ficheiro de resultados em Excel.

O facto de os resultados serem apresentados num ficheiro *Excel* tem o intuito de facilitar a sua avaliação e tratamento por parte do utilizador. Tipos de ficheiro como o bloco de notas ou notepad também poderiam ser usados como soluções para a apresentação dos resultados. Contudo o utilizador para poder analisar da melhor forma os resultados acabaria por ter de transportar os dados para um programa de tratamento de dados como o aqui utilizado.

Capítulo 5

Casos de Estudo

Neste capítulo serão abordados três casos práticos em que serão comparados os métodos de cálculo de corrente de curto-circuito, em três parques eólicos de diferentes dimensões. Inicialmente as correntes de curto-circuito serão calculadas pelo método das impedâncias (ponto 3.3 do presente documento) após se encontrar o resultado para três nós ou barramentos distintos, a mesma rede será testada na aplicação informática e posteriormente os valores de ambos os métodos serão comparados e analisados.

5 Casos de Estudo

5.1 Caso de Estudo 1

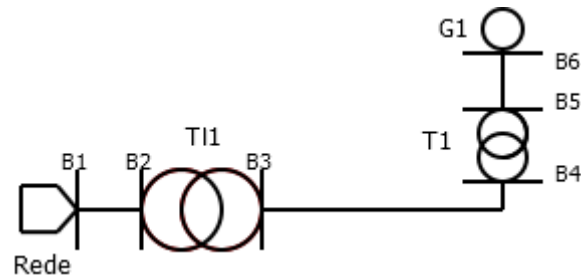


Figura 5.1 - Rede do Caso de estudo 1.

Este caso de estudo contempla uma pequena rede constituída por apenas um aerogerador, um transformador BT/MT, um transformador de interligação MT/AT e uma ligação com a rede. Assim como os cabos de baixa (690 V), média (30000 V) e alta tensão (60000 V) correspondentes.

Para se proceder ao cálculo do valor das correntes de curto-circuito máximo e mínimo seja pelo método das impedâncias ou pela aplicação informática é necessário recolher os seguintes dados relativos à aparelhagem escolhida:

Tabela 5.1 - Dados Aerogerador Caso do estudo 1

Aerogerador (G1)	
Tensão Nominal [V]	690
Potência Aparente (S_G) [MVA]	3,036
Reatância Transitória (x'_d) [%]	12

Tabela 5.2 - Dados Transformador BT/MT do Caso de estudo 1

Transformador BT/MT (T1)	
Tensão Nominal [V]	690/30000
Potência Aparente (SrT) [MVA]	3,150
Tensão de Curto-circuito (u_{kr}) [%]	6
Perdas em Carga (PkrT) [W]	5140

Tabela 5.3 - Dados Transformador MT/AT Caso de estudo 1.

Transformador MT/AT (T11)	
Tensão Nominal [V]	30000/60000
Potência Aparente (SrT) [MVA]	5,0
Tensão de Curto-circuito (u_{kr}) [%]	8
Perdas em Carga (PkrT) [W]	43000

Tabela 5.4 - Dados da Rede Caso de estudo 1.

Rede	
Tensão Nominal [V]	60000
Potência Curto-Circuito Máxima (SkQ Máx) [MVA]	2500
Potência de Curto-Circuito Mínima (SkQ Mín) [MVA]	1500

Tabela 5.5 - Dados dos Cabos BT (B6-B5) do Caso de estudo 1.

Cabos BT (B6-B5)	
Tipo de Cabo	3 x (XV 4 x 300) (0,6/1 kV)
Tensão Nominal [V]	690
Comprimento [m]	80
Nº de Condutores/Fase	3
Secção [mm ²]	300
Temperatura Máxima do Isolamento [°C]	250
Resistividade do Material Condutor (Alumínio) a 20°C [Ω mm ² /m]	0,0278

Tabela 5.6 - Dados do Cabo MT (B4-B3) do Caso de estudo 1.

Cabo MT (B4-B3)	
Tipo de Cabo	LXHIOV 3 x 50 (36 kV)
Tensão Nominal [V]	30000
Comprimento [m]	300
Nº de Condutores/Fase	1
Secção [mm ²]	50
Reatância [Ω /km]	0,194
Temperatura Máxima do Isolamento [°C]	250
Resistividade do Material Condutor (Alumínio) a 20°C [Ω mm ² /m]	0,0278

Tabela 5.7 - Dados do Cabo AT do Caso de estudo 1.

Cabo AT (B2-B1)	
Tipo de Cabo	16-AL1 (72 kV)
Tensão Nominal [V]	60000
Comprimento [m]	30
Resistência [Ω /km]	1,7896

5.1.1 Cálculo da intensidade de corrente de curto-circuito máxima:

Sabendo as características dos componentes da rede podem ser então, efetuados os cálculos dos valores das impedâncias de cada um. Através dos métodos exemplificados em 3.3.

Após calculadas as impedâncias de cada componente é importante referir, que inicialmente ainda só foram determinadas as impedâncias dos cabos para o valor de temperatura de 20°C, como demonstrado no Apêndice 1. O que nos permitirá calcular o curto-circuito máximo. Este curto-circuito corresponderá a um do tipo simétrico trifásico.

Devido aos diferentes níveis de tensão existentes no Caso de estudo 1, executar os cálculos de séries ou paralelos de impedâncias a tensões de valores diferentes iria obrigar a várias conversões a cada cálculo realizado. Desta forma executaram-se todos os cálculos em pu, o que simplifica todas as operações com as impedâncias dos componentes aos diferentes níveis de tensão.

Para se determinar os valores de impedâncias em pu, é necessário primeiramente calcular os valores de impedância de base para cada nível de tensão, tendo como referência uma potência de base de 100 MVA. Este cálculo está apresentado no Apêndice 1.

Como exemplo de cálculo da impedância equivalente serão escolhidos três pontos ou barramentos, e conseqüentemente calculadas as correntes de curto-circuito máximo.

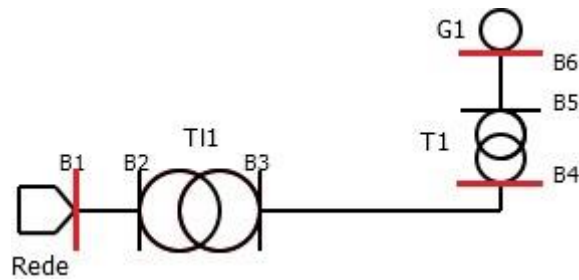


Figura 5.2 - Esquema da rede do Caso de estudo 1 com identificação dos barramentos onde os cálculos das impedâncias equivalentes será efetuado.

Foram escolhidos então, os barramentos 1, 4 e 6 para a execução dos cálculos das impedâncias equivalentes. Sendo que o procedimento será calcular o somatório das impedâncias desde a rede até ao barramento, assim como desde o aerogerador até ao mesmo barramento. Após a execução destes somatórios, será necessário calcular o paralelo entre esses dois resultados para desta forma se obter a impedância equivalente nos barramentos.

O passo seguinte será o cálculo da corrente de curto-circuito máxima nesse ponto. Inicialmente iremos calcular este valor em pu ($I_{CCb1}(pu)$) e calcular a corrente de base (I_{base}) para aquele ponto. Consequentemente determinar-se-á o valor da corrente de curto-circuito máxima real em Ampère.

5.1.2 Cálculo da intensidade de corrente de curto-circuito mínima:

O mesmo se poderá calcular para a corrente de curto-circuito mínima, em que diverge dos cálculos anteriores nas temperaturas para as quais as impedâncias dos cabos foram calculadas e a potência de curto-circuito da rede a montante a utilizar.

Nesta situação o valor de impedância dos cabos será diferente, pois o valor de corrente de curto-circuito mínimo é estudado para a situação em que os cabos de baixa e média tensão, estejam sujeitos à temperatura máxima do seu isolamento.

É ainda importante salientar que é necessário calcular a nova impedância da rede a montante pois para o cálculo de curto-circuito mínimo a potência de curto-circuito da rede será o valor mínimo.

Para calcular o valor da corrente de base (I_{base}) será tido em conta um curto-circuito fase-fase ou bifásico. Como foi anteriormente demonstrado na Eq. 3.28. Neste curto-circuito será considerado a impedância direta e indireta iguais, assumindo que os valores de ambas as impedâncias são de valor muito próximo irá ser considerado que:

$$Z_d = Z_i$$

Cálculo das correntes de curto-circuito na aplicação informática na rede do Caso de estudo 1.

Tendo desenvolvido anteriormente o esquema da rede, é possível de imediato inserir o esquema da rede diretamente na aplicação.

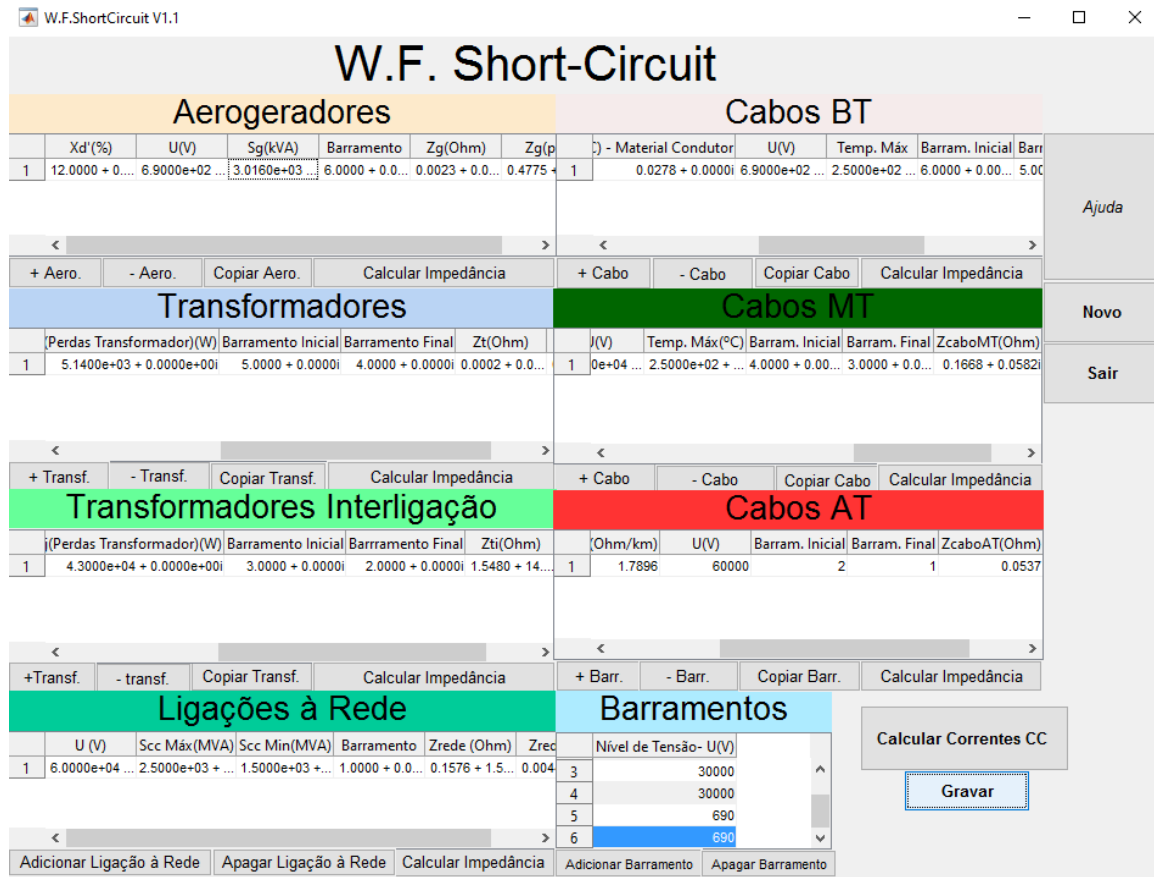


Figura 5.3 - Rede do Caso de estudo 1 inserida no interface da aplicação informática.

Como é possível visualizar na Figura 5.3, a rede apenas é constituída por um elemento de cada tabela, exceto na tabela dos barramentos, pois tendo a rede 6 barramentos esta tabela tem de ser preenchida com 6 elementos e os seus respetivos níveis de tensão.

Cada tabela para cada elemento será preenchida com as características das tabelas referidas inicialmente. Após o preenchimento, o cálculo e a gravação dos dados, tem-se então acesso aos resultados dos valores de corrente de curto-circuito.

	A	B	C	D	E	F
1	1	2	3	4	5	6
2	24189,3	24095,07	1617,872	1611,899	44071,55	43649,65
3	60000	60000	30000	30000	690	690
4						
5						
6						
7						

Figura 5.4 - Resultados do cálculo das correntes de curto-circuito máximas através da aplicação informática.

	A	B	C	D	E	F
1	1	2	3	4	5	6
2	12602,78	12572,18	1254,411	1249,286	33816,43	33494
3	60000	60000	30000	30000	690	690
4						
5						
6						
7						

Figura 5.5 - Resultados do cálculo das correntes de curto-circuito mínimas através da aplicação informática.

As figuras 5.4 e 5.5 mostram em *Excel* os resultados das correntes de curto-circuito máximas e mínimas respetivamente, em todos os barramentos da rede. Por forma a comparar os cálculos manuais utilizando o método das impedâncias, e a aplicação informática serão relacionados os barramentos 1, 4 e 6 de ambos os métodos.

Tabela 5.8 - Resultados do caso de estudo 1

Comparação de Resultados				
	Curto-Circuito Máximo (A)		Curto-Circuito Mínimo (A)	
Barramento	Método de Impedâncias	Aplicação Informática	Método de Impedâncias	Aplicação Informática
1	24037,98	24189,30	12641,61	12602,78
4	1616,25	1611,89	1249,45	1249,28
6	43702,62	43649,64	33232,48	33494,0

Na tabela 5.8 estão representados os resultados homólogos ao caso de estudo 1, os valores de corrente divergem bastante entre barramentos pois estes encontram-se a tensões diferentes. Os valores das correntes de curto-circuito máximo são claramente superiores às correntes de curto-circuito mínimo pois o segundo é um defeito bifásico, que contabiliza uma impedância muito superior ao do trifásico simétrico. Para além desta evidência os valores de impedância dos cabos de média e baixa tensão são superiores durante o curto-circuito mínimo. Desta forma a corrente resultante durante o curto-circuito mínimo tende a ser muito inferior do que o valor respetivo ao máximo.

Comparando os resultados entre o método de impedâncias e a aplicação informática, observa-se uma ligeira diferença que advém de arredondamentos durante o cálculo pelo método das impedâncias, a aplicação usa um número muito superior de casas decimais, o que implica valores resultantes mais realistas. É possível verificar que esta diferença é maior quanto menor for o nível de tensão do barramento, pois como os valores de corrente são muito superiores, este “erro” de arredondamento tem uma maior notoriedade. Pode assim ser concluído que tanto de uma forma ou outra se poderá calcular de forma correta os resultados das correntes curto-circuito. Embora uma necessite de um tempo de execução, por parte do utilizador ou projetista, muito inferior relativamente à outra.

5.2 Caso de Estudo 2

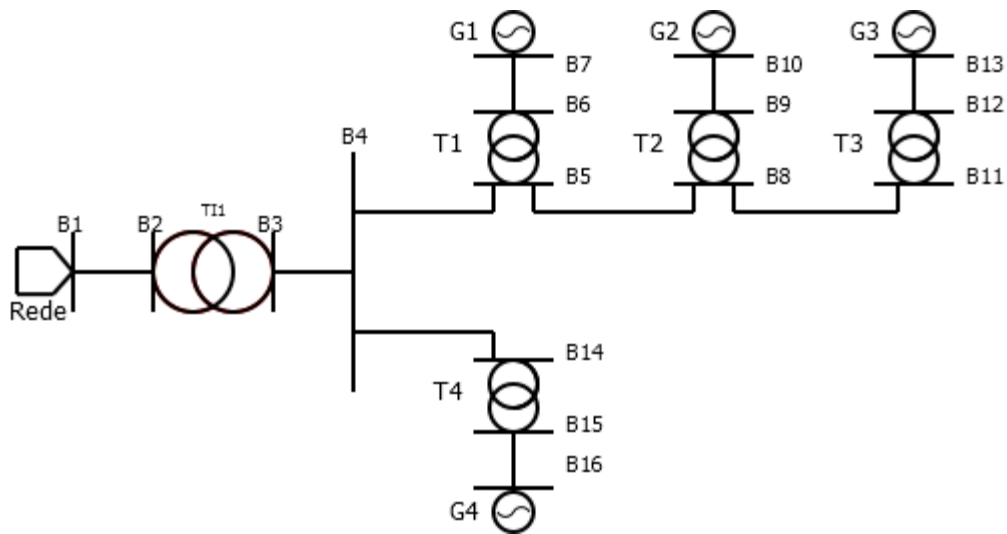


Figura 5.6 - Rede de Caso de estudo 2.

Na figura 5.6 está representada a rede do Caso de estudo 2, a rede é composta por quatro aerogeradores de potência igual, quatro transformadores BT/MT, um transformador MT/AT e uma ligação à rede de transporte. A rede funciona a nível de baixa tensão a 690 V, em média tensão a 20000 V e em alta tensão a 60000 V.

Para se proceder ao cálculo do valor das correntes de curto-circuito máximo e mínimo seja pelo método das impedâncias ou pela aplicação informática:

Tabela 5.9 - Dados Aerogerador Caso do estudo 2

Aerogerador (G1, G2, G3, G4)	
Tensão Nominal [V]	690
Potência Aparente (S_G) [MVA]	3,036
Reatância Transitória (x'_d) [%]	12

Tabela 5.10 - Dados Transformador BT/MT do Caso de estudo 2

Transformador BT/MT (T1, T2, T3, T4)	
Tensão Nominal [V]	690/20000
Potência Aparente (SrT) [MVA]	3,150
Tensão de Curto-Circuito (u_{kr}) [%]	6
Perdas em Carga (PkrT) [W]	5140

Tabela 5.11 - Dados Transformador MT/AT Caso de estudo 2.

Transformador MT/AT (T11)	
Tensão Nominal [V]	20000/60000
Potência Aparente (SrT) [MVA]	15,0
Tensão de Curto-Circuito (u_{kr}) [%]	18
Perdas em Carga (PkrT) [W]	120000

Tabela 5.12 - Dados da Rede Caso de estudo 1.

Rede	
Tensão Nominal [V]	60000
Potência de Curto-Circuito Máxima (SkQ Máx) [MVA]	2500
Potência de Curto-Circuito Mínima (SkQ Mín) [MVA]	1500

Tabela 5.13 - Dados dos Cabos BT (B6-B5) do Caso de estudo 2.

Cabos BT (Entre aerogeradores e transformadores BT/MT)	
Tipo de Cabo	3 x (XV 4 x 300) (0,6/1 kV)
Tensão Nominal [V]	690
Comprimento [m]	80
Nº de Condutores/Fase	3
Secção [mm ²]	300
Temperatura Máxima do Isolamento [°C]	250
Resistividade do Material Condutor (Alumínio) a 20°C [Ω mm ² /m]	0,0278

Tabela 5.14 - Dados do Cabo MT (B7-B6, B11-B8, B5-B4) do Caso de estudo 2.

Cabo MT (B7-B6, B11-B8, B5-B4)	
Tipo de Cabo	XHIOV 3 x 70 (24 kV)
Tensão Nominal [V]	20000
Comprimento [m]	300
Nº de Condutores/Fase	1
Secção [mm ²]	70
Reatância [Ω /km]	0,220
Temperatura Máxima do Isolamento [°C]	250
Resistividade do Material Condutor (Cobre) a 20°C [Ω mm ² /m]	0,0173

Tabela 5. 15 - Dados do Cabo MT (B4-B3) do Caso de estudo 2.

Cabo MT (B4-B3)	
Tipo de Cabo	2 x (XHIOV 3 x 70) (24 kV)
Tensão Nominal [V]	20000
Comprimento [m]	30
Nº de Condutores/Fase	2
Secção [mm ²]	70
Reatância [Ω /km]	0,220
Temperatura Máxima do Isolamento [°C]	250
Resistividade do Material Condutor (Alumínio) a 20°C [Ω mm ² /m]	0,0173

Tabela 5. 16 - Dados do Cabo AT do Caso de estudo 2.

Cabo AT (B2-B1)	
Tipo de Cabo	16-AL1 (72,5 kV)
Tensão Nominal [V]	60000
Comprimento [m]	30
Resistência [Ω /km]	1,7896

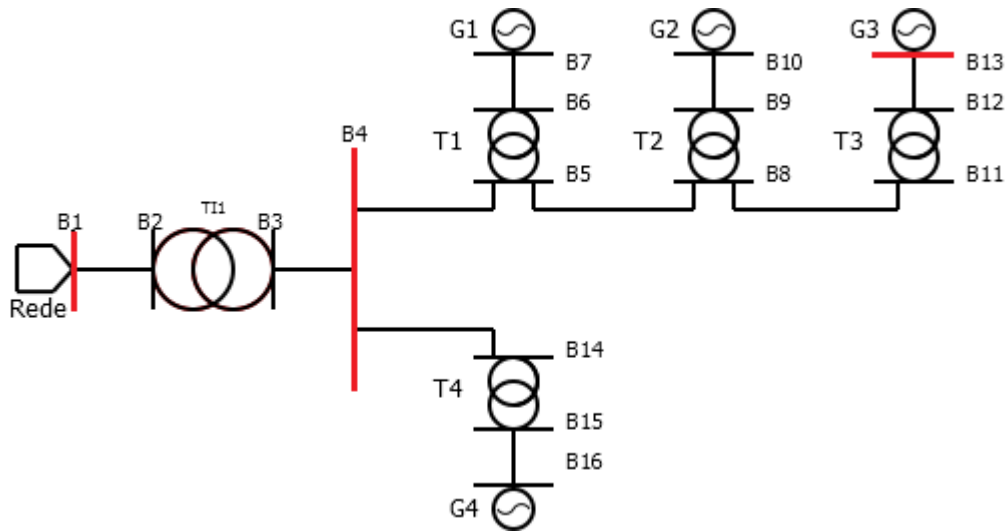


Figura 5.7 - Esquema da rede do Caso de estudo 2 com identificação dos barramentos onde os cálculos das impedâncias equivalentes será efetuado.

Neste caso de estudo os barramentos em análise são o barramento 1, 4 e 13. Sendo estes respetivamente em alta, média e baixa tensão.

A formulação e lógica de cálculo utilizada no método das impedâncias será idêntica à utilizada no Caso de estudo 1 em que através das impedâncias dos elementos constituintes da rede, em pu, será elaborada a redução da rede necessária para alcançar as impedâncias equivalentes nos barramentos escolhidos com a finalidade de calcular as correntes de curto-circuito. Estes cálculos estão representados no Apêndice 2.

Neste caso de estudo, foram novamente comparados os métodos de cálculo, método das impedâncias e pela aplicação informática.

Tabela 5. 17 - Resultados do caso de estudo 2

Comparação de Resultados				
	Curto-Circuito Máximo (A)		Curto-Circuito Mínimo (A)	
Barramento	Método de Impedâncias	Aplicação Informática	Método de Impedâncias	Aplicação Informática
1	24313,29	24433,92	12841,62	12794,54
4	4532,27	4501,22	3485,0	3464,85
13	49227,54	49053,35	37288,39	37097,98

Comparando os resultados entre o método de impedâncias e a aplicação informática, observa-se uma ligeira diferença que advém de arredondamentos durante o cálculo pelo método das impedâncias, a aplicação usa um número muito superior de casas decimais, o que implica valores resultantes mais realistas. No caso de estudo 2, a diferença entre os resultados dos dois métodos para os mesmos pontos e para o mesmo tipo de defeito foram menores.

Para além de ser importante referir que os resultados na aplicação são mais próximos da realidade, é de elevada relevância mencionar que o largo tempo usado para calcular os valores das correntes pelo método das impedâncias foi muito superior comparativamente aos poucos minutos despendidos para inserir os dados nas tabelas da aplicação.

5.3 Caso de Estudo 3

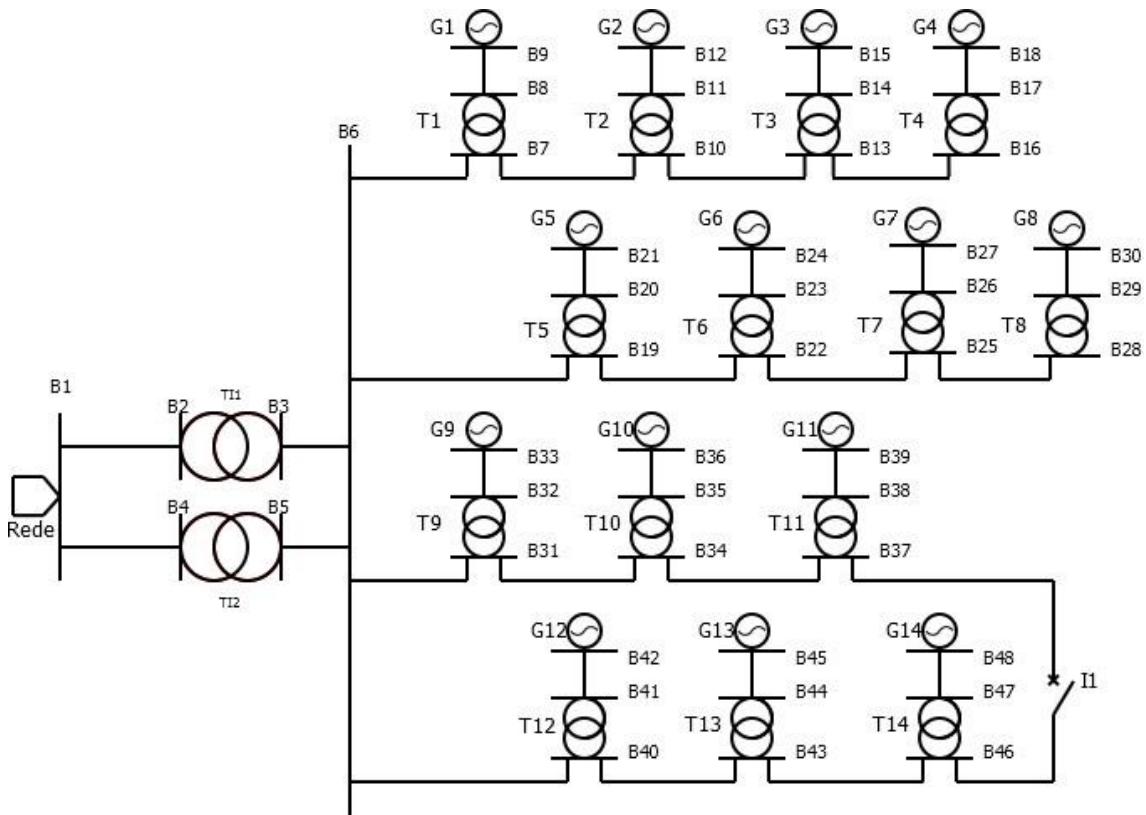


Figura 5.8 - Esquema da rede do Caso de estudo 3.

No caso de estudo 3 a rede é constituída por catorze aerogeradores, catorze transformadores BT/MT, catorze linhas BT, dezassete linhas MT, duas linhas AT na subestação e dois transformadores de interligação MT/AT em paralelo. Os níveis de tensão são 690 V, 20000 V e 60000 V em BT, MT e AT respetivamente.

O posicionamento dos aerogeradores neste caso de estudo, têm uma característica assimétrica para evitar o efeito de esteira entre torres eólicas, e com isso a posterior perda de rendimento por parte de cada aerogerador. Apesar de este estudo não necessitar de contemplar este tipo constrangimento, para que a arquitetura da rede seja o mais parecido com o real, devemos projetá-la para o estudo da forma mais real possível.

As linhas de três aerogeradores, estão interligadas em anel. Em caso de falha na linha B40-B6, ou B31-B6 o disjuntor (representado por I1) na cela de saída em B46 é fechado e permite a continuidade de serviço de ambos os ramais.

Devido à grande quantidade de informação sobre os dados da rede do caso de estudo 3, as características dos elementos da rede encontram-se no apêndice 3.

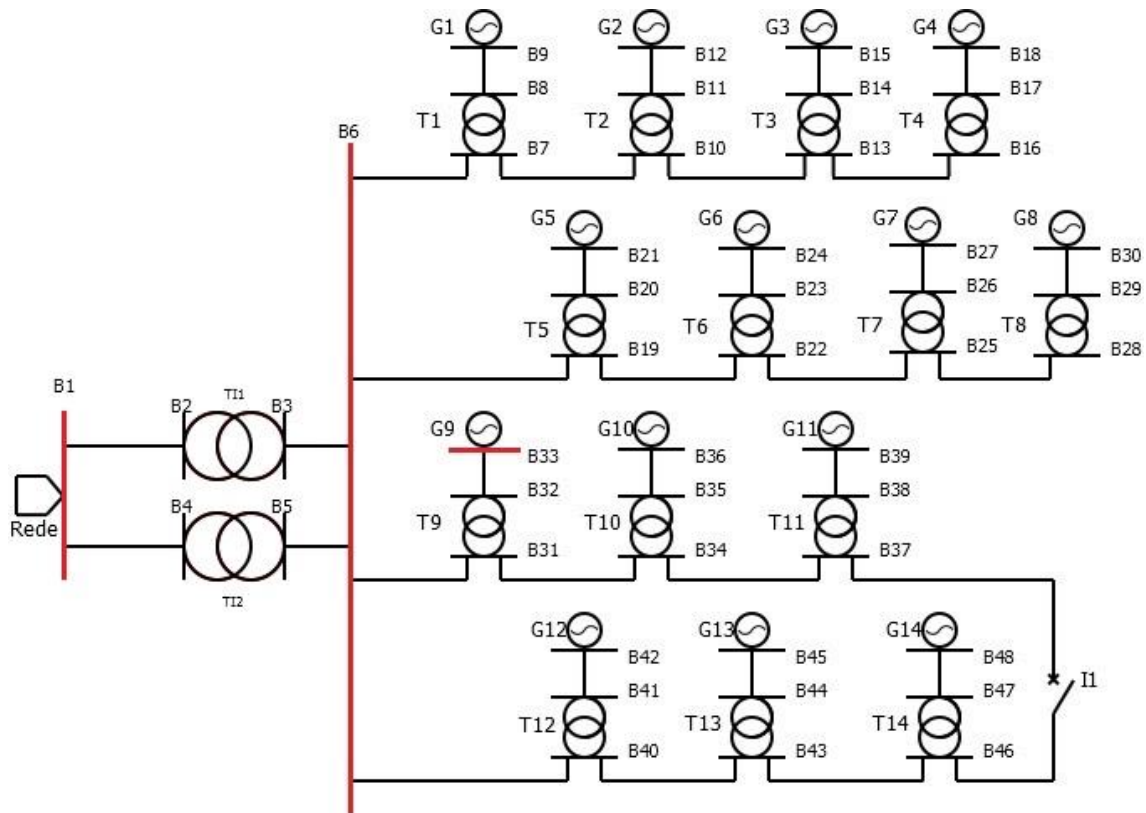


Figura 5.9 - Esquema da rede do Caso de estudo 3 com identificação dos barramentos onde os cálculos das impedâncias equivalentes será efetuado.

Neste caso de estudo os barramentos onde serão calculados os valores das correntes de curto-circuito máximo e mínimo são B1, B6 e B33. Novamente três barramentos com três níveis de tensão diferentes. No caso do barramento B33 os cálculos para as correntes curto-circuito máximo e mínimo serão efetuadas duas vezes. A primeira em situação de regime normal, em que I1 está aberto e ligação aos aerogeradores é elaborada por cada ramal de cada linha de torres eólicas. Após esse estudo será elaborado o cálculo e análise dos valores de corrente de curto-circuito para o cenário de avaria no ramo B31-B6, e em que a ligação será garantida pelo ramo B46-B37 com o fecho do disjuntor I1.

Os cálculos elaborados pelo método das impedâncias estão contidos no apêndice 3.1.

Após o cálculo dos valores de correntes de curto-circuito máximo e mínimo pelo método das impedâncias e pela aplicação informática os resultados foram também analisados e comparados.

Tabela 5.18 - Resultados do caso de estudo 3.

Comparação de Resultados				
	Curto-Circuito Máximo (A)		Curto-Circuito Mínimo (A)	
Barramento	Método de Impedâncias	Aplicação Informática	Método de Impedâncias	Aplicação Informática
1	25064,70	25159,77	13411,63	13363,63
6	12746,79	12681,72	9696,75	9674,68
33 (II aberto)	55153,32	54742,90	41467,20	41127,91
33 (II fechado)	54369,02	53900,03	40538,58	40346,79

Consegue-se aferir que os resultados mais divergentes surgem no barramento 1, pois em todos os casos é, dos barramentos comparados, o que verifica um nível de tensão superior. Mais uma vez a divergência de resultados surge por consequência de arredondamentos que no caso manual, ou método das impedâncias não permite elaborar cálculos tão corretos como na aplicação informática.

De salientar que o tempo despendido para o cálculo do valor das correntes de curto-circuito para o método manual nestes barramentos de exemplo foi bastante elevado, enquanto com a aplicação informática o tempo foi ínfimo e o cálculo foi automaticamente elaborado para todos os barramentos constituintes da rede.

Capítulo 6

Conclusões e desenvolvimentos futuros

Neste capítulo são referidas as conclusões obtidas através do estudo realizado nos capítulos anteriores, assim como apresentados possíveis desenvolvimentos futuros no âmbito do estudo, nomeadamente os métodos de cálculo utilizando a aplicação informática.

6 Conclusões e Desenvolvimentos futuros

6.1 Conclusões

Terminada a elaboração da presente dissertação, conclui-se que todos os objetivos inicialmente propostos foram atingidos, uma vez que após a realização de um estudo teórico sobre métodos de dimensionamento proteções de parques eólicos e subestações, foi possível estruturar, desenvolver e implementar a aplicação informática *WFSC*, que permite o cálculo e análise do valor das correntes de curto-circuito em parques eólicos e as consequentes subestações elétricas. Esta aplicação foi desenvolvida em ambiente *Matlab*, uma ferramenta que permite criar interfaces gráficos de boa qualidade assim como outputs para em ficheiros mais usuais como o *Microsoft Office Excel*.

Este projeto surgiu após verificação da importância do estabelecimento de proteções nas nos parques eólicos, e a prospeção do nível de dificuldade elevado no dimensionamento destas, o qual obriga a cálculos complexos e morosos que obrigam a um grande nível de concentração por parte de quem os pratica. E também como uma alternativa às ferramentas computacionais já existentes disponibilizadas muitas vezes por fabricantes, que apenas permitem o uso de materiais por si produzidos ou então são de elevado valor monetário. Além disso esta o *WFSC* não terá qualquer custo monetário para os utilizadores.

Os métodos de cálculo analisados dividem-se em dois grupos, o método convencional pelo cálculo das impedâncias e posterior cálculo de equivalentes de impedâncias em cada ponto onde é pretendido o cálculo de corrente de curto-circuito. E o método das matrizes de admitâncias que consequentemente serviu de base para o desenvolvimento do algoritmo de construção do programa. Em cada um dos métodos, para o cálculo das correntes de curto-circuito foram seguidas as normas da IEC 60909 de forma a respeitar as regras vigentes no mercado atual.

A ferramenta computacional aqui desenvolvida permite ao utilizador inserir os dados de todos os componentes da rede, assim como escolher quais os pontos que pretende que este calcule as correntes de curto-circuito máximas e mínimas. O cálculo envolve o valor de impedância de cada componente em ohm e pu, que é exposta ao utilizador logo que este peça à aplicação para que esta calcule o valor de impedância em cada tabela. Isto acontece apenas para as impedâncias do cálculo da corrente de curto-circuito máxima. Para as impedâncias para o cálculo das correntes de curto-circuito mínimas o programa

calcula-as e guarda-as internamente. A cada ponto que o utilizador decida que deve ser calculado o valor das correntes de curto-circuito, chama-se “barramento” a que o utilizador deverá ter em atenção o seu valor de tensão no preenchimento da tabela dedicada. Após os dados inseridos o utilizador pressiona em “Calcular Correntes CC” em caso de ausência de aviso sonoro é porque todos os dados foram inseridos corretamente e as correntes foram calculadas. Por fim, ao premir “Gravar” o resultado será exposto num ficheiro *Excel* no ambiente de trabalho do utilizador.

Em síntese verificou-se que, comparativamente ao método manual, a utilização desta aplicação vem acrescentar grandes vantagens ao processo de dimensionamento de proteções nos parques eólicos e subestações. Entre as quais a significativa diminuição do tempo necessário para o cálculo das correntes curto-circuito. De salientar que nos casos de estudo no cálculo pela forma manual apenas foram analisados três pontos ou barramentos da rede devido ao longo processo de cálculo. Com aplicação de forma rápida e simples conseguimos obter o cálculo das correntes de curto-circuito em todos os pontos inicialmente estabelecidos. E desta forma o erro associado ao cálculo é reduzido contrariamente ao método manual. Os resultados alcançados são mais corretos pela ferramenta computacional, pois no cálculo manual os arredondamentos não permitem um cálculo tão assertivo.

6.2 Desenvolvimentos futuros

Nos desenvolvimentos futuros, a estruturação desta ferramenta computacional confere-lhe um enorme potencial. Este vertente poderá dividir-se em duas partes, a primeira no sentido de melhorar o interface existente. A alteração do interface gráfico que permitisse ao utilizador desenhar a rede diretamente no programa. A presença de um botão para o utilizador poder gravar os dados que até ali inseriu na aplicação por forma a poder continuar, mesmo tendo encerrado aplicação. Ou mesmo inserir dados através de um ficheiro. Outra medida de desenvolvimento imediata, seria ter mais hipóteses de escolha no que diz respeito a subestação. Nesta aplicação apenas foram definidos cabos AT, não existindo a alternativa de barramentos AT.

A segunda área de melhoria poderia ser ampliação do campo de estudo da própria aplicação. Começando pela incidência do estudo em si, em que as quedas de tensão e a proteção contra contactos indiretos, por exemplo, fossem também resultados a obter.

Ainda dentro da melhoria do campo de estudo, era de todo o interesse, capacitar a aplicação a ir mais além no campo da eletrotecnia no que respeita a produção de energias renováveis, os parques fotovoltaicos seriam de grande relevância para o estudo dos curto-circuitos assim como das quedas de tensão. Para além da geração a ferramenta computacional poderia incidir também no estudo de instalações elétricas de infraestruturas como redes BT alimentadas por PT's públicos como moradias ou prédios, ou infraestruturas alimentadas por PT's privados como fábricas ou grandes edifícios de escritórios.

Por fim uma adaptação interessante seria criar a aplicação móvel (para telemóvel ou tablet) que permitisse ao engenheiro ou projetista ir ao terreno e construir a rede da forma mais factual possível. Podendo assim executar alterações de urgência ou correções no momento e desta forma saber se a solução pode ser viável ou não.

Com estas atualizações o programa teria um grande potencial a nível de desempenho no mundo da engenharia assim como no mercado deste tipo de softwares. Pois tendo em conta o estudo executado nesta dissertação na pesquisa de aplicações que se debrucem na mesma área desta. Nenhuma até aqui encontrada consegue ou dispõe, de todas as atualizações aqui propostas a desenvolvimento futuro.

Referências

Bibliográficas

- [1] B. K. Sahu, M. Hiloidhari, and D. C. Baruah, “Global trend in wind power with special focus on the top five wind power producing countries,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 348–359, 2013.
- [2] Y. Kumar, J. Ringenberg, S. S. Depuru, V. K. Devabhaktuni, J. W. Lee, E. Nikolaidis, B. Andersen, and A. Afjeh, “Wind energy: Trends and enabling technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 209–224, 2016.
- [3] D. Solyali, M. Altunç, S. Tolun, and Z. Aslan, “Wind resource assessment of Northern Cyprus,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 180–187, 2016.
- [4] R. Wiser, E. Lantz, T. Mai, J. Zayas, E. DeMeo, E. Eugeni, J. Lin-Powers, and R. Tusing, “Wind Vision: A New Era for Wind Power in the United States,” *Electr. J.*, vol. 28, no. 9, pp. 120–132, 2015.
- [5] L.-W. Ho, “Wind energy in Malaysia: Past, present and future,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 279–295, 2016.
- [6] D. Caporale and C. De Lucia, “Social acceptance of on-shore wind energy in Apulia Region (Southern Italy),” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 1378–1390, 2015.
- [7] S. K. Kar and A. Sharma, “Wind power developments in India,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 48, pp. 264–275, 2015.
- [8] B. Xue, Z. Ma, Y. Geng, P. Heck, W. Ren, M. Tobias, A. Maas, P. Jiang, J. A. Puppim De Oliveira, and T. Fujita, “A life cycle co-benefits assessment of wind power in China,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 338–346, 2015.
- [9] F. Hvelplund, B. Möller, and K. Sperling, “Local ownership, smart energy systems and better wind power economy,” *Energy Strateg. Rev.*, vol. 1, no. 3, pp. 164–170, 2013.
- [10] Y. Lin, L. Tu, H. Liu, and W. Li, “Fault analysis of wind turbines in China,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 482–490, 2016.
- [11] N. K. Gouvalas, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos, “Impact study of short-circuit calculation methods on the design of a wind farm’s grounding system,” *Renew. Energy*, vol. 66, pp. 1–8, 2014.
- [12] S. W. H. de H. Johan Morren, “Short-circuit current of wind turbines with doubly

- fed induction generator,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 1, pp. 174–180, 2007.
- [13] I. Staffell and R. Green, “How does wind farm performance decline with age?,” *Renew. Energy*, vol. 66, pp. 775–786, 2014.
- [14] M. Seixas, R. Melício, V. M. F. Mendes, and C. Couto, “Blade pitch control malfunction simulation in a wind energy conversion system with MPC five-level converter,” *Renew. Energy*, vol. 89, pp. 339–350, 2016.
- [15] J. Kazda, M. Zendehbad, S. Jafari, N. Chokani, and R. S. Abhari, “Mitigating adverse wake effects in a wind farm using non-optimum operational conditions,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 154, pp. 76–83, 2016.
- [16] Z. Song, Z. Zhang, and X. Chen, “The decision model of 3-dimensional wind farm layout design,” *Renew. Energy*, vol. 85, pp. 248–258, 2016.
- [17] S. A. Nowdeh, M. Chitsaz, and S. Khanabdal, “Evaluation of 1-phase , 3-phase and Lightning Faults on Wind Farms using EMTP-RV,” vol. 8, no. 1, pp. 53–62, 2014.
- [18] H. Abdollahzadeh, K. Atashgar, and M. Abbasi, “Multi-objective opportunistic maintenance optimization of a wind farm considering limited number of maintenance groups,” *Renew. Energy*, vol. 88, pp. 247–261, 2016.
- [19] A. Pliego Marugán, F. García Márquez, and J. Pinar Pérez, “Optimal Maintenance Management of Offshore Wind Farms,” *Energies*, vol. 9, no. 1, p. 46, 2016.
- [20] J. Glasdam, C. L. Bak, and J. Hjerrild, “Transient studies in large offshore wind farms employing detailed circuit breaker representation,” *Energies*, vol. 5, no. 7, pp. 2214–2231, 2012.
- [21] José Pedro Sucena Paiva, *Redes de Energia Elétrica. Uma análise sistémica*.
- [22] B. De Metz-Noblat, F. Dumas, and C. Poulain, *Schneider - Cahier technique no 158. Calculation of short-circuit currents*, no. 158. 2005.
- [23] I. E. Commission, “IEC 60909,” vol. 0, 2001.
- [24] S. Ramírez Cataño, *Protección de sistemas eléctricos*. 2003.
- [25] I. Kasikci, *Short Circuits in Power Systems A Practical Guide to IEC60909*. 2002.

Apêndices

Apêndice 1 – Cálculos do Caso de Estudo 1

Apêndice 1

Cálculo da intensidade de corrente de curto-circuito máxima:

Sabendo as características dos componentes da rede podem ser então, efetuados os cálculos dos valores das impedâncias de cada um. Através dos métodos exemplificados em 3.3. Podemos então proceder ao cálculo:

Impedância do Aerogerador através das equações 3.34, 3.35, 3.36:

$$X'_d = \frac{690^2}{3,03 \times 10^6} \cdot \frac{12}{100} = 0,0188 \Omega$$

$$R_G = 0,12 \cdot 0,0188 = 0,00225 \Omega$$

$$Z_G = 0,00225 + j0,0188 \Omega$$

Impedância do Transformador BT/MT através das equações 3.39, 3.40, 3.41:

$$Z_T = \frac{690^2}{3,15 \times 10^6} \cdot \frac{6}{100} = 0,009069 \Omega$$

$$I_{rT} = \frac{S_{rT}}{\sqrt{3} \cdot U_{rT}} = \frac{3,15 \times 10^6}{\sqrt{3} \cdot 690} = 2636 A$$

$$R_T = \frac{5140}{3 \cdot 2636^2} = 0,000246 \Omega$$

$$X_T = \sqrt{0,009069^2 - 0,000246^2} = 0,0090 \Omega$$

$$Z_T = 0,000246 + j0,0090 \Omega$$

Impedância do Transformador de interligação MT/AT através das equações 3.39, 3.40, 3.41:

$$Z_{TI} = \frac{30000^2}{5,0 \times 10^6} \cdot \frac{8}{100} = 14,40 \Omega$$

$$I_{rT} = \frac{S_{rT}}{\sqrt{3} \cdot U_{rT}} = \frac{5,0 \times 10^6}{\sqrt{3} \cdot 30000} = 96,22 A$$

$$R_T = \frac{43000}{3 \cdot 96,22^2} = 1,55 \Omega$$

$$X_{TI} = \sqrt{14,4^2 - 1,55^2} = 14,31 \Omega$$

$$Z_{TI} = 1,55 + j14,31 \Omega$$

Impedância da Rede através das equações 3.48, 3.49, 3.50:

$$Z_Q = \frac{1,1 \cdot 60000^2}{2500 \times 10^6} = 1,58 \Omega$$

$$X_Q = 0,995 \cdot 1,58 = 1,57 \Omega$$

$$R_Q = 0,1 \cdot 1,57 = 0,16 \Omega$$

$$Z_Q = 0,16 + j1,57 \Omega$$

Impedância do Cabo de Baixa Tensão através da equação 3.45:

$$R_{CBT} = \frac{0,0278 \times 80}{300} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} =$$

$$= \frac{0,0278 \times 80}{300} \cdot \frac{1}{3} = 0,0025 \Omega$$

$$X_{CBT} = 0,08 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} \cdot l = 0,08 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{3} \cdot 80 =$$

$$= 0,0021 \Omega$$

$$Z_{CBT} = 0,0025 + j0,0021 \Omega$$

Impedância do Cabo de Média Tensão através da equação 3.45:

$$R_{CMT} = \frac{0,0278 \times 300}{50} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = \frac{0,0278 \times 300}{50} \cdot \frac{1}{1} =$$

$$= 0,1668 \Omega$$

$$X_{CMT} = 0,1940 \times l = 0,1940 \times 0,300 = 0,0582 \Omega$$

$$Z_{CMT} = 0,1668 + j0,0582 \Omega$$

Impedância do Cabo de Alta Tensão seguindo a informação em 3.3:

$$Z_{CAT} = R_{CAT} = 1,7896 \times 0,030 = 0,0537 \Omega$$

Cálculo dos valores em pu:

$$Z_{BaseBT} = \frac{U_{BT}^2}{S_{Base}} = \frac{690^2}{100 \times 10^6} = 0,0048 \Omega$$

$$Z_{BaseMT} = \frac{U_{MT}^2}{S_{Base}} = \frac{30000^2}{100 \times 10^6} = 9 \Omega$$

$$Z_{BaseAT} = \frac{U_{AT}^2}{S_{Base}} = \frac{60000^2}{100 \times 10^6} = 36 \Omega$$

Impedância dos componentes em pu:

$$Z_G(pu) = \frac{Z_G(\Omega)}{Z_{BaseBT}} = \frac{0,00225 + j0,0188}{0,0048} = 0,4688 + j3,9167 pu$$

Nota: nos transformadores a impedância de base a utilizar para se determinar a impedância em pu, deverá ser a correspondente ao nível de tensão que terá sido utilizada para calcular o valor de impedância do transformador em Ω . Neste caso será a de baixa tensão para o transformador BT/MT e média tensão para o transformador de interligação MT/AT.

$$Z_T(pu) = \frac{Z_T(\Omega)}{Z_{BaseBT}} = \frac{0,000246 + j0,0090}{0,0048} = 0,05125 + j1,875 pu$$

$$Z_{TI}(pu) = \frac{Z_{TI}(\Omega)}{Z_{BaseMT}} = \frac{1,550 + j14,310}{9} = 0,1722 + j1,590 pu$$

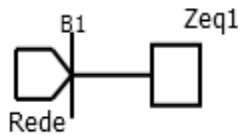
$$Z_Q(pu) = \frac{Z_Q(\Omega)}{Z_{BaseAT}} = \frac{0,16 + j1,57}{36} = 0,0044 + j0,044 pu$$

$$Z_{CBT}(pu) = \frac{Z_{CBT}(\Omega)}{Z_{BaseBT}} = \frac{0,0025 + j0,0021}{0,0048} = 0,5208 + j0,4375 pu$$

$$Z_{CMT}(pu) = \frac{Z_{CMT}(\Omega)}{Z_{BaseMT}} = \frac{0,1668 + j0,0582}{9} = 0,0185 + j0,006 pu$$

$$Z_{CAT}(pu) = \frac{Z_{CAT}(\Omega)}{Z_{BaseAT}} = \frac{0,0537}{36} = 0,0015 pu$$

Somatório das impedâncias entre a rede e o Barramento 1:



Nota sobre a figura: Impedância equivalente até ao Barramento 1.

$$Z_{eq1}(pu) = Z_G(pu) + Z_{CBT}(pu) + Z_T(pu) + Z_{CMT}(pu) + Z_{TI}(pu) + Z_{CAT}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq1}(pu) = 0,4688 + j3,9167 + 0,5208 + j0,4375 + 0,05125 + j1,875 \\ + 0,0185 + j0,006 + 0,1722 + j1,590 + 0,0015 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq1}(pu) = 1,2330 + j7,8252 pu$$

Paralelo de impedâncias:

$$Z_{b1} = Rede || Zeq1 = Z_Q(pu) || Zeq1$$

$$Z_Q(pu) || Zeq1 = \frac{Z_Q(pu) \times Zeq1}{Z_Q(pu) + Zeq1} = \frac{(0,0044 + j0,0440) \times (1,2330 + j7,8252)}{(0,0044 + j0,0440) + (1,2330 + j7,8252)} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_Q(pu) || Zeq1 = 0,0044 + j0,0438 pu$$

$$Z_{b1} = 0,0044 + j0,0438 pu$$

Valor da corrente de curto-circuito máximo no Barramento 1:

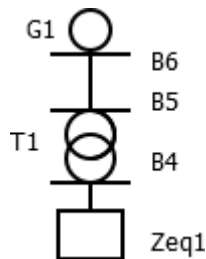
$$I_{ccb1}(pu) = \frac{1}{Z_{b1}} = \frac{1}{0,0044 + j0,0438} = 2,2706 - j22,6029 pu$$

$$|I_{CCb1}|(pu) = \sqrt{2,2706^2 + 22,6029^2} = 22,71 pu$$

$$I_{baseAT} = \frac{c \times U_{AT}}{\sqrt{3} \times Z_{BaseAT}} = \frac{1,1 \times 60000}{\sqrt{3} \times 36} = 1058,48 A$$

$$I_{CCb1} = |I_{CCb1}|(pu) \times I_{baseAT} = 1058,48 \times 22,71 = 24037,98 A$$

Somatório das impedâncias entre a rede e o Barramento 4:

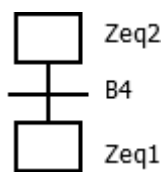


Nota sobre a figura: Impedância Equivalente desde a Rede até ao Barramento 4.

$$Z_{eq1}(pu) = Z_Q(pu) + Z_{CAT}(pu) + Z_{TI}(pu) + Z_{CMT}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq1}(pu) = 0,0044 + j0,044 + 0,0015 + 0,1722 + j1,590 + 0,0185 + j0,006 =$$

$$= 0,1966 + j1,640 pu$$



Nota sobre a figura: Impedância equivalente desde o aerogerador até ao Barramento 4.

$$Z_{eq2}(pu) = Z_G(pu) + Z_{CBT}(pu) + Z_T(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq2}(pu) = 0,4688 + j3,9167 + 0,5208 + j0,4375 + 0,05125 + j1,875 =$$

$$= 1,0409 + j6,2292 pu$$

$$Z_{b4} = Z_{eq1} || Z_{eq2}$$

$$Z_{eq1} || Z_{eq2} = \frac{Z_{eq1} \times Z_{eq2}}{Z_{eq1} + Z_{eq2}} = \frac{(0,1966 + j1,640) \times (1,0409 + j6,2292)}{(0,1966 + j1,640) + (1,0409 + j6,2292)} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b4} = Z_{eq1} || Z_{eq2} = 0,1683 + j1,2987 \text{ pu}$$

Valor da corrente de curto-circuito máximo no Barramento 4:

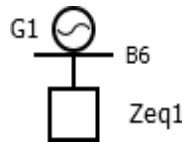
$$I_{CCb4}(\text{pu}) = \frac{1}{Z_{b4}} = \frac{1}{0,1683 + j1,2987} = 0,0981 - j0,7572 \text{ pu}$$

$$|I_{CCb4}|(\text{pu}) = \sqrt{0,0981^2 + 0,7572^2} = 0,7635 \text{ pu}$$

$$I_{baseMT} = \frac{c \times U_{MT}}{\sqrt{3} \times Z_{BaseMT}} = \frac{1,1 \times 30000}{\sqrt{3} \times 9} = 2116,9 \text{ A}$$

$$I_{CCb4} = |I_{CCb4}|(\text{pu}) \times I_{baseMT} = 0,7635 \times 2116,9 = 1616,25 \text{ A}$$

Somatório das impedâncias entre a rede e o Barramento 6:



Nota sobre a figura: Impedância equivalente até ao Barramento 6.

$$Z_{eq1}(\text{pu}) = Z_{CBT}(\text{pu}) + Z_T(\text{pu}) + Z_{CMT}(\text{pu}) + Z_{TI}(\text{pu}) + Z_{CAT}(\text{pu}) + Z_Q(\text{pu}) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq1}(\text{pu}) = 0,5208 + j0,4375 + 0,05125 + j1,875 + 0,0185 + j0,006 + 0,1722$$

$$+ j1,590 + 0,0015 + 0,0044 + j0,044 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq1}(\text{pu}) = 0,7687 + j3,9525 \text{ pu}$$

Paralelo de impedâncias:

$$Z_{b6} = \text{Gerador} || Z_{eq1} = Z_G(\text{pu}) || Z_{eq1}$$

$$Z_G(\text{pu}) || Z_{eq1} = \frac{Z_G(\text{pu}) \times Z_{eq1}}{Z_G(\text{pu}) + Z_{eq1}} = \frac{(0,4688 + j3,9167) \times (0,7687 + j3,9525)}{(0,4688 + j3,9167) + (0,7687 + j3,9525)} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_G(\text{pu}) || Z_{eq1} = 0,3083 + j1,9699 \text{ pu}$$

$$Z_{b6} = 0,3083 + j1,9699 \text{ pu}$$

Valor da corrente de curto-circuito máximo no Barramento 6:

$$I_{CCb6}(pu) = \frac{1}{Z_{b6}} = \frac{1}{0,3083 + j1,9699} = 0,0775 - j0,4955 pu$$

$$|I_{CCb6}|(pu) = \sqrt{0,0775^2 + 0,4955^2} = 0,5015 pu$$

$$I_{baseBT} = \frac{c \times U_{BT}}{\sqrt{3} \times Z_{BaseBT}} = \frac{1,05 \times 690}{\sqrt{3} \times 0,0048} = 87143,81 A$$

$$I_{CCb6} = |I_{CCb6}|(pu) \times I_{baseBT} = 87143,81 \times 0,5015 = 43702,62 A$$

Cálculo da intensidade de corrente de curto-circuito mínima:

Impedância da Rede para o cálculo da corrente de curto-circuito mínima através das equações 3.48, 3.49, 3.50:

$$Z_Q = \frac{1 \cdot 60000^2}{1500 \times 10^6} = 2,40 \Omega$$

$$X_Q = 0,995 \cdot 2,40 = 2,38 \Omega$$

$$R_Q = 0,1 \cdot 2,38 = 0,238 \Omega$$

$$Z_Q = 0,238 + j2,38 \Omega$$

Em pu:

$$Z_Q(pu) = \frac{Z_Q(\Omega)}{Z_{BaseAT}} = \frac{0,238 + j2,38}{36} = 0,0066 + j0,0661 pu$$

Impedância do Cabo de Baixa Tensão para a temperatura máxima de isolamento através das equações 3.45, 3.46, 3.47:

$$\alpha_c = \frac{1}{B + 20} = \frac{1}{228 + 20} = 0,0040$$

$$\begin{aligned} \rho_{250^\circ C} &= [1 + \alpha_c \times (\theta_f - 20)] \times \rho_{20^\circ C} = [1 + 0,004 \times (250 - 20)] \times 0,0278 = \\ &= 0,0534 \Omega mm^2 / m \end{aligned}$$

$$R_{CBT} = \frac{\rho_{\theta_{250^\circ C}} \times 80}{300} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} =$$

$$= \frac{0,0534 \times 80}{300} \cdot \frac{1}{3} = 0,0047 \Omega$$

$$X_{CBT} = 0,08 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} \cdot l = 0,08 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{3} \cdot 80 =$$

$$= 0,0021 \Omega$$

$$Z_{CBT} = 0,0047 + j0,0021 \Omega$$

Em pu:

$$Z_{CBT}(pu) = \frac{Z_{CBT}(\Omega)}{Z_{BaseBT}} = \frac{0,0047 + j0,0021}{0,0048} = 0,9791 + j0,4375 pu$$

Impedância do Cabo de Baixa Média para a temperatura máxima de isolamento através das equações 3.45, 3.46, 3.47:

Sendo o isolamento do cabo de média tensão, idêntico aos cabos de baixa tensão, bem como o tipo de material condutor, então os valores de ρ são para as mesmas temperaturas iniciais e finais. E detêm os mesmos valores para cada temperatura.

$$R_{CMT} = \frac{0,0534 \times 300}{50} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = \frac{0,0534 \times 300}{50} \cdot \frac{1}{1} =$$

$$= 0,3204 \Omega$$

$$X_{CMT} = 0,1940 \times l = 0,1940 \times 0,300 = 0,0582 \Omega$$

$$Z_{CMT} = 0,3204 + j0,0582 \Omega$$

Em pu:

$$Z_{CMT}(pu) = \frac{Z_{CMT}(\Omega)}{Z_{BaseMT}} = \frac{0,3204 + j0,0582}{9} = 0,0356 + j0,006 pu$$

Equivalente de impedâncias para o posterior cálculo da corrente curto-circuito mínima no Barramento 1:

$$Z_{eq1}(pu) = Z_{CAT}(pu) + Z_{TI}(pu) + Z_{CMT}(pu) + Z_T(pu) + Z_{CBT}(pu) + Z_G(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq1}(pu) = 0,0015 + 0,1722 + j1,59 + 0,0356 + j0,006 + 0,05125 + j1,875$$

$$+ 0,9791 + j0,4375 + 0,4688 + j3,9167 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq1}(pu) = 1,7085 + j7,8252 pu$$

Paralelo de impedâncias:

$$Z_{b1} = Rede || Z_{eq1} = Z_Q(pu) || Z_{eq1}$$

$$Z_Q(pu) || Z_{eq1} = \frac{Z_Q(pu) \times Z_{eq1}}{Z_Q(pu) + Z_{eq1}} = \frac{(0,0066 + j0,0661) \times (1,7085 + j7,8252)}{(0,0066 + j0,0661) + (1,7085 + j7,8252)} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_Q(pu) || Z_{eq1} = 0,0066 + j0,0655 pu$$

$$Z_{b1} = 0,0066 + j0,0655 pu$$

Valor da corrente de curto-circuito mínimo no Barramento 1:

$$I_{CCb1min}(pu) = \frac{1}{Z_{b1}} = \frac{1}{0,0066 + j0,0655} = 1,5223 - j15,101 pu$$

$$|I_{CCb1min}|(pu) = \sqrt{1,5223^2 + 15,101^2} = 15,17 pu$$

$$I_{baseATmin} = \frac{c \times U_{AT}}{2 \times Z_{BaseAT}} = \frac{1 \times 60000}{2 \times 36} = 833,33 A$$

$$I_{CCb1min}(A) = I_{baseATmin} \times |I_{CCb1min}|(pu) = 833,33 \times 15,17 = 12641,61 A$$

Equivalente de impedâncias para o posterior cálculo da corrente curto-circuito mínima no Barramento 4:

$$Z_{eq1}(pu) = Z_Q(pu) + Z_{CAT}(pu) + Z_{TI}(pu) + Z_{CMT}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq1}(pu) = 0,0066 + j0,0661 + 0,0015 + 0,1722 + j1,59 + 0,0356 + j0,006 = \\ = 0,2165 + j1,6687 pu$$

$$Z_{eq2}(pu) = Z_G(pu) + Z_{CBT}(pu) + Z_T(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq2}(pu) = 0,4688 + j3,9167 + 0,9791 + j0,4375 + 0,05125 + j1,875 = \\ = 1,4992 + j6,2292 pu$$

Paralelo de impedâncias:

$$Z_{eq1} || Z_{eq2} = \frac{Z_{eq1} \times Z_{eq2}}{Z_{eq1} + Z_{eq2}} = \frac{(0,2165 + j1,6687) \times (1,4992 + j6,2292)}{(0,2165 + j1,6687) + (1,4992 + j6,2292)} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b4} = Z_{eq1} || Z_{eq2} = 0,2010 + j1,3187 pu$$

Valor da corrente de curto-circuito mínimo no Barramento 4:

$$I_{CCb4mín}(pu) = \frac{1}{Zb4} = \frac{1}{0,2010 + j1,3187} = 0,1130 - j0,7411 pu$$

$$|I_{CCb4mín}|(pu) = \sqrt{0,1130^2 + 0,7411^2} = 0,7497 pu$$

$$I_{baseMTmín} = \frac{c \times U_{MT}}{2 \times Z_{BaseMT}} = \frac{1 \times 30000}{2 \times 9} = 1666,6 A$$

$$I_{CCb4mín}(A) = |I_{CCb4mín}|(pu) \times I_{baseMTmín} = 0,7497 \times 1666,6 = 1249,45 A$$

Equivalente de impedâncias para o posterior cálculo da corrente curto-circuito mínima no Barramento 6:

$$Zeq1(pu) = Z_{CBT}(pu) + Z_T(pu) + Z_{CMT}(pu) + Z_{TI}(pu) + Z_{CAT}(pu) + Z_Q(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Zeq1(pu) = 0,9791 + j0,4375 + 0,05125 + j1,875 + 0,0356 + j0,006 + 0,1722 + j1,590 + 0,0015 + 0,0072 + j0,0727 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Zeq1(pu) = 1,2469 + j3,9812 pu$$

Paralelo de impedâncias:

$$Zb6 = Gerador || Zeq1 = Z_G(pu) || Zeq1$$

$$Z_G(pu) || Zeq1 = \frac{Z_G(pu) \times Zeq1}{Z_G(pu) + Zeq1} = \frac{(0,4688 + j3,9167) \times (1,2469 + j3,9812)}{(0,4688 + j3,9167) + (1,2469 + j3,9812)} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_G(pu) || Zeq1 = 0,4257 + j2,010 pu$$

$$Zb6 = 0,4257 + j2,010 pu$$

Valor da corrente de curto-circuito mínimo no Barramento 6:

$$I_{CCb6mín}(pu) = \frac{1}{Zb6} = \frac{1}{0,4257 + j2,010} = 0,1008 - j0,4761 pu$$

$$|I_{CCb6mín}|(pu) = \sqrt{0,1008^2 + 0,4761^2} = 0,4866 pu$$

$$I_{baseBTmín} = \frac{c \times U_{BT}}{\sqrt{3} \times Z_{BaseBT}} = \frac{0,95 \times 690}{2 \times 0,0048} = 68281,25 A$$

$$I_{CCb6mín} = |I_{CCb6mín}|(pu) \times I_{baseBTmín} = 0,4866 \times 68281,25 = 33232,48 A$$

Apêndice 2 – Cálculos do Caso de Estudo 2

Apêndice 2

Cálculo da intensidade de corrente de curto-circuito máxima:

Impedância do Aerogerador através das equações 3.34, 3.35, 3.36:

$$X'_d = \frac{690^2}{3,036 \times 10^6} \cdot \frac{12}{100} = 0,0188 \Omega$$

$$R_G = 0,12 \cdot 0,0188 = 0,00225 \Omega$$

$$Z_G = 0,00225 + j0,0188 \Omega$$

Impedância do Transformador BT/MT através das equações 3.39, 3.40, 3.41:

$$Z_T = \frac{690^2}{3,15 \times 10^6} \cdot \frac{6}{100} = 0,009069 \Omega$$

$$I_{rT} = \frac{S_{rT}}{\sqrt{3} \cdot U_{rT}} = \frac{3,15 \times 10^6}{\sqrt{3} \cdot 690} = 2636 A$$

$$R_T = \frac{5140}{3 \cdot 2636^2} = 0,000246 \Omega$$

$$X_T = \sqrt{0,009069^2 - 0,000246^2} = 0,0090 \Omega$$

$$Z_T = 0,000246 + j0,0090 \Omega$$

Impedância do Transformador de interligação MT/AT através das equações 3.39, 3.40, 3.41:

$$Z_{TI} = \frac{20000^2}{15,0 \times 10^6} \cdot \frac{18}{100} = 4,80 \Omega$$

$$I_{rT} = \frac{S_{rT}}{\sqrt{3} \cdot U_{rT}} = \frac{15,0 \times 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20000} = 433,01 A$$

$$R_T = \frac{120000}{3 \cdot 433,01^2} = 0,21 \Omega$$

$$X_{TI} = \sqrt{4,80^2 - 0,21^2} = 4,79 \Omega$$

$$Z_{TI} = 0,21 + j4,79 \Omega$$

Impedância da Rede através das equações 3.48, 3.49, 3.50:

$$Z_Q = \frac{1,1 \cdot 60000^2}{2500 \times 10^6} = 1,58 \Omega$$

$$X_Q = 0,995 \cdot 1,58 = 1,57 \Omega$$

$$R_Q = 0,1 \cdot 1,57 = 0,16 \Omega$$

$$Z_Q = 0,16 + j1,57 \Omega$$

Impedância do Cabo de Baixa Tensão através da equação 3.45:

$$R_{CBT} = \frac{0,0278 \times 80}{300} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} =$$
$$= \frac{0,0278 \times 80}{300} \cdot \frac{1}{3} = 0,0025 \Omega$$

$$X_{CBT} = 0,08 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} \cdot l = 0,08 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{3} \cdot 80 =$$
$$= 0,0021 \Omega$$

$$Z_{CBT} = 0,0025 + j0,0021 \Omega$$

Impedância do Cabo de Média Tensão de 70 mm² através da equação 3.45:

$$R_{CMT} = \frac{0,0173 \times 300}{70} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = \frac{0,0173 \times 300}{70} \cdot \frac{1}{1} =$$
$$= 0,0741 \Omega$$

$$X_{CMT} = 0,220 \times l = 0,220 \times 0,300 = 0,066 \Omega$$

$$Z_{CMT} = 0,0741 + j0,066 \Omega$$

Impedância do Cabo de Média Tensão de 70 mm² em B4-B3 da equação 3.45:

$$R_{CMT} = \frac{0,0173 \times 30}{70} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = \frac{0,0173 \times 30}{70} \cdot \frac{1}{2} =$$
$$= 0,00371 \Omega$$

$$X_{CMT} = 0,220 \cdot l \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = 0,220 \times 0,030 \times \frac{1}{2} = 0,0033 \Omega$$

$$Z_{CMT} = 0,0371 + j0,00330 \Omega$$

Impedância do Cabo de Alta Tensão seguindo a informação em 3.3 :

$$Z_{CAT} = R_{CAT} = 1,7896 \times 0,030 = 0,0537 \Omega$$

Cálculo dos valores em pu:

$$Z_{BaseBT} = \frac{U_{BT}^2}{S_{Base}} = \frac{690^2}{100 \times 10^6} = 0,0048 \Omega$$

$$Z_{BaseMT} = \frac{U_{MT}^2}{S_{Base}} = \frac{20000^2}{100 \times 10^6} = 4 \Omega$$

$$Z_{BaseAT} = \frac{U_{AT}^2}{S_{Base}} = \frac{60000^2}{100 \times 10^6} = 36 \Omega$$

Impedância dos componentes em pu:

$$Z_G(pu) = \frac{Z_G(\Omega)}{Z_{BaseBT}} = \frac{0,00225 + j0,0188}{0,0048} = 0,4688 + j3,9167 pu$$

Nota: nos transformadores a impedância de base a utilizar para se determinar a impedância em pu, deverá ser a correspondente ao nível de tensão que terá sido utilizada para calcular o valor de impedância do transformador em Ω . Neste caso será a de baixa tensão para o transformador BT/MT e média tensão para o transformador de interligação MT/AT.

$$Z_T(pu) = \frac{Z_T(\Omega)}{Z_{BaseBT}} = \frac{0,000246 + j0,0090}{0,0048} = 0,05125 + j1,875 pu$$

$$Z_{TI}(pu) = \frac{Z_{TI}(\Omega)}{Z_{BaseMT}} = \frac{0,21 + j4,79}{4} = 0,0525 + j1,1975 pu$$

$$Z_Q(pu) = \frac{Z_Q(\Omega)}{Z_{BaseAT}} = \frac{0,16 + j1,57}{36} = 0,0044 + j0,044 pu$$

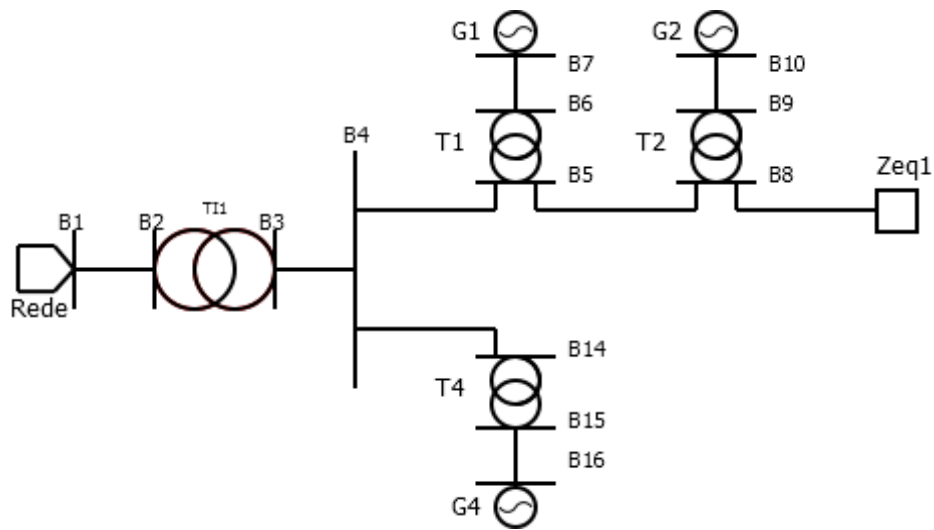
$$Z_{CBT}(pu) = \frac{Z_{CBT}(\Omega)}{Z_{BaseBT}} = \frac{0,0025 + j0,0021}{0,0048} = 0,5208 + j0,4375 pu$$

$$Z_{CMT}(pu) = \frac{Z_{CMT}(\Omega)}{Z_{BaseMT}} = \frac{0,0741 + j0,066}{4} = 0,0185 + j0,0165 pu$$

$$Z_{CMT(B4-B3)}(pu) = \frac{Z_{CMT}(\Omega)}{Z_{BaseMT}} = \frac{0,00371 + j0,0033}{4} = 0,0009 + j0,0008 pu$$

$$Z_{CAT}(pu) = \frac{Z_{CAT}(\Omega)}{Z_{BaseAT}} = \frac{0,0537}{36} = 0,0015 pu$$

Cálculo da Impedância equivalente no Barramento 1:

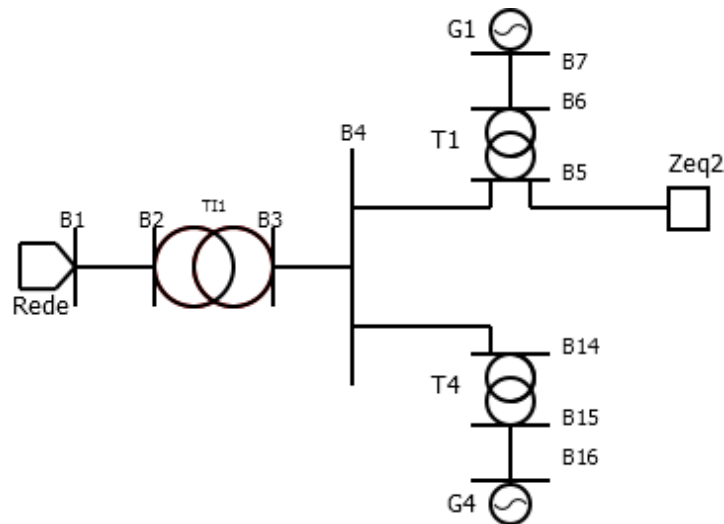


Nota sobre a figura: Impedância Equivalente entre aerogerador cabo BT e transformador BT/MT.

$$Z_{eq1}(pu) = Z_G(pu) + Z_{CBT}(pu) + Z_T(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq1}(pu) = 0,4688 + j3,9167 + 0,5208 + j0,4375 + 0,05125 + j1,875 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq1}(pu) = 1,0410 + j6,2292 pu$$

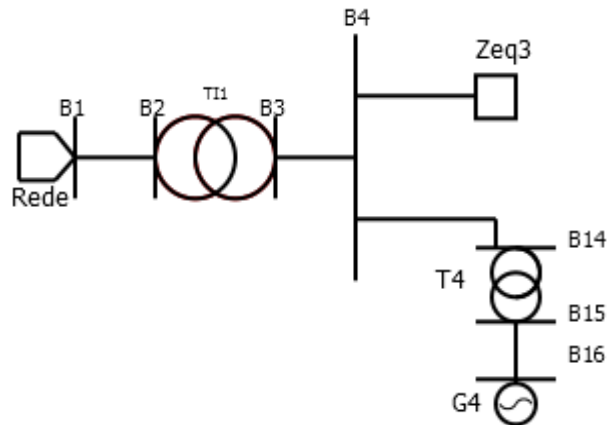


Nota sobre a figura: Impedância Equivalente entre Zeq1 e o grupo seguinte aerogerador cabo BT e Transformador BT/MT.

$$\Leftrightarrow Z_{eq2}(pu) = (Z_{eq1}(pu) + Z_{CMT}(pu)) || Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq2}(pu) = \frac{(1,0410 + j6,2292 + 0,0185 + j0,0165) \cdot (1,0410 + j6,2292)}{1,0410 + j6,2292 + 0,0185 + j0,0165 + 1,0410 + j6,2292} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq2}(pu) = 0,5251 + j3,1187 pu$$

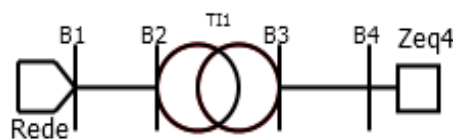


Nota sobre a figura: Impedância Equivalente entre Zeq2 e o grupo seguinte aerogerador cabo BT e Transformador BT/MT.

$$\Leftrightarrow Z_{eq3}(pu) = (Z_{eq2}(pu) + Z_{CMT}(pu)) || Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq3}(pu) = \frac{(0,5251 + j3,1187 + 0,0185 + j0,0165) \cdot (1,0410 + j6,2292)}{0,5251 + j3,1187 + 0,0185 + j0,0165 + 1,0410 + j6,2292} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq3}(pu) = 0,3572 + j2,0855 pu$$



Nota sobre a figura: Impedância Equivalente Zq3 e o restante grupo aerogerador cabo BT e Transformador BT/MT.

$$\Leftrightarrow Z_{eq4}(pu) = (Z_{eq3}(pu) + Z_{CMT}(pu)) || (Z_{eq1}(pu) + Z_{CMT}(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq4}(pu) = \frac{(0,3572 + j2,0855 + 0,0185 + j0,0165) \cdot (1,0410 + j6,2292 + 0,0185 + j0,0165)}{0,3572 + j2,0855 + 0,0185 + j0,0165 + 1,0410 + j6,2292 + 0,0185 + j0,0165}$$

\Leftrightarrow

$$\Leftrightarrow Z_{eq4}(pu) = 0,2774 + j1,5727 pu$$

$$Z_{b1}(pu) = (Z_{eq4}(pu) + Z_{CMT(B4-B3)}(pu) + Z_{TI}(pu) + Z_{AT}(pu)) || Z_Q(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b1}(pu) = (0,2774 + j1,5727 + 0,0009 + j0,0008 + 0,0525 + j1,1975 + 0,0015) || (0,0044 + j0,044) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b1}(pu) = (0,3323 + j2,7710) || (0,0044 + j0,044) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b1}(pu) = 0,0043 + j0,0433 pu$$

Valor da corrente de curto-circuito máximo no Barramento 1:

$$I_{ccb1}(pu) = \frac{1}{Z_{b1}} = \frac{1}{0,0043 + j0,0433} = 2,27 - j22,86 pu$$

$$|I_{ccb1}|(pu) = \sqrt{2,27^2 + 22,86^2} = 22,97 pu$$

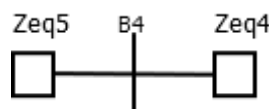
$$I_{baseAT} = \frac{c \times U_{AT}}{\sqrt{3} \times Z_{BaseAT}} = \frac{1,1 \times 60000}{\sqrt{3} \times 36} = 1058,48 A$$

$$I_{ccb1} = |I_{ccb1}|(pu) \times I_{baseAT} = 1058,48 \times 22,97 = 24313,29 A$$

Cálculo da Impedância equivalente no Barramento 4:

Iniciando o cálculo após o esquema da rede da Figura 61, em que,

$$Z_{eq4}(pu) = 0,2774 + j1,5727 pu$$



Nota sobre a figura: Impedância equivalente entre a rede e o Barramento 4 e desde os aerogeradores até ao Barramento 4.

$$Z_{eq5}(pu) = Z_Q(pu) + Z_{AT}(pu) + Z_{T1}(pu) + Z_{CMT(B4-B3)}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq5}(pu) = 0,0044 + j0,044 + 0,0015 + 0,0525 + j1,1975 + 0,0009$$

$$+ j0,0008 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq5}(pu) = 0,0677 + j1,2423 pu$$

$$Z_{b4}(pu) = Z_{eq5}(pu) || Z_{eq4}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b4}(pu) = \frac{(0,0677 + j1,2423) \cdot (0,2774 + j1,5727)}{0,0677 + j1,2423 + 0,2774 + j1,5727} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b4}(pu) = 0,0749 + j0,6966 pu$$

Valor da corrente de curto-circuito máximo no Barramento 4:

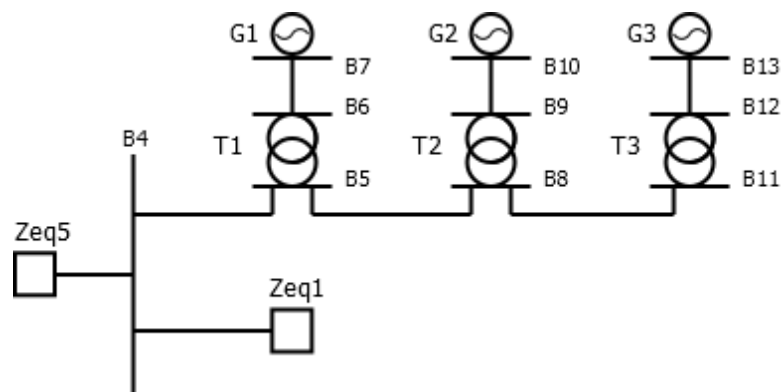
$$I_{CCb4}(pu) = \frac{1}{Z_{b4}} = \frac{1}{0,0749 + j0,6966} = 0,1526 + j1,4191 pu$$

$$|I_{CCb4}|(pu) = \sqrt{0,1526^2 + 1,4191^2} = 1,4273 pu$$

$$I_{baseMT} = \frac{c \times U_{MT}}{\sqrt{3} \times Z_{BaseMT}} = \frac{1,1 \times 20000}{\sqrt{3} \times 4} = 3175,42 A$$

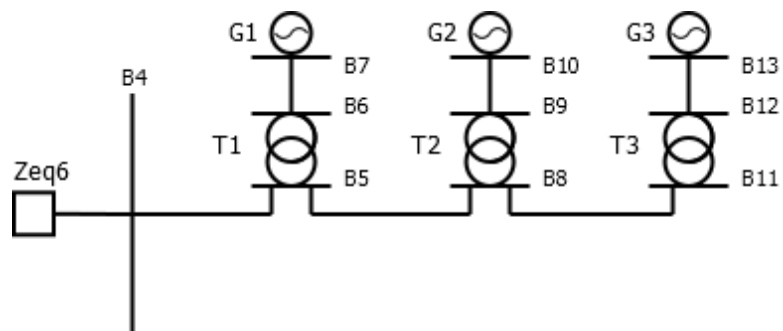
$$I_{CCb4} = |I_{CCb4}|(pu) \times I_{baseMT} = 3175,42 \times 1,4273 = 4532,27 A$$

Cálculo da Impedância equivalente no Barramento 13:



Nota sobre a figura: Impedância equivalente entre a rede e o Barramento 4 e impedância equivalente do aerogerador 4 até este.

Assumindo o Z_{eq5} e Z_{eq1} dos cálculos efetuados anteriormente,

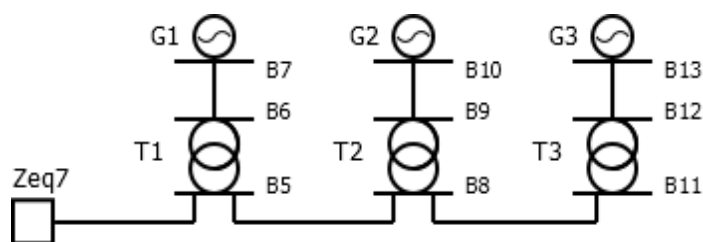


Nota sobre a figura: Impedância equivalente entre Z_{eq5} e Z_{eq1} .

$$Z_{eq6}(pu) = Z_{eq5}(pu) \parallel (Z_{eq1}(pu) + Z_{CMT}(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq6}(pu) = \frac{(0,0677 + j1,2423) \cdot (1,0410 + j6,2292 + 0,0185 + j0,0165)}{0,0677 + j1,2423 + 1,0410 + j6,2292 + 0,0185 + j0,0165} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq6}(pu) = 0,0759 + j1,0380 pu$$

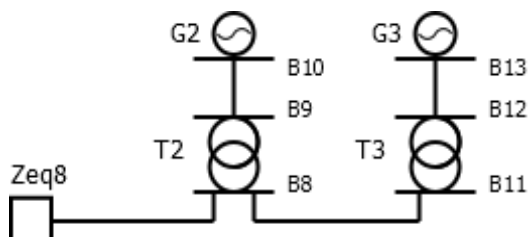


Nota sobre a figura: Impedância equivalente entre Z_{eq5} e Z_{eq1} .

$$Z_{eq7}(pu) = Z_{eq6}(pu) + Z_{CMT}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq7}(pu) = 0,0759 + j1,0380 + 0,0185 + j0,0165 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq7}(pu) = 0,0944 + j1,0545 pu$$

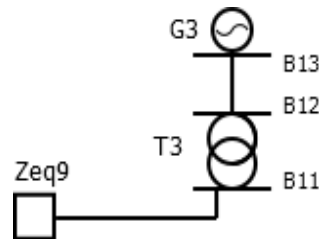


Nota sobre a figura: Impedância equivalente Z_{eq8} .

$$Z_{eq8}(pu) = (Z_{eq7}(pu) || Z_{eq1}(pu)) + Z_{CMT}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq8}(pu) = \frac{(0,0944 + j1,0545) \cdot (1,0410 + j6,2292)}{0,0944 + j1,0545 + 1,0410 + j6,2292} + 0,0185 + j0,0165 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq8}(pu) = 0,1093 + j0,9189 pu$$

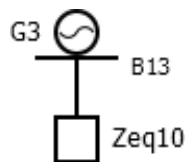


Nota sobre a figura: Impedância equivalente Zeq9.

$$Z_{eq9}(pu) = (Z_{eq8}(pu) || Z_{eq1}(pu)) + Z_{CMT}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq9}(pu) = \frac{(0,1093 + j0,9189) \cdot (1,0410 + j6,2292)}{0,1093 + j0,9189 + 1,0410 + j6,2292} + 0,0185 + j0,0165 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq9}(pu) = 0,1187 + j0,8175 pu$$



Nota sobre a figura: Impedância equivalente Zeq10.

$$Z_{eq10}(pu) = Z_{eq9}(pu) + Z_T(pu) + Z_{BT}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq10}(pu) = 0,1187 + j0,8175 + 0,05125 + j1,875 + 0,5208 +$$

$$j0,4375 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq10}(pu) = 0,6908 + j3,130 pu$$

$$Z_{b13}(pu) = Z_G(pu) || Z_{eq10} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b13}(pu) = \frac{(0,4688 + j3,9167) \cdot (0,6908 + j3,130)}{0,4688 + j3,9167 + 0,6908 + j3,130} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b13}(pu) = 0,3052 + j1,7439 pu$$

Valor da corrente de curto-circuito máximo no Barramento 13:

$$I_{CCb13}(pu) = \frac{1}{Z_{b13}} = \frac{1}{0,3052 + j1,7439} = 0,0974 - j0,5564 pu$$

$$|I_{CCb13}|(pu) = \sqrt{0,0974^2 + 0,5564^2} = 0,5649 pu$$

$$I_{baseBT} = \frac{c \times U_{BT}}{\sqrt{3} \times Z_{BaseBT}} = \frac{1,05 \times 690}{\sqrt{3} \times 0,0048} = 87143,81 A$$

$$I_{CCb13} = |I_{CCb13}|(pu) \times I_{baseBT} = 87143,81 \times 0,5649 = 49227,54 A$$

Cálculo da intensidade de corrente de curto-circuito mínima:

Impedância da Rede para o cálculo da corrente de curto-circuito mínima através das equações 3.48, 3.49, 3.50:

$$Z_Q = \frac{1 \cdot 60000^2}{1500 \times 10^6} = 2,40 \Omega$$

$$X_Q = 0,995 \cdot 2,40 = 2,38 \Omega$$

$$R_Q = 0,1 \cdot 2,38 = 0,238 \Omega$$

$$Z_Q = 0,238 + j2,38 \Omega$$

Em pu:

$$Z_Q(pu) = \frac{Z_Q(\Omega)}{Z_{BaseAT}} = \frac{0,238 + j2,38}{36} = 0,0066 + j0,0661 pu$$

Impedância do Cabo de Baixa Tensão para a temperatura máxima de isolamento através das equações 3.45, 3.46, 3.47:

$$\alpha_c = \frac{1}{B + 20} = \frac{1}{228 + 20} = 0,0040$$

$$\rho_{250^\circ C} = [1 + \alpha_c \times (\theta_f - 20)] \times \rho_{20^\circ C} = [1 + 0,004 \times (250 - 20)] \times 0,0278 =$$

$$= 0,0534 \Omega \text{mm}^2 / \text{m}$$

$$R_{CBT} = \frac{\rho_{\theta_{250^\circ\text{C}}} \times 80}{300} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} =$$

$$= \frac{0,0534 \times 80}{300} \cdot \frac{1}{3} = 0,0047 \Omega$$

$$X_{CBT} = 0,08 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} \cdot l = 0,08 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{3} \cdot 80 =$$

$$= 0,0021 \Omega$$

$$Z_{CBT} = 0,0047 + j0,0021 \Omega$$

Em pu:

$$Z_{CBT}(pu) = \frac{Z_{CBT}(\Omega)}{Z_{BaseBT}} = \frac{0,0047 + j0,0021}{0,0048} = 0,9791 + j0,4375 pu$$

Impedância do Cabo de Média de 70 mm² do parque eólico, para a temperatura máxima de isolamento através das equações 3.45, 3.46, 3.47:

$$\alpha_c = \frac{1}{B + 20} = \frac{1}{234,5 + 20} = 0,0039$$

$$\rho_{250^\circ\text{C}} = [1 + \alpha_c \times (\theta_f - 20)] \times \rho_{20^\circ\text{C}} = [1 + 0,0039 \times (250 - 20)] \times 0,0173 =$$

$$= 0,0328 \Omega \text{mm}^2 / \text{m}$$

$$R_{CMT} = \frac{0,0328 \times 300}{70} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = \frac{0,0328 \times 300}{70} \cdot \frac{1}{1} =$$

$$= 0,1406 \Omega$$

$$X_{CMT} = 0,1940 \cdot l \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} =$$

$$= 0,220 \times 0,300 \times \frac{1}{1} = 0,066 \Omega$$

$$Z_{CMT} = 0,1406 + j0,066 \Omega$$

Em pu:

$$Z_{CMT}(pu) = \frac{Z_{CMT}(\Omega)}{Z_{BaseMT}} = \frac{0,1406 + j0,066}{4} = 0,0352 + j0,0165 pu$$

Impedância do Cabo de Baixa Média de 70 mm² da subestação, para a temperatura máxima de isolamento através das equações 3.45, 3.46, 3.47:

$$\alpha_c = \frac{1}{B + 20} = \frac{1}{234,5 + 20} = 0,0039$$

$$\begin{aligned} \rho_{250^\circ\text{C}} &= [1 + \alpha_c \times (\theta_f - 20)] \times \rho_{20^\circ\text{C}} = [1 + 0,0039 \times (250 - 20)] \times 0,0173 = \\ &= 0,0328 \Omega\text{mm}^2/\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{CMT(B4-B3)} &= \frac{0,0328 \times 30}{70} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = \frac{0,0328 \times 30}{70} \cdot \frac{1}{2} = \\ &= 0,0070 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{CMT(B4-B3)} &= 0,1940 \cdot l \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = \\ &= 0,220 \times 0,030 \times \frac{1}{2} = 0,0033 \Omega \end{aligned}$$

$$Z_{CMT(B4-B3)} = 0,1406 + j0,0033 \Omega$$

Em pu:

$$Z_{CMT(B4-B3)}(pu) = \frac{Z_{CMT(B4-B3)}(\Omega)}{Z_{BaseMT}} = \frac{0,0070 + j0,0033}{4} = 0,0018 + j0,0008 pu$$

Equivalente de impedâncias para o posterior cálculo da corrente curto-circuito mínima no Barramento 1, tendo por base as figuras utilizadas para o cálculo do valor da corrente de curto-circuito máximo:

$$Zeq1(pu) = Z_G(pu) + Z_{CBT}(pu) + Z_T(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Zeq1(pu) = 0,4688 + j3,9167 + 0,9791 + j0,4375 + 0,05125 + j1,875 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Zeq1(pu) = 1,4992 + j6,2292 pu$$

$$\Leftrightarrow Zeq2(pu) = (Zeq1(pu) + Z_{CMT}(pu)) || Zeq1(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Zeq2(pu) = \frac{(1,4992 + j6,2292 + 0,0352 + j0,0165) \cdot (1,4992 + j6,2292)}{1,4992 + j6,2292 + 0,0352 + j0,0165 + 1,4992 + j6,2292} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq2}(pu) = 0,7584 + j3,1187 pu$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq3}(pu) = (Z_{eq2}(pu) + Z_{CMT}(pu)) || Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq3}(pu) = \frac{(0,7584 + j3,1187 + 0,0352 + j0,0165) \cdot (1,4992 + j6,2292)}{0,7584 + j3,1187 + 0,0352 + j0,0165 + 1,4992 + j6,2292} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq3}(pu) = 0,5191 + j2,0856 pu$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq4}(pu) = (Z_{eq3}(pu) + Z_{CMT}(pu)) || (Z_{eq1}(pu) + Z_{CMT}(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq4}(pu) =$$

$$= \frac{(0,5191 + j2,0856 + 0,0352 + j0,0165) \cdot (1,4992 + j6,2292 + 0,0352 + j0,0165)}{0,5191 + j2,0856 + 0,0352 + j0,0165 + 1,4992 + j6,2292 + 0,0352 + j0,0165}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq4}(pu) = 0,4076 + j1,5728 pu$$

$$Z_{b1}(pu) = (Z_{eq4}(pu) + Z_{CMT(B4-B3)}(pu) + Z_{TI}(pu) + Z_{AT}(pu)) || Z_Q(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b1}(pu) = (0,4076 + j1,5728 + 0,0018 + j0,0008 + 0,0525 + j1,1975 + 0,0015) || (0,0066 + j0,0661) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b1}(pu) = (0,4634 + j2,7711) || (0,0066 + j0,0661) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b1}(pu) = 0,0065 + j0,0646 pu$$

$$I_{CCb1min}(pu) = \frac{1}{Z_{b1}} = \frac{1}{0,0065 + j0,0646} = 1,55 - j15,33 pu$$

$$|I_{CCb1min}|(pu) = \sqrt{1,55^2 + 15,33^2} = 15,41 pu$$

$$I_{baseATmin} = \frac{c \times U_{AT}}{2 \times Z_{BaseAT}} = \frac{1 \times 60000}{2 \times 36} = 833,33 A$$

$$I_{CCb1min}(A) = I_{baseATmin} \times |I_{CCb1}|(pu) = 833,33 \times 15,41 = 12841,62 A$$

Equivalente de impedâncias para o posterior cálculo da corrente curto-circuito mínima no Barramento 4:

$$Z_{eq5}(pu) = Z_Q(pu) + Z_{AT}(pu) + Z_{TI}(pu) + Z_{CMT(B4-B3)}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq5}(pu) = 0,0066 + j0,0661 + 0,0015 + 0,0525 + j1,1975 + 0,0018 + j0,0008 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq5}(pu) = 0,0630 + j1,2710 pu$$

$$Z_{b4}(pu) = Z_{eq5}(pu) || Z_{eq4}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b4}(pu) = \frac{(0,0630 + j1,2710) \cdot (0,4076 + j1,5728)}{0,0630 + j1,2710 + 0,4076 + j1,5728} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b4}(pu) = 0,0995 + j0,7104 pu$$

Valor da corrente de curto-circuito mínimo no Barramento 4:

$$I_{CCb4min}(pu) = \frac{1}{Z_{b4}} = \frac{1}{0,0995 + j0,7104} = 0,1934 - j1,3806 pu$$

$$|I_{CCb4min}|(pu) = \sqrt{0,1934^2 + 1,3806^2} = 1,3940 pu$$

$$I_{baseMTmin} = \frac{c \times U_{MT}}{2 \times Z_{BaseMT}} = \frac{1 \times 20000}{2 \times 4} = 2500 A$$

$$I_{CCb4min} = I_{baseMTmin} \times |I_{CCb4min}|(pu) = 2500 \times 1,3940 = 3485 A$$

Cálculo da Impedância equivalente no Barramento 13:

$$Z_{eq6}(pu) = Z_{eq5}(pu) || (Z_{eq1}(pu) + Z_{CMT}(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq6}(pu) = \frac{(0,0630 + j1,2710) \cdot (1,4992 + j6,2292 + 0,0352 + j0,0165)}{0,0630 + j1,2710 + 1,4992 + j6,2292 + 0,0352 + j0,0165} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq6}(pu) = 0,0862 + j1,0615 pu$$

$$Z_{eq7}(pu) = Z_{eq6}(pu) + Z_{CMT}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq7}(pu) = 0,0862 + j1,0615 + 0,0352 + j0,0165 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq7}(pu) = 0,1214 + j1,078 pu$$

$$Z_{eq8}(pu) = (Z_{eq7}(pu) || Z_{eq1}(pu)) + Z_{CMT}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq8}(pu) = \frac{(0,1214 + j1,078) \cdot (1,4992 + j6,2292)}{0,1214 + j1,078 + 1,4992 + j6,2292} + 0,0352 + j0,0165 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq8}(pu) = 0,1557 + j0,9372 pu$$

$$Z_{eq9}(pu) = (Z_{eq8}(pu) || Z_{eq1}(pu)) + Z_{CMT}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq9}(pu) = \frac{(0,1557 + j0,9372 \cdot (1,4992 + j6,2292))}{0,1557 + j0,9372 + 1,4992 + j6,2292} + 0,0352 + j0,0165 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq9}(pu) = 0,1784 + j0,8316 pu$$

$$Z_{eq10}(pu) = Z_{eq9}(pu) + Z_T(pu) + Z_{BT}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq10}(pu) = 0,1784 + j0,8316 + 0,05125 + j1,875 + 0,9791 + j0,4375 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq10}(pu) = 1,2088 + j3,1441 pu$$

$$Z_{b13}(pu) = Z_G(pu) || Z_{eq10} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b13}(pu) = \frac{(0,4688 + j3,9167) \cdot (1,2088 + j3,1441)}{0,4688 + j3,9167 + 1,2088 + j3,1441} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b13}(pu) = 0,4581 + j1,7727 pu$$

Valor da corrente de curto-circuito mínimo no Barramento 13:

$$I_{ccb13\min}(pu) = \frac{1}{Z_{b13}} = \frac{1}{0,4581 + j1,7727} = 0,1367 - j0,5288 pu$$

$$|I_{ccb13\min}|(pu) = \sqrt{0,1367^2 + 0,5288^2} = 0,5461 pu$$

$$I_{baseBT\min} = \frac{c \times U_{BT}}{\sqrt{3} \times Z_{BaseBT}} = \frac{0,95 \times 690}{2 \times 0,0048} = 68281,25 A$$

$$I_{ccb13\min} = I_{baseBT\min} \times |I_{ccb13\min}|(pu) = 68281,25 \times 0,5461 = 37288,39 A$$

Apêndice 3 – Dados sobre a Rede do Caso de Estudo 3

Apêndice 3

Dados da rede do Caso de Estudo 3:

Tabela Ap. 1 - Dados Aerogerador Caso do estudo 3.

Aerogerador (G1, ..., G14)	
Tensão Nominal [V]	690
Potência Aparente (S_G) [MVA]	3,036
Reatância Transitória (x'_d) [%]	12

Tabela Ap. 2- Dados Transformador BT/MT do Caso de estudo 3.

Transformador BT/MT (T1, ..., T14)	
Tensão Nominal [V]	690/20000
Potência Aparente (S_rT) [MVA]	3,150
Tensão de Curto-circuito (u_{kr}) [%]	6
Perdas em Carga (P_{krT}) [W]	5140

Tabela Ap. 3- Dados Transformador MT/AT Caso de estudo 3.

Transformador MT/AT (TI1 e TI2)	
Tensão Nominal [V]	20000/60000
Potência Aparente (S_rT) [MVA]	20
Tensão de Curto-Circuito (u_{kr})[%]	20
Perdas em Carga (P_{krT}) [W]	130000

Tabela Ap. 4 - Dados da Rede Caso de estudo 3.

Rede	
Tensão Nominal [V]	60000
Potência Curto-Circuito Máxima (SkQ Máx) [MVA]	2500
Potência de Curto-Circuito Mínima (SkQ Mín) [MVA]	1500

Tabela Ap. 5 - Dados dos Cabos BT do Caso de estudo 3.

Cabos BT (Entre aerogeradores e transformadores BT/MT)	
Tipo de Cabo	3 x (XV 4 x 300) (0,6/1 kV)
Tensão Nominal [V]	690
Comprimento [m]	80
Nº de Condutores/Fase	3
Secção [mm ²]	300
Temperatura Máxima do Isolamento [°C]	250
Resistividade do Material Condutor (Alumínio) a 20°C [Ω mm ² /m]	0,0278

Tabela Ap. 6- Dados do Cabo MT do Caso de estudo 3.

Idênt. do Cabo	Tipo de Cabo	Tensão Nominal [V]	Comprimento [m]	Nº de Condutores/Fase	Secção [mm ²]	Reatância [Ω /km]	B	A
B16-B13	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	20000	310	1	70	0,22	0,0173	250
B13-B10	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	20000	310	1	70	0,22	0,0173	250
B10-B7	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	20000	310	1	70	0,22	0,0173	250
B7-B6	2 x (XHIOV 3 x 70 (24 kV))	20000	160	2	70	0,22	0,0173	250
B28-B25	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	20000	310	1	70	0,22	0,0173	250
B25-B22	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	20000	310	1	70	0,22	0,0173	250
B22-B19	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	20000	310	1	70	0,22	0,0173	250
B19-B6	2 x (XHIOV 3 x 70 (24 kV))	20000	315	2	70	0,22	0,0173	250
B37-B34	XHIOV 3 x 120 (24 kV)	20000	310	1	120	0,20	0,0173	250

B34-B31	2 x (XHIOV 3 x 120 (24 kV))	20000	310	2	120	0,20	0,0173	250
B31-B6	2 x XHIOV 3 x 120 (24 kV))	20000	160	2	120	0,20	0,0173	250
B46-B43	XHIOV 3 x 120 (24 kV)	20000	310	1	120	0,20	0,0173	250
B43-B40	2 x (XHIOV 3 x 120 (24 kV))	20000	310	2	120	0,20	0,0173	250
B40-B6	2 x (XHIOV 3 x 120 (24 kV))	20000	315	2	120	0,20	0,0173	250
B46-B37	XHIOV 3 x 120 (24 kV)	20000	510	1	120	0,20	0,0173	250
B6-B3	XHIOV 3 x 400 (24 kV)	20000	30	1	400	0,14	0,0173	250
B6-B5	XHIOV 3 x 400 (24 kV)	20000	30	1	400	0,14	0,0173	250

A - Resistividade do Material Condutor (Cobre) a 20°C [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]

B - Temperatura Máxima do Isolamento [°C]

Tabela Ap. 7 - Dados do Cabo AT do Caso de estudo 3.

Cabo AT (B2-B1)	
Tipo de Cabo	16-AL1 (72,5 kV)
Tensão Nominal [V]	60000
Comprimento [m]	30
Resistência [Ω /km]	1,7896

Apêndice 3.1 – Cálculos do Caso de Estudo 3

Apêndice 3.1

Cálculo da intensidade de corrente de curto-circuito máxima:

Sabendo as características dos componentes da rede podem ser então, efetuados os cálculos dos valores das impedâncias de cada um. Através dos métodos exemplificados em 3.5. Podemos então proceder ao cálculo:

Impedância do Aerogerador através das equações 3.34, 3.35, 3.36:

$$X'_d = \frac{690^2}{3,036 \times 10^6} \cdot \frac{12}{100} = 0,0188 \Omega$$

$$R_G = 0,12 \cdot 0,0188 = 0,00225 \Omega$$

$$Z_G = 0,00225 + j0,0188 \Omega$$

Impedância do Transformador BT/MT através das equações 3.39, 3.40, 3.41:

$$Z_T = \frac{690^2}{3,15 \times 10^6} \cdot \frac{6}{100} = 0,009069 \Omega$$

$$I_{rT} = \frac{S_{rT}}{\sqrt{3} \cdot U_{rT}} = \frac{3,15 \times 10^6}{\sqrt{3} \cdot 690} = 2636 A$$

$$R_T = \frac{5140}{3 \cdot 2636^2} = 0,000246 \Omega$$

$$X_T = \sqrt{0,009069^2 - 0,000246^2} = 0,0090 \Omega$$

$$Z_T = 0,000246 + j0,0090 \Omega$$

Impedância do Transformador de interligação MT/AT através das equações 3.39, 3.40, 3.41:

$$Z_{TI} = \frac{20000^2}{20,0 \times 10^6} \cdot \frac{20}{100} = 4,0 \Omega$$

$$I_{rT} = \frac{S_{rT}}{\sqrt{3} \cdot U_{rT}} = \frac{20,0 \times 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20000} = 577,35 A$$

$$R_T = \frac{130000}{3 \cdot 577,35^2} = 0,13 \Omega$$

$$X_{TI} = \sqrt{4,0^2 - 0,13^2} = 3,99 \Omega$$

$$Z_{TI} = 0,13 + j3,99 \Omega$$

Impedância da Rede através das equações 3.48, 3.49, 3.50:

$$Z_Q = \frac{1,1 \cdot 60000^2}{2500 \times 10^6} = 1,58 \Omega$$

$$X_Q = 0,995 \cdot 1,58 = 1,57 \Omega$$

$$R_Q = 0,1 \cdot 1,57 = 0,16 \Omega$$

$$Z_Q = 0,16 + j1,57 \Omega$$

Impedância do Cabo de Baixa Tensão através da equação 3.45:

$$\begin{aligned} R_{CBT} &= \frac{0,0278 \times 80}{300} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = \\ &= \frac{0,0278 \times 80}{300} \cdot \frac{1}{3} = 0,0025 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{CBT} &= 0,08 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} \cdot l = 0,08 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{3} \cdot 80 = \\ &= 0,0021 \Omega \end{aligned}$$

$$Z_{CBT} = 0,0025 + j0,0021 \Omega$$

Impedância do Cabo de Média Tensão de 70 mm² e 310 m através da equação 3.45:

$$\begin{aligned} R_{CMT} &= \frac{0,0173 \times 310}{70} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = \frac{0,0173 \times 310}{70} \cdot \frac{1}{1} = \\ &= 0,0766 \Omega \end{aligned}$$

$$X_{CMT} = 0,220 \times l = 0,220 \times 0,310 = 0,0682 \Omega$$

$$Z_{CMT} = 0,0766 + 0,0682 \Omega$$

Impedância dos Cabos de Média Tensão de 70 mm² e 160 m através da equação 3.45::

$$R_{CMT} = \frac{0,0173 \times 160}{70} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = \frac{0,0173 \times 160}{70} \cdot \frac{1}{2} =$$

$$= 0,0197\Omega$$

$$X_{CMT} = 0,220 \cdot l \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = 0,220 \times 0,160 \times \frac{1}{2} = 0,0176 \Omega$$

$$Z_{CMT} = 0,0197 + j0,0176 \Omega$$

Impedância dos Cabos de Média Tensão de 70 mm² e 315 m através da equação 3.45:

$$R_{CMT} = \frac{0,0173 \times 315}{70} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = \frac{0,0173 \times 315}{70} \cdot \frac{1}{2} =$$

$$= 0,0389\Omega$$

$$X_{CMT} = 0,220 \cdot l \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = 0,220 \times 0,315 \times \frac{1}{2} = 0,0347 \Omega$$

$$Z_{CMT} = 0,0389 + j0,0347 \Omega$$

Impedância do Cabo de Média Tensão de 120 mm² e 310 m através da equação 3.45:

$$R_{CMT} = \frac{0,0173 \times 310}{120} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = \frac{0,0173 \times 310}{120} \cdot \frac{1}{1} =$$

$$= 0,0447\Omega$$

$$X_{CMT} = 0,20 \cdot l \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = 0,20 \times 0,310 \times \frac{1}{1} = 0,0620 \Omega$$

$$Z_{CMT} = 0,0447 + j0,0620 \Omega$$

Impedância dos Cabos de Média Tensão de 120 mm² e 310 m através da equação 3.45:

$$R_{CMT} = \frac{0,0173 \times 310}{120} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = \frac{0,0173 \times 310}{120} \cdot \frac{1}{2} =$$

$$= 0,0223\Omega$$

$$X_{CMT} = 0,20 \cdot l \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = 0,20 \times 0,310 \times \frac{1}{2} = 0,0310 \Omega$$

$$Z_{CMT} = 0,0223 + j0,0310 \Omega$$

Impedância dos Cabos de Média Tensão de 120 mm² e 160 m através da equação 3.45:

$$R_{CMT} = \frac{0,0173 \times 160}{120} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = \frac{0,0173 \times 160}{120} \cdot \frac{1}{2} =$$

$$= 0,0115 \Omega$$

$$X_{CMT} = 0,20 \cdot l \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = 0,20 \times 0,160 \times \frac{1}{2} = 0,0160 \Omega$$

$$Z_{CMT} = 0,0115 + j0,0160 \Omega$$

Impedância dos Cabos de Média Tensão de 120 mm² e 315 m através da equação 3.45:

$$R_{CMT} = \frac{0,0173 \times 315}{120} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = \frac{0,0173 \times 315}{120} \cdot \frac{1}{2} =$$

$$= 0,0227 \Omega$$

$$X_{CMT} = 0,20 \cdot l \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = 0,20 \times 0,315 \times \frac{1}{2} = 0,0315 \Omega$$

$$Z_{CMT} = 0,0115 + j0,0315 \Omega$$

Impedância do Cabo de Média Tensão de 120 mm² e 510 m através da equação 3.45:

$$R_{CMT} = \frac{0,0173 \times 510}{120} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = \frac{0,0173 \times 510}{120} \cdot \frac{1}{1} =$$

$$= 0,0735 \Omega$$

$$X_{CMT} = 0,20 \cdot l \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = 0,20 \times 0,510 \times \frac{1}{1} = 0,102 \Omega$$

$$Z_{CMT} = 0,0735 + j0,102 \Omega$$

Impedância do Cabo de Média Tensão de 400 mm² e 30 m através da equação 3.45:

$$R_{CMT} = \frac{0,0173 \times 30}{400} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = \frac{0,0173 \times 30}{400} \cdot \frac{1}{1} =$$

$$= 0,0013 \Omega$$

$$X_{CMT} = 0,14 \cdot l \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} = 0,14 \times 0,030 \times \frac{1}{1} = 0,0042 \Omega$$

$$Z_{CMT} = 0,0013 + j0,0042 \Omega$$

Em resumo os cabos MT:

Tabela Ap. 8 - Resumo das impedâncias em cada troço de média tensão.

Idênt. do Cabo	Tipo de Cabo	Impedância (Ω)
B16-B13	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	0,0766+j0,0682
B13-B10	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	0,0766+j0,0682
B10-B7	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	0,0766+j0,0682
B7-B6	2 x (XHIOV 3 x 70 (24 kV))	0,0195+j0,0176
B28-B25	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	0,0766+j0,0682
B25-B22	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	0,0766+j0,0682
B22-B19	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	0,0766+j0,0682
B19-B6	2 x (XHIOV 3 x 70 (24 kV))	0,0389+j0,0347
B37-B34	XHIOV 3 x 120 (24 kV)	0,0447+j0,0620
B34-B31	2 x (XHIOV 3 x 120 (24 kV))	0,0223+j0,0310
B31-B6	2 x XHIOV 3 x 120 (24 kV))	0,0115+j0,0160
B46-B43	XHIOV 3 x 120 (24 kV)	0,0447+j0,0620
B43-B40	2 x (XHIOV 3 x 120 (24 kV))	0,0227+j0,0315
B40-B6	2 x (XHIOV 3 x 120 (24 kV))	0,0223+j0,0310
B46-B37	XHIOV 3 x 120 (24 kV)	0,0735+j0,102
B6-B3	XHIOV 3 x 400 (24 kV)	0,0013+j0,0042
B6-B5	XHIOV 3 x 400 (24 kV)	0,0013+j0,0042

Impedância do Cabo de Alta Tensão seguindo a informação em 3.3:

$$Z_{CAT} = R_{CAT} = 1,7896 \times 0,030 = 0,0537 \Omega$$

Cálculo dos valores em pu:

$$Z_{BaseBT} = \frac{U_{BT}^2}{S_{Base}} = \frac{690^2}{100 \times 10^6} = 0,0048 \Omega$$

$$Z_{BaseMT} = \frac{U_{MT}^2}{S_{Base}} = \frac{20000^2}{100 \times 10^6} = 4 \Omega$$

$$Z_{BaseAT} = \frac{U_{AT}^2}{S_{Base}} = \frac{60000^2}{100 \times 10^6} = 36 \Omega$$

Impedância dos componentes em pu:

$$Z_G(pu) = \frac{Z_G(\Omega)}{Z_{BaseBT}} = \frac{0,00225 + j0,0188}{0,0048} = 0,4688 + j3,9167 pu$$

Nota: nos transformadores a impedância de base a utilizar para se determinar a impedância em pu, deverá ser a correspondente ao nível de tensão que terá sido utilizada para calcular o valor de impedância do transformador em Ω . Neste caso será a de baixa tensão para o transformador BT/MT e média tensão para o transformador de interligação MT/AT.

$$Z_T(pu) = \frac{Z_T(\Omega)}{Z_{BaseBT}} = \frac{0,000246 + j0,0090}{0,0048} = 0,05125 + j1,875 pu$$

$$Z_{TI}(pu) = \frac{Z_{TI}(\Omega)}{Z_{BaseMT}} = \frac{0,13 + j3,99}{4} = 0,0325 + j0,9975 pu$$

$$Z_Q(pu) = \frac{Z_Q(\Omega)}{Z_{BaseAT}} = \frac{0,16 + j1,57}{36} = 0,0044 + j0,044 pu$$

$$Z_{CBT}(pu) = \frac{Z_{CBT}(\Omega)}{Z_{BaseBT}} = \frac{0,0025 + j0,0021}{0,0048} = 0,5208 + j0,4375 pu$$

Para os cabos MT o valor da impedância de base será de 4 Ω na tabela seguinte estão os valores em pu para cada trecho:

Tabela Ap. 9 - Resumo das impedâncias em cada trecho de média tensão em pu.

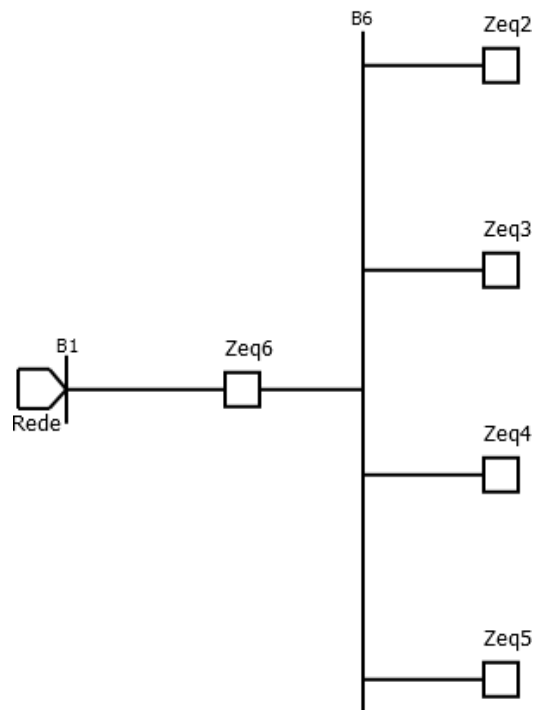
Idênt. do Cabo	Tipo de Cabo	Impedância (Ω)	Impedância (pu)
B16-B13	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	0,0766+j0,0682	0,0192+j0,0171
B13-B10	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	0,0766+j0,0682	0,0192+j0,0171
B10-B7	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	0,0766+j0,0682	0,0192+j0,0171
B7-B6	2 x (XHIOV 3 x 70 (24 kV))	0,0197+j0,0176	0,0049+j0,0044
B28-B25	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	0,0766+j0,0682	0,0192+j0,0171
B25-B22	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	0,0766+j0,0682	0,0192+j0,0171
B22-B19	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	0,0766+j0,0682	0,0192+j0,0171
B19-B6	2 x (XHIOV 3 x 70 (24 kV))	0,0389+j0,0347	0,0097+j0,0087
B37-B34	XHIOV 3 x 120 (24 kV)	0,0447+j0,0620	0,0112+j0,0155
B34-B31	2 x (XHIOV 3 x 120 (24 kV))	0,0223+j0,0310	0,0056+j0,0078
B31-B6	2 x XHIOV 3 x 120 (24 kV)	0,0115+j0,0160	0,0029+j0,0040
B46-B43	XHIOV 3 x 120 (24 kV)	0,0447+j0,0620	0,0112+j0,0155
B43-B40	2 x (XHIOV 3 x 120 (24 kV))	0,0227+j0,0315	0,0057+j0,0079
B40-B6	2 x (XHIOV 3 x 120 (24 kV))	0,0223+j0,0310	0,0056+j0,0078
B46-B37	XHIOV 3 x 120 (24 kV)	0,0735+j0,102	0,0184+j0,0255
B6-B3	XHIOV 3 x 400 (24 kV)	0,0013+j0,0042	0,0003+j0,0011
B6-B5	XHIOV 3 x 400 (24 kV)	0,0013+j0,0042	0,0003+j0,0011

$$Z_{CAT}(pu) = \frac{Z_{CAT}(\Omega)}{Z_{BaseAT}} = \frac{0,0537}{36} = 0,0015 pu$$

Cálculo da Impedância equivalente no Barramento 1:

Nota: considerando o disjuntor (II) aberto, ou seja, considerando o troço B46-B37 inexistente.

O valor de impedância equivalente em cada torre eólica corresponde a soma da impedância do aerogerador, do cabo BT e do transformador BT/MT. Sendo as características destes componentes iguais aos do caso de estudo 2. Conclui-se que o valor Z_{eq1} no caso de estudo 2 é igual Z_{eq1} no caso de estudo 3. Assim sendo irá ser feito primeiramente o equivalente de impedâncias em cada ramo.



Nota sobre a figura - Equivalente de impedâncias em cada ramo da rede do caso de estudo 3.

Cálculo da Impedância equivalente no Barramento 1:

Para ser calculado Z_{eq2} será o equivalente de impedâncias será iniciado a partir de B16 sendo que a montante deste estará a impedância Z_{eq1} .

Até ao Barramento 13 temos a impedância Z_{eq213} :

$$Z_{eq213}(pu) = (Z_{eq1}(pu) + Z_{B16-B13}(pu)) || Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq213}(pu) = (1,0410 + j6,2292 + 0,0192 + j0,0171) \parallel (1,0410 + j6,2292) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq213}(pu) = 0,5253 + j3,1189 pu$$

Até ao Barramento 10 temos a impedância Z_{eq210} :

$$Z_{eq210}(pu) = (Z_{eq213}(pu) + Z_{B13-B10}(pu)) \parallel Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow$$

$$Z_{eq210}(pu) = (0,5253 + j3,1189 + 0,0192 + j0,0171) \parallel (1,0410 + j6,2292) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq210}(pu) = 0,3576 + j2,0859 pu \Leftrightarrow$$

Até ao Barramento 7 temos a impedância Z_{eq207} :

$$Z_{eq207}(pu) = (Z_{eq210}(pu) + Z_{B10-B7}(pu)) \parallel Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow$$

$$Z_{eq207}(pu) = (0,3576 + j2,0859 + 0,0192 + j0,0171) \parallel (1,0410 + j6,2292) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq207}(pu) = 0,2735 + j1,5722 pu$$

Cálculo de Z_{eq2} :

$$Z_{eq2}(pu) = Z_{eq207}(pu) + Z_{B7-B6} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq2}(pu) = 0,2735 + j1,5722 + 0,0049 + j0,0044 pu \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq2}(pu) = 0,2828 + j1,5722 pu$$

O mesmo se efetuará para o cálculo do segundo ramal:

Até ao Barramento 25 temos a impedância Z_{eq325} :

$$Z_{eq325}(pu) = (Z_{eq1}(pu) + Z_{B28-B25}(pu)) \parallel Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq325}(pu) = (1,0410 + j6,2292 + 0,0192 + j0,0171) \parallel (1,0410 + j6,2292) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq325}(pu) = 0,5253 + j3,1189 pu$$

Até ao Barramento 22 temos a impedância Z_{eq322} :

$$Z_{eq322}(pu) = (Z_{eq325}(pu) + Z_{B25-B22}(pu)) \parallel Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq322}(pu) = (0,5253 + j3,1189 + 0,0192 + j0,0171) \parallel (1,0410 + j6,2292) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq322}(pu) = 0,3576 + j2,0859 pu \Leftrightarrow$$

Até ao Barramento 19 temos a impedância Z_{eq319} :

$$\begin{aligned} Z_{eq319}(pu) &= (Z_{eq322}(pu) + Z_{B22-B19}(pu)) || Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow \\ Z_{eq319}(pu) &= (0,3576 + j2,0859 + 0,0192 + j0,0171) || (1,0410 + j6,2292) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow Z_{eq319}(pu) = 0,2735 + j1,5722 pu \end{aligned}$$

Cálculo de Z_{eq3} :

$$\begin{aligned} Z_{eq3}(pu) &= Z_{eq319}(pu) + Z_{B19-B6} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq3}(pu) &= 0,2735 + j1,5722 + 0,0097 + j0,0087 pu \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow Z_{eq3}(pu) = 0,2832 + j1,5809 pu \end{aligned}$$

O mesmo se efetuará para o cálculo do terceiro ramal:

Até ao Barramento 34 temos a impedância Z_{eq434} :

$$\begin{aligned} Z_{eq434}(pu) &= (Z_{eq1}(pu) + Z_{B37-B34}(pu)) || Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq434}(pu) &= (1,0410 + j6,2292 + 0,0112 + j0,0155) || (1,0410 + \\ &\quad j6,2292) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow Z_{eq434}(pu) = 0,5232 + j3,1185 pu \end{aligned}$$

Até ao Barramento 31 temos a impedância Z_{eq431} :

$$\begin{aligned} Z_{eq431}(pu) &= (Z_{eq434}(pu) + Z_{B34-B31}(pu)) || Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq431}(pu) &= (0,5232 + j3,1185 + 0,0056 + j0,0078) || (1,0410 + j6,2292) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow Z_{eq431}(pu) = 0,3507 + j2,0816 pu \Leftrightarrow \end{aligned}$$

Cálculo de Z_{eq4} :

$$\begin{aligned} Z_{eq4}(pu) &= Z_{eq431}(pu) + Z_{B31-B6} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq4}(pu) &= 0,3507 + j2,0816 + 0,0029 + j0,0040 pu \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow Z_{eq4}(pu) = 0,3576 + j2,0816 pu \end{aligned}$$

O mesmo se efetuará para o cálculo do quarto ramal:

Até ao Barramento 43 temos a impedância Z_{eq543} :

$$Z_{eq543}(pu) = (Z_{eq1}(pu) + Z_{B46-B43}(pu)) || Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq543}(pu) = (1,0410 + j6,2292 + 0,0112 + j0,0155) \parallel (1,0410 + j6,2292) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq543}(pu) = 0,5232 + j3,1185 pu$$

Até ao Barramento 40 temos a impedância Z_{eq540} :

$$Z_{eq540}(pu) = (Z_{eq543}(pu) + Z_{B43-B40}(pu)) \parallel Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq540}(pu) = (0,5232 + j3,1185 + 0,0056 + j0,0078) \parallel (1,0410 + j6,2292) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq540}(pu) = 0,3507 + j2,0816 pu \Leftrightarrow$$

Cálculo de Z_{eq5} :

$$Z_{eq5}(pu) = Z_{eq540}(pu) + Z_{B40-B6} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq5}(pu) = 0,3507 + j2,0816 + 0,0056 + j0,0078 pu \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq5}(pu) = 0,3563 + j2,0894 pu$$

Cálculo Z_{eq6} :

$$Z_{eq6}(pu) = (Z_{CAT}(pu) + Z_{TI}(pu) + Z_{B6-B3}(pu)) \parallel (Z_{CAT}(pu) + Z_{TI}(pu) + Z_{B6-B5}(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq6}(pu) = (0,0015 + 0,0325 + j0,9975 + 0,0003 + j0,0011) \parallel (0,0015 + 0,0325 + j0,9975 + 0,0003 + j0,0011) \Leftrightarrow$$

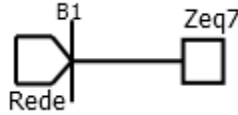
$$\Leftrightarrow Z_{eq6}(pu) = 0,0172 + j0,4993 pu$$

$$Z_{eq2345}(pu) = (Z_{eq2}(pu) \parallel Z_{eq3}(pu)) \parallel (Z_{eq4}(pu) \parallel Z_{eq5}(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq2345}(pu) =$$

$$= ((0,2828 + j1,5722) \parallel (0,2832 + j1,5809)) \parallel ((0,3576 + j2,0816) \parallel (0,3563 + j2,0894)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq2345}(pu) = 0,0789 + j0,4492 pu$$



Nota sobre a figura: Equivalente de impedâncias até ao Barramento 1.

$$Z_{b1}(pu) = (Z_{eq2345}(pu) + Z_{eq6}(pu)) || (Z_Q(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b1}(pu) = (0,0789 + j0,4492 + 0,0172 + j0,4993) || (0,0044 + j0,044) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b1}(pu) = 0,0042 + j0,0420 pu$$

Valor da corrente de curto-circuito máximo no Barramento 1:

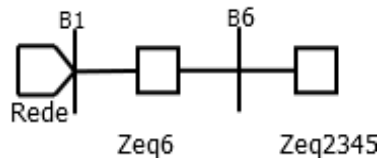
$$I_{CCb1}(pu) = \frac{1}{Z_{b1}} = \frac{1}{0,0042 + j0,0420} = 2,3574 - j23,57 pu$$

$$|I_{CCb1}|(pu) = \sqrt{2,3574^2 + 23,57^2} = 23,68 pu$$

$$I_{baseAT} = \frac{c \times U_{AT}}{\sqrt{3} \times Z_{BaseAT}} = \frac{1,1 \times 60000}{\sqrt{3} \times 36} = 1058,47 A$$

$$I_{CCb1} = |I_{CCb1}|(pu) \times I_{baseAT} = 1058,47 \times 23,68 = 25064,70 A$$

Cálculo da Impedância equivalente no Barramento 6:



Nota sobre a figura: Equivalente de impedâncias em todas as linhas do parque eólico.

$$Z_{b6}(pu) = (Z_Q(pu) + Z_{eq6}(pu)) || (Z_{eq2345}(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b6}(pu) = (0,0044 + j0,044 + 0,0172 + j0,4993) || (0,0789 + j0,4492) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b6}(pu) = 0,0279 + j0,2473 pu$$

Valor da corrente de curto-circuito máximo no Barramento 6:

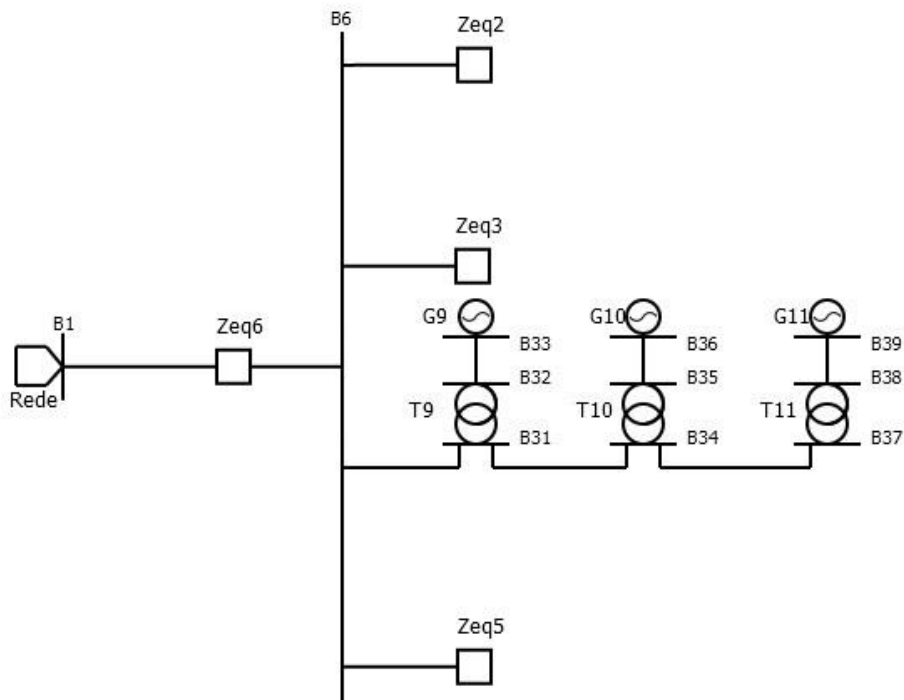
$$I_{CCb6}(pu) = \frac{1}{Z_{b6}} = \frac{1}{0,0279 + j0,2473} = 0,4505 - j3,9929 pu$$

$$|I_{CCb6}|(pu) = \sqrt{0,4505^2 + 3,9929^2} = 4,0182 pu$$

$$I_{baseMT} = \frac{c \times U_{MT}}{\sqrt{3} \times Z_{BaseMT}} = \frac{1,1 \times 20000}{\sqrt{3} \times 4} = 3175,42 \text{ A}$$

$$I_{CCb6} = |I_{CCb6}|(pu) \times I_{baseMT} = 3175,42 \times 4,0182 = 12746,79 \text{ A}$$

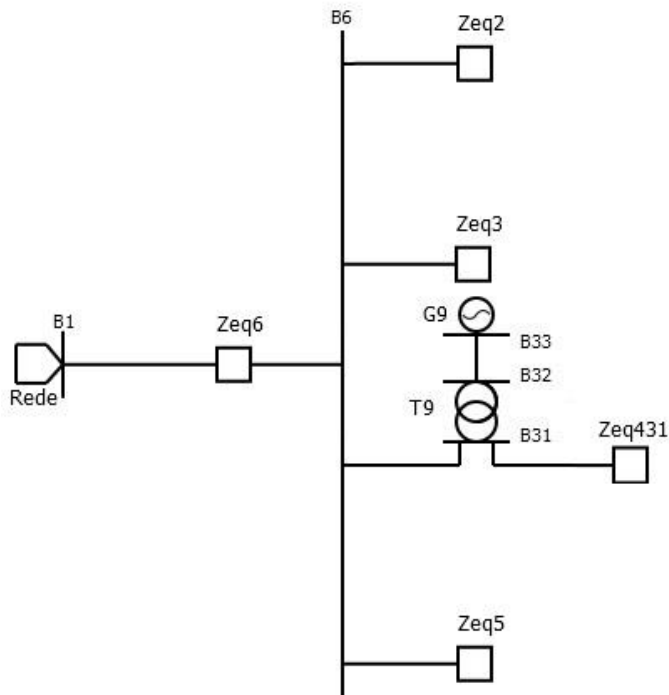
Cálculo da Impedância equivalente no Barramento 33 com I1 aberto:



Nota sobre a figura: Equivalente de impedâncias nos ramos e na subestação.

Nesta situação com o interruptor fechado o quarto ramo da rede pode ser estabelecido como no cálculo da impedância equivalente nos Barramentos anteriores e pode continuar a ser representado por Zeq5.

Podemos admitir que a impedância do Barramento 39 até ao Barramento 31 irá manter-se como nos cálculos anteriores e desta forma representado por Zeq431.



Nota sobre a figura: Equivalente de impedâncias nos ramos, na subestação e a montante do Barramento 31.

Inicialmente irá ser calculado a soma a impedância da rede com a impedância Zeq6 (Zeq8).

$$Zeq8(pu) = Zeq6(pu) + Z_Q(pu) \Leftrightarrow$$

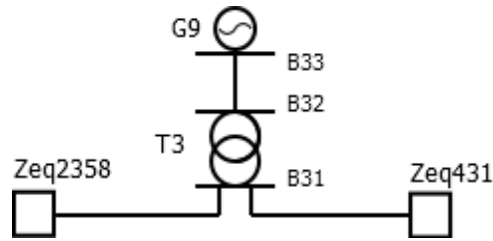
$$\Leftrightarrow Zeq8(pu) = 0,0172 + j0,4993 + 0,0044 + j0,044 = 0,0216 + j0,5433 pu$$

$$Zeq2358(pu) = (Zeq2(pu) || Zeq3(pu)) || (Zeq5(pu) || Zeq8(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Zeq2358(pu) =$$

$$= ((0,2828 + j1,5722) || (0,2832 + j1,5809)) || ((0,3563 + j2,0894) || (0,0216 + j0,5433)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Zeq2358(pu) = 0,0322 + j0,2805 pu$$



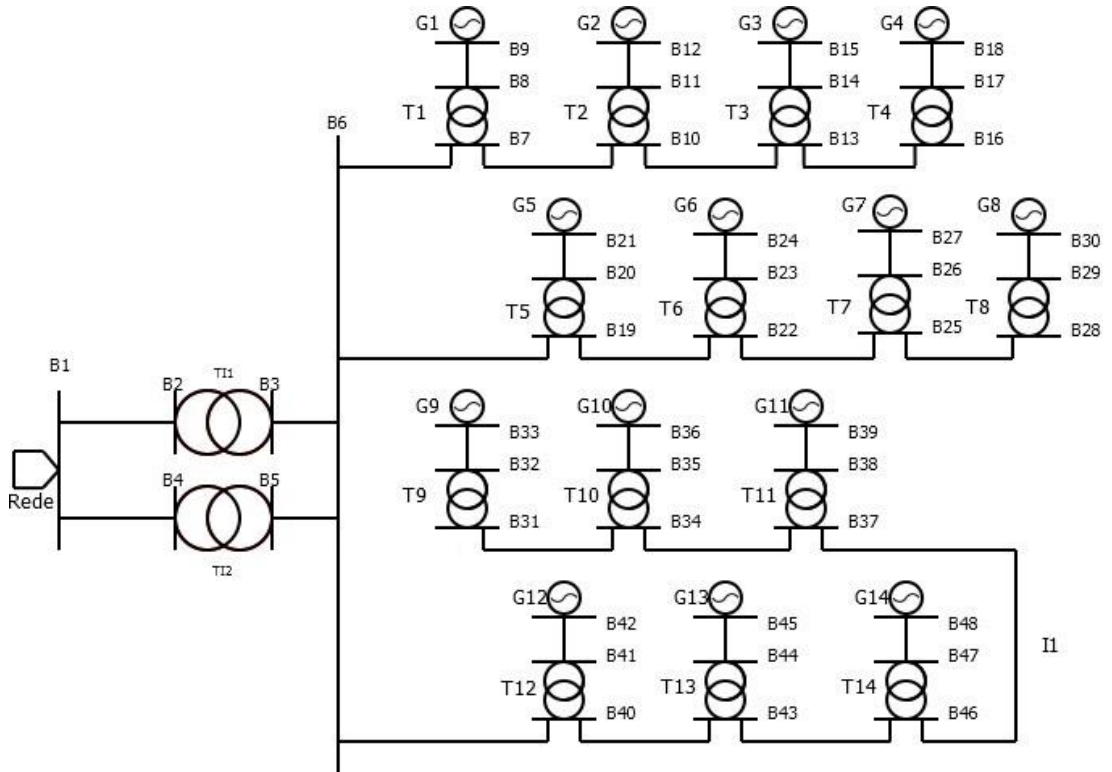
Nota sobre a figura: Equivalente de impedâncias até ao Barramento 31.

$$\begin{aligned}
 Z_{b33}(pu) &= ((Z_{eq2358}(pu) || Z_{eq431}) + Z_{CBT}(pu) + Z_T(pu)) || Z_G(pu) \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow Z_{b33}(pu) = \\
 &= (((0,0322 + j0,2805) || (0,3507 + j2,0816)) + 0,5208 + j0,4375 + 0,05125 \\
 &\quad + j1,875) || (0,4688 + j3,9167) \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow Z_{b33}(pu) = 0,2910 + j1,5528 pu
 \end{aligned}$$

Valor da corrente de curto-circuito máximo no Barramento 33:

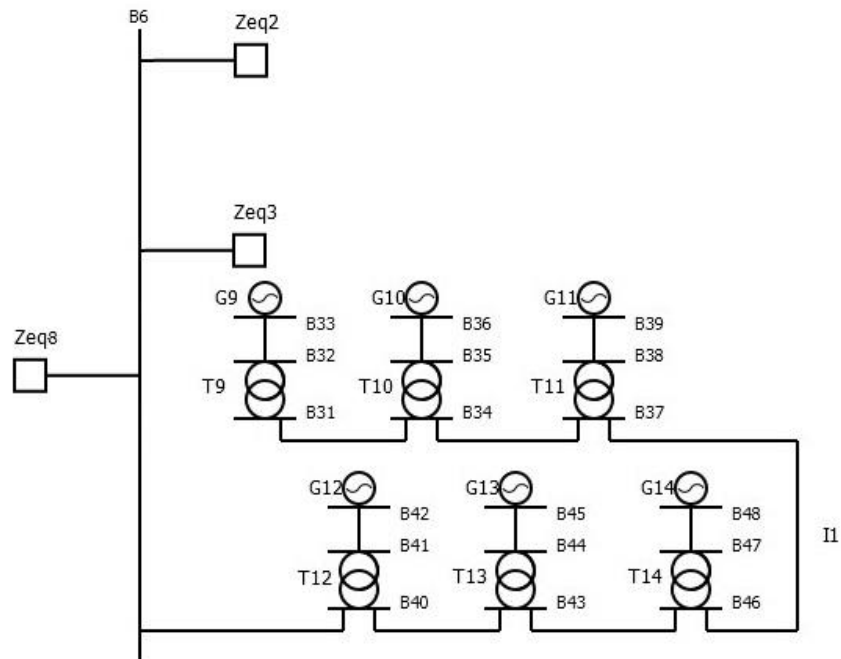
$$\begin{aligned}
 I_{CCb33}(pu) &= \frac{1}{Z_{b1}} = \frac{1}{0,2910 + j1,5528} = 0,1166 - j0,6221 pu \\
 |I_{CCb33}|(pu) &= \sqrt{0,1166^2 + 0,6221^2} = 0,6329 pu \\
 I_{baseBT} &= \frac{c \times U_{BT}}{\sqrt{3} \times Z_{BaseBT}} = \frac{1,05 \times 690}{\sqrt{3} \times 0,0048} = 87143,81 A \\
 I_{CCb33} &= |I_{CCb33}|(pu) \times I_{baseAT} = 87143,81 \times 0,6329 = 55153,32 A
 \end{aligned}$$

Cálculo da Impedância equivalente no Barramento 33 com falha na linha B31-B6 e I1 fechado:



Nota sobre a figura: Representação da rede do caso de estudo 3 com falha no trecho B33-B6 e com I1 fechado.

A rede pode ser simplificada com os cálculos de impedâncias equivalentes anteriormente efetuados.

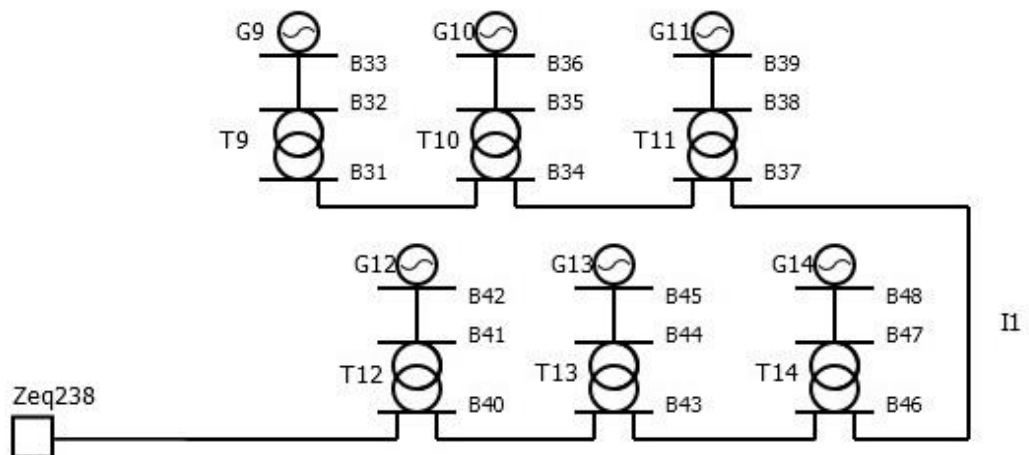


Nota sobre a figura: Simplificação da rede do caso de estudo 3.

$$\Leftrightarrow Z_{eq238}(pu) = Z_{eq2}(pu) || Z_{eq3}(pu) || Z_{eq8}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq238}(pu) = (0,2828 + j1,5722) || (0,3708 + j1,5809) || (0,0216 + j0,5433) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq238}(pu) = 0,0344 + j0,3238 pu$$



Nota sobre a figura: Equivalente de impedâncias até ao Barramento 6.

Após o cálculo da impedância até ao Barramento 6, serão calculadas as novas impedâncias equivalentes desde o Barramento 40 até ao Barramento 33, relembrando que a impedância do conjunto aerogerador, cabo BT e transformador BT/MT é Z_{eq1} .

$$Z_{eq40}(pu) = (Z_{eq238}(pu) + Z_{B40-B6}(pu)) || (Z_{eq1}(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq40}(pu) = ((0,0344 + j0,3238) + (0,0056 + j0,0078)) || (1,0410 + j6,2292)$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq40}(pu) = 0,0387 + j0,3149 pu$$

$$Z_{eq43}(pu) = (Z_{eq40}(pu) + Z_{B43-B40}(pu)) || (Z_{eq1}(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq43}(pu) = ((0,0387 + j0,3149) + (0,0057 + j0,0079)) || (1,0410 + j6,2292)$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq43}(pu) = 0,0427 + j0,3069 pu$$

$$Z_{eq46}(pu) = (Z_{eq43}(pu) + Z_{B46-B43}(pu)) || (Z_{eq1}(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq46}(pu) = ((0,0427 + j0,3069) + (0,0112 + j0,0155)) || (1,0410 + j6,2292)$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq46}(pu) = 0,0512 + j0,3065 pu$$

$$Z_{eq37}(pu) = (Z_{eq46}(pu) + Z_{B46-B37}(pu)) || (Z_{eq1}(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq37}(pu) = ((0,0512 + j0,3065) + (0,0184 + j0,0255)) || (1,0410 + j6,2292)$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq37}(pu) = 0,0654 + j0,3152 pu$$

$$Z_{eq34}(pu) = (Z_{eq37}(pu) + Z_{B37-B34}(pu)) || (Z_{eq1}(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq34}(pu) = ((0,0654 + j0,3152) + (0,0112 + j0,0155)) || (1,0410 + j6,2292)$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq34}(pu) = 0,0717 + j0,3141 pu$$

$$Z_{eq31}(pu) = (Z_{eq34}(pu) + Z_{B34-B31}(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq31}(pu) = ((0,0717 + j0,3141) + (0,0056 + j0,0078)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq31}(pu) = 0,0773 + j0,3219 pu$$

$$\begin{aligned}
Z_{b33}(pu) &= (Z_{eq31}(pu) + Z_{CBT}(pu) + Z_T(pu)) || Z_G(pu) \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow Z_{b33}(pu) &= (0,0773 + j0,3219 + 0,5208 + j0,4375 + 0,05125 \\
&\quad + j1,875) || (0,4688 + j3,9167) \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow Z_{b33}(pu) = 0,2635 + j1,5808 pu
\end{aligned}$$

Valor da corrente de curto-circuito máximo no Barramento 33 quando II está fechado e o troço B31-B6 não está operacional:

$$I_{CCb33}(pu) = \frac{1}{Z_{b1}} = \frac{1}{0,2635 + 1,5808} = 0,1025 - j0,6155 pu$$

$$|I_{CCb33}|(pu) = \sqrt{0,1025^2 + 0,6155^2} = 0,6239 pu$$

$$I_{baseBT} = \frac{c \times U_{BT}}{\sqrt{3} \times Z_{BaseBT}} = \frac{1,05 \times 690}{\sqrt{3} \times 0,0048} = 87143,81 A$$

$$I_{CCb33} = |I_{CCb33}|(pu) \times I_{baseBT} = 87143,81 \times 0,6239 = 54369,02 A$$

Cálculo de impedâncias na situação de curto-circuito mínimo:

Impedância da Rede para o cálculo da corrente de curto-circuito mínima através das equações 3.48, 3.49, 3.50:

$$Z_Q = \frac{1 \cdot 60000^2}{1500 \times 10^6} = 2,40 \Omega$$

$$X_Q = 0,995 \cdot 2,40 = 2,38 \Omega$$

$$R_Q = 0,1 \cdot 2,38 = 0,238 \Omega$$

$$Z_Q = 0,238 + j2,38 \Omega$$

Em pu:

$$Z_Q(pu) = \frac{Z_Q(\Omega)}{Z_{BaseAT}} = \frac{0,238 + j2,38}{36} = 0,0066 + j0,0661 pu$$

Impedância do Cabo de Baixa Tensão para a temperatura máxima de isolamento através das equações 3.45, 3.46, 3.47:

$$\alpha_c = \frac{1}{B + 20} = \frac{1}{228 + 20} = 0,0040$$

$$\rho_{250^\circ\text{C}} = [1 + \alpha_c \times (\theta_f - 20)] \times \rho_{20^\circ\text{C}} = [1 + 0,004 \times (250 - 20)] \times 0,0278 =$$

$$= 0,0534 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$$

$$R_{CBT} = \frac{\rho_{\theta_{250^\circ\text{C}}} \times 80}{300} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} =$$

$$= \frac{0,0534 \times 80}{300} \cdot \frac{1}{3} = 0,0047 \Omega$$

$$X_{CBT} = 0,08 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{\text{núm. de condutores por fase}} \cdot l = 0,08 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{3} \cdot 80 =$$

$$= 0,0021 \Omega$$

$$Z_{CBT} = 0,0047 + j0,0021 \Omega$$

Em pu:

$$Z_{CBT}(pu) = \frac{Z_{CBT}(\Omega)}{Z_{BaseBT}} = \frac{0,0047 + j0,0021}{0,0048} = 0,9791 + j0,4375 pu$$

Para os cabos MT foram calculados da mesma forma as impedâncias de cada para a situação em que a temperatura do seu isolamento é máxima na tabela seguinte estão os valores em ohm e pu para cada troço sendo que todos eles têm uma temperatura de isolamento máxima de 250°C e um $\rho(20^\circ\text{C})$ de 0,0173 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$:

Tabela Ap. 10 - Resumo das impedâncias em cada trecho de média tensão para a situação de temperatura máxima.

Idênt. do Cabo	Tipo de Cabo	Impedância (Ω)	Impedância (pu)
B16-B13	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	0,1453+j0,0682	0,0363+j0,0171
B13-B10	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	0,1453+j0,0682	0,0363+j0,0171
B10-B7	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	0,1453+j0,0682	0,0363+j0,0171
B7-B6	2 x (XHIOV 3 x 70 (24 kV))	0,0375+j0,0176	0,0094+j0,0044
B28-B25	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	0,1453+j0,0682	0,0363+j0,0171
B25-B22	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	0,1453+j0,0682	0,0363+j0,0171
B22-B19	XHIOV 3 x 70 (24 kV)	0,1453+j0,0682	0,0363+j0,0171
B19-B6	2 x (XHIOV 3 x 70 (24 kV))	0,0738+j0,0347	0,0185+j0,0087
B37-B34	XHIOV 3 x 120 (24 kV)	0,0847+j0,0620	0,0212+j0,0155
B34-B31	2 x (XHIOV 3 x 120 (24 kV))	0,0424+j0,0310	0,0106+j0,0078
B31-B6	2 x XHIOV 3 x 120 (24 kV))	0,0219+j0,0160	0,0055+j0,0040
B46-B43	XHIOV 3 x 120 (24 kV)	0,0847+j0,0620	0,0212+j0,0155
B43-B40	2 x (XHIOV 3 x 120 (24 kV))	0,0424+j0,0310	0,0106+j0,0078
B40-B6	2 x (XHIOV 3 x 120 (24 kV))	0,0431+j0,0315	0,0108+j0,0078
B46-B37	XHIOV 3 x 120 (24 kV)	0,1394+j0,1020	0,0349+j0,0255
B6-B3	XHIOV 3 x 400 (24 kV)	0,0026+j0,0042	0,0007+j0,0011
B6-B5	XHIOV 3 x 400 (24 kV)	0,0026+j0,0042	0,0007+j0,0011

Equivalente de impedâncias para o posterior cálculo da corrente curto-circuito mínima no Barramento 1, tendo por base as figuras utilizadas para o cálculo do valor da corrente de curto-circuito máximo:

Nota: considerando o disjuntor (II) aberto, ou seja, considerando o trecho B46-B37 inexistente.

Até ao Barramento 13 temos a impedância Z_{eq213} :

$$\begin{aligned} Z_{eq213}(pu) &= (Z_{eq1}(pu) + Z_{B16-B13}(pu)) || Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq213}(pu) &= (1,4992 + j6,2292 + 0,0363 + j0,0171) || (1,4992 + \\ & \quad j6,2292) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq213}(pu) &= 0,7586 + j3,1189 pu \end{aligned}$$

Até ao Barramento 10 temos a impedância Z_{eq210} :

$$Z_{eq210}(pu) = (Z_{eq213}(pu) + Z_{B13-B10}(pu)) || Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\begin{aligned} Z_{eq210}(pu) &= (0,7586 + j3,1189 + 0,0363 + j0,0171) || (1,4992 + j6,2292) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq210}(pu) &= 0,5533 + j2,0859 pu \Leftrightarrow \end{aligned}$$

Até ao Barramento 7 temos a impedância Z_{eq207} :

$$Z_{eq207}(pu) = (Z_{eq210}(pu) + Z_{B10-B7}(pu)) || Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\begin{aligned} Z_{eq207}(pu) &= (0,5533 + j2,0859 + 0,0363 + j0,0171) || (1,4992 + j6,2292) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq207}(pu) &= 0,4249 + j1,5722 pu \end{aligned}$$

Cálculo de Z_{eq2} :

$$Z_{eq2}(pu) = Z_{eq207}(pu) + Z_{B7-B6} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq2}(pu) = 0,4249 + j1,5722 + 0,0094 + j0,0044 pu \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq2}(pu) = 0,4343 + j1,5766 pu$$

O mesmo se efetuará para o cálculo do segundo ramal:

Até ao Barramento 25 temos a impedância Z_{eq325} :

$$Z_{eq325}(pu) = (Z_{eq1}(pu) + Z_{B28-B25}(pu)) || Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow$$

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow Z_{eq325}(pu) &= (1,4992 + j6,2292 + 0,0363 + j0,0171) || (1,4992 + \\ & \quad j6,2292) \Leftrightarrow \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq325}(pu) = 0,7586 + j3,1189 pu$$

Até ao Barramento 22 temos a impedância Z_{eq322} :

$$\begin{aligned} Z_{eq322}(pu) &= (Z_{eq325}(pu) + Z_{B25-B22}(pu)) || Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq322}(pu) &= (0,7586 + j3,1189 + 0,0363 + j0,0171) || (1,4992 + j6,2292) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow Z_{eq322}(pu) = 0,5197 + j2,0859 pu \Leftrightarrow \end{aligned}$$

Até ao Barramento 19 temos a impedância Z_{eq319} :

$$\begin{aligned} Z_{eq319}(pu) &= (Z_{eq322}(pu) + Z_{B22-B19}(pu)) || Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow \\ Z_{eq319}(pu) &= (0,5197 + j2,0859 + 0,0363 + j0,0171) || (1,4992 + j6,2292) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow Z_{eq319}(pu) = 0,4062 + j1,5722 pu \end{aligned}$$

Cálculo de Z_{eq3} :

$$\begin{aligned} Z_{eq3}(pu) &= Z_{eq319}(pu) + Z_{B19-B6} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq3}(pu) &= 0,4062 + j1,5722 + 0,0185 + j0,0087 pu \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow Z_{eq3}(pu) = 0,4247 + j1,5809 pu \end{aligned}$$

O mesmo se efetuará para o cálculo do terceiro ramal:

Até ao Barramento 34 temos a impedância Z_{eq434} :

$$\begin{aligned} Z_{eq434}(pu) &= (Z_{eq1}(pu) + Z_{B37-B34}(pu)) || Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq434}(pu) &= (1,4992 + j6,2292 + 0,0212 + j0,0155) || (1,4992 + \\ &j6,2292) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow Z_{eq434}(pu) = 0,7549 + j3,1185 pu \end{aligned}$$

Até ao Barramento 31 temos a impedância Z_{eq431} :

$$\begin{aligned} Z_{eq431}(pu) &= (Z_{eq434}(pu) + Z_{B34-B31}(pu)) || Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq431}(pu) &= (0,7549 + j3,1185 + 0,0106 + j0,0078) || (1,4992 + j6,2292) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow Z_{eq431}(pu) = 0,5067 + j2,0816 pu \Leftrightarrow \end{aligned}$$

Cálculo de Z_{eq4} :

$$\begin{aligned} Z_{eq4}(pu) &= Z_{eq431}(pu) + Z_{B31-B6} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq4}(pu) &= 0,5067 + j2,0816 + 0,0055 + j0,0040 pu \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow Z_{eq4}(pu) = 0,5122 + j2,0856 pu \end{aligned}$$

O mesmo se efetuará para o cálculo do quarto ramal:

Até ao Barramento 43 temos a impedância Z_{eq543} :

$$\begin{aligned} Z_{eq543}(pu) &= (Z_{eq1}(pu) + Z_{B46-B43}(pu)) || Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq543}(pu) &= (1,4992 + j6,2292 + 0,0212 + j0,0155) || (1,4992 + \\ & \quad j6,2292) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq543}(pu) &= 0,7549 + j3,1185 pu \end{aligned}$$

Até ao Barramento 40 temos a impedância Z_{eq540} :

$$\begin{aligned} Z_{eq540}(pu) &= (Z_{eq543}(pu) + Z_{B43-B40}(pu)) || Z_{eq1}(pu) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq540}(pu) &= (0,7549 + j3,1185 + 0,0106 + j0,0078) || (1,4992 + j6,2292) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq540}(pu) &= 0,5067 + j2,0816 pu \Leftrightarrow \end{aligned}$$

Cálculo de Z_{eq5} :

$$\begin{aligned} Z_{eq5}(pu) &= Z_{eq540}(pu) + Z_{B40-B6} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq5}(pu) &= 0,5067 + j2,0816 + 0,0108 + j0,0078 pu \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq5}(pu) &= 0,5175 + j2,0894 pu \end{aligned}$$

Cálculo Z_{eq6} :

$$\begin{aligned} Z_{eq6}(pu) &= (Z_{CAT}(pu) + Z_{TI}(pu) + Z_{B6-B3}(pu)) || (Z_{CAT}(pu) + Z_{TI}(pu) \\ & \quad + Z_{B6-B5}(pu)) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq6}(pu) &= (0,0015 + 0,0325 + j0,9975 + 0,0007 + j0,0011) || (0,0015 + 0,0325 \\ & \quad + j0,9975 + 0,0007 + j0,0011) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq6}(pu) &= 0,0174 + j0,4993 pu \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{eq2345}(pu) &= (Z_{eq2}(pu) || Z_{eq3}(pu)) || (Z_{eq4}(pu) || Z_{eq5}(pu)) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq2345}(pu) &= \\ &= ((0,4343 + j1,5766) || (0,4247 + j1,5809)) || ((0,5122 \\ & \quad + j2,0856) || (0,5175 + j2,0894)) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_{eq2345}(pu) &= 0,1173 + j0,4492 pu \end{aligned}$$

$$Z_{b1}(pu) = (Z_{eq2345}(pu) + Z_{eq6}(pu)) || (Z_Q(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b1}(pu) = (0,1173 + j0,4492 + 0,0174 + j0,4993) || (0,0066 + j0,0661) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b1}(pu) = 0,0063 + j0,0618 pu$$

Valor da corrente de curto-circuito mínimo no Barramento 1:

$$I_{CCb1min}(pu) = \frac{1}{Z_{b1}} = \frac{1}{0,0063 + j0,0618} = 1,6424 - j16,01 pu$$

$$|I_{CCb1min}|(pu) = \sqrt{1,6424^2 + 16,01^2} = 16,09 pu$$

$$I_{baseATmin} = \frac{c \times U_{AT}}{\sqrt{3} \times Z_{BaseAT}} = \frac{1 \times 60000}{2 \times 36} = 833,33 A$$

$$I_{CCb1min} = |I_{CCb1min}|(pu) \times I_{baseATmin} = 833,33 \times 16,09 = 13411,63 A$$

Cálculo da Impedância equivalente no Barramento 6:

$$Z_{b6}(pu) = (Z_Q(pu) + Z_{eq6}(pu)) || (Z_{eq2345}(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b6}(pu) = (0,0066 + j0,0661 + 0,0174 + j0,4993) || (0,1173 + j0,4492) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b6}(pu) = 0,0412 + j0,2545 pu$$

Valor da corrente de curto-circuito mínimo no Barramento 6:

$$I_{CCb6min}(pu) = \frac{1}{Z_{b4}} = \frac{1}{0,0412 + j0,2545} = 0,6199 - j3,8289 pu$$

$$|I_{CCb6min}|(pu) = \sqrt{0,6199^2 + 3,8289^2} = 3,8787 pu$$

$$I_{baseMTmin} = \frac{c \times U_{MT}}{\sqrt{3} \times Z_{BaseMT}} = \frac{1 \times 20000}{2 \times 4} = 2500 A$$

$$I_{CCb6min} = |I_{CCb6}|(pu) \times I_{baseMT} = 2500 \times 3,8787 = 9696,75 A$$

Cálculo da Impedância equivalente no Barramento 33 com II aberto:

$$Z_{eq8}(pu) = Z_{eq6}(pu) + Z_Q(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq8}(pu) = 0,0174 + j0,4993 + 0,0066 + j0,0661 = 0,0246 + j0,5720 pu$$

$$\begin{aligned}
Z_{eq2358}(pu) &= (Z_{eq2}(pu) || Z_{eq3}(pu)) || (Z_{eq5}(pu) || Z_{eq8}(pu)) \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow Z_{eq2358}(pu) = \\
&= ((0,4343 + j1,5766) || (0,4247 + j1,5809)) || ((0,5175 + j2,0894) || (0,0246 \\
&\quad + j0,5720)) \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow Z_{eq2358}(pu) = 0,0436 + j0,2897 pu \\
Z_{b33}(pu) &= ((Z_{eq2358}(pu) || Z_{eq431}) + Z_{CBT}(pu) + Z_T(pu)) || Z_G(pu) \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow Z_{b33}(pu) = \\
&= (((0,0436 + j0,2897) || (0,5067 + j2,0816)) + 0,9791 + j0,4375 + 0,05125 \\
&\quad + j1,875) || (0,4688 + j3,9167) \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow Z_{b33}(pu) = 0,4571 + j1,5818 pu
\end{aligned}$$

Valor da corrente de curto-circuito mínimo no Barramento 33 com II aberto:

$$I_{CCb33\text{mín}}(pu) = \frac{1}{Z_{b1}} = \frac{1}{0,4571 + j1,5818} = 0,1686 - j0,5834 pu$$

$$|I_{CCb33\text{mín}}|(pu) = \sqrt{0,1686^2 + 0,5834^2} = 0,6073 pu$$

$$I_{baseBT\text{mín}} = \frac{c \times U_{BT}}{\sqrt{3} \times Z_{BaseBT}} = \frac{0,95 \times 690}{2 \times 0,0048} = 68281,25 A$$

$$I_{CCb33\text{mín}} = |I_{CCb33\text{mín}}|(pu) \times I_{baseAT\text{mín}} = 68281,25 \times 0,6073 = 41467,20 A$$

Cálculo da Impedância equivalente no Barramento 33 com falha na linha B31-B6 e II fechado:

$$\begin{aligned}
&\Leftrightarrow Z_{eq238}(pu) = Z_{eq2}(pu) || Z_{eq3}(pu) || Z_{eq8}(pu) \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow Z_{eq238}(pu) = (0,4343 + j1,5766) || (0,4247 + j1,5809) || (0,0246 + j0,5720) \Leftrightarrow \\
&\quad \Leftrightarrow Z_{eq238}(pu) = 0,0455 + j0,3358 pu \\
Z_{eq40}(pu) &= (Z_{eq238}(pu) + Z_{B40-B6}(pu)) || (Z_{eq1}(pu)) \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow Z_{eq40}(pu) = ((0,0455 + j0,3358) + (0,0108 + j0,0078)) || (1,4992 + j6,2292) \\
&\quad \Leftrightarrow
\end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq40}(pu) = 0,0546 + j0,3257 pu$$

$$Z_{eq43}(pu) = (Z_{eq40}(pu) + Z_{B43-B40}(pu)) || (Z_{eq1}(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq43}(pu) = ((0,0546 + j0,3257) + (0,0106 + j0,0078)) || (1,4992 + j6,2292)$$

\Leftrightarrow

$$\Leftrightarrow Z_{eq43}(pu) = 0,0626 + j0,3166 pu$$

$$Z_{eq46}(pu) = (Z_{eq43}(pu) + Z_{B46-B43}(pu)) || (Z_{eq1}(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq46}(pu) = ((0,0626 + j0,3166) + (0,0212 + j0,0155)) || (1,4992 + j6,2292)$$

\Leftrightarrow

$$\Leftrightarrow Z_{eq46}(pu) = 0,0794 + j0,3153 pu$$

$$Z_{eq37}(pu) = (Z_{eq46}(pu) + Z_{B46-B37}(pu)) || (Z_{eq1}(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq37}(pu) =$$

$$= ((0,0794 + j0,3153) + (0,0349 + j0,0255)) || (1,4992 + j6,2292) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq37}(pu) = 0,1068 + j0,3233 pu$$

$$Z_{eq34}(pu) = (Z_{eq37}(pu) + Z_{B37-B34}(pu)) || (Z_{eq1}(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq34}(pu) = ((0,1068 + j0,3233) + (0,0212 + j0,0155)) || (1,4992 + j6,2292)$$

\Leftrightarrow

$$\Leftrightarrow Z_{eq34}(pu) = 0,1197 + j0,3214 pu$$

$$Z_{eq31}(pu) = (Z_{eq34}(pu) + Z_{B34-B31}(pu)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq31}(pu) = ((0,1197 + j0,3214) + (0,0106 + j0,0078)) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{eq31}(pu) = 0,1303 + j0,3292 pu$$

$$Z_{b33}(pu) = (Z_{eq31}(pu) + Z_{CBT}(pu) + Z_T(pu)) || Z_G(pu) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b33}(pu) = (0,1303 + j0,3292 + 0,9791 + j0,4375 + 0,05125 + j1,875) || (0,4688 + j3,9167) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Z_{b33}(pu) = 0,4809 + j1,6142 pu$$

Valor da corrente de curto-circuito mínimo no Barramento 33 quando I1 está fechado e o troço B31-B6 não está operacional:

$$I_{CCb33\text{mín}}(pu) = \frac{1}{Z_{b1}} = \frac{1}{0,4809 + j1,6142} = 0,1695 - j0,5690 pu$$

$$|I_{CCb33\text{mín}}|(pu) = \sqrt{0,1695^2 + 0,5690^2} = 0,5937 pu$$

$$I_{baseBT\text{mín}} = \frac{c \times U_{BT}}{\sqrt{3} \times Z_{BaseBT}} = \frac{0,95 \times 690}{2 \times 0,0048} = 68281,25 A$$

$$I_{CCb33\text{mín}} = |I_{CCb33\text{mín}}|(pu) \times I_{baseBT\text{mín}} = 68281,25 \times 0,5937 = 40538,58 A$$