

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Desenvolvimento de um software para
curto-circuitos em Transformadores de Potência**

Gabriel do Fundo Gonçalves

Relatório de Projecto realizado no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. António Machado e Moura
Co-orientador: Sr. Eng. Duarte Couto

Julho de 2008

Aos meus pais
À minha irmã e cunhado
À minha sobrinha Rita
E à Susana

Resumo

O estudo efectuado foi o resultado de uma parceria entre a *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto* e a *Efacec Energia - PT*.

Teve como tema, os curto-circuitos nos transformadores de potência, o qual é e será sempre grande motivo de preocupação na área de Engenharia Electrotécnica nas redes de energia eléctrica.

Um curto-circuito surge na ocorrência de um defeito, e apresenta consequências prejudiciais para os materiais eléctricos e materiais mecânicos podendo mesmo levar a acidentes pessoais muito graves ou até mesmo à morte de pessoas.

Os transformadores de potência são máquinas eléctricas de grande porte com custos muito elevados, podendo ocorrer a sua explosão em caso de defeito.

Este software foi desenvolvido para calcular os curto-circuitos com mais exactidão, de uma forma mais rápida e completa, específico para transformadores, tendo abordado todos os tipos de curto-circuitos possíveis e considerados pelas normas da Comissão Electrotécnica Internacional.

Abstract

This study resulted of a partnership between Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto and Efacec Energy - PT.

The subject chosen was the short circuits of power transformers, which is a big concern in the area of electric energy networks.

In the presence of a physical defect a short circuit may appear causing damage both to electric and mechanical materials and possibly resulting in severe injuries and even death of the nearby workers.

The power transformers are electric machines of great size and high cost, which may explode if defective.

This software was developed with the goal of calculating the short circuits with exactness, in a faster and more complete way, considering all existent types of short circuits described in the norms of International Electrotechnical Commission.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos aqueles que me ajudaram a realizar esta Tese de Mestrado, a nível de métodos de trabalho, de documentação ou esclarecimento de dúvidas.

Queria começar por agradecer à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e à Efacec Energia - PT que me deram todo o material e apoio necessário.

Em concreto, ao meu orientador da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, o Prof. Doutor António Carlos Sepúlveda Machado e Moura e ao meu orientador da Efacec Energia - PT, o Sr. Eng. Duarte Couto.

E a todas as pessoas que me ajudaram, destacando o Sr. Eng. Ricardo Lopes, Sra. Eng. Andrea Soto, Sr. Eng. Orlando Moreiras e à Sra. Dr. Susana Figueiredo.

Índice

Resumo	v
Abstract.....	vii
Agradecimentos	ix
Índice.....	xi
Lista de figuras	xiii
Lista de tabelas	xvii
Abreviaturas e Símbolos	xix
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e motivação	1
1.2 Objectivo.....	2
1.3 Estrutura do projecto	3
Capítulo 2	5
Transformadores: revisão de bases teóricas	5
2.1 Princípio de funcionamento	5
2.2 Transformadores trifásicos.....	7
2.3 Ensaios económicos	10
2.4 Impedâncias	12
Capítulo 3	13
Curto-circuitos: análise dos casos possíveis.....	13
3.1 Curto-circuito simétrico	16
3.2 Curto-circuito assimétrico	17
3.3 Método das componentes simétricas.....	18
3.4 Teorema de Thévenin.....	21
3.5 Curto-circuito Monofásico.....	22
3.6 Curto-circuito Bifásico	25
3.7 Curto-circuito Bifásico Terra	27
3.8 Cálculo das correntes de pico	30
Capítulo 4	33
Software de cálculo	33

4.1 Introdução	33
4.2 Software de Cálculo.....	33
4.3 Cálculo das correntes de curto-circuito	44
4.4 Cálculo das correntes de pico	47
4.5 Cálculo das tensões de defeito.....	48
Capítulo 5	49
Aplicação do software desenvolvido e análise comparada de resultados	49
5.1 Transformador de 2 enrolamentos	49
5.2 Transformador de 3 enrolamentos	53
Capítulo 6	59
Conclusões e perspectivas de desenvolvimento futuro	59
Referências	61
ANEXO A	65
ANEXO B	75

Lista de figuras

Figura 2.1 - Transformador ideal [2]	6
Figura 2.2 - Esquema de ligações [2]	9
Figura 2.3 - Diagrama de fasores [2]	9
Figura 2.4 - Esquema de montagem para o ensaio em vazio [3]	11
Figura 2.5 - Esquema de montagem para o ensaio em curto-circuito [4].....	11
Figura 3.1 - Corrente de curto-circuito afastada de qualquer alternador [5].....	15
Figura 3.2 - Corrente relativa de um curto-circuito próximo de um alternador [5]	15
Figura 3.3 - Curto-circuito trifásico [2]	17
Figura 3.4 - Componentes simétricas de um sistema trifásico assimétrico [2]	19
Figura 3.5 - Esquema equivalente de Thévenin [2]	22
Figura 3.6 - Curto-circuito monofásico	23
Figura 3.7 - Curto-circuito bifásico	25
Figura 3.8 - Curto-circuito bifásico com terra	27
Figura 3.9 - Factor K [6]	30
Figura 3.10 - Factor K [6].....	31
Figura 4.1 - Menu inicial do CorrentesCC	35
Figura 4.2 - Menu do CorrentesCC para 2 enrolamentos.....	36
Figura 4.3 - Menu do CorrentesCC	36
Figura 4.4 - Menu do CorrentesCC	37
Figura 4.5 - Menu do CorrentesCC	37
Figura 4.6 - Menu do CorrentesCC	37
Figura 4.7 - Menu do CorrentesCC	37

Figura 4.8 - Menu do CorrentesCC	38
Figura 4.9 - Menu do CorrentesCC	38
Figura 4.10 - Menu do CorrentesCC.....	38
Figura 4.11 - Menu do CorrentesCC.....	38
Figura 4.12 - Folha de Resultados do CorrentesCC	39
Figura 4.13 - Folha de Resultados do CorrentesCC	39
Figura 4.14 - Folha de Resultados do CorrentesCC	40
Figura 4.15 - Folha de Resultados do CorrentesCC	40
Figura 4.16 - Menu do CorrentesCC para 3 enrolamentos	41
Figura 4.17 - Folha de Resultados do CorrentesCC	42
Figura 4.18 - Folha de Resultados do CorrentesCC	42
Figura 4.19 - Folha de Resultados do CorrentesCC	43
Figura 4.20 - Folha de Resultados do CorrentesCC	43
Figura 4.21 - Curto-circuito trifásico [6]	44
Figura 4.22 - Curto-circuito bifásico [6]	45
Figura 4.23 - Curto-circuito bifásicos [6].....	45
Figura 4.24 - Monofásico [6]	46
Figura 5.1 - Exemplo com 2 enrolamentos	50
Figura 5.2 - Resultados dos Curto-circuitos trifásicos.....	50
Figura 5.3 - Resultados dos Curto-circuitos monofásicos	51
Figura 5.4 - Gráfico comparativo dos valores mais elevados das correntes de curto-circuito na Alta Tensão dos dois softwares.....	52
Figura 5.5 - Gráfico comparativo dos valores mais elevados das correntes de curto-circuito na Baixa Tensão dos dois softwares	52
Figura 5.6 - Exemplo com 3 enrolamentos	54
Figura 5.7 - Resultados dos Curto-circuitos trifásicos.....	54
Figura 5.8 - Resultados dos Curto-circuitos monofásicos	55
Figura 5.9 - Gráfico comparativo dos valores mais elevados das correntes de curto-circuito na Alta Tensão dos dois softwares.....	56
Figura 5.10 - Gráfico comparativo dos valores mais elevados das correntes de curto-circuito na Média Tensão dos dois softwares	57

Figura 5.11 - Gráfico comparativo dos valores mais elevados das correntes de curto-circuito na Baixa Tensão dos dois softwares..... 57

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Comparação dos diferentes enrolamentos.....	8
Tabela 4.1 - Tabela das potências aparentes de curto-circuito da rede [8]	34
Tabela 5.1 - Resultados do CorrentesCC.....	51
Tabela 5.2 - Resultados do CORET	51
Tabela 5.3 - Comparação dos resultados dos dois softwares.....	53
Tabela 5.4 - Resultados do CorrentesCC.....	55
Tabela 5.5 - Resultados do CORET	56
Tabela 5.6 - Comparação dos resultados dos dois softwares.....	58

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

AC	Corrente Alternada
ANSI	American National Standards Institute
CEI	Comissão Electrotécnica Internacional
DC	Corrente Continua
f.e.m.	Força Electromotriz
VDE	Verband Deutscher Electrotechniker

Lista de símbolos

u_{kr}	Tensão de curto-circuito atribuída a um transformador, em percentagem.
u_{Rr}	Componente resistiva atribuída a tensão de curto-circuito de um transformador em percentagem.
u_{Xr}	Componente reactiva atribuída a tensão de curto-circuito de um transformador em percentagem.
x_T	Reactância relativa do transformador.
c	factor da tensão.
U_{rTHV}	Tensão atribuída ao transformador no lado da alta tensão do transformador.
U_{rTLV}	Tensão atribuída ao transformador no lado da baixa tensão do transformador.
U_{vista}	Tensão vista do lado do enrolamento a considerar.
U_h^{cc} / U_{cc}	Tensão homopolar de curto-circuito em percentagem.
U_n	Tensão nominal.
U_{cc}	Tensão de curto-circuito em percentagem.
U_A	Tensão nominal no enrolamento de alta.
U_M	Tensão nominal no enrolamento de média.
U_B	Tensão nominal no enrolamento baixa.
$U_{A/B}^{cc}$	Tensão de curto-circuito entre os enrolamentos de alta e de baixa em percentagem.
$U_{A/M}^{cc}$	Tensão de curto-circuito entre os enrolamentos de alta e na média em percentagem.
$U_{M/B}^{cc}$	Tensão de curto-circuito entre os enrolamentos de média e na baixa em percentagem.
U_A^{cc}	Tensão de curto-circuito no enrolamento de alta em percentagem.

U_M^{cc}	Tensão de curto-circuito no enrolamento de média em percentagem.
U_B^{cc}	Tensão de curto-circuito no enrolamento baixa em percentagem.
I_{kQ}''	Corrente de curto-circuito simétrica inicial no ponto de ligação a uma alimentação (valor eficaz).
I_k''	Corrente de curto-circuito simétrica inicial.
I_{k2}''	Corrente de curto-circuito bifásico.
I_{k1}''	Corrente de curto-circuito monofásico.
I_{k2ELS}''	Corrente de curto-circuito na fase S num curto-circuito fase-fase-terra.
I_{k2ELT}''	Corrente de curto-circuito na fase T num curto-circuito fase-fase-terra.
I_{kE2E}''	Corrente de curto-circuito que vai para terra num curto-circuito fase-fase-terra.
I_A^{cc}	Corrente de curto-circuito no enrolamento da alta.
I_M^{cc}	Corrente de curto-circuito no enrolamento da média.
I_B^{cc}	Corrente de curto-circuito no enrolamento de baixa.
I_A^{cc-L}	Corrente de curto-circuito na linha no enrolamento da alta.
I_M^{cc-L}	Corrente de curto-circuito na linha no enrolamento da média.
I_B^{cc-L}	Corrente de curto-circuito na linha no enrolamento na baixa.
I_A^{cc-Y}	Corrente de curto-circuito no enrolamento em estrela no enrolamento da alta.
I_M^{cc-Y}	Corrente de curto-circuito no enrolamento em estrela no enrolamento da média.
I_B^{cc-Y}	Corrente de curto-circuito no enrolamento em estrela no enrolamento no baixa.
I_A^{cc-D}	Corrente de curto-circuito no enrolamento em triângulo no enrolamento da alta.
I_M^{cc-D}	Corrente de curto-circuito no enrolamento em triângulo no enrolamento da média.
I_B^{cc-D}	Corrente de curto-circuito no enrolamento em triângulo no enrolamento na baixa.
$I_{A_k2ELS}^{cc-L}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra na linha na fase S no enrolamento da alta.
$I_{A_k2ELT}^{cc-L}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra na linha na fase T no enrolamento da alta.
$I_{A_kE2E}^{cc-L}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra na linha que vai para a terra no enrolamento da alta.
$I_{A_k2ELS}^{cc-Y}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra no enrolamento em estrela na fase S no enrolamento da alta.
$I_{A_k2ELT}^{cc-Y}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra no enrolamento em estrela na fase T no enrolamento da alta.
$I_{A_kE2E}^{cc-Y}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra no enrolamento em estrela que vai para a terra no enrolamento da alta.

$I_{A_k2ELS}^{cc_D}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra no enrolamento em triângulo na fase S no enrolamento da alta.
$I_{A_k2ELT}^{cc_D}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra no enrolamento em triângulo na fase T no enrolamento da alta.
$I_{A_kE2E}^{cc_D}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra no enrolamento em triângulo que vai para a terra no enrolamento da alta.
$I_{M_k2ELS}^{cc_L}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra na linha na fase S no enrolamento da média.
$I_{M_k2ELT}^{cc_L}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra na linha na fase T no enrolamento da média.
$I_{M_kE2E}^{cc_L}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra na linha que vai para a terra no enrolamento da média.
$I_{M_k2ELS}^{cc_Y}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra no enrolamento em estrela na fase S no enrolamento da média.
$I_{M_k2ELT}^{cc_Y}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra no enrolamento em estrela na fase T no enrolamento da média.
$I_{M_kE2E}^{cc_Y}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra no enrolamento em estrela que vai para a terra no enrolamento da média.
$I_{M_k2ELS}^{cc_D}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra no enrolamento em triângulo na fase S no enrolamento da média.
$I_{M_k2ELT}^{cc_D}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra no enrolamento em triângulo na fase T no enrolamento da média.
$I_{M_kE2E}^{cc_D}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra no enrolamento em triângulo que vai para a terra no enrolamento da média.
$I_{B_k2ELS}^{cc_L}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra na linha na fase S no enrolamento da baixa.
$I_{B_k2ELT}^{cc_L}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra na linha na fase T no enrolamento da baixa.
$I_{B_kE2E}^{cc_L}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra na linha que vai para a terra no enrolamento da baixa.
$I_{B_k2ELS}^{cc_Y}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra no enrolamento em estrela na fase S no enrolamento da baixa.
$I_{B_k2ELT}^{cc_Y}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra no enrolamento em estrela na fase T no enrolamento da baixa.
$I_{B_kE2E}^{cc_Y}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra no enrolamento em estrela que vai para a terra no enrolamento da baixa.
$I_{B_k2ELS}^{cc_D}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra no enrolamento em triângulo na fase S no enrolamento da baixa.
$I_{B_k2ELT}^{cc_D}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra no enrolamento em triângulo na fase T no enrolamento da baixa.
$I_{B_kE2E}^{cc_D}$	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra no enrolamento em triângulo que vai para a terra no enrolamento da baixa.
i_p	Valor do pico da corrente de pico em curto-circuito.

i_{p2}	Valor do pico da corrente de pico em curto-circuito bifásico.
i_{p2E}	Valor do pico da corrente de pico em curto-circuito bifásico com terra.
i_{p1}	Valor do pico da corrente de pico em curto-circuito monofásico.
Z_Q	Impedância de ligação a uma alimentação.
Z_{rede}	Impedância da rede.
$Z_{Transf.}$	Impedância do transformador.
Z_{THV}	Impedância do transformador no lado da alta tensão.
Z_k	Impedância de curto-circuito da rede de corrente alternativa trifásica.
Z_d	Impedância directa.
Z_i	Impedância inversa.
Z_h	Impedância homopolar.
Z_A^{cc}	Impedância no enrolamento da alta.
Z_M^{cc}	Impedância no enrolamento da média.
Z_B^{cc}	Impedância no enrolamento da baixa.
Z_{rede}^h	Impedância homopolar da rede.
$Z_{Transf.}^h$	Impedância homopolar do transformador.
$Z_A^{cc_h}$	Impedância homopolar no enrolamento da alta.
$Z_M^{cc_h}$	Impedância homopolar no enrolamento da média.
$Z_B^{cc_h}$	Impedância homopolar no enrolamento da baixa.
$Z_{A \rightarrow B}^{cc}$	Impedância do enrolamento da alta referido a baixa.
$Z_{M \rightarrow B}^{cc}$	Impedância no enrolamento da média referido a baixa.
$Z_{A \rightarrow M}^{cc}$	Impedância do enrolamento da alta referido a média.
$Z_{B \rightarrow M}^{cc}$	Impedância no enrolamento do terciário referido a média.
$Z_{M \rightarrow A}^{cc}$	Impedância do enrolamento da média referido a alta.
$Z_{B \rightarrow A}^{cc}$	Impedância no enrolamento da baixa referido a alta.
$Z_{A \rightarrow B}^{cc_h}$	Impedância homopolar do enrolamento da alta referido a baixa.
$Z_{M \rightarrow B}^{cc_h}$	Impedância homopolar no enrolamento da média referido a baixa.
$Z_{A \rightarrow M}^{cc_h}$	Impedância homopolar do enrolamento da alta referido a média.
$Z_{B \rightarrow M}^{cc_h}$	Impedância homopolar no enrolamento da baixa referido a média.
$Z_{M \rightarrow A}^{cc_h}$	Impedância homopolar do enrolamento da média referido a alta.
$Z_{B \rightarrow A}^{cc_h}$	Impedância homopolar no enrolamento da baixa referido a alta.
R_k	Resistência de curto-circuito trifásica.
X_k	Reactância de curto-circuito trifásica.
$S_{referido}^{cc}$	Potência de curto-circuito aparente referente ao lado a considerar.
S_A^{cc}	Potência de curto-circuito aparente no enrolamento da alta.
S_M^{cc}	Potência de curto-circuito aparente no enrolamento da média.
S_B^{cc}	Potência de curto-circuito aparente no enrolamento da baixa.
P_b	Potência de base.

- A Tipo de enrolamento estrela ou triângulo no enrolamento de alta.
- M Tipo de enrolamento estrela ou triângulo no enrolamento da média.
- B Tipo de enrolamento estrela ou triângulo no enrolamento da baixa.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento e motivação

A necessidade de proceder à normalização do cálculo das correntes de curto-circuito foi aceite há quase 80 anos. Desde esse tempo, têm sido propostas várias alternativas mas infelizmente, nunca se conseguiu alcançar um cenário simples e universal, normalizado e aceite internacionalmente. Todas as metodologias normalizadas foram, por boas razões, baseadas em várias suposições simplificadoras, escolhidas para dar projectos conservadores, e também baseadas no uso de factores empíricos necessários para reflectir os efeitos das tensões do sistema, a razão dos circuitos X/R , proximidade dos geradores, etc. Avanços na tecnologia dos computadores permitiu-nos produzir softwares de análise de curto-circuitos com maiores desempenhos.

Em 1918, uma das mais poderosas ferramentas para estabelecer as equações de curto-circuitos, em circuitos polifásicos equilibrados e desequilibrados, foi apresentada por Fortescue numa conferência num instituto americano para engenheiros electrotécnicos. No método descrito no artigo científico de Fortescue estão aplicadas ambas as soluções analíticas e nas tabelas de cálculo AC e DC. Este método foi bastante adoptado, tanto na Europa como nos Estados Unidos da América, durante os primeiros anos da indústria eléctrica.

No entanto, a complexidade do cálculo dos curto-circuitos em a qualquer sistema eléctrico foi está para além do método de cálculo de Fortescue. Actualmente, utilizam-se métodos mais poderosos, capazes de melhorar os resultados fornecidos pelo o método das componentes simétricas. A primeira metodologia normalizada para o cálculo de curto-circuitos foi introduzida em 1929 pela Verband Deutscher Electrotechniker (VDE). Durante o mesmo ano, as tabelas de cálculo das redes AC foram desenvolvidos juntamente com o Instituto de Tecnologia de Massachusetts e a General Electric Company. O estudo dos curto-circuitos que podiam ser executados nas tabelas de cálculo DC do dia, podiam ser executados com mais precisão nas tabelas de cálculo em AC.

Nos Estados Unidos da América, os inícios dos anos 1940 e 1950 viram o desenvolvimento da normalização similar ao da VDE nas suas bases subjacentes dos métodos das componentes simétricas, mas diferente nos factores empíricos em cada normalização usada para aproximar tal fenómeno como as AC e as DC. Ao longo dos anos, os factores empíricos tornaram-se mais

2 Introdução

importantes, devido ao facto dos equipamentos eléctricos estarem por categorias, de acordo com o método particular de cálculo. Felizmente, até 1987, existiam somente duas normas principais para calcular equações de curto-circuitos. Em 1987, as normas VDE 0102 foram incorporadas nas novas normas 909 da Comissão Electrotécnica Internacional (CEI). As normas American National Standards Institute (ANSI) vieram dar igualmente um contributo para a definição dos vários parâmetros de cálculo.

Pode observar-se que, nos anos 90, as normas ANSI e CEI são essencialmente baseadas em procedimentos empíricos, em que as equações dos cálculos de curto-circuitos são em regimes estacionários. As actuais normas ANSI (C37.06-1979 e C37.010-1979), tal como as normas CEI 909, que têm uma extrema confiança nos multiplicadores e procedimentos empíricos, têm sido muito melhoradas ao longo dos anos. [1]

Com a evolução e o aumento do desempenho dos computadores, têm-se assistido a uma melhoria dos algoritmos dos cálculos de curto-circuito, podendo-se fazer mais cálculos em menos tempo e mais exactos.

Nestas últimas duas décadas, temos assistido a um grande desenvolvimento dos *softwares*, e as ferramentas de cálculo tornaram-se bastante mais poderosas.

Os algoritmos de cálculo de curto-circuitos foram desenvolvidos, em boa parte, para permitirem assegurar progressos na tecnologia das redes eléctricas.

E, com isso, devemos continuar a procurar algoritmos melhores que levem a melhores resultados, de forma a conseguir proteger melhor os nossos equipamentos eléctricos e também as pessoas que tenham contacto com os elementos eléctricos.

A motivação para deste trabalho, centra-se na qualidade, rapidez e simplicidade de resultados obtidos no dimensionamento do transformador. Actualmente, é exigido às empresas, maior competitividade, qualidade e segurança, tanto da parte da CEI como da parte dos seus clientes.

Um facto relevante é que, quando se trata dos dimensionamentos de transformadores de potência, está-se a falar de máquinas eléctricas que correspondem a um grande investimento, e daí a exigência ser ainda maior, para além de, normalmente, estarem ligadas em redes importantes, como são as de Média Tensão, Alta Tensão e Muito Alta Tensão.

Com efeito, no caso de ocorrer uma paragem num transformador desta gama, para além do seu custo da reparação, ou mesmo da substituição por um novo transformador ficar bastante elevado, implicará seguramente consequências muito graves pela interrupção das suas funções na rede.

1.2 Objectivo

O objectivo deste projecto teve como desenvolvimento, um *software* de cálculo de curto-circuitos em transformadores de potência, capaz de fornecer determinados dados de grande utilidade e que os outros programas não forneciam do mesmo modo.

Como referência vamos tomar o CORET que é um *software* de cálculo que a Efacec Energia - PT desenvolveu, o qual possui capacidade de calcular correntes de curto-circuito trifásicas e monofásicas.

O CORET será usado para comparação de resultados, tendo em conta que este *software* já é usado há vários anos nesta empresa.

Este *software* desenvolvido procura ser de mais fácil utilização para o utilizador, com valores mais exactos em relação ao que o CORET já nos dá, aproveitando todo o potencial que

os computadores de hoje em dia nos podem facultar e ainda dispor de informação adicional, como as correntes de curto-circuito e as suas tensões em módulo e ângulo e os seus valores de pico.

Este software ajudará o utilizador de tal forma, que este poderá ter acesso às correntes máximas de curto-circuito, correntes de pico e tensões de defeito num só cálculo, para todos os tipos de curto-circuitos considerados.

Posteriormente, este software poderá ser aplicado na base de dados da EFACEC, de forma a melhorar a velocidade e qualidade dos cálculos no dimensionamento dos transformadores do tipo CORE e SHELL.

1.3 Estrutura do projecto

Este trabalho está dividido em 6 capítulos, dos quais, o primeiro é composto por esta introdução ao trabalho, onde se refere o enquadramento e motivação do tema do projecto e os objectivos a cumprir.

No segundo capítulo, temos uma introdução acerca de transformadores, sendo apresentadas bases gerais relacionadas com este tópico, permitindo uma contextualização e uma melhor compreensão do assunto abordado neste projecto.

O terceiro capítulo, aborda os curto-circuitos, começando por referir de uma forma geral quais os curto-circuitos existentes e como se calculam os mesmos e também as correntes de pico.

No quarto capítulo, explica-se o funcionamento do software de cálculo, começando por uma apresentação do software CorrentesCC, como funciona, quais os cuidados a ter e uma explicação acerca dos cálculos efectuados no CorrentesCC. Estes cálculos efectuados encontram-se detalhados em anexos.

No quinto capítulo, temos duas aplicações do software desenvolvido e uma análise comparada dos resultados com o CORET.

Por fim, o último capítulo contém as conclusões gerais do trabalho, analisa os seus principais resultados e apresenta algumas perspectivas de desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Transformadores: revisão de bases teóricas

O transporte e distribuição de energia eléctrica em corrente alternada, só existe devido à existência do transformador estático.

Por motivos técnicos, económicos e de segurança são necessários diferentes níveis de tensão, conforme se trate da produção de energia, do transporte, da distribuição ou do consumo. A possibilidade de adaptar tensões por meios estáticos, deriva da lei de indução. Entre dois enrolamentos temos um acoplamento magnético. A razão dos seus números de espiras determina com boa aproximação (factor de acoplamento ≈ 1), a razão entre as tensões de entrada e de saída, e a razão inversa em relação à anterior, entre as respectivas correntes, pelo que, também muito aproximadamente serão iguais as potências de entrada e saída. De acordo com a lei de indução, o funcionamento do transformador estático só é possível, se as tensões forem variáveis no tempo.

O transformador é utilizado nas redes de energia eléctrica para aumentar e diminuir a tensão, facilitando o transporte da energia. No nosso país, temos linhas a operar nos 400kV mas existem países onde já se trabalha com tensões ainda mais altas.

2.1 Princípio de funcionamento

Considera-se um transformador monofásico ideal (enrolamentos com resistência nula e circuito magnético com relutância igualmente nula), representado esquematicamente na figura 2.1. Observe-se o sentido convencional das correntes, coerente com a assunção de que o enrolamento primário recebe energia de uma fonte e o secundário a entrega a uma carga.

6 Transformadores: revisão de bases teóricas

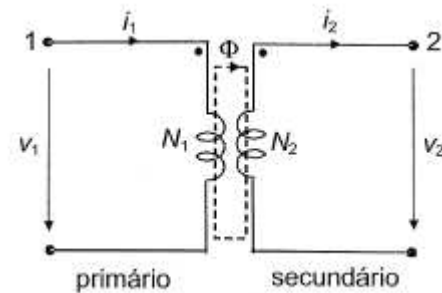


Figura 2.1 - Transformador ideal [2]

A aplicação de uma tensão alternada v_1 ao enrolamento primário dá lugar a um fluxo magnético ligado λ_1 , que com ela se relaciona pela lei de Faraday:

$$v_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} \quad (2.1)$$

O fluxo ligado λ_1 é igual ao produto do número de espiras do enrolamento N_1 pelo fluxo magnético Φ que circula no núcleo (uma vez que se supôs um circuito magnético com relutância nula, não há fluxo de dispersão):

$$\lambda_1 = N_1 \times \Phi \quad (2.2)$$

donde:

$$v_1 = N_1 \times \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.3)$$

O fluxo ligado com o enrolamento secundário é então:

$$\lambda_2 = N_2 \times \Phi \quad (2.4)$$

onde N_2 é o número de espiras do enrolamento secundário.

Resultando para a f.e.m. induzida no enrolamento secundário (tensão em vazio) v_2 :

$$v_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} = N_2 \times \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.5)$$

Em regime alternado sinusoidal, o fluxo Φ e as tensões v_1 e v_2 têm a mesma frequência angular ω . Usando a notação simbólica:

$$V_1 = j\omega N_1 \Phi \quad (2.6)$$

$$V_2 = j\omega N_2 \Phi \quad (2.7)$$

Dividindo as duas últimas equações:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.8)$$

Considere-se agora o transformador em carga. Uma vez que num transformador ideal não há perdas, quer de potência activa (resistência dos enrolamentos nula) quer de reactiva (reactâncias de dispersão nula), a potência complexa é igual nos dois lados do transformador:

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (2.9)$$

donde:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (2.10)$$

ou seja:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.11)$$

A relação do transformador m é o quociente entre o número de espiras N_1 do primário (enrolamento que recebe energia) e do secundário N_2 (enrolamento que cede energia):

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_{n1}}{V_{n2}} kV / kV \quad (2.12)$$

onde V_{n1} é a tensão nominal primária e V_{n2} a tensão nominal secundária.

Tomando para as tensões de base, do lado primário e do secundário, as respectivas tensões nominais:

$$V_{b1} = V_{n1} \quad (2.13)$$

$$V_{b2} = V_{n2} \quad (2.14)$$

a relação de transformação em p.u. é:

$$m = \frac{V_{n1pu}}{V_{n2pu}} = \frac{V_{n1}}{V_{b1}} \times \frac{V_{b2}}{V_{n2}} = 1,0 p.u. \quad (2.15)$$

Uma vez que a relação de transformação é unitária, o transformador ideal pode ser retirado no esquema equivalente da rede em que esteja integrado.

2.2 Transformadores trifásicos

Nos sistemas trifásicos, usam-se os transformadores trifásicos mas também se podem usar 3 transformadores monofásicos, ligados de forma a constituírem um banco trifásico. Os transformadores trifásicos ficam mais baratos a nível de produto final mas, no caso de se querer um transformador de reserva ou mesmo em caso de avaria de um deles, fica mais barato o banco de transformadores, pois apenas se precisa de ter um transformador monofásico em vez de ter um trifásico.

8 Transformadores: revisão de bases teóricas

Os transformadores trifásicos (ou o banco trifásico) podem ter vários esquemas de ligações dos seus enrolamentos. Podem ser em triângulo (D ou Δ), estrela (Y) e o menos usado, o zig-zag (Z), usado na distribuição.

Algumas comparações sobre estes tipos de enrolamentos, para a mesma potência do transformador e com iguais tensões compostas e fluxos nos núcleos são:

Tabela 2.1 - Comparação dos diferentes enrolamentos

	Estrela	Triângulo	Zig-Zag
Tensão composta	U	U	U
Intensidade da linha	I	I	I
Intensidade por enrolamento	I	$\frac{I}{\sqrt{3}}$	I
Secção do enrolamento (com igual densidade de corrente)	s	$\frac{s}{\sqrt{3}}$	s
Número de espiras	N	$\sqrt{3}.N$	$\frac{2}{\sqrt{3}}.N$
Peso do condutor	100	100	115,5

A aplicação de cada ligação:

- ✚ Estrela: pode ter neutro acessível, podendo ter-se acesso a dois níveis de tensão. Tem ainda a vantagem de os seus enrolamentos poderem ter isolamento graduado. Com efeito, enquanto numa ligação em estrela é aplicada aos enrolamentos uma tensão simples, numa ligação em triângulo cada enrolamento está submetido à tensão composta.
- ✚ Triângulo: é utilizada quando as correntes que se prevêm são elevadas, pois deste modo, a corrente no enrolamento é $\sqrt{3}$ vezes inferior à corrente na linha. Além disso, num banco de transformadores monofásicos ligados em triângulo, a avaria de um dos transformadores não impede a continuação do serviço, embora com potência inferior ($\frac{2}{3}$ da nominal).
- ✚ Zig-zag: é utilizada quando se prevêm no circuito de carga grandes desequilíbrios. Com efeito, este tipo de ligação, estando subdividido por colunas diferentes, tem vantagem de uma carga numa fase afectar sempre duas fases da rede de distribuição, minimizando assim o efeito do desequilíbrio. Por este motivo, esta ligação é utilizada no secundário dos transformadores de distribuição onde a repartição de cargas por cada fase dificilmente é equilibrada. No entanto, como já foi visto na tabela 2.1, gasta mais cobre em cerca de 15%, ficando mais caro.

Estes 3 tipos de ligações fazem depois combinações entre elas, formando vários tipos de transformadores, tornando-se uns mais favoráveis que outros para as várias situações das redes eléctricas.

Os transformadores são representados pelos seus símbolos e coloca-se um símbolo maiúsculo para o primário, um minúsculo para o secundário e, no caso do transformador ser de 3 enrolamentos, o seu símbolo virá também em minúsculas.

No caso da ligação em triângulo, não temos nenhuma ligação ao neutro mas, na ligação em estrela podemos ter essa ligação de maneira que temos de referenciar na simbologia, se o neutro está ou não ligado, através de um 'n'.

Nos transformadores ligados em Y/ Δ ou em Δ /Y, existe um desfaseamento entre o primário e o secundário nas tensões, motivo pela qual, o transformador tem uma relação complexa.

Como se pode verificar pela figura 2.2, temos como exemplo um transformador do tipo Y/ Δ , onde se tem o seguinte diagrama de fasores:

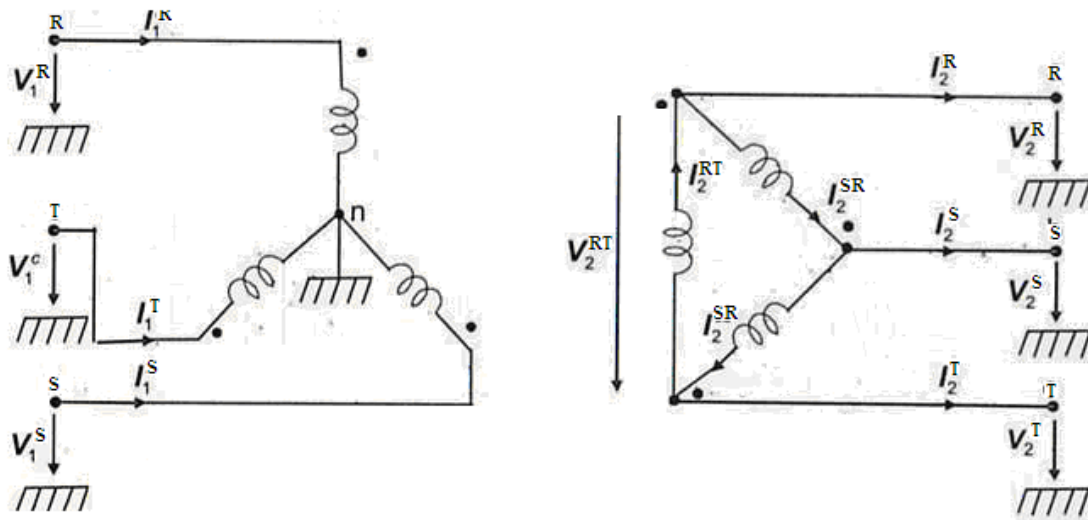


Figura 2.2 - Esquema de ligações [2]

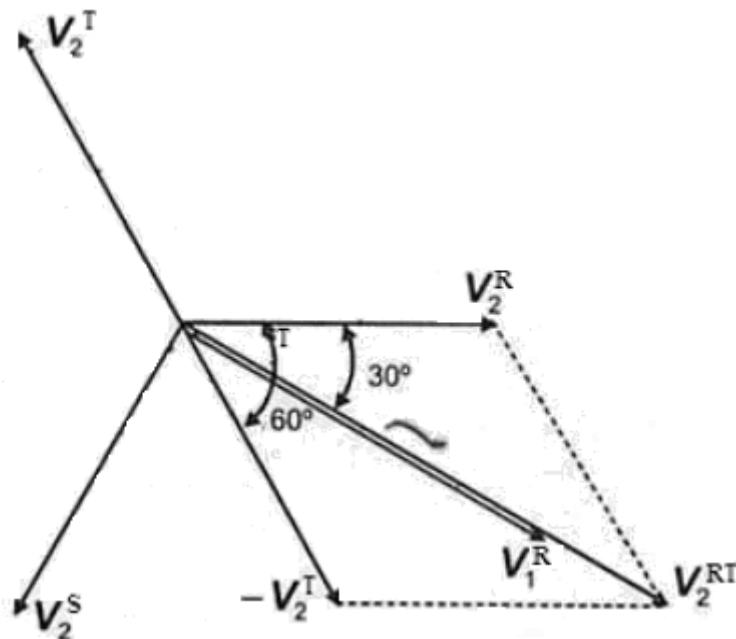


Figura 2.3 - Diagrama de fasores [2]

10 Transformadores: revisão de bases teóricas

Tem-se a seguinte dedução:

$$V_B^{RT} = V_B^R - V_B^T \quad (2.16)$$

Ora se V_B^R se toma como referência e as fases são chamadas de RST, teremos,

$$V_B^T = V_B^R \cdot e^{j120^\circ} \quad (2.17)$$

e assim, substituído na primeira equação obtém-se,

$$V_B^{RT} = V_B^R \cdot (1 - e^{j120^\circ}) = \sqrt{3} \cdot V_B^R \cdot e^{-j30^\circ} \quad (2.18)$$

A razão de transformação é dada por N_A e N_B , que representam o número de espiras dos enrolamentos da alta e da baixa, respectivamente.

$$V_A^R = \frac{N_A}{N_B} \times V_B^{RT} = \sqrt{3} \times \frac{N_A}{N_B} \times V_B^R \times e^{-j30^\circ} \quad (2.19)$$

Como se pode verificar, a tensão fase-neutro na baixa está desfasada de 30° em avanço, em relação à correspondente tensão da alta. Caso se trocasse as polaridades das 3 fases de um dos enrolamentos, o argumento da relação de transformação passaria a ser de $+30^\circ$.

Para o caso da corrente na baixa, tem-se:

$$I_B^{RT} = \frac{N_A}{N_B} \times I_A^R \quad (2.20)$$

e

$$I_B^{RS} = \frac{N_A}{N_B} \times I_A^S = \frac{N_A}{N_B} \times I_A^R \times e^{-j120^\circ} \quad (2.21)$$

Então tem-se nas linhas da baixa,

$$I_B^R = I_B^{RT} - I_B^{ST} = \frac{N_A}{N_B} \times I_A^R \times (1 - e^{-j120^\circ}) = \sqrt{3} \times \frac{N_A}{N_B} \times I_A^R \times e^{j30^\circ} \quad (2.22)$$

Concluindo, pode-se demonstrar a igualdade entre as potências complexas trifásicas correspondentes à alta e à baixa, respectivamente, válida para um transformador ideal.

$$3 \times V_A^R \times I_A^{R*} = 3 \times V_B^R \times I_B^{R*} \quad (2.23)$$

2.3 Ensaios económicos

2.3.1 Ensaio em vazio

A componente fundamental à frequência nominal pode medir-se num ensaio em vazio do transformador, que se representa na figura 2.4. Temos de ter o secundário em circuito aberto e aplica-se a tensão e a frequência nominal ao enrolamento primário, dado que nenhuma corrente flui nele, nenhuma energia é transmitida para aquele ramo do circuito e as perdas de Joule, no enrolamento secundário, são nulas.

Verifica-se no entanto, que o wattímetro e o amperímetro inseridos no circuito do primário mostram valores não nulos, essa energia provém do enrolamento primário, das perdas Joule e das perdas do núcleo do ferro (Eddy e histerese).

Com este ensaio pode-se medir:

✚ A razão de transformação: $a = \frac{U_{1N}}{U_{20}}$ (2.24)

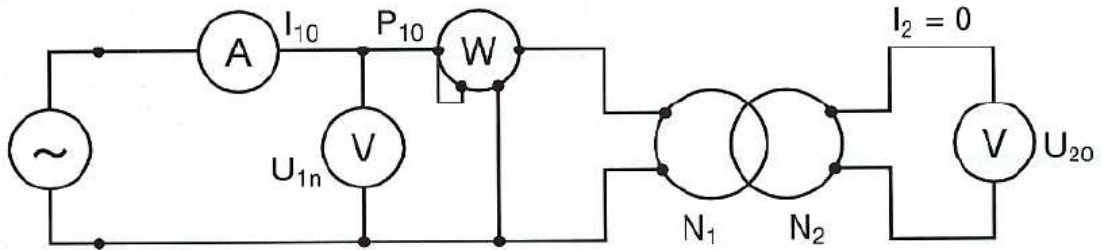


Figura 2.4 - Esquema de montagem para o ensaio em vazio [3]

✚ As perdas no ferro:

Para este modelo simplificado, no ensaio em vazio, a corrente percorrida nas impedâncias exteriores ao núcleo é nula, logo, todas as perdas serão resultantes de perdas do núcleo ou perdas no ferro ($P_{FE} = P_{10}$).

✚ O factor de potência: $\cos(\varphi_{10}) = \frac{P_{10}}{U_{1N} \cdot I_{10}}$ (2.25)

$P_{10} \rightarrow$ Potência activa absorvida

$U_{1N} \cdot I_{10} \rightarrow$ Potência aparente absorvida

✚ Impedância em vazio: $Z_0 = R_0 + jX_0$ (2.26)

2.3.2 Ensaio de Curto-circuito

Coloca-se em curto-circuito um dos enrolamentos, normalmente os terminais do secundário do transformador, e sobe-se a tensão até ter uma corrente igual à corrente nominal.

Podemos assim calcular:

✚ Tensão de curto-circuito nominal: $u_{cc} = \frac{U_{1cc}}{I_{1n}} \times 100\%$ (2.27)

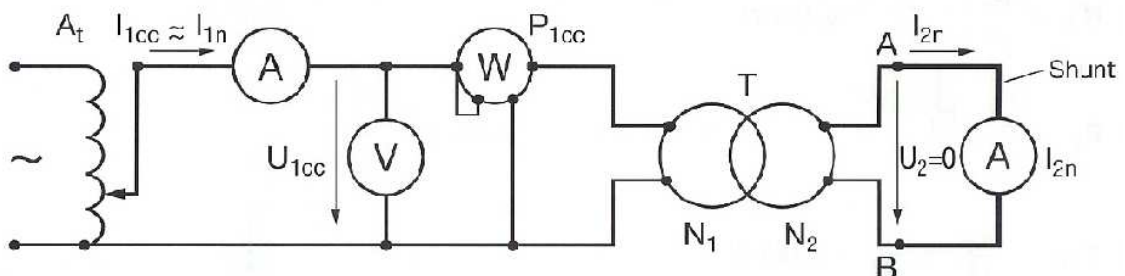


Figura 2.5 - Esquema de montagem para o ensaio em curto-circuito [4]

Tensão de curto-circuito nominal é, portanto, a razão entre a tensão que é necessário aplicar num enrolamento com o outro em curto-circuito, para que sejam percorridos pelas correntes nominais, e a sua tensão nominal.

✚ R_{1t} , X_{1t} e perdas nominais no cobre

2.4 Impedâncias

2.4.1 Impedância directa e inversa

Um transformador trifásico é uma máquina passiva, não rotativa. Portanto, a impedância directa e inversa têm o mesmo valor $X_d = X_i$.

A sua determinação faz-se com um ensaio de curto-circuito.

É preciso ter em atenção, os diferentes tipos de enrolamentos no primário e no secundário. É importante referir também que são introduzidos sentidos de rotação distintos nas tensões directa e inversa.

2.4.2 Impedância homopolar

O transformador é o equipamento que mais complicação introduz na análise de curto-circuitos assimétricos porque a sua impedância homopolar depende dos tipos de enrolamentos, depende da ligação dos pontos neutros à terra e depende, em geral, de que lado o transformador é observado.

Dependendo do tipo de enrolamentos, pode não ser possível ligar à terra o ponto neutro de um dos enrolamentos e, nesse caso, não se fechará circuito com o gerador de ensaio e a corrente homopolar será nula, significando que a impedância homopolar tem um valor infinito, ou seja, que o circuito homopolar, visto desse lado do transformador, é um circuito aberto.

Capítulo 3

Curto-circuitos: análise dos casos possíveis

O desafio deste trabalho reside em considerar todos os tipos de curto-circuitos perante as várias combinações possíveis da rede (de acordo com as suas características) e os diferentes transformadores, sem esquecer as normas em vigor publicadas pela CEI.

A preocupação em relação a estas correntes e tensões de defeito está focada no transformador, o objectivo é proteger apenas o transformador.

Os curto-circuitos são originados por defeitos, que provocam correntes, em geral, muito elevadas e que têm como consequência fadigas térmicas e mecânicas, que danificam os equipamentos por elas percorridos. As fadigas térmicas são devidas aos efeitos Joule e dependem do quadrado do valor eficaz da corrente e as fadigas mecânicas correspondem ao efeito electrodinâmico desenvolvido entre os condutores próximos, percorridos pelas elevadas correntes de curto-circuito, manifestando-se por meio de forças que se estabelecem instantaneamente e cuja intensidade é directamente proporcional às intensidades de corrente que percorrem os condutores.

Por esse mesmo motivo, o cálculo das correntes de curto-circuito torna-se bastante importante para dimensionar as devidas protecções e prever os esforços electrodinâmicos nas máquinas e barramentos.

A potência de curto-circuito pode ser definida como máxima e mínima, onde a máxima tem interesse para o dimensionamento do poder de corte dos disjuntores e dos esforços electrodinâmicos e a mínima é utilizada no cálculo das perturbações resultantes da ligação de geradores e/ou cargas e da sensibilidade das protecções contra curto-circuitos.

Consegue-se ver a capacidade da rede em absorver as variações no perfil de geração ou de carga pela sua potência de curto-circuito. Quanto maior for, mais “forte” é a rede e menor é a impedância a montante.

Para uma dada rede, a potência ou a intensidade de corrente de curto-circuito depende, evidentemente, do ponto da rede que se considera, pois os respectivos valores dependem das impedâncias que se interpõem entre as fontes de energia e esse ponto. Por outro lado, à medida que ao longo do tempo vai evoluindo a constituição de uma rede, pela adição de

novos componentes, nomeadamente novos centros produtores e novas linhas, vai aumentando a potência e a intensidade de corrente de curto-circuito num dado ponto da rede.

Nas redes de pequenas dimensões, é possível reduzir os elementos eléctricos (linhas, transformadores, geradores, etc.), por uma questão de análise e de mais fácil visualização em esquemas equivalentes, onde se mantém as suas propriedades mais importantes. Alguns pontos desses elementos não são referenciados por se considerarem desprezáveis.

Após transpor todos os elementos para os esquemas equivalentes, segue-se a sua simplificação, por meio da redução da rede em etapas sucessivas até à obtenção da impedância equivalente de Thévenin vista do ponto do defeito.

Com esse valor de impedância, já se pode calcular a corrente de curto-circuito.

Define-se corrente de curto-circuito como a corrente que flui através do defeito enquanto dura o curto-circuito.

Após um defeito, a corrente é vista em geral como a adição de três componentes, duas delas exponenciais e outra sinusoidal. A forma de onda da corrente de curto-circuito depende do valor da onda de tensão no instante em que ocorre o defeito. Assim, embora podendo ser simétrica em relação ao eixo dos tempos numa das fases, se o defeito ocorrer no instante em que a onda de tensão passa por zero, apresentará uma assimetria inicial em relação àquele eixo. De facto, além de uma componente fundamental alternada simétrica, apresenta uma componente contínua que decai para zero, anulando-se ao fim de oito a dez ciclos. Esta componente contínua, que aparece em pelo menos duas fases, atingirá o seu valor máximo (valor mais desfavorável) na fase em que o defeito ocorre simultaneamente com o instante em que a onda de tensão se anula.

À componente fundamental da corrente de curto-circuito chama-se corrente de curto-circuito simétrica.

A componente fundamental da corrente de curto-circuito simétrica decresce também com o tempo até atingir um valor estacionário. Definem-se então, os três períodos seguintes relativos à variação no tempo da componente fundamental da corrente de curto-circuito:

Período sub-transitório: período inicial durante o qual a corrente de curto-circuito diminui rapidamente de valor, com durações de um a dez ciclos.

Período transitório: período seguinte, correspondendo a uma diminuição mais lenta da corrente de curto-circuito, até ser atingido o valor permanente desta corrente, com durações compreendidas entre 50 e 100 períodos.

Período permanente: período em que a corrente de curto-circuito apresenta o seu valor quase estacionário. Obviamente que este período não será atingido, dado que o tempo total de isolamento do defeito, soma dos tempos de actuação das protecções e de corte, é muito inferior.

As curvas das correntes de curto-circuito em função do tempo, são apresentadas de seguida:

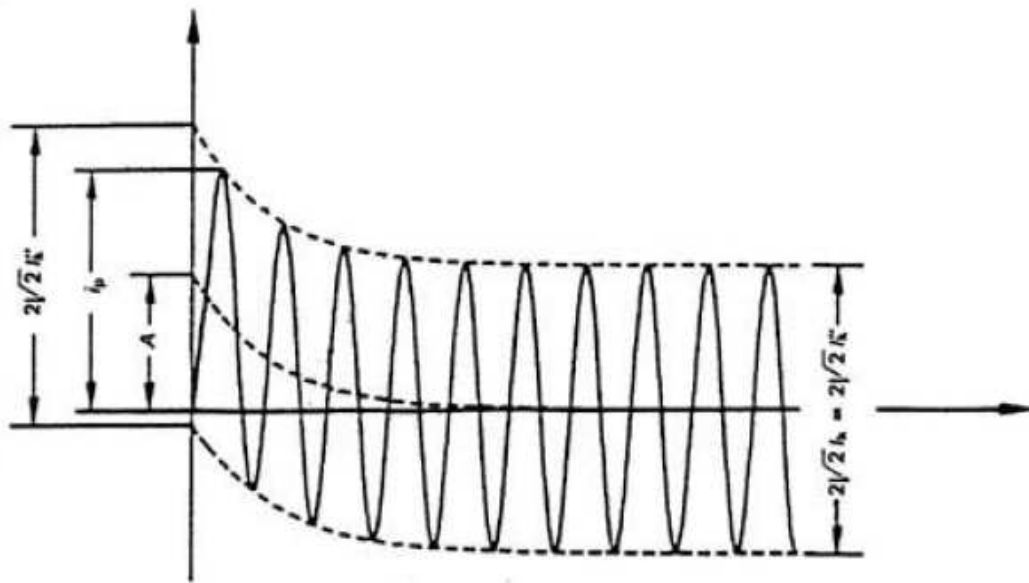


Figura 3.1 - Corrente de curto-circuito afastada de qualquer alternador [5]

e

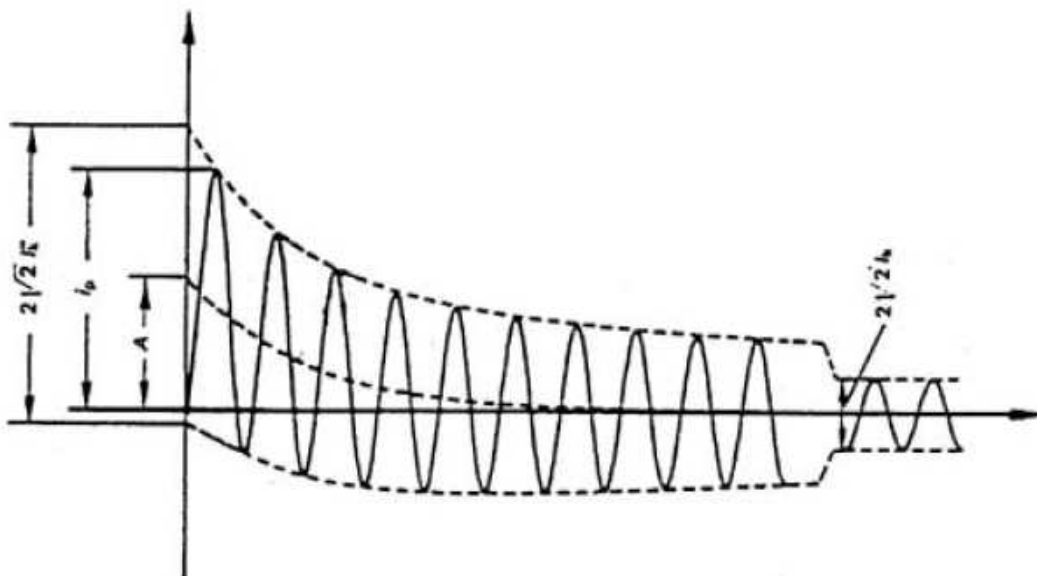


Figura 3.2 - Corrente relativa de um curto-circuito próximo de um alternador [5]

Pode-se ver nas seguintes figuras:

I_k'' = corrente de curto-circuito simétrica inicial (Valor eficaz da corrente de curto-circuito simétrica no instante em que ocorre o curto-circuito)

i_p = valor de pico da corrente de curto-circuito (valor máximo instantâneo da corrente de curto-circuito. O seu valor depende do instante do ciclo da onda de tensão em que ocorre o curto-circuito. Para o seu cálculo supõe-se sempre o instante correspondente ao maior valor possível, valor nulo da onda de tensão)

I_k = corrente de curto-circuito permanente (valor eficaz da corrente de curto-circuito simétrica que permanece após o desaparecimento da fase transitória do fenómeno)

i_{dc} = componente contínua da corrente de curto-circuito (valor médio da envolvente da corrente de curto-circuito, decrescente de um valor inicial até zero)

A = valor inicial da componente contínua i_{dc}

Podemos verificar que temos uma onda dividida em 3 períodos, período subtransitório, transitório e permanente.

Temos 2 grandes grupos de curto-circuitos: os curto-circuitos simétricos e os assimétricos, que podem ser francos ou sólidos (a impedância é nula).

✚ Os curto-circuitos simétricos ocorrem simultaneamente nas três fases do sistema. A impedância do defeito é igual em todas as fases.

✚ Nos curto-circuitos assimétricos existem diferentes curto-circuitos. Nomeadamente: o curto-circuito fase-terra ou monofásico, o curto-circuito fase-fase ou bifásico e o curto-circuito fase-fase-terra ou bifásico terra.

3.1 Curto-circuito simétrico

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

Na ocorrência de um defeito trifásico simétrico num barramento i , figura 3.3, com uma impedância Z_{def} , resulta uma corrente de curto-circuito igual em módulo nas três fases e desfasadas de mais ou menos 120° . Mesmo que haja uma ligação à terra, não existirá passagem de corrente no neutro, pelo facto de as três componentes somadas resultarem num valor nulo.

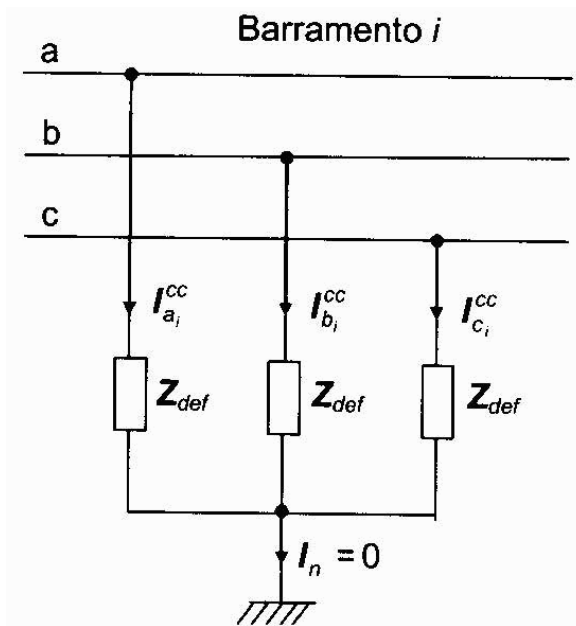


Figura 3.3- Curto-circuito trifásico [2]

Assim sendo, é possível utilizar um esquema monofásico equivalente e proceder à análise apenas numa fase.

Através da Lei de Ohm obtemos a fórmula para o cálculo da corrente de curto-circuito:

$$I_i^{cc} = \frac{V_i^0}{Z_{Total}} \quad (\text{Monofásico}) \quad (3.1)$$

$$I_i^{cc} = \frac{V_i^0}{\sqrt{3} \times Z_{Total}} \quad (\text{Trifásico}) \quad (3.2)$$

E a sua potência de curto-circuito será calculada:

$$S_i^{cc} = \sqrt{3} \times V_i^0 \times I_i^{cc} = \frac{V_i^{0^2}}{Z_{Total}} \quad (3.3)$$

Em valores p.u.:

$$S_i^{cc} = I_i^{cc} = \frac{1}{Z_{Total}} \quad (3.4)$$

3.2 Curto-circuito assimétrico

Nas redes de pequena dimensão, reduz-se a rede para calcular a corrente de curto-circuito, tal como se faz nos curto-circuitos simétricos.

Para se conseguir fazer essa análise tem-se de utilizar o método das componentes simétricas, onde se decompõe a corrente em 3 componentes separadas: directa, inversa e homopolar.

Neste grupo, temos 3 tipos de defeitos como já foi referido, fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra. Com a aplicação do teorema de Thévenin consegue-se calcular as correntes no ponto do defeito e nos ramos da rede.

No estado pré-defeito, considera-se que o sistema é caracterizado pela simetria, pelo que, as componentes inversa e homopolar da tensão são nulas.

Os passos a seguir são:

✚ Determinar os esquemas dos circuitos directo, inverso e homopolar, o problema principal vem com o esquema homopolar, porque em regra os transformadores, com os seus esquemas de ligação particulares, fazem com que seja os circuitos directo e inverso, são em regra iguais dependente do esquema de ligação.

✚ Determinar a condição fronteira relativamente ao tipo de curto-circuito em análise e combiná-la com a condição geral anterior, obtendo-se as componentes simétricas da corrente de curto-circuito.

3.3 Método das componentes simétricas

Nos sistemas onde temos uma carga assimétrica, que vai provocar uma diferença de tensões e correntes entre fases, torna-se impossível a análise monofásica.

Temos de utilizar o sistema trifásico.

O método das componentes simétricas vem, no entanto, simplificar essa análise, decompondo os sistemas trifásicos assimétricos em três sistemas trifásicos designados por componentes simétricas. São elas as componentes directa, inversa e homopolar, que possuem propriedades de simetria.

Sendo I_R , I_S e I_T as correntes das três fases num sistema trifásico, demonstra-se que o sistema a seguir tem solução única e daí a validade do método:

$$I_R = I_R^d + I_R^i + I_R^h \quad (3.5)$$

$$I_S = I_S^d + I_S^i + I_S^h \quad (3.6)$$

$$I_T = I_T^d + I_T^i + I_T^h \quad (3.7)$$

Para a componente directa, temos três fasores de igual módulo e sequência de fases em que as fases S e T estão atrasada e avançada, respectivamente, de $2\pi/3$ relativamente à fase R:

$$I_S^d = I_R^d \cdot e^{-j\frac{2}{3}\pi} \quad (3.8)$$

$$I_T^d = I_R^d \cdot e^{j\frac{2}{3}\pi} \quad (3.9)$$

Para a componente inversa, temos três fasores de igual módulo e uma sequência de fase em que, as fases S e T estão avançada e atrasada, respectivamente, de $2\pi/3$ relativamente à fase R:

$$I_S^i = I_R^i \cdot e^{j\frac{2}{3}\pi} \quad (3.10)$$

$$I_T^i = I_R^i \cdot e^{-j\frac{2}{3}\pi} \quad (3.11)$$

A componente homopolar é composta de três fasores iguais em módulo e fase:

$$I_R^h = I_S^h = I_T^h \quad (3.12)$$

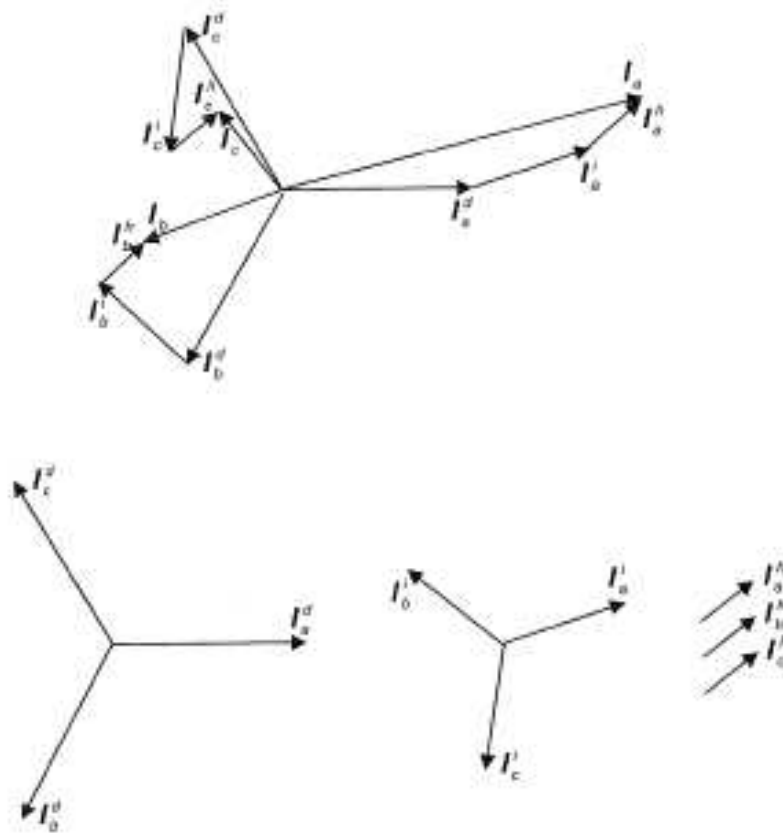


Figura 3.4 - Componentes simétricas de um sistema trifásico assimétrico [2]

Com a utilização do operador α , que aplica uma rotação de $2\pi/3$ no sentido positivo:

$$\alpha = e^{j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3.13)$$

Onde se pode assim reescrever as equações das três fases:

$$I_R = I_d + I_i + I_h \quad (3.14)$$

$$I_S = \alpha^2 \cdot I_d + \alpha \cdot I_i + I_h \quad (3.15)$$

$$I_T = \alpha \cdot I_d + \alpha^2 \cdot I_i + I_h \quad (3.16)$$

Em notação matricial fica:

$$[I_{RST}] = [T] \cdot [I_{dih}] \quad (3.17)$$

20 Curto-circuitos: análise dos casos possíveis

Onde $[T]$ é a matriz da transformação das componentes simétricas ou matriz de Fortescue:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

e os vectores $[I_{RST}]$ e $[I_{dih}]$ representam as correntes nas fases e as componentes simétricas, respectivamente.

Mas também se podem calcular os valores na fase em função das componentes simétricas:

$$[I_{dih}] = [T]^{-1} \cdot [I_{RST}] \quad (3.19)$$

onde:

$$[T]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

E assim, obtemos as equações para calcular as componentes simétricas:

$$I_d = \frac{I_R + \alpha \cdot I_S + \alpha^2 \cdot I_T}{3} \quad (3.21)$$

$$I_i = \frac{I_R + \alpha^2 \cdot I_S + \alpha \cdot I_T}{3} \quad (3.22)$$

$$I_h = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (3.23)$$

Sendo exactamente a mesma ordem de ideias para as tensões:

$$[V_{RST}] = [T][V_{dih}] \quad (3.24)$$

e

$$[V_{dih}] = [T]^{-1} \cdot [V_{RST}] \quad (3.25)$$

Algumas relações úteis:

$$\alpha^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3.26)$$

$$\alpha^3 = 1 \quad (3.27)$$

$$1 + \alpha + \alpha^2 = 0 \quad (3.28)$$

$$\alpha - \alpha^2 = j\sqrt{3} \quad (3.29)$$

$$\alpha^* = \alpha^2 \quad (3.30)$$

$$(\alpha^2)^* = \alpha \quad (3.31)$$

Se quisermos analisar as quedas de tensão e as correntes por fase, teremos de usar as componentes simétricas:

$$[\Delta V_{dih}] = [Z_{dih}] [I_{dih}] \quad (3.32)$$

e

$$[I_{dih}] = [Y_{dih}] [\Delta V_{dih}] \quad (3.33)$$

As matrizes de impedâncias e admitâncias de dimensão 3 x 3, se a carga for simétricas, as matrizes são diagonais. Desta forma, pode-se tratar as fases separadamente:

$$[Z_{dih}] = [T]^{-1} \cdot [Z_{RST}] \cdot [T] \quad (3.34)$$

$$[Y_{dih}] = [T]^{-1} \cdot [Y_{RST}] \cdot [T] \quad (3.35)$$

Para o cálculo da potência em sistemas trifásicos temos:

$$S = P + jQ = V_R \cdot I^* + V_S \cdot I^* + V_T \cdot I^* = [V_{RST}]^T \cdot [I_{RST}]^* \quad (3.36)$$

Substituindo e simplificando temos:

$$S = P + jQ = ([T] [V_{dih}])^T \cdot ([T] [I_{dih}])^* = [V_{dih}]^T \cdot [T]^T \cdot [T]^* \cdot [I_{dih}]^* \quad (3.37)$$

e:

$$[T]^T \cdot [T]^* = \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} = 3 \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = 3[1] \quad (3.38)$$

Então:

$$S = P + jQ = 3 \cdot [V_{dih}]^T \cdot [I_{dih}]^* = 3 \cdot V_d \cdot I_d^* + 3 \cdot V_i \cdot I_i^* + 3 \cdot V_h \cdot I_h^* \quad (3.39)$$

Repare-se no factor 3 em cada parcela, que mostra que em cada parcela se trata de um sistema trifásico simétrico.

3.4 Teorema de Thévenin

A base usada para o cálculo é o teorema de Thévenin, começando por se construir uma rede vista do ponto do defeito, com a correspondente determinação de uma impedância equivalente Z_T e de uma fonte de tensão em circuito aberto V_i^0 , como se representa na figura 3.5.

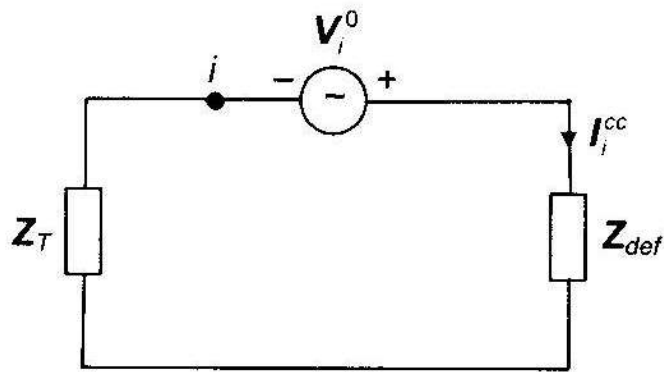


Figura 3.5 - Esquema equivalente de Thévenin [2]

A corrente de curto-circuito, ocorrida num ponto i , calcula-se:

$$I_i^{cc} = \frac{V_i^0}{Z_{def} + Z_T} \quad (\text{Monofásico}) \quad (3.40)$$

$$I_i^{cc} = \frac{V_i^0}{\sqrt{3} \cdot (Z_{def} + Z_T)} \quad (\text{Trifásico}) \quad (3.41)$$

A sua potência de curto-circuito será:

$$S_i^{cc} = \sqrt{3} \cdot V_i^0 \cdot I_i^{cc} = \frac{V_i^{02}}{Z_T} \quad (3.42)$$

No caso de V_i^0 ser igual a tensão nominal V_n , teremos em p.u.:

$$S_i^{cc} = I_i^{cc} = \frac{1}{Z_T} \quad (3.43)$$

3.5 Curto-circuito Monofásico

Considera-se um gerador síncrono em vazio e admite-se que, entre a fase R e a terra, se dá um curto-circuito com impedância Z_{def} (que será nula no caso de um curto-circuito franco).

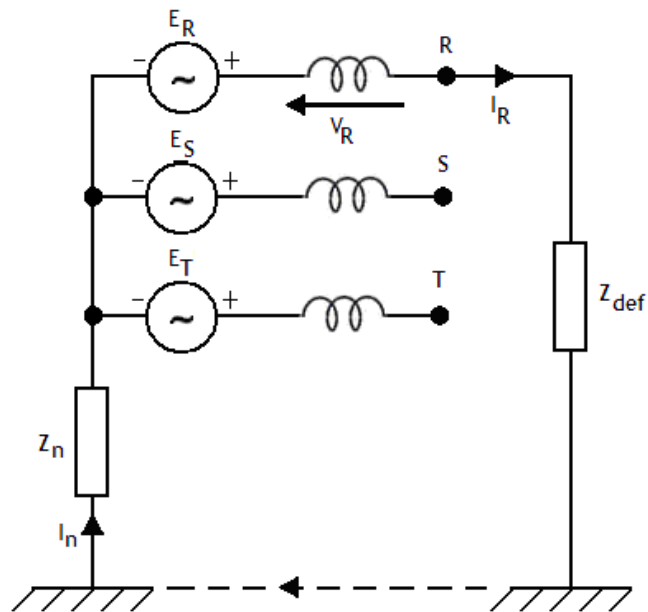


Figura 3.6 - Curto-circuito monofásico

Neste esquema, temos um circuito fechado através da impedância Z_n de ligação do neutro do gerador à terra.

As correntes nas fases são: $[I_{RST}] = \begin{bmatrix} I_R \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ (3.44)

Atendendo que as fases S e T não são afectadas.

E como foi dito anteriormente:

$$I_d = \frac{I_R + \alpha I_S + \alpha^2 I_T}{3} \quad (3.45)$$

$$I_i = \frac{I_R + \alpha^2 I_S + \alpha I_T}{3} \quad (3.46)$$

$$I_h = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (3.47)$$

Substituindo temos: $I_d = I_i = I_h = \frac{I_R}{3}$ (3.48)

24 Curto-circuitos: análise dos casos possíveis

Em componentes simétricas obtemos:

$$[I_{dih}] = [T]^{-1} \cdot [I_{RST}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \cdot I_R \\ \frac{1}{3} \cdot I_R \\ \frac{1}{3} \cdot I_R \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

Onde se verifica assim, que as componentes directa, inversa e homopolar são iguais.

E as componentes simétricas da tensão ficam:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_i \\ V_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_d & 0 & 0 \\ 0 & Z_i & 0 \\ 0 & 0 & Z_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_i \\ I_h \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Como sabemos que:

$$V_R = V_d + V_i + V_h \quad (3.51)$$

e

$$V_R = (Z_{def} + Z_n) \cdot I_R \quad (3.52)$$

tem-se:

$$(Z_{def} + Z_n) \cdot I_R = E_R - \frac{1}{3} \cdot (Z_d + Z_i + Z_h) \cdot I_R \quad (3.53)$$

Então a corrente de defeito acaba por ser calculada assim:

$$I_{cc} = I_R = \frac{E_R}{Z_{def} + Z_n + \frac{1}{3} \cdot (Z_d + Z_i + Z_h)} \quad (3.54)$$

No caso de estarmos perante um curto-circuito franco, $Z_{def} = 0$ e se o neutro do gerador estivesse ainda ligado directamente à terra, $Z_n = 0$, a amplitude de corrente de curto-circuito fase-terra seria superior à de curto-circuito trifásico. E essa é a razão pela qual se instala impedância no neutro, que em regime simétrico não afecta a operação do sistema, visto que a corrente do neutro é nula.

As tensões após o defeito, nas suas componentes simétricas:

$$V_d = E_R - Z_d \cdot I_d = E_R \cdot \frac{Z_i + Z_h + 3 \cdot Z_n}{Z_d + Z_i + Z_h + 3 \cdot Z_n} \quad (3.55)$$

$$V_i = -Z_i \cdot I_i = -E_R \cdot \frac{Z_i}{Z_d + Z_i + Z_h + 3 \cdot Z_n} \quad (3.56)$$

$$V_h = -Z_h \cdot I_h = -E_R \cdot \frac{Z_h}{Z_d + Z_i + Z_h + 3 \cdot Z_n} \quad (3.57)$$

E as tensões fase-neutro:

$$V_R = E_R \cdot \frac{3.Z_n}{Z_d + Z_i + Z_h + 3.Z_n} \quad (3.58)$$

$$V_S = E_R \cdot \frac{(\alpha^2 - \alpha).Z_i + (\alpha^2 - 1).Z_h + 3.\alpha^2.Z_n}{Z_d + Z_i + Z_h + 3.Z_n} \quad (3.59)$$

$$V_T = E_R \cdot \frac{(\alpha - \alpha^2).Z_i + (\alpha - 1).Z_h + 3.\alpha.Z_n}{Z_d + Z_i + Z_h + 3.Z_n} \quad (3.60)$$

No regime trifásico assimétrico, as tensões fase-terra são diferentes das tensões fase-neutro, devido à queda de tensão na impedância do neutro:

$$V_{RT} = V_R - Z_n \cdot I_{cc} = 0 \quad (3.61)$$

$$V_{ST} = V_S - Z_n \cdot I_{cc} = E_R \cdot \frac{(\alpha^2 - \alpha).Z_i + (\alpha^2 - 1).Z_h + 3.(\alpha^2 - 1).Z_n}{Z_d + Z_i + Z_h + 3.Z_n} \quad (3.62)$$

$$V_{TT} = V_T - Z_n \cdot I_{cc} = E_R \cdot \frac{(\alpha - \alpha^2).Z_i + (\alpha - 1).Z_h + 3.(\alpha - 1).Z_n}{Z_d + Z_i + Z_h + 3.Z_n} \quad (3.63)$$

3.6 Curto-circuito Bifásico

Considera-se um gerador com um curto-circuito entre as fases S e T, com uma impedância Z_{def} .

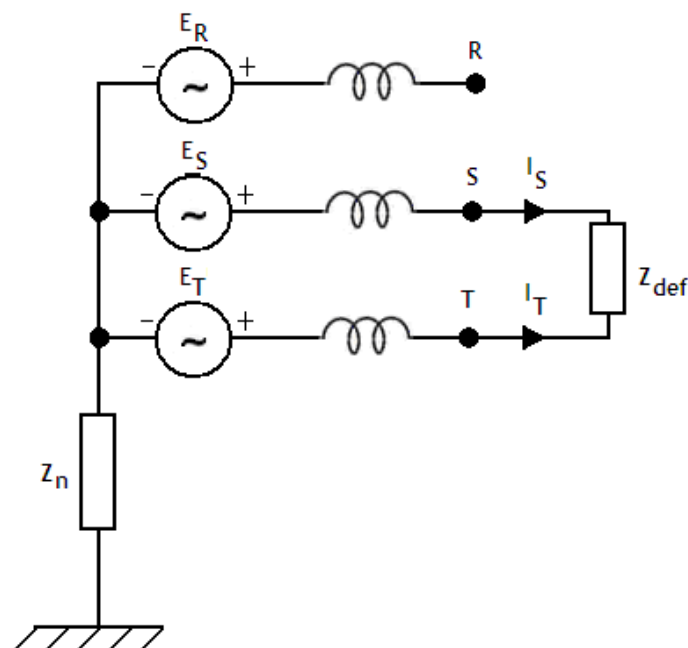


Figura 3.7 - Curto-circuito bifásico

26 Curto-circuitos: análise dos casos possíveis

As correntes nas fases são: $[I_{RST}] = \begin{bmatrix} 0 \\ I_S \\ -I_S \end{bmatrix}$ (3.64)

Em componentes simétricas obtemos:

$$[I_{dih}] = [T]^{-1} \cdot [I_{RST}] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_S \\ -I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j \frac{I_S}{\sqrt{3}} \\ -j \frac{I_S}{\sqrt{3}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

Como se verifica, as correntes directa e inversa são simétricas e não há corrente homopolar, visto que não temos nenhum circuito pela terra.

E as tensões simétricas ficam:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_i \\ V_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} j \frac{I_S}{\sqrt{3}} \cdot Z_d \\ -j \frac{I_S}{\sqrt{3}} \cdot Z_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

Como se deduz que:

$$Z_{def} \cdot I_S = V_S - V_T \quad (3.67)$$

e sabemos que:

$$V_S = \alpha^2 \cdot V_d + \alpha \cdot V_i + V_h \text{ e } V_T = \alpha \cdot V_d + \alpha^2 \cdot V_i + V_h. \quad (3.68)$$

Tem-se:

$$-j\sqrt{3} \cdot Z_{def} \cdot I_d = (\alpha^2 - \alpha) \cdot V_d + (\alpha - \alpha^2) \cdot V_i \quad (3.69)$$

Simplificando:

$$V_d - V_i - Z_{def} \cdot I_d = 0 \quad (3.70)$$

A componente simétrica da corrente fica:

$$I_d = -I_i = \frac{E_R}{Z_d + Z_i + Z_{def}} \quad (3.71)$$

Então a corrente de defeito acaba por ser calculada assim:

$$I_{cc} = I_S = -j \frac{\sqrt{3} \cdot E}{Z_{def} + (Z_d + Z_i)} \quad (3.72)$$

Neste caso particular, a impedância do neutro não influencia o valor do curto-circuito, uma vez que a componente homopolar é nula.

As componentes simétricas das tensões calculam-se:

$$V_d = E_R - Z_d \cdot I_d = E_R - Z_d \cdot \frac{E_R}{Z_d + Z_i + Z_{def}} = E_R \cdot \frac{Z_i + Z_{def}}{Z_d + Z_i + Z_{def}} \quad (3.73)$$

$$V_i = -Z_i \cdot I_i = Z_i \cdot I_d = E_R \cdot \frac{Z_i}{Z_d + Z_i + Z_{def}} \quad (3.74)$$

$$V_h = 0 \quad (3.75)$$

Pode-se ver que as componentes directa e inversa das tensões são iguais e, nesta situação, não haverá diferença entre as tensões de fase-neutro e fase-terra, já que a corrente do neutro é nula:

$$V_R = V_d + V_i = E_R \cdot \frac{2Z_i + Z_{def}}{Z_d + Z_i + Z_{def}} \quad (3.76)$$

$$V_S = \alpha^2 \cdot V_d + \alpha \cdot V_i = (\alpha^2 + \alpha) V_d = -E_R \cdot \frac{Z_i + Z_{def}}{Z_d + Z_i + Z_{def}} \quad (3.77)$$

$$V_T = \alpha \cdot V_d + \alpha^2 \cdot V_i = (\alpha + \alpha^2) V_d = -E_R \cdot \frac{Z_i + Z_{def}}{Z_d + Z_i + Z_{def}} \quad (3.78)$$

3.7 Curto-circuito Bifásico Terra

Considera-se um curto-circuito entre as duas fases S e T e a terra, de um gerador cujo o neutro está ligado à terra através de uma impedância Z_n .

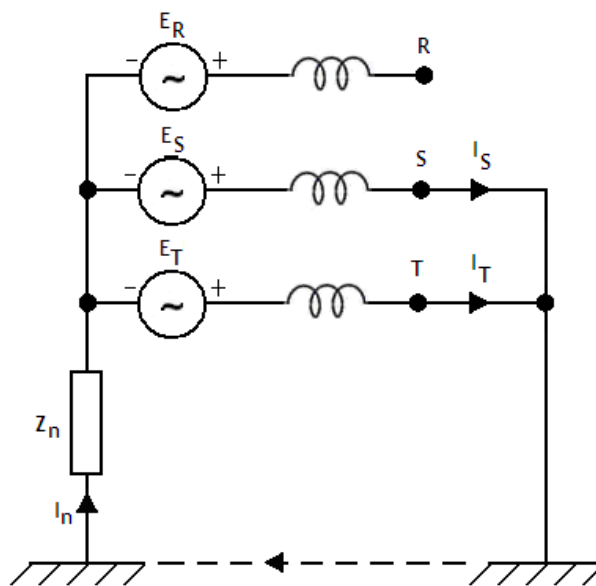


Figura 3.8 - Curto-circuito bifásico com terra

28 Curto-circuitos: análise dos casos possíveis

Temos então as seguintes equações:

$$I_R = 0 \quad (3.79)$$

e

$$V_S = V_T = (I_S + I_T).(Z_n + Z_{def}) \quad (3.80)$$

Neste sistema, já temos corrente homopolar mas como na fase R ela é nula, temos que:

$$I_h = \frac{1}{3}(I_S + I_T) \quad (3.81)$$

E como as fases S e T são iguais, pode-se escrever:

$$V_S = V_T = 3.(Z_{def} + Z_n).I_h \quad (3.82)$$

Sendo as tensões nas fases S e T as mesmas:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_i \\ V_h \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_S \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

e assim, pode-se concluir das últimas duas equações, que $V_d = V_i$, o que nos permite voltar a escrever que:

$$3.V_h = V_R + 2.V_S = (V_d + V_i + V_h) + 2.(3.(Z_{def} + Z_n).I_h) \quad (3.84)$$

ou seja:

$$V_d = V_h - 3.(Z_{cc} + Z_n).I_h \quad (3.85)$$

$$V_i = V_h - 3.(Z_{cc} + Z_n).I_h \quad (3.86)$$

Sabemos que:

$$I_d + I_i + I_h = 0 \quad (3.87)$$

e

$$I_R = 0 \quad (3.88)$$

e que:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_i \\ V_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_R \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_d & 0 & 0 \\ 0 & Z_i & 0 \\ 0 & 0 & Z_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_i \\ I_h \end{bmatrix} \quad (3.89)$$

Substituindo nas equações anteriores, temos:

$$E_R - Z_d I_d = -Z_h I_h - 3.(Z_{def} + Z_n).I_h \quad (3.90)$$

$$-Z_i I_i = -Z_h I_h - 3.(Z_{def} + Z_n).I_h \quad (3.91)$$

Substituindo I_h ,

$$E_R - Z_d I_d = -Z_h (-I_d - I_i) - 3.(Z_{def} + Z_n).(-I_d - I_i) \quad (3.92)$$

$$-Z_i I_i = -Z_h (-I_d - I_i) - 3.(Z_{def} + Z_n).(-I_d - I_i) \quad (3.93)$$

Agora conseguimos ter:

$$\begin{aligned} I_i &= -\frac{Z_h + 3.(Z_{def} + Z_n)}{Z_i + Z_h + 3.(Z_{def} + Z_n)}.I_d = \\ &= -E_R \cdot \frac{Z_h + 3.(Z_{def} + Z_n)}{Z_d.Z_i + Z_d.Z_h + Z_i.Z_h + 3.Z_d.(Z_{def} + Z_n) + 3.Z_i.(Z_{def} + Z_n)} \end{aligned} \quad (3.94)$$

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{E_R}{Z_d + \frac{Z_i.(Z_h + 3.(Z_{def} + Z_n))}{Z_i + Z_h + 3.(Z_{def} + Z_n)}} = \\ &= E_R \cdot \frac{Z_i + Z_h + 3.(Z_{def} + Z_n)}{Z_d.Z_i + Z_d.Z_h + Z_i.Z_h + 3.Z_d.(Z_{def} + Z_n) + 3.Z_i.(Z_{def} + Z_n)} \end{aligned} \quad (3.95)$$

$$\begin{aligned} I_h &= -\frac{Z_i}{Z_i + Z_h + 3.(Z_{def} + Z_n)}.I_d = \\ &= -E_R \cdot \frac{Z_i}{Z_d.Z_i + Z_d.Z_h + Z_i.Z_h + 3.Z_d.(Z_{def} + Z_n) + 3.Z_i.(Z_{def} + Z_n)} \end{aligned} \quad (3.96)$$

Agora já se consegue calcular a corrente de curto-circuito:

$$I_S^{cc} = E_R \cdot \frac{(\alpha^2 - 1).Z_i + (\alpha^2 - \alpha).Z_h + 3.(\alpha^2 - \alpha).(Z_{def} + Z_n)}{Z_d.Z_i + Z_d.Z_h + Z_i.Z_h + 3.Z_d.(Z_{def} + Z_n) + 3.Z_i.(Z_{def} + Z_n)} \quad (3.97)$$

$$I_T^{cc} = E_R \cdot \frac{(\alpha - 1).Z_i + (\alpha - \alpha^2).Z_h + 3.(\alpha - \alpha^2).(Z_{def} + Z_n)}{Z_d.Z_i + Z_d.Z_h + Z_i.Z_h + 3.Z_d.(Z_{def} + Z_n) + 3.Z_i.(Z_{def} + Z_n)} \quad (3.98)$$

$$I_n^{cc} = I_S + I_T = \frac{-3.E_R.Z_i}{Z_d.Z_i + Z_d.Z_h + Z_i.Z_h + 3.Z_d.(Z_{def} + Z_n) + 3.Z_i.(Z_{def} + Z_n)} \quad (3.99)$$

As tensões em componentes simétricas serão então as seguintes:

$$\begin{aligned} V_d &= V_i = E_R - Z_d.I_d = \\ &= E_R - Z_d \cdot E_R \cdot \frac{Z_i + Z_h + 3.(Z_{def} + Z_n)}{Z_d.Z_i + Z_d.Z_h + Z_i.Z_h + 3.Z_d.(Z_{def} + Z_n) + 3.Z_i.(Z_{def} + Z_n)} = \\ &= E_R \cdot \frac{Z_i.Z_h + 3.Z_i.(Z_{def} + Z_n)}{Z_d.Z_i + Z_d.Z_h + Z_i.Z_h + 3.Z_d.(Z_{def} + Z_n) + 3.Z_i.(Z_{def} + Z_n)} \end{aligned} \quad (3.100)$$

$$V_h = Z_h.I_h = -E_R \cdot \frac{Z_i.Z_h}{Z_d.Z_i + Z_d.Z_h + Z_i.Z_h + 3.Z_d.(Z_{def} + Z_n) + 3.Z_i.(Z_{def} + Z_n)} \quad (3.101)$$

$$V_R = E_R \cdot \frac{Z_i.Z_h + 6.Z_i.(Z_{def} + Z_n)}{Z_d.Z_i + Z_d.Z_h + Z_i.Z_h + 3.Z_d.(Z_{def} + Z_n) + 3.Z_i.(Z_{def} + Z_n)} \quad (3.102)$$

$$V_S = \frac{(\alpha^2 + \alpha).E_R.(Z_i.Z_h + 3.Z_i.(Z_{def} + Z_n)) - E_R.Z_i.Z_h}{Z_d.Z_i + Z_d.Z_h + Z_i.Z_h + 3.Z_d.(Z_{def} + Z_n) + 3.Z_i.(Z_{def} + Z_n)} \quad (3.103)$$

$$V_T = \frac{(\alpha + \alpha^2) \cdot E_R \cdot (Z_i \cdot Z_h + 3 \cdot Z_i \cdot (Z_{def} + Z_n)) - E_R \cdot Z_i \cdot Z_h}{Z_d \cdot Z_i + Z_d \cdot Z_h + Z_i \cdot Z_h + 3 \cdot Z_d \cdot (Z_{def} + Z_n) + 3 \cdot Z_i \cdot (Z_{def} + Z_n)} \quad (3.104)$$

3.8 Cálculo das correntes de pico

A corrente de pico calcula-se da seguinte maneira:

$$i_p = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (3.105)$$

O factor k pode ser obtido directamente com as figuras 3.9 e 3.10 ou pode ser calculado directamente pela seguinte expressão:

$$k = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3R/X} \quad (3.106)$$

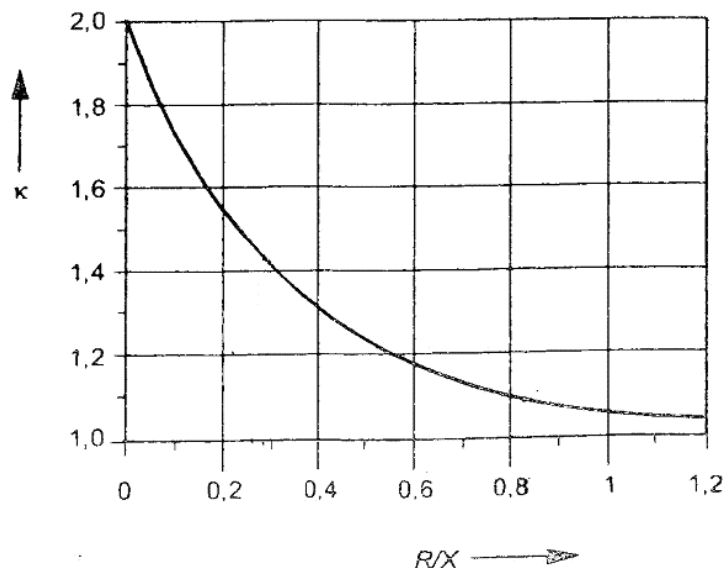


Figura 3.9 - Factor K [6]

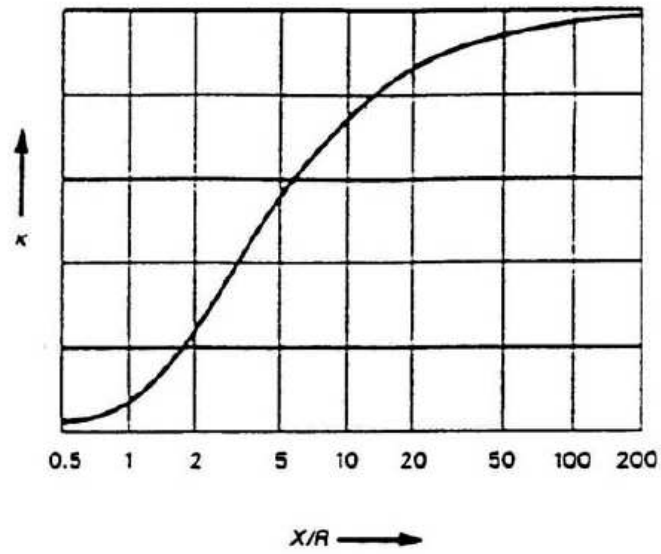


Figura 3.10 - Factor K [6]

Supõe-se que o curto-circuito começa a tensão de zero e que i_p é atingido aproximadamente após um meio-período.

Capítulo 4

Software de cálculo

4.1 Introdução

A área dos curto-circuitos é uma área já bastante estudada mas, no entanto, continua a haver problemas nessa área porque não se consegue elimina-los, mas apenas reduzi-los e diminuir o seu tempo de duração, de forma a provocar o menor estrago possível.

O cálculo das correntes de curto-circuito são importantes para proteger melhor os transformadores que terá como benefícios prolongar a sua longevidade e mesmo para a sua segurança de risco de explosão.

As catastróficas forças electromagnéticas causadas pelas elevadas correntes transitórias, actuam nos enrolamentos dos transformadores e, no caso de grandes transformadores, podem provocar graves danos no isolamento, nos condutores e nas ligações dos enrolamentos. Tudo isto leva a alterações na segurança de funcionamento do transformador e na redução do tempo de vida útil do mesmo. Decorre daqui a extrema importância de dispormos de softwares de cálculo para avaliarmos as forças electromagnéticas que se verificam nos enrolamentos durante esse período de defeito. [7]

4.2 Software de Cálculo

O software de cálculo, CorrentesCC, foi desenvolvido em FORTRAN 90, uma ferramenta de cálculo científico, com grandes potencialidades. A finalização do software tem como preocupação também a interface para o utilizador, desenvolvida em Delphi, foi criada uma interface simples de perceber, utilizar e de fornecer os resultados.

Este software tem como preocupação apenas o transformador, não está preocupado com a rede nem com outros elementos da rede, visto estar a ser desenvolvido para um fabricante de transformadores.

Os curto-circuitos aqui mencionados, consideram-se de origem externa aos transformadores, mas na sua proximidade, sendo desprezada a resistência de qualquer tipo de cabo ou linha entre o defeito e o transformador, colocamo-nos no pior caso.

Os curto-circuitos internos são desprezados, porque se num transformador ocorrer um curto-circuito interno, devido a um rasgo do papel isolante, por exemplo, a máquina terá logo de ser reparada ou substituída, porque essa máquina deixará de funcionar.

Considera-se neste software que o grupo horário usado é o 11.

Os únicos dados que têm influência serão apenas os dados da rede e do transformador.

Os dados da rede serão:

- ✚ Potência de curto-circuito directa da rede;
- ✚ Potência de curto-circuito homopolar da rede.

A potência de curto-circuito inversa considera-se igual à directa. Também se devia entrar com a potência de curto-circuito inversa da rede, porque essa potência é diferente da directa quando nos encontramos perto dos alternadores. Todavia, por informações obtidas na Efacec Energia - PT, existe uma grande dificuldade em obter com segurança os dados referentes à potência de curto-circuito directa e homopolar da rede, pelo que se considera habitualmente a directa igual à inversa. A norma CEI 60076-5 prevê esses casos e apresenta uma tabela com as potências de curto-circuito directas a considerar em função da tensão do transformador. Também refere que a potência de curto-circuito homopolar se obtém multiplicando a potência de curto-circuito por uma constante que varia entre 1 e 3 na falta de indicação mais precisa.

Tabela 4.1 - Tabela das potências aparentes de curto-circuito da rede [8]

Tension la plus élevée pour le matériel (U_m) kV	Puissance apparente de court-circuit MVA	
	Pratique européenne courante	Pratique nord-américaine courante
7,2; 12; 17,5 et 24	500	500
36	1 000	1 500
52 et 72,5	3 000	5 000
100 et 123	6 000	15 000
145 et 170	10 000	15 000
245	20 000	25 000
300	30 000	30 000
362	35 000	35 000
420	40 000	40 000
525	60 000	60 000
765	83 500	83 500

NOTE Si ce n'est pas spécifié, il convient de considérer une valeur comprise entre 1 et 3 pour le rapport des impédances homopolaire et directe du réseau.

O CorrentesCC tem como primeiro plano a figura 4.1, onde o utilizador terá de referir se se trata de um transformador com 2 ou 3 enrolamentos.

Todos os transformadores tratados aqui serão trifásicos, com 2 enrolamentos, que designaremos por alta e baixa, primário e secundário, respectivamente, ou com 3 enrolamentos, alta, média e baixa, primário, secundário e terciário, respectivamente.

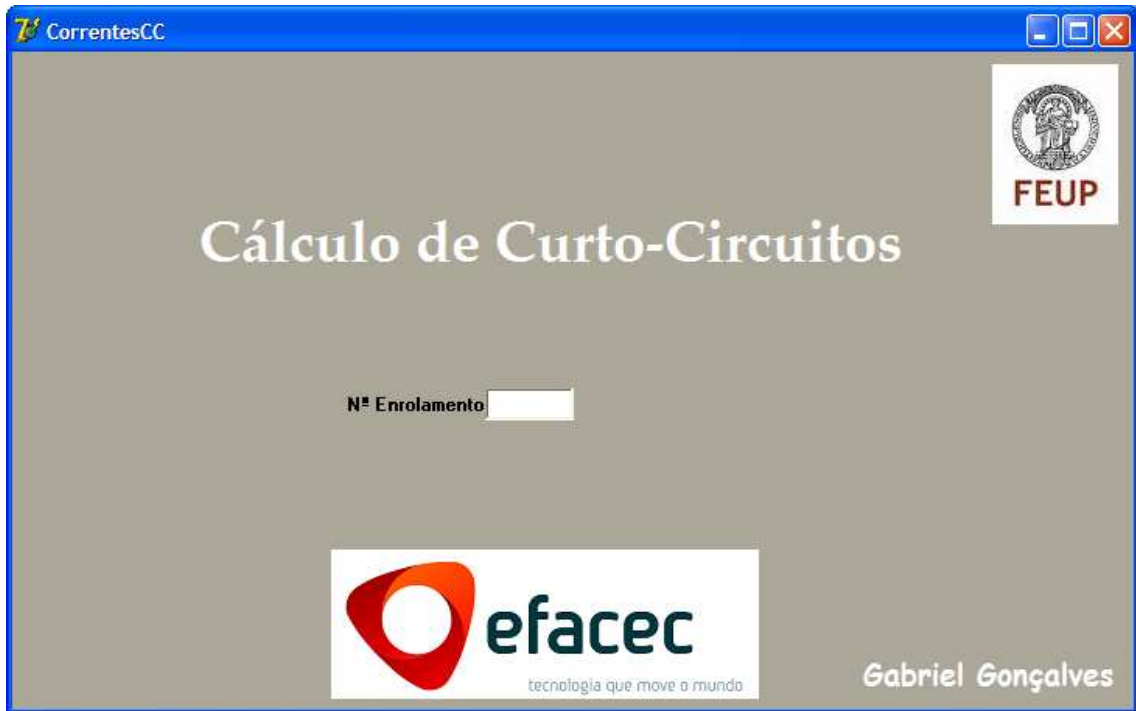


Figura 4.1 - Menu inicial do CorrentesCC

Se optarmos por um transformador de 2 enrolamentos o utilizador terá os seguintes menus para preencher:

- ✚ Tensões;
- ✚ Tipo de enrolamento;
- ✚ Dados da Rede;
- ✚ Potência de Base;
- ✚ Tensão de curto-circuito;
- ✚ Componente homopolar;
- ✚ Resistências do transformador e da rede.

Tal como se pode ver na figura 4.2:

The screenshot shows the 'CorrentesCC' software window with the 'Dados' tab selected. The interface is organized into several sections:

- Tensões [kV]:** Two input fields for 'ALTA' and 'BAIXA'.
- Enrolamentos Zn[Ohm]:** Two dropdown menus for 'ALTA' and 'BAIXA'.
- Resistências [Ohm]:** Two sub-sections: 'Transformador' and 'Rede', each with 'ALTA' and 'BAIXA' input fields.
- Potência de Base (MVA):** A single input field.
- Componente Homopolar:** An input field.
- Ucc(%):** An input field.
- Dados da Rede de Alta:** Includes radio buttons for 'Potência CC infinita?' (Sim/Não), an input for 'Potência CC (MVA)', a 'Homopolar' section with radio buttons for 'Tipo Valor Potência CC' (Real/Múltiplo de Scc), and inputs for 'Potência CC homopolar (MVA)' and 'Factor Multiplicação'.
- Dados da Rede de Baixa:** Identical structure to the high voltage network data.
- Calcular:** A button with a warning icon at the bottom center.

Figura 4.2 - Menu do CorrentesCC para 2 enrolamentos

Salientando alguns aspectos dos menus acima:

✚ Nas tensões, teremos de ter a atenção de colocar as várias tensões compostas, para o caso de termos diferentes tensões num só enrolamento, em [kV], isto porque uma grande maioria dos transformadores leva reguladores de tensão ou enrolamentos em série/paralelo ou outras soluções para obter casos de tensões diferentes no mesmo enrolamento. Devemos ter o cuidado de notar que nem sempre a tensão mais baixa significa o mais elevado valor da corrente de curto-circuito, isso porque a tensão de curto-circuito pode variar de forma não linear com a sua tensão.

This is a close-up of the 'Tensões [kV]' section from the software interface, showing two empty text input boxes labeled 'ALTA' and 'BAIXA'.

Figura 4.3 - Menu do CorrentesCC

✚ No tipo de enrolamento, temos como opções *estrela* com ou sem neutro ligado à terra e *triângulo*. O tipo de enrolamento em zig-zag, tal como já foi referido antes, só é usado praticamente na distribuição em baixa tensão 400V e não será considerado:



Figura 4.4 - Menu do CorrentesCC

No caso de optarmos por uma ligação em estrela com neutro ligado à terra teremos um campo adicional onde poderemos indicar o valor da impedância do neutro do transformador em módulo.

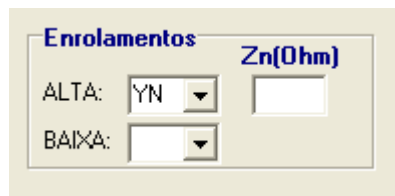


Figura 4.5 - Menu do CorrentesCC

✚ Nos dados da Rede, como já foi referido, apenas tratamos das potências de curto-circuito das redes directas e homopolares e considerando as directas iguais às inversas, para além disso, ainda podemos encontrar casos em que a potência de curto-circuito da rede seja considerada infinita e, nesse caso, temos essa opção como se pode ver pela figura 4.6.

Figura 4.6 - Menu do CorrentesCC

✚ Na potência de base coloca-se a potência do transformador.

Figura 4.7 - Menu do CorrentesCC

✚ Na tensão de curto-circuito tem-se que verificar sempre bem quais as tensões em jogo devido às variações de tensões nos mesmos enrolamentos, já referido anteriormente.

A rectangular input field with a light beige background and a thin border. To its left is the text "Ucc(%):".

Figura 4.8 - Menu do CorrentesCC

✚ Na componente homopolar são normalmente usados valores que variam entre os 0,8 e 0,9.

A rectangular input field with a light beige background and a thin border. To its left is the text "Componente Homopolar:".

Figura 4.9 - Menu do CorrentesCC

✚ As resistências do transformador e da rede são usadas para o cálculo das correntes de pico. Não sendo indicadas, o software executa e dá os valores das correntes e tensões de curto-circuito certos na mesma.

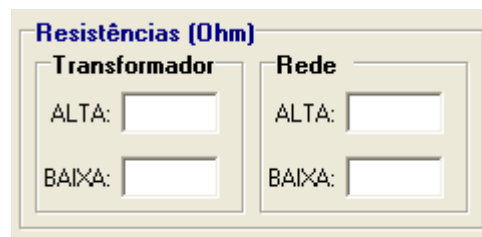
A menu titled "Resistências (Ohm)" in blue text. It is divided into two columns: "Transformador" and "Rede". Each column has two input fields labeled "ALTA:" and "BAIXA:".

Figura 4.10 - Menu do CorrentesCC

Finalizando o preenchimento de todos estes espaços, é só mandar calcular, clicando no botão:

A rectangular button with a light beige background and a thin border. On the left is a yellow triangular warning icon with a lightning bolt. To the right of the icon is the text "Calcular".

Figura 4.11 - Menu do CorrentesCC

O software apresentará de imediato, os resultados das correntes de curto-circuito, correntes de pico e tensões de defeito nos defeitos do tipo trifásico, monofásico, bifásico e bifásico com terra, tal como se pode ver pelas figuras abaixo:

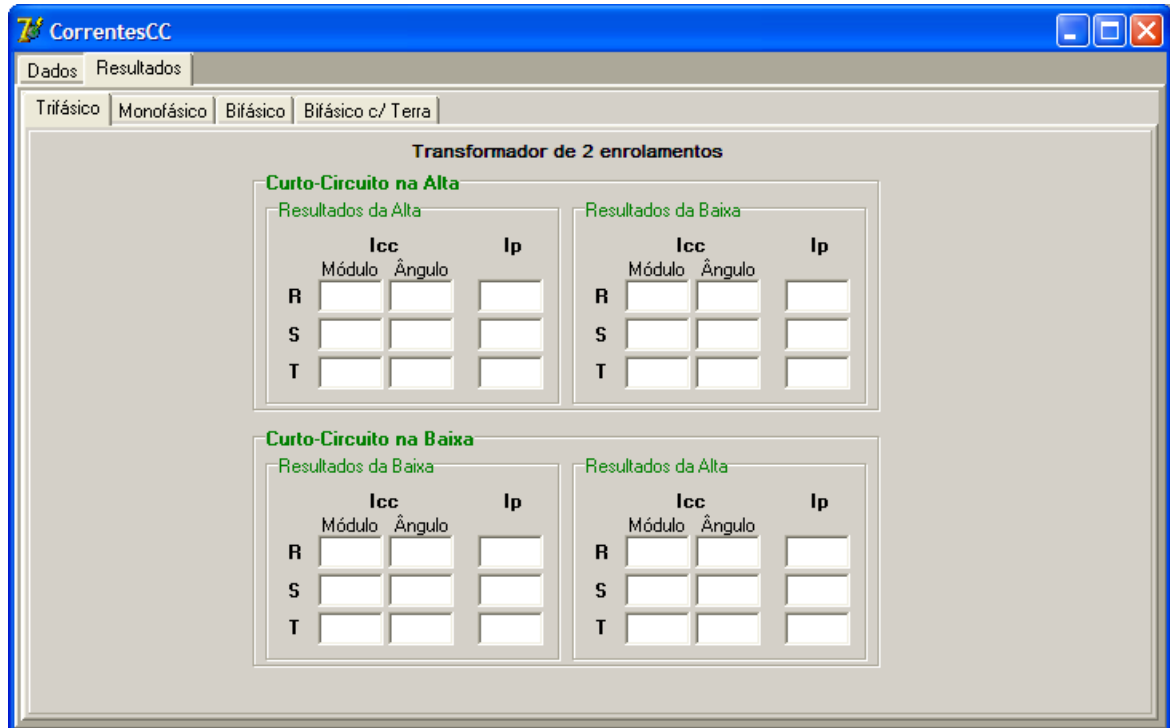


Figura 4.12 - Folha de Resultados do CorrentesCC



Figura 4.13 - Folha de Resultados do CorrentesCC



Figura 4.14 - Folha de Resultados do CorrentesCC

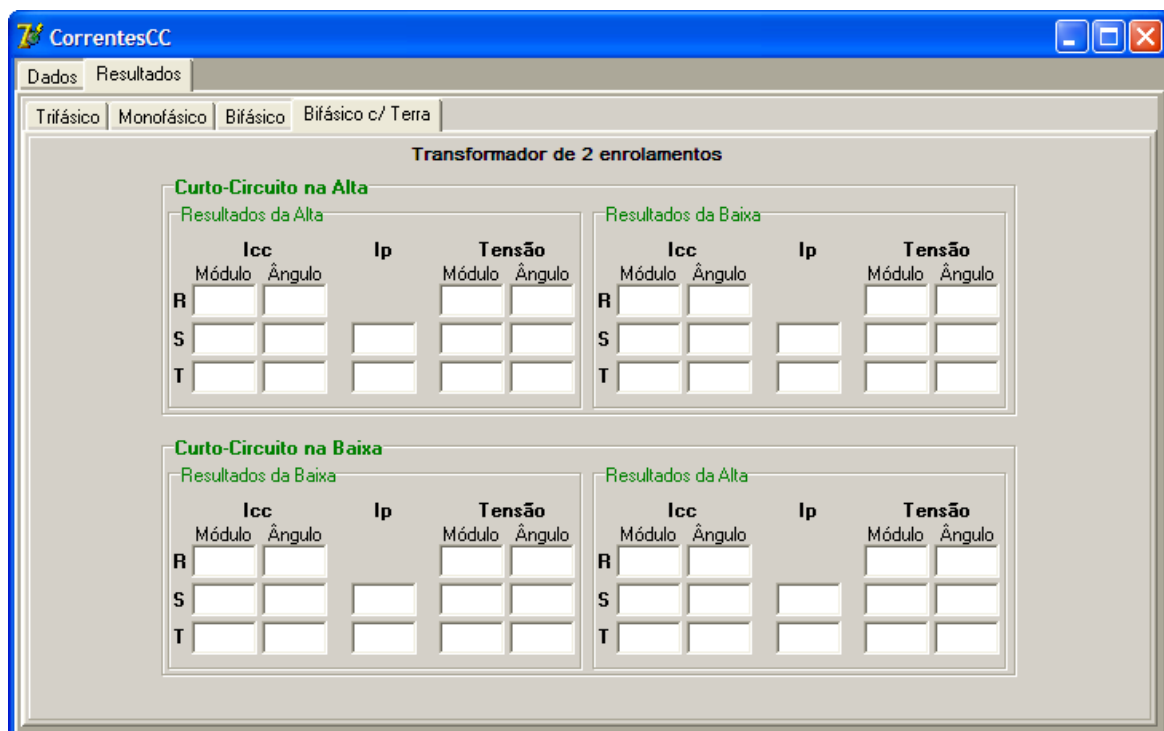


Figura 4.15 - Folha de Resultados do CorrentesCC

Se optarmos por um transformador de 3 enrolamentos, o utilizador terá os seguintes menus para preencher:

- ✚ Tensões;
- ✚ Tipo de enrolamento;
- ✚ Dados da Rede;
- ✚ Potência de Base;
- ✚ Tensão de curto-circuito;
- ✚ Elemento de referência das tensões de curto-circuitos;
- ✚ Componente homopolar;
- ✚ Resistências do transformador e da rede.

Tal como se pode ver pela figura 4.16:

Figura 4.16 - Menu do CorrentesCC para 3 enrolamentos

O único aspecto diferente aqui a considerar, para além dos que já foram ditos no caso de ser um transformador de 2 enrolamentos, são apenas as tensões de curto-circuito. Devido às suas medições, necessitamos de obter uma potência de referência pela qual elas são medidas. Normalmente, o enrolamento da baixa do transformador têm potência nominal inferior aos enrolamentos da alta e da média.

Executando o software, obtemos as seguintes janelas de resultados, com as correntes de curto-circuito, correntes de pico e tensões de defeito, nos defeitos do tipo trifásico, monofásico, bifásico e bifásico com terra, tal como se pode ver pelas figuras abaixo:

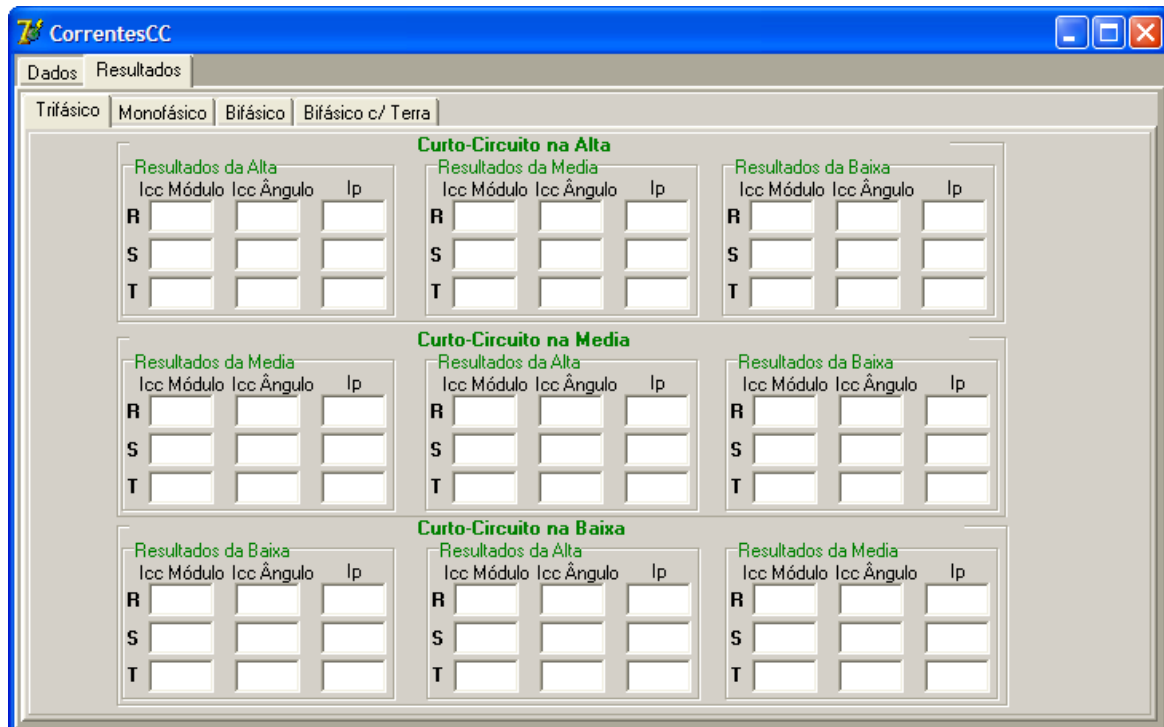


Figura 4.17 - Folha de Resultados do CorrentesCC

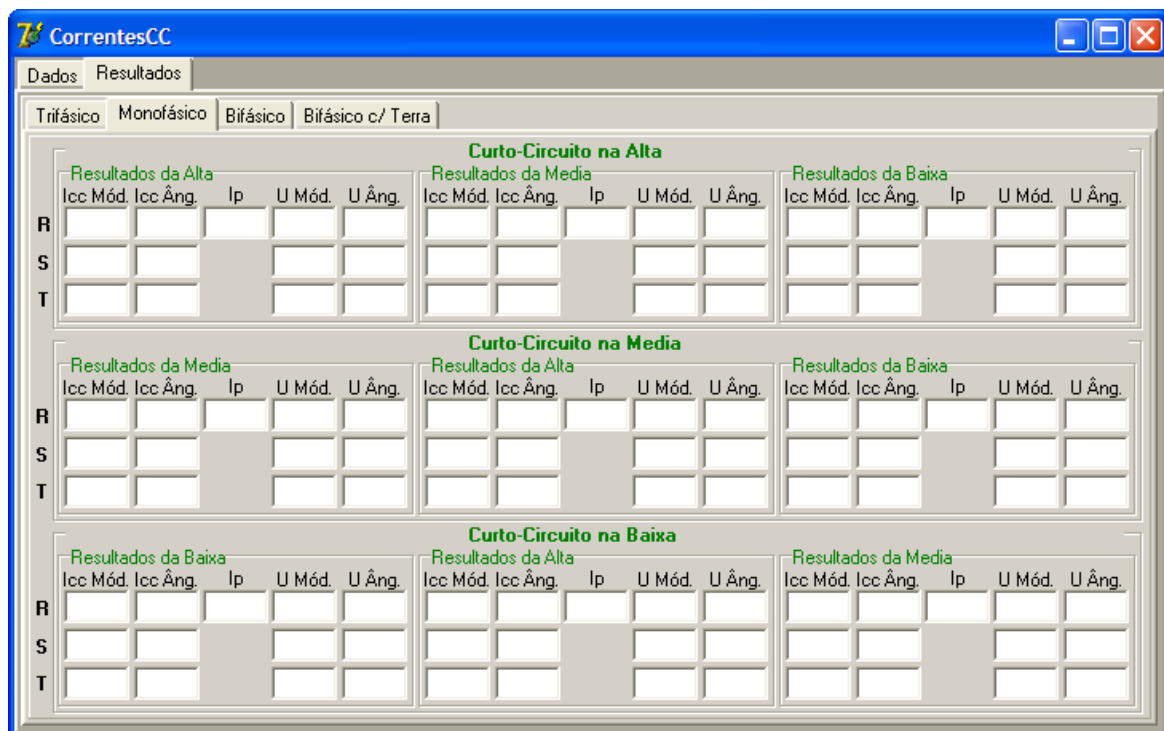


Figura 4.18 - Folha de Resultados do CorrentesCC

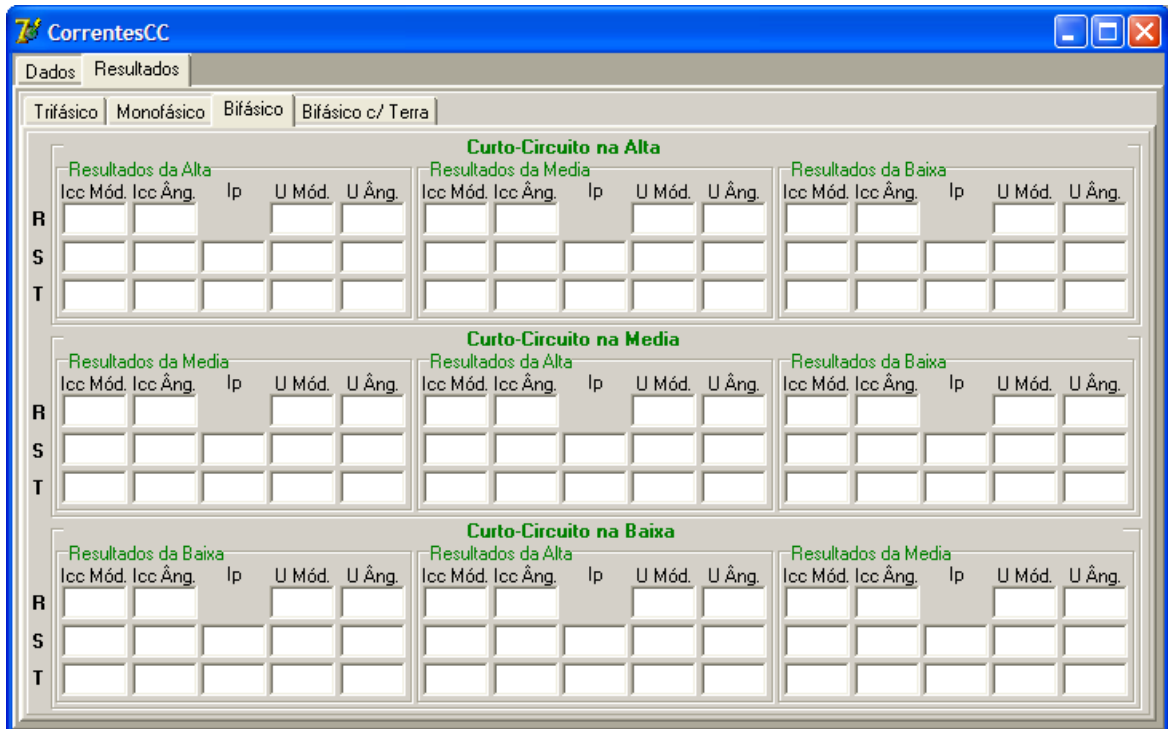


Figura 4.19 - Folha de Resultados do CorrentesCC

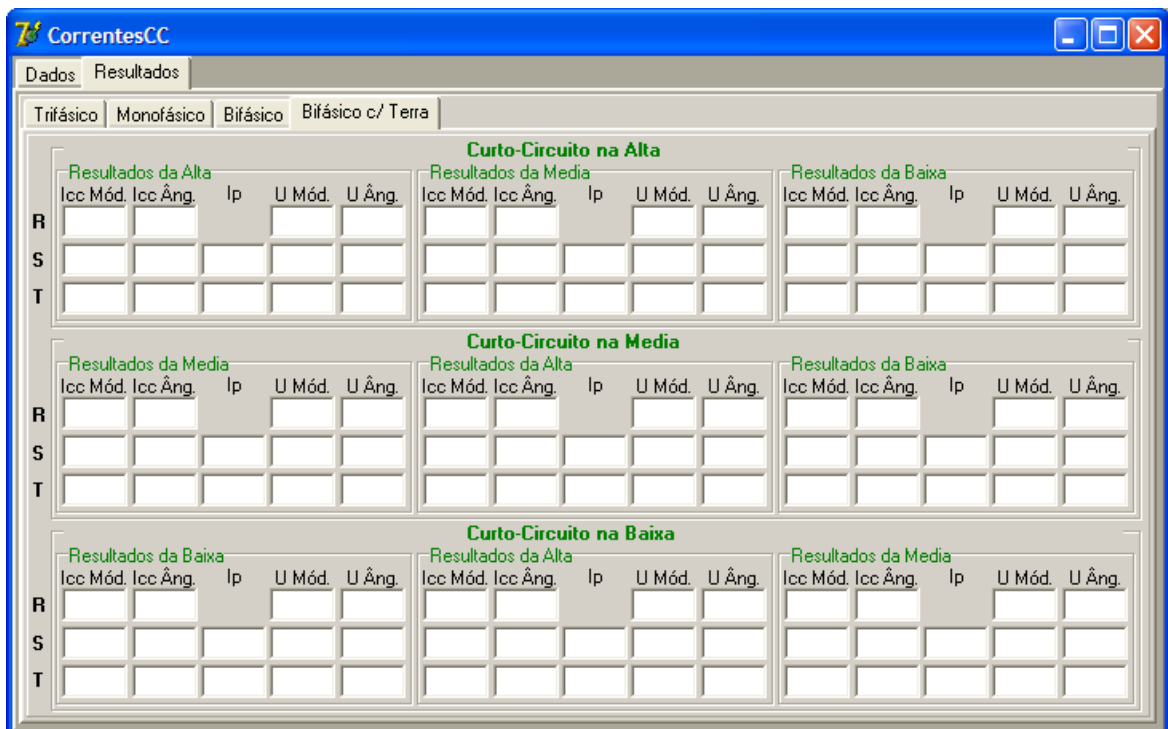


Figura 4.20 - Folha de Resultados do CorrentesCC

4.3 Cálculo das correntes de curto-circuito

Nos casos habituais, a impedância Z_h é superior às impedâncias $Z_d = Z_i$, a corrente de curto-circuito inicial mais elevada nesta situação será o curto-circuito trifásico. Mas, no entanto, para curto-circuitos próximos dos transformadores com impedâncias homopolares baixas, é então considerado que Z_h é inferior a Z_d . Nesse caso, a corrente de curto-circuito inicial mais elevada será dada por um curto-circuito fase-fase-terra.

4.3.1 Trifásico

Todas as impedâncias terão de ser calculadas com as várias vistas das diferentes tensões de entrada ou saída do transformador e, assim, somar a impedância directa (que é igual à inversa) à impedância da rede. Com a informação da potência de curto-circuito da rede calcula-se:

$$Z_{rede} = \frac{U_{vista}^2}{S_{cc\ referido}} \quad (4.1)$$

Reduzimos as impedâncias a uma só impedância equivalente, para o cálculo do curto-circuito.

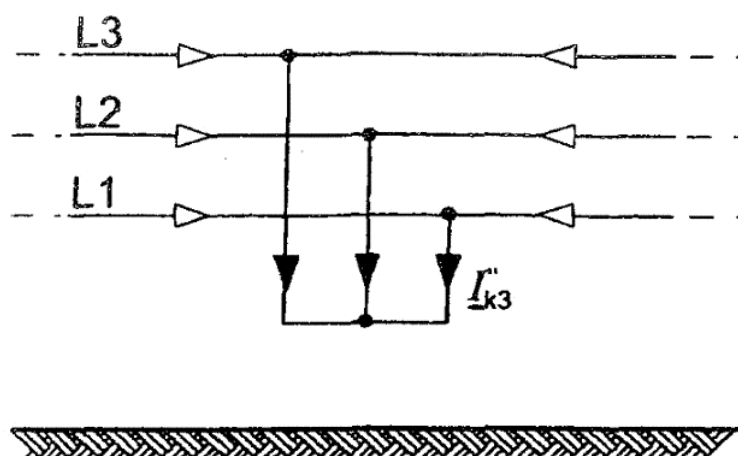


Figura 4.21 - Curto-circuito trifásico [6]

Assim sendo, pode-se calcular as correntes de curto-circuito trifásicas simétricas.

$$I_k'' = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \quad (4.2)$$

com uma fonte de alimentação equivalente $U_n/\sqrt{3}$ no ponto do curto-circuito e da impedância de curto-circuito.

4.3.2 Bifásico

No caso dos curto-circuitos bifásicos, as impedâncias homopolares ainda não entram neste tipo de curto-circuito, por não termos nenhum circuito pela terra. Calcula-se assim:

$$I''_{k2} = \frac{U_n}{|Z_d + Z_i|} = \frac{U_n}{2|Z_d|} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_k \quad (4.3)$$

Durante o início do curto-circuito, a impedância inversa é aproximadamente igual à impedância directa, independentemente do curto-circuito ser longe ou perto do alternador.

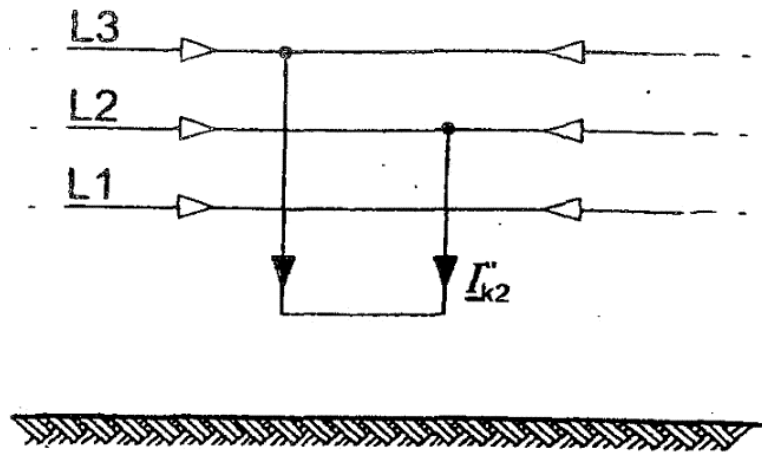


Figura 4.22 - Curto-circuito bifásico [6]

4.3.3 Bifásico com terra

Para calcular as correntes de curto-circuito iniciais, é necessário distinguir as correntes I''_{k2ELS} , I''_{k2ELT} e I''_{kE2E} .

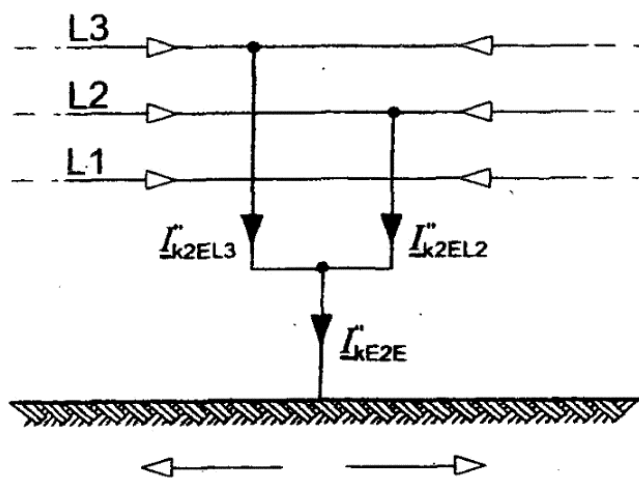


Figura 4.23 - Curto-circuito bifásicos [6]

No caso de Z_h ser inferior a Z_d , a corrente I_{kE2E}'' na corrente de curto-circuito bifásico terra é geralmente o maior curto-circuito simétrico inicial do que I_k'' , I_{k2}'' , I_{k2E}'' e I_{k1}'' .

Nas duas fases teremos então a seguinte corrente:

$$I_{k2ELS}'' = U_n \cdot \frac{|Z_h/Z_d - \alpha|}{|Z_d + 2.Z_h|} \quad (4.4)$$

$$I_{k2ELT}'' = U_n \cdot \frac{|Z_h/Z_d - \alpha^2|}{|Z_d + 2.Z_h|} \quad (4.5)$$

A corrente de curto-circuito inicial I_{kE2E}'' , passa pela terra e/ou nos condutores à terra, como se mostra na figura 4.23:

$$I_{kE2E}'' = \frac{\sqrt{3}.U_n}{|Z_d + 2.Z_h|} \quad (4.6)$$

4.3.4 Curto-circuitos monofásicos

A corrente de curto-circuito monofásico é calculada da seguinte maneira:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3}.U_n}{|2.Z_d + Z_h|} \quad (4.7)$$

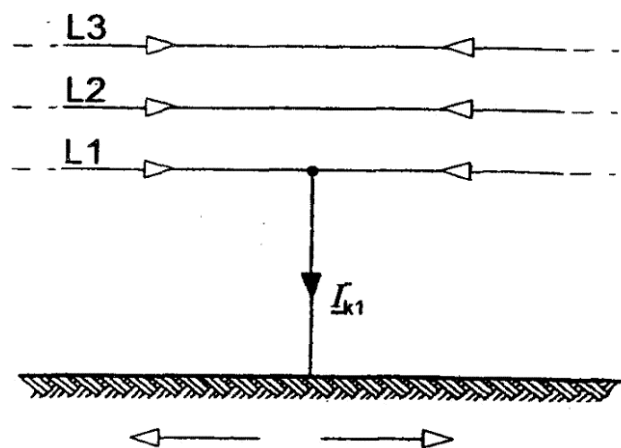


Figura 4.24 - Monofásico [6]

No caso de Z_h ser inferior a Z_d , a corrente de curto-circuito monofásica inicial I_{k1}'' é superior à corrente de curto-circuito trifásica I_k'' mas inferior à corrente de curto-circuito bifásica com terra, I_{kE2E}'' . No entanto, I_{k1}'' será a corrente mais elevada que terá que ser interrompida pelo disjuntor se $1,0 > Z_h/Z_d > 0,23$.

4.4 Cálculo das correntes de pico

4.4.1 Corrente de curto-circuito trifásico

A corrente de pico calcula-se da seguinte maneira:

$$i_p = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (4.8)$$

O factor k pode ser calculado tal como é explicado no capítulo 3.8.

4.4.2 Corrente de curto-circuito bifásico

A corrente de pico calcula-se da seguinte maneira:

$$i_{p2} = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k2}'' \quad (4.10)$$

O factor k deve ser calculado do mesmo modo que no trifásico.

O valor de pico do fase-fase é inferior ao do trifásico, que até pode ser dado assim:

$$i_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_p \quad (4.11)$$

4.4.3 Corrente de curto-circuito bifásico com terra

Para um curto-circuito fase-fase com terra, o valor da corrente de pico de curto-circuito pode ser exprimido por:

$$i_{p2E} = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k2E}'' \quad (4.12)$$

O factor k deve ser calculado como nos casos anteriores.

É apenas nos casos em que Z_h é nitidamente inferior a Z_d (inferior a 25% de Z_d) que é necessário calcular i_{p2E} .

4.4.4 Corrente de curto-circuito monofásico

Para um curto-circuito monofásico, o valor da corrente de pico de curto-circuito pode ser exprimida por:

$$i_{p1} = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k1}'' \quad (4.13)$$

O factor k continua a ser calculado como nos casos anteriores.

4.5 Cálculo das tensões de defeito

As tensões de defeito são calculadas através das correntes das componentes simétricas e da matriz das impedâncias,

$$V_{[dih]} = Z_{[dih]} \times I_{[dih]} \quad (4.14)$$

donde podemos agora calcular:

$$V_{RST} = T \times V_{[dih]} \quad (4.15)$$

Capítulo 5

Aplicação do software desenvolvido e análise comparada de resultados

O software de cálculo, CorrentesCC, foi criado e desenvolvido durante este projecto final de curso mestrado de raiz. Não tendo sido copiado de nenhum outro software existente, foi utilizado o CORET, para comparação de resultados.

Serão ilustrados 2 casos, com um transformador de 2 enrolamentos e outro com um transformador de 3 enrolamentos.

5.1 Transformador de 2 enrolamentos

O transformador que se irá analisar tem uma potência de 30 MVA, trata-se de uma ligação YNd11, com impedância do neutro nula (porque o CORET não consegue adicionar impedâncias de neutro), com tensões de $225\text{kV} \pm 1,111\% \times 10 / 31,5 \text{ kV}$. A potência directa de curto-circuito da rede será de 22 GVA na alta e 3500 MVA na baixa, e a sua potência de curto-circuito homopolar será considerada igual à directa sendo por isso multiplicada por um factor de 1 no software. A componente homopolar usada foi de 0,9.

As resistências do transformador serão de $0,002 \Omega$ na alta e de $0,005 \Omega$ na baixa, e na rede serão de $0,00005 \Omega$ na alta e de $0,0005 \Omega$ na baixa.

Após ter feito as várias combinações entre tensões e tensões de curto-circuito, verifiquei que o curto-circuito mais elevado se encontrava na tomada mínima do regulador da tensão da alta.

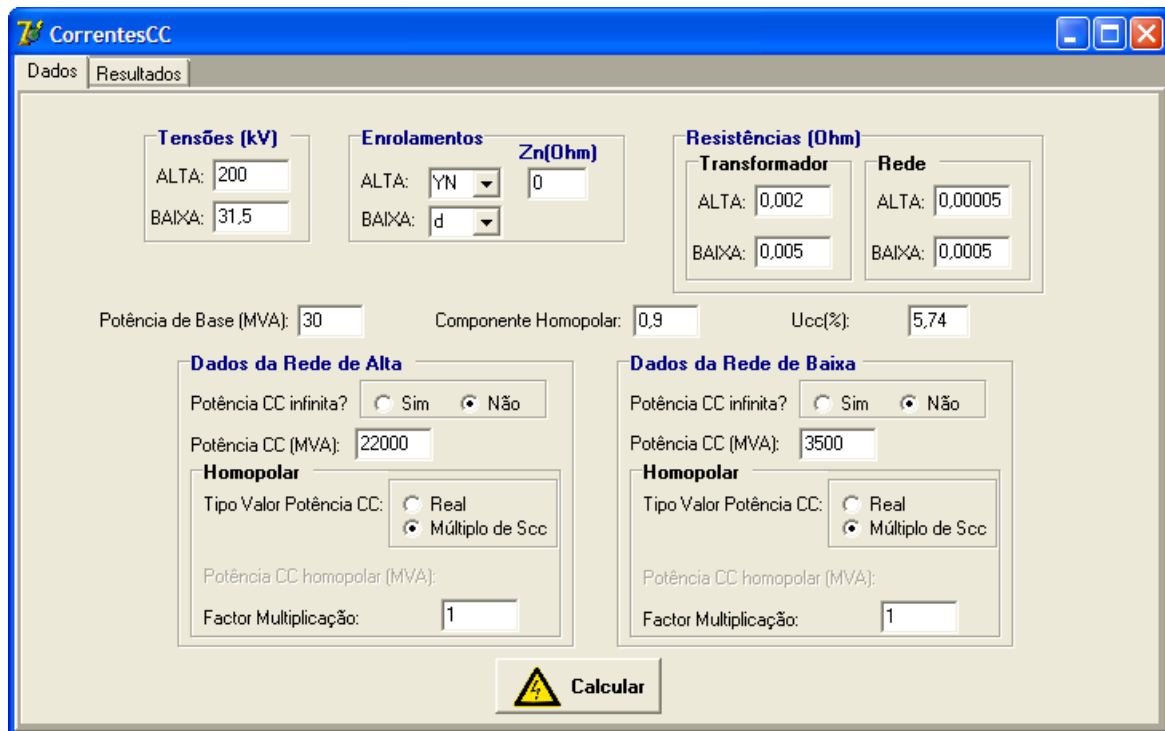


Figura 5.1 - Exemplo com 2 enrolamentos

Onde se verifica os seguintes resultados:

Curto-circuito trifásico:



Figura 5.2 - Resultados dos Curto-circuitos trifásicos

Curto-circuito monofásico:

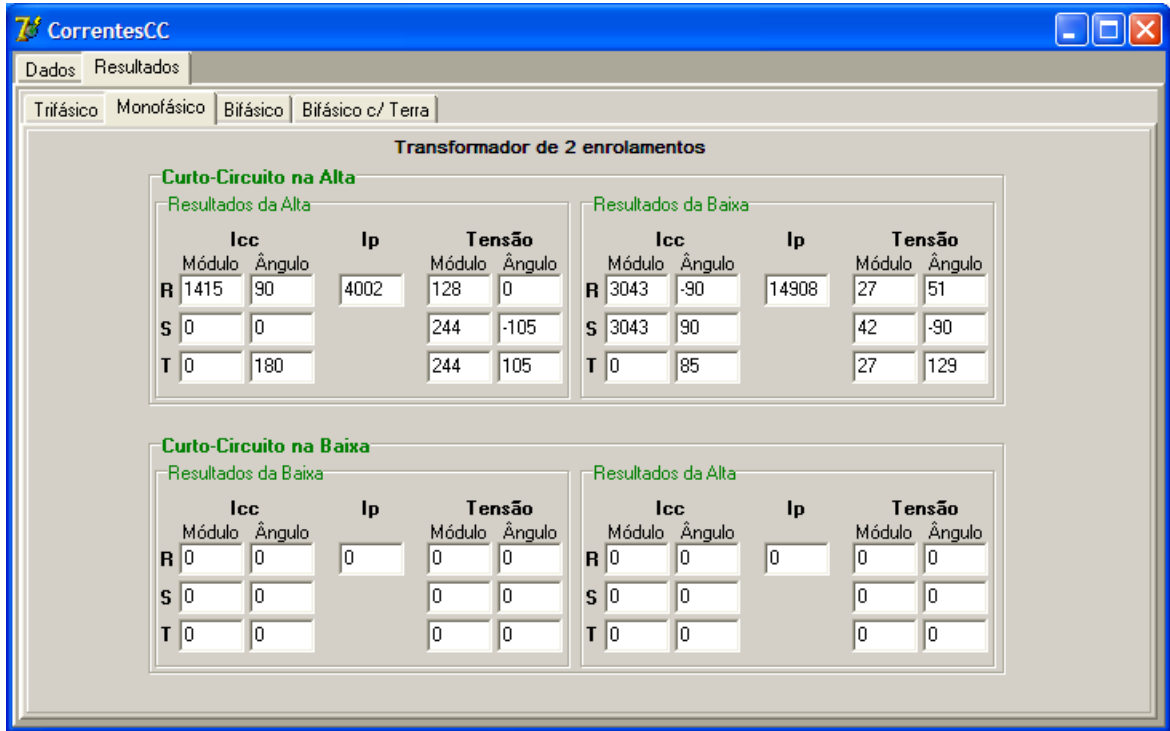


Figura 5.3 - Resultados dos Curto-circuitos monofásicos

Comparando os meus resultados com o CORET, obtemos:

CorrentesCC:

Tabela 5.1 - Resultados do CorrentesCC

Trifásico		Monofásico		Valores mais elevados	
AT		AT		AT	
AT	BT	AT	BT	AT	BT
1313	4890	1415	3043	1415	4890
BT		BT		BT	
AT	BT	AT	BT	AT	BT
1474	5489	0	0	1474	5489

CORET:

Tabela 5.2 - Resultados do CORET

Valores mais elevados	
AT	
AT	BT
1285	5301
BT	
AT	BT
1291	5324

Vendo em forma de gráfico, para uma análise mais fácil, podemos observar:

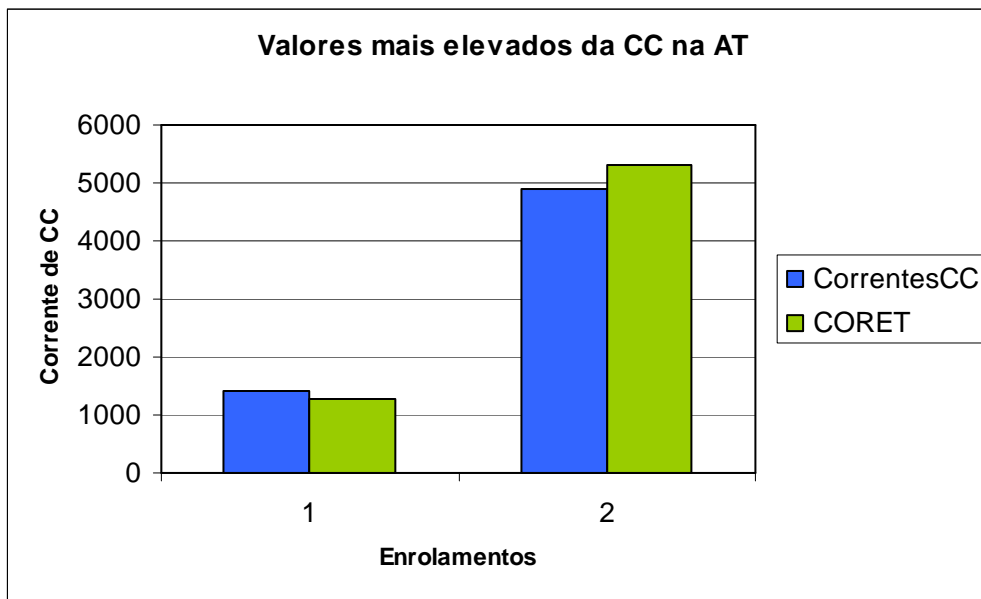


Figura 5.4 - Gráfico comparativo dos valores mais elevados das correntes de curto-circuito na Alta Tensão dos dois softwares

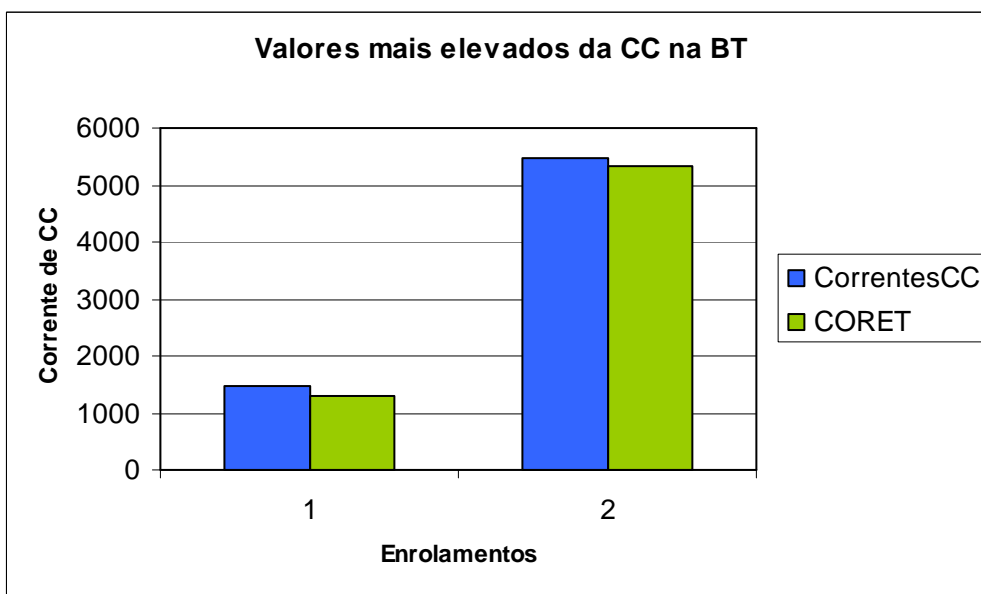


Figura 5.5 - Gráfico comparativo dos valores mais elevados das correntes de curto-circuito na Baixa Tensão dos dois softwares

Análise de resultados:

Tabela 5.3 - Comparação dos resultados dos dois softwares

Diferença		Erro(%)	
AT		AT	
AT	BT	AT	BT
130	411	10,12	7,75
BT		BT	
AT	BT	AT	BT
183	165	14,18	3,10

A comparação apenas foi as correntes de curto-circuito trifásicas e monofásicas, porque o CORET apenas calcula essas duas.

Pode-se verificar na sua maioria, erros inferiores a 10%, esses erros provêm de arredondamentos feitos pelo CORET, o erro que está acima de 10% provém ainda do CORET não considerar o seu grupo horário (11) e entrar com as suas contas como se fosse do grupo 0.

5.2 Transformador de 3 enrolamentos

O transformador que se irá analisar tem uma potência de 180 MVA na alta e na média e na baixa, tem uma potência de um terço de 60 MVA, neste caso trata-se de um terciário de estabilização. As suas ligações são YNynd11, com impedância do neutro nula (porque o CORET não consegue adicionar impedâncias de neutro), com 218,5kV de tensão nominal na alta, com um regulador na alta de $-1,25\% \times 12$ e $+1,25\% \times 4$, com 68,8 kV na média e 13,8kV na baixa. A potência de curto-circuito directa da rede será de 21218MVA na alta, de 5023MVA na média e de 758MVA na baixa e a sua potência de curto-circuito homopolar será considerada igual à directa sendo por isso multiplicada por um factor de 1 no software. A componente homopolar usada foi de 0,9.

As resistências do transformador serão de 0,002 Ω na alta, de 0,003 Ω na média e de 0,005 Ω na baixa e na rede serão de 0,00005 Ω na alta, de 0,0003 Ω na média e de 0,0005 Ω na baixa.

Após ter feito as várias combinações entre tensões e tensões de curto-circuito, verifiquei que o curto-circuito mais elevado se encontrava na tomada mínima do regulador de tensão da alta.

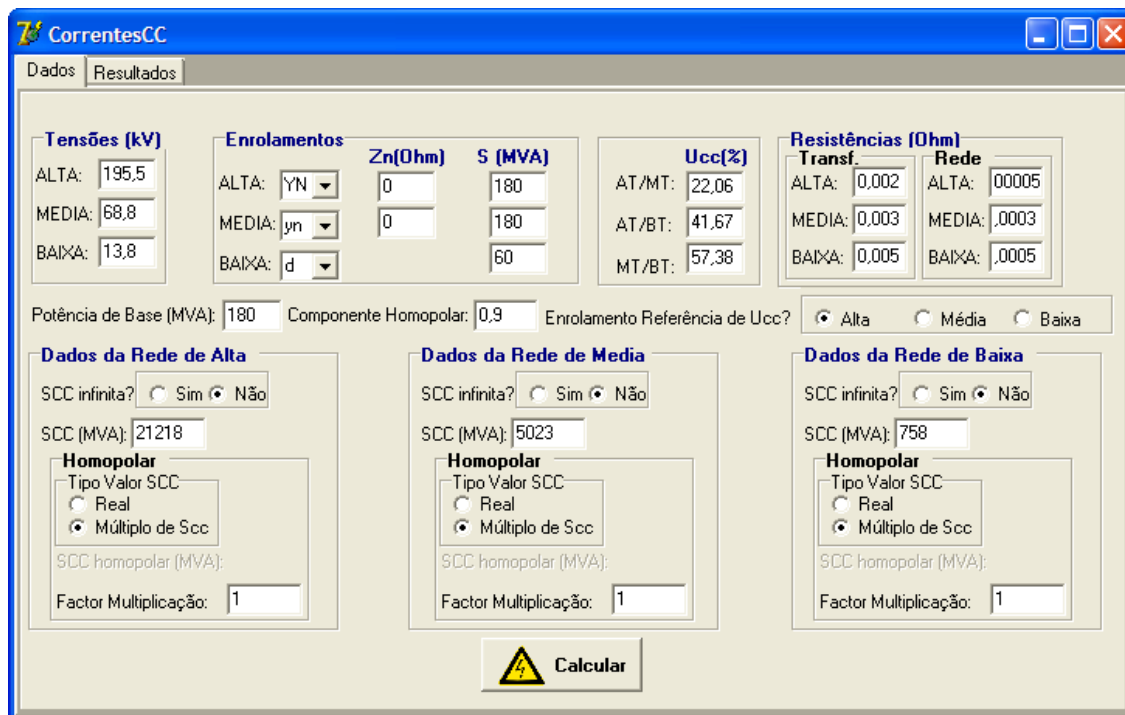


Figura 5.6 - Exemplo com 3 enrolamentos

Onde se verifica os seguintes resultados:

🔌 Curto-circuito trifásico:

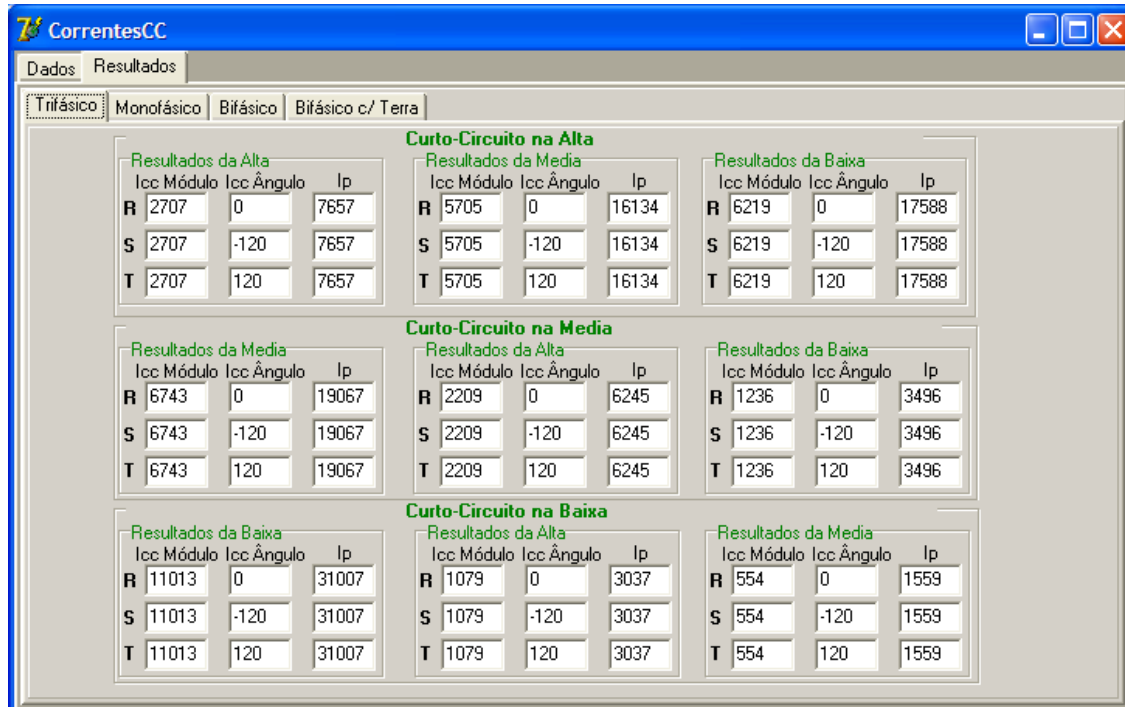


Figura 5.7 - Resultados dos Curto-circuitos trifásicos

Curto-circuito monofásico:

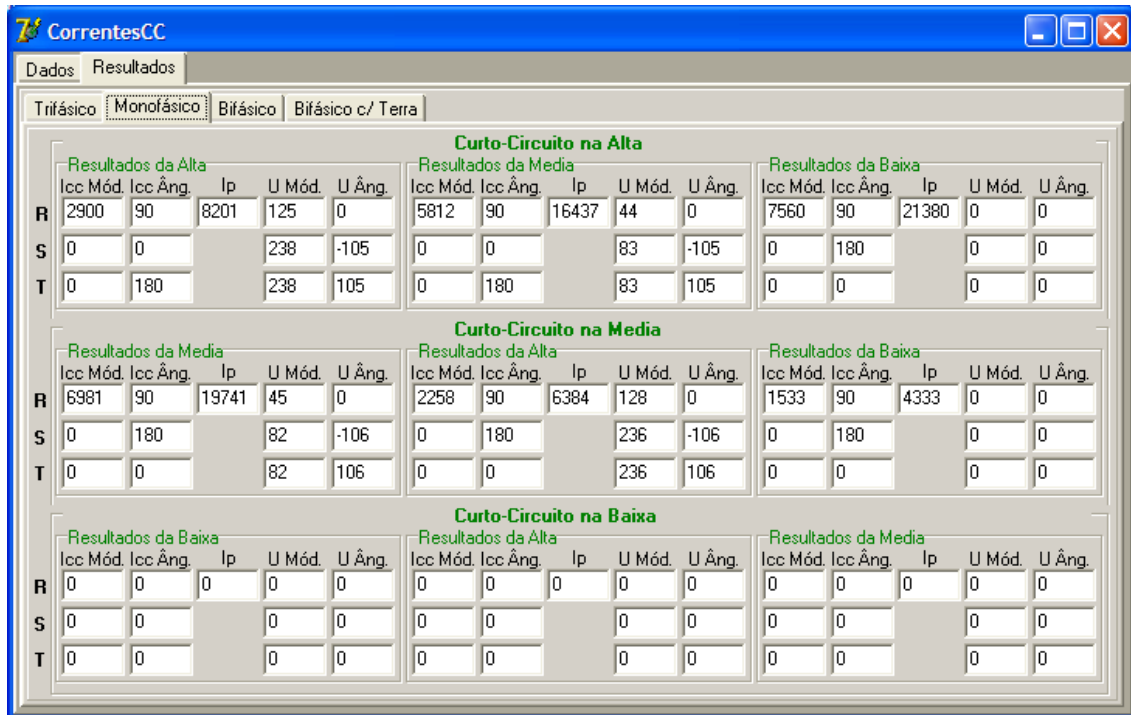


Figura 5.8 - Resultados dos Curto-circuitos monofásicos

Comparando os meus resultados com o CORET, obtemos:

CorrentesCC:

Tabela 5.4 - Resultados do CorrentesCC

Trifásico			Monofásico			Valores mais elevados		
AT			AT			AT		
AT	MT	BT	AT	MT	BT	AT	MT	BT
2707	5705	6219	2900	5812	7560	2900	5812	7560
MT			MT			MT		
AT	MT	BT	AT	MT	BT	AT	MT	BT
2209	6743	1236	2258	6981	1533	2258	6981	1533
BT			BT			BT		
AT	MT	BT	AT	MT	BT	AT	MT	BT
1079	554	11013	0	0	0	1079	554	11013

✚ CORET:

Tabela 5.5 - Resultados do CORET

Valores mais elevados CC

AT		
AT	MT	BT
2982	5860	7493
MT		
AT	MT	BT
2298	7054	1501
BT		
AT	MT	BT
1076	548	10334

Vendo em forma de gráfico, para uma análise mais fácil, podemos observar:

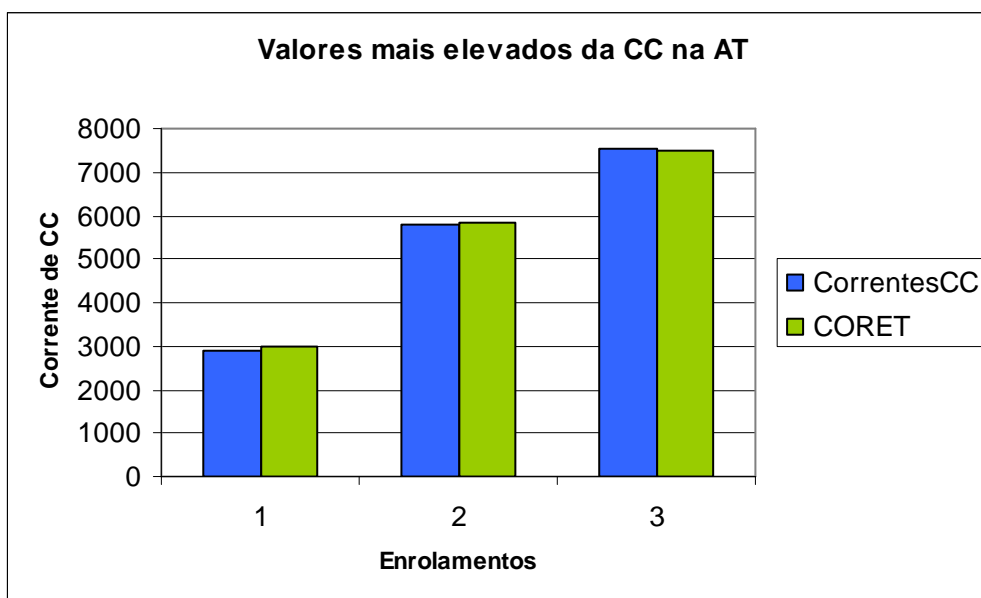


Figura 5.9 - Gráfico comparativo dos valores mais elevados das correntes de curto-circuito na Alta Tensão dos dois softwares

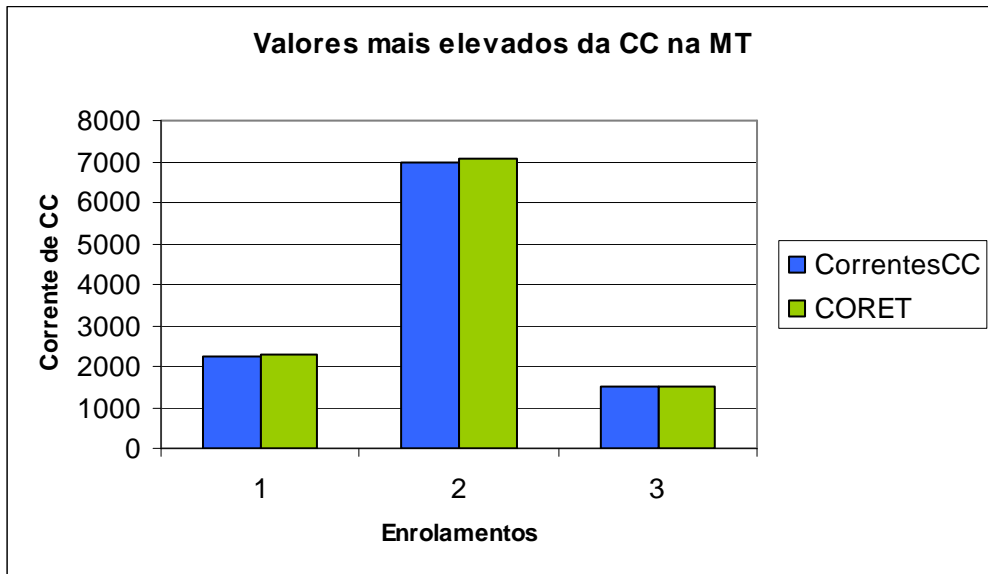


Figura 5.10 - Gráfico comparativo dos valores mais elevados das correntes de curto-circuito na Média Tensão dos dois softwares

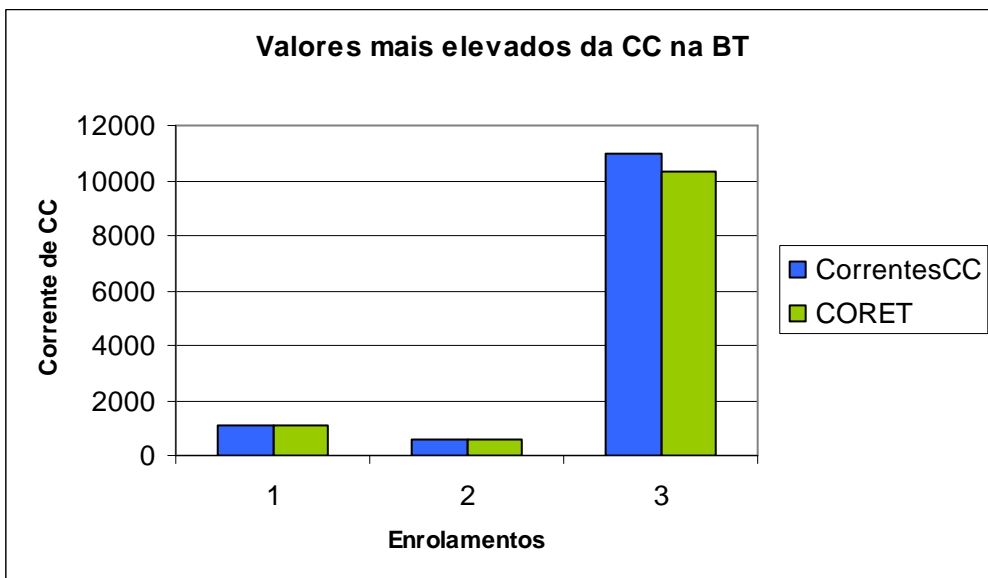


Figura 5.11 - Gráfico comparativo dos valores mais elevados das correntes de curto-circuito na Baixa Tensão dos dois softwares

Análise de resultados:

Tabela 5.6 - Comparação dos resultados dos dois softwares

Diferença			Erro(%)		
AT			AT		
AT	MT	BT	AT	MT	BT
82	48	67	2,75	0,82	0,89
MT			MT		
AT	MT	BT	AT	MT	BT
40	73	32	1,74	1,03	2,13
BT			BT		
AT	MT	BT	AT	MT	BT
3	6	679	0,28	1,09	6,57

A comparação apenas foi as correntes de curto-circuito trifásicas e monofásicas, porque o CORET apenas calcula essas duas.

Pode-se verificar na sua maioria, erros inferiores a 3%, esses erros provêm de arredondamentos feitos pelo CORET, o erro que está acima de 6% provém ainda do CORET não considerar o seu grupo horário (11) e entrar com as suas contas como se fosse do grupo 0.

Capítulo 6

Conclusões e perspectivas de desenvolvimento futuro

Este trabalho tinha como objectivo desenvolver um software de cálculo de curto-circuitos, que conduzisse a valores mais exactos e precisos, e de forma simples para o utilizador.

Pode dizer-se que esses objectivos do projecto foram cumpridos.

Foi realizado um estudo aprofundado dos curto-circuitos externos ao transformador, com a preocupação a nível do transformador, sendo este estudo feito, com o apoio de um fabricante de transformadores. Estudou-se também as tensões de defeitos e as correntes de pico ocorridas após um curto-circuito externo, sofridas pelo transformador.

O software foi desenvolvido com base nesse estudo, em Fortran 90, uma excelente linguagem de programação com muitas potencialidades. A finalização do software teve como preocupação a interface, feita em Delphi, onde foi desenvolvida uma interface simples de usar e de fornecer os resultados.

Devo referir que o CorrentesCC mostra como vantagem em relação ao CORET, não usar simplificações nem arredondamentos durante os seus cálculos, informando o utilizador da corrente de todas as fases existentes no transformador, em módulo e ângulo (o ângulo é uma informação adicional, que poderá ser usada mais tarde no cálculo das forças electrodinâmicas internas do transformador).

Algo que não existe no CORET, são as tensões de defeito, que servem para calcular o isolamento das fases porque a tensão num curto-circuito sobe nalguns casos, dando esses resultados também nas 3 fases sem arredondamentos nem simplificações.

E, por fim, o CORET utiliza os valores dados pelas normas para o cálculo das correntes de pico, podendo esse valor não ser o seu valor real, mas sim um valor máximo algumas vezes existente dependendo de muitas condicionantes, o pior caso. No CorrentesCC, o cálculo da corrente de pico é feita com os valores exactos da rede e do transformador, podendo dar o seu valor real e podendo nalguns casos, projectar o transformador sem o sobredimensionar.

Após esta análise, penso que o resultado é positivo e que se conseguiu dar algo melhor do que aquilo que já existia. O CORET já existe há alguns anos na Efacec Energia - PT e ele corre

sobre algumas simplificações, não fornecendo algumas informações existente no CorrentesCC, informações essas que podem levar a um melhor dimensionamento dos transformadores e até a percebê-los melhor. Actualmente, tudo isto poderia levar a alguns sobredimensionamentos dos transformadores, com custos adicionais.

Sendo a Efacec Energia - PT, um fabricante com grande prestígio nacional e também internacional, a competitividade do mercado é grande e a qualidade é exigida.

Este software poderá futuramente ser inserido nos restantes softwares da *Efacec Energia - PT*.

Como perspectivas de desenvolvimento, posso referir que este estudo poderia ser alargado a outras gamas de transformadores, como os auto-transformadores e transformadores monofásicos, para contemplar toda a gama de transformadores de potência existente na Efacec, não tendo sido feito por falta de tempo, um semestre é muito curto e, por isso, apenas utilizei os casos de maior importância, transformadores de 2 e 3 enrolamentos.

Outro desenvolvimento que poderia ser dado ao meu projecto, numa fase posterior, seria um estudo dos esforços electrodinâmicos internos ao transformador (nos enrolamentos e na cuba), no qual se usaria os resultados do CorrentesCC, o módulo e o ângulo das correntes de curto-circuito, para calcular os esforços electrodinâmicos internos do transformador mais exactos e com mais precisão. Este é um ponto fulcral para garantir a segurança do transformador, evitando o risco de avaria ou mesmo de explosão, o que seria extremamente grave, porque não se pode esquecer que um transformador pode chegar a levar muitas toneladas de óleo no seu interior, uma substância bastante inflamável.

A realização deste trabalho, na minha formação como Engenheiro foi bastante enriquecedora e constituiu uma experiência única, que me acompanhará durante toda a minha vida profissional. Finalmente, após anos de teoria na faculdade, deparei-me com a realidade da vida profissional numa empresa onde a responsabilidade e o profissionalismo são a base do seu funcionamento.

Apesar de todas as complicações e dificuldades que o mundo actual do trabalho apresenta, a *Efacec* demonstrou a sua enorme capacidade de atingir a máxima qualidade nos serviços prestados, tendo sido para mim, um exemplo que irei seguir durante toda a minha carreira profissional enquanto Engenheiro Electrotécnico.

Referências

- [1] Roennspiess, Olaf E.; Efthymiadis, A. E.; A comparison of static and dynamic short circuit analysis procedures, IEEE Transactions on industry application, vol. 26, Nº 3, May/June 1990.
- [2] PAIVA, José P. S. Redes de Energia Eléctrica uma análise sistemática: IST press. Abril 2005.
- [3] <http://www.josematias.pt/EsqMaquinasElectricas/EnsaioVazioTransform.jpg>, Março 2008.
- [4] <http://www.josematias.pt/EsqMaquinasElectricas/EnsaioCurtoCircuito.jpg>, Março 2008.
- [5] Matos, Manuel de antónio, Introdução ao cálculo de curto-circuitos trifásicos simétricos pela norma CEI-909, FEUP 1996.
- [6] CEI 60909-0. Courant de court-circuit dans les réseaux triphasé à courant alternative partie 0: Calcul des courants. 07-2001.
- [7] Tang Renyuan, Li Yan , Li Dake and Tian Lijan, Numerical Calculation of 3D transient eddy current field and short circuit electromagnetic force in large transformers, IEEE, Transactions on magnetic on magnetics, vol. 28, Nº 2, Shenyang Polytechnic University, China, March 1992.
- [8] CEI 60076-5. Transformateur de puissance partie 5: tenue au court-circuit. 02-2006.
- [9] PÉLISSIER, René. Les réseaux d'énergie électrique. 1971.
- [10] ELGERD, Olle Ingemar. Introdução à teoria de sistemas de energia eléctrica. 1976.
- [11] Ras Oliva, Enrique. Transformadores. 1944.
- [12] Fitzgerald, A. E.. Electric machinery. 2003.
- [13] Chapman, Stephen J.. Electric machinery Fundamentals. 1988.
- [14] Fraile Mora, Jesus. Máquinas eléctricas.

- [15] VLADIMIRO, Miranda. Curto Circuitos Assimétricos. Versão 1.0, 1br 2006.
- [16] CEI 60909-4. Courant de court-circuit dans les réseaux triphasé à courant alternative partie 4: Exemples pour le calcul des courants de court-circuit. 07-2000.
- [17] CEI 60076-8. Transformateur de puissance - Guide d'application. 10-1997.
- [18] Carvalho, Carlos Castro, Transformadores, FEUP 1983.
- [19] Morais, António Arnaldo Lima dos Anjos, Programa de cálculo de curto-circuitos, 2001.
- [20] Anderson, P. M, Analysis of Faulted Power Systems, Hardcover, Edition: 1, July 1995.
- [21] Tan, Anyan; Liu, W. H. Edwin; Shirmohammadi, Dariush; Transformer and load modeling in short circuit analysis for distribution systems, IEEE Transactions on Power Systems, vol 12, nº3, August 1997.
- [22] Chen, Tsai-Hsiang; Chen, Mo-Shing; Lee, Wei-Jen; Kotas, Paul; Olinda, Peter Van; Distribution system short circuit analysis - A rigid Approach, Transaction on Power System, vol. 7, nº 1, February 1992.
- [23] Parise, Giuseppe, A new approach to calculate the decaying AC contributions to short circuit: the "characteristic" currents method, IEEE Transactions on industry application, vol 31, nº1, January/February 1995.
- [24] Yun-Qiu, Tang; Jing-Qiu, Qiao; Zi-Hong, Xu; Numerical calculation of short circuit electromagnetic forces on the transformer winding, IEEE Transactions on magnetics, vol 26, nº2, March 1990.
- [25] Hurley, WM Gerard; Wilcox, David J.; Mc Namara, P. Stephen; Calculation of short circuit impedance in transformer windings, IEEE 1991.
- [26] Fortescue, C. L. , Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks, in proc. Conf. Amer. Inst. Elect. Eng. 1918.
- [27] Monticelli, A., The impact of modeling short circuit branches in state estimation, IEEE Transaction on Power system, vol.8 nº1, February 1993.
- [28] Hwang, Hu H., Mathematical analysis of double line-to-ground short circuit of an alternator, IEEE Transaction on Power system apparatus and systems, vol.pas-86, nº10, October 1967.
- [29] Malon, David M.; On a common error in open & short circuit reliability computation, IEEE Transaction on Reability, vol.38 nº3, August 1989.
- [30] Pillsbury, R. D.; Thome, R. J.; Mann, W. R.; Minervini, J. V.; A program for evaluating the effects of short circuits in coil systems, IEEE Transaction on Magnetics, vol.24 nº2, March 1988.
- [31] Pierre, conrad R. St., Sample system for three-phase short circuit calculations, IEEE Transaction on industry applications, vol.26 nº2, March/April 1990.

- [32] Renyuan, Tang; Yan, Hu; Zhanhong, Lu; Shiyu, Yang; Lijie, Miao; computation of transient electromagnetic torque in a turbogenerator under the cases of different sudden short circuits, IEEE Transaction on magnetics, vol.26 n°2, March 1990.
- [33] Ramaswami, R.; Mc Guire, P. F.; Integrated coordination and short circuit analysis for system protection, IEEE Transaction on Power delivery, vol.7 n°3, July 1992.

ANEXO A

1. Curto-circuito Trifásico

Baixa:

Calcular a impedância:

$$Z_B^{cc} = Z_{rede} + Z_{Transf.} \quad (A.1)$$

$$Z_B^{cc} = \frac{U_B^2}{S_A^{cc}} + \frac{U_{cc} \cdot U_B^2}{100 \cdot P_b} = \text{---} \Omega \quad (A.2)$$

Cálculo da corrente de curto-circuito na linha:

$$I_B^{cc-L} = I_B^{cc-Y} = \frac{1000 \cdot U_B}{\sqrt{3} \cdot Z_B^{cc}} \quad (A.3)$$

$$I_A^{cc-L} = I_A^{cc-Y} = I_B^{cc-L} \cdot \frac{U_B}{U_A} \quad (A.4)$$

Se o enrolamento for em estrela, o valor da corrente de curto-circuito será o mesmo do da linha calculado em cima, se for em triângulo teremos:

$$I_B^{cc-D} = \frac{1000 \cdot U_B}{3 \cdot Z_B^{cc}} \quad (A.5)$$

$$I_A^{cc-D} = \frac{I_B^{cc-L}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_B}{U_A} \quad (A.6)$$

Alta:

Calcular a impedância:

$$Z_A^{cc} = Z_{rede} + Z_{Transf.} \quad (A.7)$$

$$Z_A^{cc} = \frac{U_A^2}{S_B^{cc}} + \frac{U_{cc} \cdot U_A^2}{100 \cdot P_b} = \text{---} \Omega \quad (A.8)$$

Cálculo da corrente de curto-circuito na linha:

$$I_A^{cc-L} = I_A^{cc-Y} = \frac{1000 \cdot U_A}{\sqrt{3} \cdot Z_A^{cc}} \quad (A.9)$$

$$I_B^{cc-L} = I_B^{cc-Y} = I_A^{cc-L} \cdot \frac{U_A}{U_B} \quad (A.10)$$

Se o enrolamento for em estrela, o valor da corrente de curto-circuito será o mesmo do da linha calculado em cima, se for em triângulo teremos:

$$I_A^{cc-D} = \frac{1000 \cdot U_A}{3 \cdot Z_A^{cc}} \quad (A.11)$$

$$I_B^{cc-D} = \frac{I_A^{cc-L}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_A}{U_B} \quad (A.12)$$

2. Curto-circuito Monofásico

Baixa:

Calcular a impedância:

Z_B^{cc-h}	=	Z_{rede}^h	+	$Z_{transf.}^h$
		$\frac{U_B^2}{S_A^{cc-h}}$ ou $x.Z_{rede}$ (estrela ¹)		$\frac{U_{cc} \cdot U_B^2}{100 \cdot P_b} \cdot \frac{U_h^{cc}}{U_{cc}}$ (estrela ²)
		0 (triângulo ¹)		∞ (triângulo ²)

Cálculo da corrente de curto-circuito na linha:

$$I_B^{cc-L} = I_B^{cc-Y} = \frac{3 \times 1000 \cdot U_B}{\sqrt{3} \cdot (Z_B^{cc-h} + 2 \cdot Z_B^{cc})} \quad (\text{A.13})$$

$$I_A^{cc-L} = I_A^{cc-Y} = I_B^{cc-L} \cdot \frac{U_B}{U_A} \quad (\text{A.14})$$

Se o enrolamento for em estrela, o valor da corrente de curto-circuito será o mesmo da linha calculado em cima, se for em triângulo teremos:

$$I_B^{cc-D} = 0 \text{ A} \quad (\text{A.15})$$

$$I_A^{cc-D} = \frac{I_B^{cc-L}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_B}{U_A} \quad (\text{A.16})$$

Alta:

Calcular a impedância:

Z_A^{cc-h}	=	Z_{rede}^h	+	$Z_{transf.}^h$
		$\frac{U_A^2}{S_B^{cc-h}}$ ou $x.Z_{rede}$ (estrela ³)		$\frac{U_{cc} \cdot U_A^2}{100 \cdot P_b} \cdot \frac{U_h^{cc}}{U_{cc}}$ (estrela ⁴)
		0 (triângulo ³)		∞ (triângulo ⁴)

¹ Enrolamento de alta

² Enrolamento de baixa

³ Enrolamento de baixa

⁴ Enrolamento de alta

Cálculo da corrente de curto-circuito na linha:

$$I_A^{cc-L} = I_A^{cc-Y} = \frac{3 \times 1000 \cdot U_A}{\sqrt{3} \cdot (Z_A^{cc-h} + 2 \cdot Z_A^{cc})} \quad (\text{A.17})$$

$$I_B^{cc-L} = I_B^{cc-Y} = I_A^{cc-L} \cdot \frac{U_A}{U_B} \quad (\text{A.18})$$

Se o enrolamento for em estrela, o valor da corrente de curto-circuito será o mesmo do da linha calculado em cima, se for em triângulo teremos:

$$I_A^{cc-D} = 0A \quad (\text{A.19})$$

$$I_B^{cc-D} = \frac{I_A^{cc-L}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_A}{U_B} = 0A \quad (\text{A.20})$$

Após calcular as correntes de curto-circuito do defeito nos vários enrolamentos, podemos calcular as correntes das componentes simétricas que corresponde a um terço da corrente de curto-circuito e, de seguida dividir pela sua corrente de base para passar tudo para p.u.:

$$I_{[dih]} = j \times \frac{I_{enrolamento}^{cc}}{3} \times \frac{1}{I_{base}} \quad (\text{A.21})$$

A partir daqui, podemos obter a matriz que representa as correntes nas 3 fases, multiplicando a matriz de Fortescue pela matriz das correntes das componentes simétricas:

$$I_{RST} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \times I_{[dih]} \quad (\text{A.22})$$

E a partir daqui, facilmente se consegue retirar o módulo e ângulo da corrente, após multiplicar pela sua corrente de base, para obter os resultados em Ampère.

Para o caso da tensão de defeito, temos de calcular a matriz das impedâncias também em p.u. para cada enrolamento, como já tínhamos o cálculo das impedâncias feitas em ohm, apenas temos de dividir pela sua impedância de base e obtemos:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_d & 0 & 0 \\ 0 & Z_i & 0 \\ 0 & 0 & Z_h \end{bmatrix} \times \frac{1}{Z_{base}} \text{ (p.u.)} \quad (\text{A.23})$$

Multiplicando esta matriz das impedâncias pela matriz das correntes das componentes simétricas, obtemos a matriz das tensões em componentes simétricas:

$$V_{[dih]} = \begin{bmatrix} Z_d & 0 & 0 \\ 0 & Z_i & 0 \\ 0 & 0 & Z_h \end{bmatrix} \times I_{[dih]} \quad (\text{A.24})$$

E pela mesma lógica da corrente, a tensão nas fases é:

$$V_{RST} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \times V_{[dih]} \quad (\text{A.25})$$

3. Curto-circuito Bifásico

Baixa:

Cálculo da corrente de curto-circuito na linha:

$$I_B^{cc-L} = I_B^{cc-Y} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{1000.U_B}{\sqrt{3}.Z_B^{cc}} = \frac{1}{2} \times \frac{1000.U_B}{Z_B^{cc}} \quad (\text{A.26})$$

$$I_A^{cc-L} = I_A^{cc-Y} = I_B^{cc-L} \cdot \frac{U_B}{U_A} \quad (\text{A.27})$$

Se o enrolamento for em estrela, o valor da corrente de curto-circuito será o mesmo do da linha calculado em cima, se for em triângulo teremos:

$$I_B^{cc-D} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{1000.U_B}{3.Z_B^{cc}} \quad (\text{A.28})$$

$$I_A^{cc-D} = \frac{I_B^{cc-L}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_B}{U_A} \quad (\text{A.29})$$

Alta:

Cálculo da corrente de curto-circuito na linha:

$$I_A^{cc-L} = I_A^{cc-Y} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{1000.U_A}{\sqrt{3}.Z_A^{cc}} = \frac{1}{2} \times \frac{1000.U_A}{Z_A^{cc}} \quad (\text{A.30})$$

$$I_B^{cc-L} = I_B^{cc-Y} = I_A^{cc-L} \cdot \frac{U_A}{U_B} \quad (\text{A.31})$$

Se o enrolamento for em estrela, o valor da corrente de curto-circuito será o mesmo do da linha calculado em cima, se for em triângulo teremos:

$$I_A^{cc-D} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{1000.U_A}{3.Z_A^{cc}} \quad (\text{A.32})$$

$$I_B^{cc-D} = \frac{I_A^{cc-L}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_A}{U_B} \quad (\text{A.33})$$

Em relação ao cálculo das correntes e tensões por fase, de um curto-circuito bifásico para um monofásico, muda apenas a equação das correntes simétricas, sendo elas:

$$I_{[dih]} = j \times \begin{bmatrix} \frac{I_{\text{enrolamento}}^{cc}}{\sqrt{3}} \\ -\frac{I_{\text{enrolamento}}^{cc}}{\sqrt{3}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.34})$$

4. Curto-circuito Bifásico Terra

Baixa:

Cálculo da corrente de curto-circuito na linha:

$$I_{B_k2ELS}^{cc_L} = I_{B_k2ELS}^{cc_Y} = 1000.U_B \times \frac{\left| \frac{Z_B^{cc-h}}{Z_B^{cc}} - \alpha \right|}{\left| Z_B^{cc} + 2.Z_B^{cc-h} \right|} \quad (\text{fase S}) \quad (\text{A.35})$$

$$I_{B_k2ELT}^{cc_L} = I_{B_k2ELT}^{cc_Y} = 1000.U_B \times \frac{\left| \frac{Z_B^{cc-h}}{Z_B^{cc}} - \alpha^2 \right|}{\left| Z_B^{cc} + 2.Z_B^{cc-h} \right|} \quad (\text{fase T}) \quad (\text{A.36})$$

$$I_{B_kE2E}^{cc_L} = I_{B_kE2E}^{cc_Y} = \frac{3 \times 1000.U_B}{\left| Z_B^{cc} + 2.Z_B^{cc-h} \right|} \quad (\text{terra}) \quad (\text{A.37})$$

$$I_{A_k2ELS}^{cc_L} = I_{A_k2ELS}^{cc_Y} = I_{B_k2EL2}^{cc_L} \cdot \frac{U_B}{U_A} \quad (\text{A.38})$$

$$I_{A_k2ELT}^{cc_L} = I_{A_k2ELT}^{cc_Y} = I_{B_k2EL3}^{cc_L} \cdot \frac{U_B}{U_A} \quad (\text{A.39})$$

$$I_{A_kE2E}^{cc_L} = I_{A_kE2E}^{cc_Y} = I_{B_kE2E}^{cc_L} \cdot \frac{U_B}{U_A} \quad (\text{A.40})$$

Se o enrolamento for em estrela, o valor da corrente de curto-circuito será o mesmo do da linha calculado em cima, se for em triângulo teremos:

$$I_{B_k2ELS}^{cc_D} = 0 \quad (\text{fase S}) \quad (\text{A.41})$$

$$I_{B_k2ELT}^{cc_D} = 0 \quad (\text{fase T}) \quad (\text{A.42})$$

$$I_{B_kE2E}^{cc_D} = 0 \quad (\text{terra}) \quad (\text{A.43})$$

$$I_{A_k2ELS}^{cc_D} = I_{B_k2EL2}^{cc_L} \cdot \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot U_A} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (\text{A.44})$$

$$I_{A_k2ELT}^{cc_D} = I_{B_k2EL3}^{cc_L} \cdot \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot U_A} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (\text{A.45})$$

$$I_{A_kE2E}^{cc_D} = I_{B_kE2E}^{cc_L} \cdot \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot U_A} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (\text{A.46})$$

Alta:

Cálculo da corrente de curto-circuito na linha:

$$I_{A_k2ELS}^{cc_L} = I_{A_k2ELS}^{cc_Y} = 1000 \cdot U_A \times \frac{\left| \frac{Z_A^{cc_h}}{Z_A^{cc}} - \alpha \right|}{\left| Z_A^{cc} + 2 \cdot Z_A^{cc_h} \right|} \text{ (fase S)} \quad (\text{A.47})$$

$$I_{A_k2ELT}^{cc_L} = I_{A_k2ELT}^{cc_Y} = 1000 \cdot U_A \times \frac{\left| \frac{Z_A^{cc_h}}{Z_A^{cc}} - \alpha^2 \right|}{\left| Z_A^{cc} + 2 \cdot Z_A^{cc_h} \right|} \text{ (fase T)} \quad (\text{A.48})$$

$$I_{A_kE2E}^{cc_L} = I_{A_kE2E}^{cc_Y} = \frac{3 \times 1000 \cdot U_A}{\left| Z_A^{cc} + 2 \cdot Z_A^{cc_h} \right|} \text{ (terra)} \quad (\text{A.49})$$

$$I_{B_k2ELS}^{cc_L} = I_{B_k2ELS}^{cc_Y} = I_{A_k2EL2}^{cc_L} \cdot \frac{U_A}{U_B} \quad (\text{A.50})$$

$$I_{B_k2ELT}^{cc_L} = I_{B_k2ELT}^{cc_Y} = I_{A_k2EL3}^{cc_L} \cdot \frac{U_A}{U_B} \quad (\text{A.51})$$

$$I_{B_kE2E}^{cc_L} = I_{B_kE2E}^{cc_Y} = I_{A_kE2E}^{cc_L} \cdot \frac{U_A}{U_B} \quad (\text{A.52})$$

Se o enrolamento for em estrela, o valor da corrente de curto-circuito será o mesmo do da linha calculado em cima, se for em triângulo teremos:

$$I_{A_k2ELS}^{cc_D} = 0 \text{ (fase S)} \quad (\text{A.53})$$

$$I_{A_k2ELT}^{cc_D} = 0 \text{ (fase T)} \quad (\text{A.54})$$

$$I_{A_kE2E}^{cc_D} = 0 \text{ (terra)} \quad (\text{A.55})$$

$$I_{B_k2ELS}^{cc_D} = I_{A_k2EL2}^{cc_L} \cdot \frac{U_A}{\sqrt{3} \cdot U_B} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (\text{A.56})$$

$$I_{B_k2ELT}^{cc_D} = I_{A_k2EL3}^{cc_L} \cdot \frac{U_A}{\sqrt{3} \cdot U_B} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (\text{A.57})$$

$$I_{B_kE2E}^{cc_D} = I_{A_kE2E}^{cc_L} \cdot \frac{U_A}{\sqrt{3} \cdot U_B} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (\text{A.58})$$

Em relação ao cálculo das correntes e tensões por fase, de um curto-circuito bifásico para um monofásico, muda apenas a equação das correntes simétricas sendo elas:

$$I_{[dih]} = \begin{bmatrix} \frac{1000 \times U_{enrolamnto} \times (2 \times Z_{enrolamnto} + 3 \times Z_{enrolamento}^{neutro})}{\sqrt{3} \times (Z_{enrolamento} \times (Z_{enrolamento} + 2 \times Z_{enrolamento}^{hom\ opolar} + 6 \times Z_{enrolamento}))} \times \frac{1}{I_{enrolamento}^{base}} \\ - \frac{1000 \times U_{enrolamnto} \times (2 \times Z_{enrolamento}^{hom\ opolar} + 3 \times Z_{enrolamento}^{neutro})}{\sqrt{3} \times (Z_{enrolamento} \times (Z_{enrolamento} + 2 \times Z_{enrolamento}^{hom\ opolar} + 6 \times Z_{enrolamento}))} \times \frac{1}{I_{enrolamento}^{base}} \\ - \frac{1000 \times U_{enrolamnto} \times 2 \times Z_{enrolamnto}}{\sqrt{3} \times (Z_{enrolamento} \times (Z_{enrolamento} + 2 \times Z_{enrolamento}^{hom\ opolar} + 6 \times Z_{enrolamento}))} \times \frac{1}{I_{enrolamento}^{base}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.59})$$

5. Cálculo das correntes de pico

Já tínhamos as reactâncias do transformador e da rede, juntamos os dados das resistências do transformador e da rede e conseguimos calcular assim o valor exacto do factor k :

$$k = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3R/X} \quad (\text{A.60})$$

Após obter o factor k , podemos facilmente calcular o valor da corrente de pico dos vários curto-circuitos utilizando as equações já dadas no capítulo 3.8.

6. Relação entre ligações em triângulo e em estrela

Nos transformadores trifásicos podemos ter as ligações em estrela e em triângulo, por isso, importa ver a relação que existe entre as componentes simétricas das correntes e das tensões nestas ligações.

Representam-se as ligações em triângulo e em estrela, sendo as impedâncias em cada sistema iguais respectivamente a Z_{Δ} e Z_Y .

Se aplicarmos a tensão directa, podemos escrever:

$$V_{RS}^d = V_{Rn}^d - V_{Sn}^d = V_{Rn}^d - \alpha^2 V_{Rn}^d = (1 - \alpha^2) \times V_{Rn}^d = (\sqrt{3} \times e^{j\frac{\pi}{6}}) \times V_{Rn}^d \quad (\text{A.61})$$

E se aplicarmos as tensões em sequência inversa temos:

$$V_{RS}^i = V_{Rn}^i - V_{Sn}^i = V_{Rn}^i - \alpha V_{Rn}^i = (1 - \alpha) \times V_{Rn}^i = (\sqrt{3} \times e^{-j\frac{\pi}{6}}) \times V_{Rn}^i \quad (\text{A.62})$$

Portanto, as tensões (e as correntes) da linha apresentam um avanço de 30° relativamente às tensões fase neutro, no sistema directo, e um atraso de 30° no sistema inverso.

Este valor foi obtido com os pressupostos que o transformador se encontra no grupo horário 11. Noutro grupo de ligação, existirá uma rotação diferente mas os desvios relativos serão sempre simétricos.

ANEXO B

1. Tratamento de dados

Deve-se começar por colocar as tensões de curto-circuito na base correcta:

$$U_{A/M}^{cc}(\text{nov}) = U_{A/M}^{cc} \times \frac{P_b}{P_{\text{Base_enrolamento}}} = \text{_____} \% \quad (\text{B.1})$$

$$U_{A/B}^{cc}(\text{nov}) = U_{A/B}^{cc} \times \frac{P_b}{P_{\text{Base_enrolamento}}} = \text{_____} \% \quad (\text{B.2})$$

$$U_{M/B}^{cc}(\text{nov}) = U_{M/B}^{cc} \times \frac{P_b}{P_{\text{Base_enrolamento}}} = \text{_____} \% \quad (\text{B.3})$$

Calcular a impedância através do teorema de Boyajian:

$$U_A^{cc} = \frac{U_{A/M}^{cc} + U_{A/B}^{cc} - U_{M/B}^{cc}}{2} = \text{_____} \% \quad (\text{B.4})$$

$$U_M^{cc} = \frac{U_{A/M}^{cc} + U_{M/B}^{cc} - U_{A/B}^{cc}}{2} = \text{_____} \% \quad (\text{B.5})$$

$$U_B^{cc} = \frac{U_{A/B}^{cc} + U_{M/B}^{cc} - U_{A/M}^{cc}}{2} = \text{_____} \% \quad (\text{B.6})$$

2. Curto-circuito Trifásico

Baixa:

Cálculo das impedâncias da rede e do transformador:

$$Z_{A \rightarrow B}^{cc} = Z_{\text{rede}} + Z_{\text{Transf.}} \quad (\text{B.7})$$

$$Z_{A \rightarrow B}^{cc} = \frac{U_B^2}{S_A^{cc}} + \frac{U_A^{cc} \cdot U_B^2}{100 \cdot P_b} = \text{_____} \Omega \quad (\text{B.8})$$

$$Z_{M \rightarrow B}^{cc} = Z_{\text{rede}} + Z_{\text{Transf.}} \quad (\text{B.9})$$

$$Z_{M \rightarrow B}^{cc} = \frac{U_B^2}{S_M^{cc}} + \frac{U_M^{cc} \cdot U_B^2}{100 \cdot P_b} = \text{_____} \Omega \quad (\text{B.10})$$

$$Z_B^{cc} = Z_{A \rightarrow B}^{cc} // Z_{M \rightarrow B}^{cc} + \frac{U_B^{cc} \cdot U_B^2}{100 \cdot P_b} \quad (\text{B.11})$$

$$Z_B^{cc} = \frac{Z_{A \rightarrow B}^{cc} \times Z_{M \rightarrow B}^{cc}}{Z_{A \rightarrow B}^{cc} + Z_{M \rightarrow B}^{cc}} + \frac{U_B^{cc} \cdot U_B^2}{100 \cdot P_b} \quad (\text{B.12})$$

Cálculo da corrente de curto-circuito na linha:

$$I_B^{cc-L} = I_B^{cc-Y} = \frac{1000 \cdot U_B}{\sqrt{3} \cdot Z_B^{cc}} \quad (\text{B.13})$$

$$I_M^{cc-L} = I_M^{cc-Y} = \frac{I_B^{cc-L} \cdot Z_{A \rightarrow B}^{cc}}{Z_{A \rightarrow B}^{cc} + Z_{M \rightarrow B}^{cc}} \cdot \frac{U_B}{U_M} \quad (\text{B.14})$$

$$I_A^{cc-L} = I_A^{cc-Y} = \frac{I_B^{cc-L} \cdot Z_{M \rightarrow B}^{cc}}{Z_{A \rightarrow B}^{cc} + Z_{M \rightarrow B}^{cc}} \cdot \frac{U_B}{U_A} \quad (\text{B.15})$$

Se o enrolamento for em estrela, o valor da corrente de curto-circuito será o mesmo da linha calculado em cima, se for em triângulo teremos:

$$I_B^{cc-D} = \frac{1000 \cdot U_B}{3 \cdot Z_B^{cc}} \quad (\text{B.16})$$

$$I_M^{cc-D} = \left(\frac{I_B^{cc-L} \cdot Z_{A \rightarrow B}^{cc}}{Z_{A \rightarrow B}^{cc} + Z_{M \rightarrow B}^{cc}} \cdot \frac{U_B}{U_M} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (\text{B.17})$$

$$I_A^{cc-D} = \left(\frac{I_B^{cc-L} \cdot Z_{M \rightarrow B}^{cc}}{Z_{A \rightarrow B}^{cc} + Z_{M \rightarrow B}^{cc}} \cdot \frac{U_B}{U_A} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (\text{B.18})$$

Média:

Calcular a impedância:

$$Z_{A \rightarrow M}^{cc} = Z_{rede} + Z_{Transf.} \quad (\text{B.19})$$

$$Z_{A \rightarrow M}^{cc} = \frac{U_M^2}{S_A^{cc}} + \frac{U_A^{cc} \cdot U_M^2}{100 \cdot P_b} = \text{---} \Omega \quad (\text{B.20})$$

$$Z_{B \rightarrow M}^{cc} = Z_{rede} + Z_{Transf.} \quad (\text{B.21})$$

$$Z_{B \rightarrow M}^{cc} = \frac{U_M^2}{S_B^{cc}} + \frac{U_B^{cc} \cdot U_M^2}{100 \cdot P_b} = \text{---} \Omega \quad (\text{B.22})$$

$$Z_M^{cc} = Z_{A \rightarrow M}^{cc} // Z_{B \rightarrow M}^{cc} + \frac{U_M^{cc} \cdot U_M^2}{100 \cdot P_b} \quad (\text{B.23})$$

$$Z_M^{cc} = \frac{Z_{A \rightarrow M}^{cc} \times Z_{B \rightarrow M}^{cc}}{Z_{A \rightarrow M}^{cc} + Z_{B \rightarrow M}^{cc}} + \frac{U_M^{cc} \cdot U_M^2}{100 \cdot P_b} \quad (\text{B.24})$$

Cálculo da corrente de curto-circuito na linha:

$$I_M^{cc-L} = I_M^{cc-Y} = \frac{1000 \cdot U_M}{\sqrt{3} \cdot Z_M^{cc}} \quad (\text{B.25})$$

$$I_A^{cc-L} = I_A^{cc-Y} = \frac{I_M^{cc-L} \cdot Z_{B \rightarrow M}^{cc}}{Z_{A \rightarrow M}^{cc} + Z_{B \rightarrow M}^{cc}} \cdot \frac{U_M}{U_A} \quad (\text{B.26})$$

$$I_B^{cc-L} = I_B^{cc-Y} = \frac{I_M^{cc-L} \cdot Z_{A \rightarrow M}^{cc}}{Z_{A \rightarrow M}^{cc} + Z_{B \rightarrow M}^{cc}} \cdot \frac{U_M}{U_B} \quad (\text{B.27})$$

Se o enrolamento for em estrela, o valor da corrente de curto-circuito será o mesmo do da linha calculado em cima, se for em triângulo teremos:

$$I_M^{cc-D} = \frac{1000 \cdot U_B}{3 \cdot Z_M^{cc}} \quad (\text{B.28})$$

$$I_A^{cc-D} = \left(\frac{I_M^{cc-L} \cdot Z_{B \rightarrow M}^{cc}}{Z_{A \rightarrow M}^{cc} + Z_{B \rightarrow M}^{cc}} \cdot \frac{U_M}{U_A} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (\text{B.29})$$

$$I_B^{cc-D} = \left(\frac{I_M^{cc-L} \cdot Z_{A \rightarrow M}^{cc}}{Z_{A \rightarrow M}^{cc} + Z_{B \rightarrow M}^{cc}} \cdot \frac{U_M}{U_B} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (\text{B.30})$$

Alta:

Calcular a impedância:

$$Z_{M \rightarrow A}^{cc} = Z_{rede} + Z_{Transf.} \quad (\text{B.31})$$

$$Z_{M \rightarrow A}^{cc} = \frac{U_A^2}{S_M^{cc}} + \frac{U_M^{cc} \cdot U_A^2}{100 \cdot P_b} = \text{---} \Omega \quad (\text{B.32})$$

$$Z_{B \rightarrow A}^{cc} = Z_{rede} + Z_{Transf} \quad (B.33)$$

$$Z_A^{cc} = Z_{B \rightarrow A}^{cc} // Z_{B \rightarrow A}^{cc} + \frac{U_A^{cc} \cdot U_A^2}{100 \cdot P_b} \quad (B.34)$$

$$Z_{B \rightarrow A}^{cc} = \frac{U_A^2}{S_B^{cc}} + \frac{U_B^{cc} \cdot U_A^2}{100 \cdot P_b} = \text{---} \Omega \quad (B.35)$$

$$Z_A^{cc} = \frac{Z_{M \rightarrow A}^{cc} \times Z_{B \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} + \frac{U_A^{cc} \cdot U_A^2}{100 \cdot P_b} \quad (B.36)$$

Cálculo da corrente de curto-circuito na linha:

$$I_A^{cc-L} = I_A^{cc-Y} = \frac{1000 \cdot U_A}{\sqrt{3} \cdot Z_A^{cc}} \quad (B.37)$$

$$I_M^{cc-L} = I_M^{cc-Y} = \frac{I_A^{cc-L} \cdot Z_{B \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} \cdot \frac{U_A}{U_M} \quad (B.38)$$

$$I_B^{cc-L} = I_B^{cc-Y} = \frac{I_A^{cc-L} \cdot Z_{M \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} \cdot \frac{U_A}{U_B} \quad (B.39)$$

Se o enrolamento for em estrela, o valor da corrente de curto-circuito será o mesmo do da linha calculado em cima, se for em triângulo teremos:

$$I_A^{cc-D} = \frac{1000 \cdot U_A}{3 \cdot Z_A^{cc}} \quad (B.40)$$

$$I_M^{cc-D} = \left(\frac{I_A^{cc-L} \cdot Z_{B \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} \cdot \frac{U_A}{U_M} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (B.41)$$

$$I_B^{cc-D} = \left(\frac{I_A^{cc-L} \cdot Z_{M \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} \cdot \frac{U_A}{U_B} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (B.42)$$

3. Curto-circuito Monofásico

Baixa:

Calcular a impedância:

$Z_{A \rightarrow B}^{cc-h}$	=	Z_{rede}^h	+	$Z_{transf.}^h$
		$\frac{U_B^2}{S_A^{cc-h}}$ ou		$\frac{U_A^{cc} \cdot U_B^2}{100 \cdot P_b} \cdot \frac{U_h^{cc}}{U_{cc}}$
		$x \cdot Z_{rede}$ (estrela ⁵) 0 (triângulo ⁵)		

$Z_{M \rightarrow B}^{cc-h}$	=	Z_{rede}^h	+	$Z_{transf.}^h$
		$\frac{U_B^2}{S_M^{cc-h}}$ ou		$\frac{U_M^{cc} \cdot U_B^2}{100 \cdot P_b} \cdot \frac{U_h^{cc}}{U_{cc}}$
		$x \cdot Z_{rede}$ (estrela ⁶) 0 (triângulo ⁶)		

$$Z_B^{cc-h} = Z_{A \rightarrow B}^{cc-h} // Z_{M \rightarrow B}^{cc-h} + \frac{U_B^{cc} \cdot U_B^2}{100 \cdot P_b} \times \frac{U_h^{cc}}{U_{cc}} \quad (B.43)$$

$$Z_B^{cc-h} = \frac{Z_{A \rightarrow B}^{cc-h} \times Z_{M \rightarrow B}^{cc-h}}{Z_{A \rightarrow B}^{cc-h} + Z_{M \rightarrow B}^{cc-h}} + \frac{U_B^{cc} \cdot U_B^2}{100 \cdot P_b} \times \frac{U_h^{cc}}{U_{cc}} \quad (B.44)$$

Cálculo da corrente de curto-circuito na linha:

$$I_B^{cc-L} = I_B^{cc-Y} = \frac{3 \times 1000 \cdot U_B}{\sqrt{3} \cdot (Z_B^{cc-h} + 2 \cdot Z_B^{cc})} \quad (B.45)$$

⁵ Enrolamento da alta

⁶ Enrolamento da baixa

$$I_A^{cc-L} = I_A^{cc-Y} = \left[\frac{2}{3} \times \frac{I_B^{cc-L} \cdot Z_{M \rightarrow B}^{cc}}{Z_{A \rightarrow B}^{cc} + Z_{M \rightarrow B}^{cc}} + \frac{1}{3} \times \frac{I_B^{cc-L} \cdot Z_{M \rightarrow B}^{cc-h}}{Z_{A \rightarrow B}^{cc-h} + Z_{M \rightarrow B}^{cc-h}} \right] \cdot \frac{U_B}{U_A} \quad (\text{B.46})$$

$$I_M^{cc-L} = I_M^{cc-Y} = \left[\frac{2}{3} \times \frac{I_B^{cc-L} \cdot Z_{A \rightarrow B}^{cc}}{Z_{A \rightarrow B}^{cc} + Z_{M \rightarrow B}^{cc}} + \frac{1}{3} \times \frac{I_B^{cc-L} \cdot Z_{A \rightarrow B}^{cc-h}}{Z_{A \rightarrow B}^{cc-h} + Z_{M \rightarrow B}^{cc-h}} \right] \cdot \frac{U_B}{U_M} \quad (\text{B.47})$$

Se o enrolamento for em estrela, o valor da corrente de curto-circuito será o mesmo da linha calculado em cima, se for em triângulo teremos:

$$I_B^{cc-D} = 0A \quad (\text{B.48})$$

$$I_M^{cc-D} = 0A \quad (\text{B.49})$$

$$I_A^{cc-D} = 0A \quad (\text{B.50})$$

Média:

Calcular a impedância:

$Z_{A \rightarrow M}^{cc-h}$	=	Z_{rede}^h	+	$Z_{transf.}^h$
		$\frac{U_M^2}{S_A^{cc-h}}$ ou		$\frac{U_A^{cc} \cdot U_M^2}{100 \cdot P_b} \cdot \frac{U_h^{cc}}{U_{cc}}$
		$x \cdot Z_{rede}$ (estrela ⁷)		
		0 (triângulo ⁷)		

$Z_{B \rightarrow M}^{cc-h}$	=	Z_{rede}^h	+	$Z_{transf.}^h$
		$\frac{U_M^2}{S_B^{cc-h}}$ ou		$\frac{U_B^{cc} \cdot U_M^2}{100 \cdot P_b} \cdot \frac{U_h^{cc}}{U_{cc}}$
		$x \cdot Z_{rede}$ (estrela ⁸)		
		0 (triângulo ⁸)		

⁷ Enrolamento da alta

⁸ Enrolamento do terciário

$$Z_M^{cc-h} = Z_{A \rightarrow M}^{cc-h} // Z_{B \rightarrow M}^{cc-h} + \frac{U_M^{cc} \cdot U_M^2}{100 \cdot P_b} \times \frac{U_h^{cc}}{U_{cc}^{cc}} \quad (\text{B.51})$$

$$Z_B^{cc-h} = \frac{Z_{A \rightarrow M}^{cc-h} \times Z_{B \rightarrow M}^{cc-h}}{Z_{A \rightarrow M}^{cc-h} + Z_{B \rightarrow M}^{cc-h}} + \frac{U_M^{cc} \cdot U_M^2}{100 \cdot P_b} \times \frac{U_h^{cc}}{U_{cc}^{cc}} \quad (\text{B.52})$$

Cálculo da corrente de curto-circuito na linha:

$$I_M^{cc-L} = I_M^{cc-Y} = \frac{3 \times 1000 \cdot U_M}{\sqrt{3} \cdot (Z_M^{cc-h} + 2 \cdot Z_M^{cc})} \quad (\text{B.53})$$

$$I_A^{cc-L} = I_A^{cc-Y} = \left[\frac{2}{3} \times \frac{I_M^{cc-L} \cdot Z_{B \rightarrow M}^{cc}}{Z_{A \rightarrow M}^{cc} + Z_{B \rightarrow M}^{cc}} + \frac{1}{3} \times \frac{I_M^{cc-L} \cdot Z_{B \rightarrow M}^{cc-h}}{Z_{A \rightarrow M}^{cc-h} + Z_{B \rightarrow M}^{cc-h}} \right] \cdot \frac{U_M}{U_A} \quad (\text{B.54})$$

$$I_B^{cc-L} = I_B^{cc-Y} = \left[\frac{2}{3} \times \frac{I_M^{cc-L} \cdot Z_{A \rightarrow M}^{cc}}{Z_{A \rightarrow M}^{cc} + Z_{B \rightarrow M}^{cc}} + \frac{1}{3} \times \frac{I_M^{cc-L} \cdot Z_{A \rightarrow M}^{cc-h}}{Z_{A \rightarrow M}^{cc-h} + Z_{B \rightarrow M}^{cc-h}} \right] \cdot \frac{U_M}{U_B} \quad (\text{B.55})$$

Se o enrolamento for em estrela, o valor da corrente de curto-circuito será o mesmo do da linha calculado em cima, se for em triângulo teremos:

$$I_B^{cc-D} = 0A \quad (\text{B.56})$$

$$I_M^{cc-D} = 0A \quad (\text{B.57})$$

$$I_A^{cc-D} = 0A \quad (\text{B.58})$$

Alta:

Calcular a impedância:

$Z_{M \rightarrow A}^{cc_h}$	=	Z_{rede}^h	+	$Z_{transf.}^h$
		$\frac{U_A^2}{S_M^{cc_h}}$ ou		$\frac{U_M^{cc} \cdot U_A^2}{100 \cdot P_b} \cdot \frac{U_h^{cc}}{U_{cc}}$
		$x \cdot Z_{rede}$ (estrela ⁹)		
		0 (triângulo ⁹)		

$Z_{B \rightarrow A}^{cc_h}$	=	Z_{rede}^h	+	$Z_{transf.}^h$
		$\frac{U_A^2}{S_B^{cc_h}}$ ou		$\frac{U_B^{cc} \cdot U_A^2}{100 \cdot P_b} \cdot \frac{U_h^{cc}}{U_{cc}}$
		$x \cdot Z_{rede}$ (estrela ¹⁰)		
		0 (triângulo)		

$$Z_A^{cc_h} = Z_{M \rightarrow A}^{cc_h} // Z_{B \rightarrow A}^{cc_h} + \frac{U_A^{cc} \cdot U_A^2}{100 \cdot P_b} \times \frac{U_h^{cc}}{U_{cc}} \quad (\text{B.59})$$

$$Z_A^{cc_h} = \frac{Z_{M \rightarrow A}^{cc_h} \times Z_{B \rightarrow A}^{cc_h}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc_h} + Z_{B \rightarrow A}^{cc_h}} + \frac{U_A^{cc} \cdot U_A^2}{100 \cdot P_b} \times \frac{U_h^{cc}}{U_{cc}} \quad (\text{B.60})$$

Cálculo da corrente de curto-circuito na linha:

$$I_A^{cc_L} = I_A^{cc_Y} = \frac{3 \times 1000 \cdot U_A}{\sqrt{3} \cdot (Z_A^{cc_h} + 2 \cdot Z_A^{cc})} \quad (\text{B.61})$$

$$I_M^{cc_L} = I_M^{cc_Y} = \left[\frac{2}{3} \times \frac{I_A^{cc_L} \cdot Z_{B \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} + \frac{1}{3} \times \frac{I_A^{cc_L} \cdot Z_{B \rightarrow A}^{cc_h}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc_h} + Z_{B \rightarrow A}^{cc_h}} \right] \cdot \frac{U_A}{U_M} \quad (\text{B.62})$$

⁹ Enrolamento da baixa¹⁰ Enrolamento do terciário

$$I_B^{cc-L} = I_B^{cc-Y} = \left[\frac{2}{3} \times \frac{I_A^{cc-L} \cdot Z_{M \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} + \frac{1}{3} \times \frac{I_A^{cc-L} \cdot Z_{M \rightarrow A}^{cc-h}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc-h} + Z_{B \rightarrow A}^{cc-h}} \right] \cdot \frac{U_A}{U_B} \quad (\text{B.63})$$

Se o enrolamento for em estrela, o valor da corrente de curto-circuito será o mesmo do da linha calculado em cima, se for em triângulo teremos:

$$I_B^{cc-D} = 0A \quad (\text{B.64})$$

$$I_M^{cc-D} = 0A \quad (\text{B.65})$$

$$I_A^{cc-D} = 0A \quad (\text{B.66})$$

Após calcular as correntes de curto-circuito do defeito nos vários enrolamentos, podemos calcular as correntes das componentes simétricas que corresponde a um terço da corrente de curto-circuito e, de seguida dividir pela sua corrente de base para passar tudo para p.u.:

$$I_{[dih]} = j \times \frac{I_{\text{enrolamento}}^{cc}}{3} \times \frac{1}{I_{\text{base}}} \quad (\text{B.67})$$

A partir daqui, podemos obter a matriz que representa as correntes nas 3 fases, multiplicando a matriz de Fortescue pela matriz das correntes das componentes simétricas:

$$I_{RST} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \times I_{[dih]} \quad (\text{B.68})$$

E a partir daqui, facilmente se consegue retirar o módulo e ângulo da corrente, após multiplicar pela sua corrente de base, para obter os resultados em Ampère.

Para o caso da tensão de defeito, temos de calcular a matriz das impedâncias também em p.u. para cada enrolamento, como já tínhamos o cálculo das impedâncias feitas em ohm, apenas temos de dividir pela sua impedância de base e obtemos:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_d & 0 & 0 \\ 0 & Z_i & 0 \\ 0 & 0 & Z_h \end{bmatrix} \times \frac{1}{Z_{\text{base}}} \text{ (p.u.)} \quad (\text{B.69})$$

Multiplicando esta matriz das impedâncias pela matriz das correntes das componentes simétricas, obtemos a matriz das tensões em componentes simétricas:

$$V_{[dih]} = \begin{bmatrix} Z_d & 0 & 0 \\ 0 & Z_i & 0 \\ 0 & 0 & Z_h \end{bmatrix} \times I_{[dih]} \quad (\text{B.70})$$

E pela mesma lógica da corrente, a tensão nas fases é:

$$V_{RST} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \times V_{[dih]} \quad (\text{B.71})$$

4. Curto-circuito Bifásico

Baixa:

Cálculo da corrente de curto-circuito na linha:

$$I_B^{cc-L} = I_B^{cc-Y} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{1000.U_B}{\sqrt{3}.Z_B^{cc}} \quad (\text{B.72})$$

$$I_M^{cc-L} = I_M^{cc-Y} = \frac{I_B^{cc-L}.Z_{A \rightarrow B}^{cc}}{Z_{A \rightarrow B}^{cc} + Z_{M \rightarrow B}^{cc}} \cdot \frac{U_B}{U_M} \quad (\text{B.73})$$

$$I_A^{cc-L} = I_A^{cc-Y} = \frac{I_B^{cc-L}.Z_{M \rightarrow B}^{cc}}{Z_{A \rightarrow B}^{cc} + Z_{M \rightarrow B}^{cc}} \cdot \frac{U_B}{U_A} \quad (\text{B.74})$$

Se o enrolamento for em estrela, o valor da corrente de curto-circuito será o mesmo do da linha calculado em cima, se for em triângulo teremos:

$$I_B^{cc-D} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{1000.U_B}{3.Z_B^{cc}} \quad (\text{B.75})$$

$$I_M^{cc-D} = \left(\frac{I_B^{cc-L}.Z_{A \rightarrow B}^{cc}}{Z_{A \rightarrow B}^{cc} + Z_{M \rightarrow B}^{cc}} \cdot \frac{U_B}{U_M} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (\text{B.76})$$

$$I_A^{cc-D} = \left(\frac{I_B^{cc-L} \cdot Z_{M \rightarrow B}^{cc}}{Z_{A \rightarrow B}^{cc} + Z_{M \rightarrow B}^{cc}} \cdot \frac{U_B}{U_A} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (\text{B.77})$$

Média:

Cálculo da corrente de curto-circuito na linha:

$$I_M^{cc-L} = I_M^{cc-Y} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{1000 \cdot U_M}{\sqrt{3} \cdot Z_M^{cc}} \quad (\text{B.78})$$

$$I_A^{cc-L} = I_A^{cc-Y} = \frac{I_M^{cc-L} \cdot Z_{B \rightarrow M}^{cc}}{Z_{A \rightarrow M}^{cc} + Z_{B \rightarrow M}^{cc}} \cdot \frac{U_M}{U_A} \quad (\text{B.79})$$

$$I_B^{cc-L} = I_B^{cc-Y} = \frac{I_M^{cc-L} \cdot Z_{A \rightarrow M}^{cc}}{Z_{A \rightarrow M}^{cc} + Z_{B \rightarrow M}^{cc}} \cdot \frac{U_M}{U_B} \quad (\text{B.80})$$

Se o enrolamento for em estrela, o valor da corrente de curto-circuito será o mesmo do da linha calculado em cima, se for em triângulo teremos:

$$I_M^{cc-D} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{1000 \cdot U_B}{3 \cdot Z_M^{cc}} \quad (\text{B.81})$$

$$I_A^{cc-D} = \left(\frac{I_M^{cc-L} \cdot Z_{B \rightarrow M}^{cc}}{Z_{A \rightarrow M}^{cc} + Z_{B \rightarrow M}^{cc}} \cdot \frac{U_M}{U_A} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (\text{B.83})$$

$$I_B^{cc-D} = \left(\frac{I_M^{cc-L} \cdot Z_{A \rightarrow M}^{cc}}{Z_{A \rightarrow M}^{cc} + Z_{B \rightarrow M}^{cc}} \cdot \frac{U_M}{U_B} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (\text{B.84})$$

Alta:

Cálculo da corrente de curto-circuito na linha:

$$I_A^{cc-L} = I_A^{cc-Y} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{1000 \cdot U_A}{\sqrt{3} \cdot Z_A^{cc}} \quad (\text{B.85})$$

$$I_M^{cc-L} = I_M^{cc-Y} = \frac{I_A^{cc-L} \cdot Z_{B \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} \cdot \frac{U_A}{U_M} \quad (\text{B.86})$$

$$I_B^{cc-L} = I_B^{cc-Y} = \frac{I_A^{cc-L} \cdot Z_{M \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} \cdot \frac{U_A}{U_B} \quad (\text{B.87})$$

Se o enrolamento for em estrela, o valor da corrente de curto-circuito será o mesmo da linha calculado em cima, se for em triângulo teremos:

$$I_A^{cc-D} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{1000 \cdot U_A}{3 \cdot Z_A^{cc}} \quad (\text{B.88})$$

$$I_M^{cc-D} = \left(\frac{I_A^{cc-L} \cdot Z_{B \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} \cdot \frac{U_A}{U_M} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (\text{B.89})$$

$$I_B^{cc-D} = \left(\frac{I_A^{cc-L} \cdot Z_{M \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} \cdot \frac{U_A}{U_B} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (\text{B.90})$$

Em relação ao cálculo das correntes e tensões por fase, de um curto-circuito bifásico para um monofásico, muda apenas a equação das correntes simétricas, sendo elas:

$$I_{[dih]} = j \times \begin{bmatrix} \frac{I_{\text{enrolamento}}^{cc}}{\sqrt{3}} \\ -\frac{I_{\text{enrolamento}}^{cc}}{\sqrt{3}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B.91})$$

5. Curto-circuito Bifásico Terra

Baixa:

Cálculo da corrente de curto-circuito na linha:

$$I_{B_k2ELS}^{cc_L} = I_{B_k2ELS}^{cc_Y} = 1000.U_B \times \frac{\left| \frac{Z_B^{cc_h}}{Z_B^{cc}} - \alpha \right|}{\left| Z_B^{cc} + 2.Z_B^{cc_h} \right|} \quad (\text{fase S}) \quad (\text{B.92})$$

$$I_{B_k2ELT}^{cc_L} = I_{B_k2ELT}^{cc_Y} = 1000.U_B \times \frac{\left| \frac{Z_B^{cc_h}}{Z_B^{cc}} - \alpha^2 \right|}{\left| Z_B^{cc} + 2.Z_B^{cc_h} \right|} \quad (\text{fase T}) \quad (\text{B.93})$$

$$I_{B_kE2E}^{cc_L} = I_{B_kE2E}^{cc_Y} = \frac{3 \times 1000.U_B}{\left| Z_B^{cc} + 2.Z_B^{cc_h} \right|} \quad (\text{terra}) \quad (\text{B.94})$$

$$I_{A_k2ELS}^{cc_L} = I_{A_k2ELS}^{cc_Y} = \frac{I_{B_k2EL2}^{cc_L} \cdot Z_{M \rightarrow B}^{cc}}{Z_{M \rightarrow B}^{cc} + Z_{A \rightarrow B}^{cc}} \cdot \frac{U_B}{U_A} \quad (\text{B.95})$$

$$I_{A_k2ELT}^{cc_L} = I_{A_k2ELT}^{cc_Y} = \frac{I_{B_k2EL3}^{cc_L} \cdot Z_{M \rightarrow B}^{cc}}{Z_{M \rightarrow B}^{cc} + Z_{A \rightarrow B}^{cc}} \cdot \frac{U_B}{U_A} \quad (\text{B.96})$$

$$I_{A_kE2E}^{cc_L} = I_{A_kE2E}^{cc_Y} = \frac{I_{B_kE2E}^{cc_L} \cdot Z_{M \rightarrow B}^{cc}}{Z_{M \rightarrow T}^{cc} + Z_{A \rightarrow B}^{cc}} \cdot \frac{U_B}{U_A} \quad (\text{B.97})$$

$$I_{M_k2ELS}^{cc_L} = I_{M_k2ELS}^{cc_Y} = \frac{I_{B_k2EL2}^{cc_L} \cdot Z_{A \rightarrow B}^{cc}}{Z_{M \rightarrow B}^{cc} + Z_{A \rightarrow B}^{cc}} \cdot \frac{U_B}{U_M} \quad (\text{B.98})$$

$$I_{M_k2ELT}^{cc_L} = I_{M_k2ELT}^{cc_Y} = \frac{I_{B_k2EL3}^{cc_L} \cdot Z_{A \rightarrow B}^{cc}}{Z_{M \rightarrow B}^{cc} + Z_{A \rightarrow B}^{cc}} \cdot \frac{U_B}{U_M} \quad (\text{B.99})$$

$$I_{M_kE2E}^{cc_L} = I_{M_kE2E}^{cc_Y} = \frac{I_{B_kE2E}^{cc_L} \cdot Z_{A \rightarrow B}^{cc}}{Z_{M \rightarrow B}^{cc} + Z_{A \rightarrow B}^{cc}} \cdot \frac{U_B}{U_M} \quad (\text{B.100})$$

Se o enrolamento for em estrela, o valor da corrente de curto-circuito será o mesmo do da linha calculado em cima, se for em triângulo teremos:

$$I_{M_k2ELS}^{cc_D} = 0A \quad (\text{B.101})$$

$$I_{M_k2ELT}^{cc_D} = 0A \quad (\text{B.102})$$

$$I_{M_kE2E}^{cc_D} = 0A \quad (\text{B.103})$$

$$I_{A_k2ELS}^{cc_D} = \frac{I_{B_k2EL2}^{cc_L} \cdot Z_{M \rightarrow B}^{cc}}{Z_{M \rightarrow B}^{cc} + Z_{A \rightarrow B}^{cc}} \cdot \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot U_A} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (\text{B.104})$$

$$I_{A_k2ELT}^{cc_D} = \frac{I_{B_k2EL3}^{cc_L} \cdot Z_{M \rightarrow B}^{cc}}{Z_{M \rightarrow B}^{cc} + Z_{A \rightarrow B}^{cc}} \cdot \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot U_A} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (\text{B.105})$$

$$I_{A_kE2E}^{cc_D} = \frac{I_{B_kE2E}^{cc_L} \cdot Z_{M \rightarrow B}^{cc}}{Z_{M \rightarrow B}^{cc} + Z_{A \rightarrow B}^{cc}} \cdot \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot U_A} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (\text{B.106})$$

$$I_{M_k2ELS}^{cc_D} = \frac{I_{B_k2EL2}^{cc_L} \cdot Z_{A \rightarrow B}^{cc}}{Z_{M \rightarrow B}^{cc} + Z_{A \rightarrow B}^{cc}} \cdot \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot U_M} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (\text{B.107})$$

$$I_{M_k2ELT}^{cc_D} = \frac{I_{B_k2EL3}^{cc_L} \cdot Z_{A \rightarrow B}^{cc}}{Z_{M \rightarrow B}^{cc} + Z_{A \rightarrow B}^{cc}} \cdot \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot U_M} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (\text{B.108})$$

$$I_{M_kE2E}^{cc_D} = \frac{I_{B_kE2E}^{cc_L} \cdot Z_{A \rightarrow B}^{cc}}{Z_{M \rightarrow B}^{cc} + Z_{A \rightarrow B}^{cc}} \cdot \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot U_M} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (\text{B.109})$$

Média:

Cálculo da corrente de curto-circuito na linha:

$$I_{M_k2ELS}^{cc_L} = I_{M_k2ELS}^{cc_Y} = 1000 \cdot U_M \times \frac{\left| \frac{Z_M^{cc-h}}{Z_M^{cc}} - \alpha \right|}{\left| Z_M^{cc} + 2 \cdot Z_M^{cc-h} \right|} \text{ (fase S)} \quad (\text{B.110})$$

$$I_{M_k2ELT}^{cc_L} = I_{M_k2ELT}^{cc_Y} = 1000 \cdot U_M \times \frac{\left| \frac{Z_M^{cc-h}}{Z_M^{cc}} - \alpha^2 \right|}{\left| Z_M^{cc} + 2 \cdot Z_M^{cc-h} \right|} \text{ (fase T)} \quad (\text{B.111})$$

$$I_{M_kE2E}^{cc_L} = I_{M_kE2E}^{cc_Y} = \frac{3 \times 1000 \cdot U_M}{\left| Z_M^{cc} + 2 \cdot Z_M^{cc-h} \right|} \text{ (terra)} \quad (\text{B.112})$$

$$I_{A_k2ELS}^{cc_L} = I_{A_k2ELS}^{cc_Y} = \frac{I_{M_k2EL2}^{cc_L} \cdot Z_{B \rightarrow M}^{cc}}{Z_{B \rightarrow M}^{cc} + Z_{A \rightarrow M}^{cc}} \cdot \frac{U_M}{U_A} \quad (\text{B.113})$$

$$I_{A_k2ELT}^{cc_L} = I_{A_k2ELT}^{cc_Y} = \frac{I_{M_k2EL3}^{cc_L} \cdot Z_{B \rightarrow M}^{cc}}{Z_{B \rightarrow M}^{cc} + Z_{A \rightarrow M}^{cc}} \cdot \frac{U_M}{U_A} \quad (\text{B.114})$$

$$I_{A_kE2E}^{cc_L} = I_{A_kE2E}^{cc_Y} = \frac{I_{M_kE2E}^{cc_L} \cdot Z_{B \rightarrow M}^{cc}}{Z_{B \rightarrow M}^{cc} + Z_{A \rightarrow M}^{cc}} \cdot \frac{U_M}{U_A} \quad (\text{B.115})$$

$$I_{B_k2ELS}^{cc_L} = I_{B_k2ELS}^{cc_Y} = \frac{I_{M_k2EL2}^{cc_L} \cdot Z_{A \rightarrow B}^{cc}}{Z_{B \rightarrow M}^{cc} + Z_{A \rightarrow M}^{cc}} \cdot \frac{U_M}{U_B} \quad (B.116)$$

$$I_{B_k2ELT}^{cc_L} = I_{B_k2ELT}^{cc_Y} = \frac{I_{M_k2EL3}^{cc_L} \cdot Z_{A \rightarrow M}^{cc}}{Z_{B \rightarrow M}^{cc} + Z_{A \rightarrow M}^{cc}} \cdot \frac{U_M}{U_B} \quad (B.117)$$

$$I_{B_kE2E}^{cc_L} = I_{B_kE2E}^{cc_Y} = \frac{I_{M_kE2E}^{cc_L} \cdot Z_{A \rightarrow M}^{cc}}{Z_{B \rightarrow M}^{cc} + Z_{A \rightarrow M}^{cc}} \cdot \frac{U_M}{U_B} \quad (B.118)$$

Se o enrolamento for em estrela, o valor da corrente de curto-circuito será o mesmo do da linha calculado em cima, se for em triângulo teremos:

$$I_{M_k2ELS}^{cc_D} = 0A \quad (B.119)$$

$$I_{M_k2ELT}^{cc_D} = 0A \quad (B.120)$$

$$I_{M_kE2E}^{cc_D} = 0A \quad (B.121)$$

$$I_{A_k2ELS}^{cc_D} = \frac{I_{M_k2EL2}^{cc_L} \cdot Z_{B \rightarrow M}^{cc}}{Z_{B \rightarrow M}^{cc} + Z_{A \rightarrow M}^{cc}} \cdot \frac{U_M}{\sqrt{3} \cdot U_A} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (B.122)$$

$$I_{A_k2ELT}^{cc_D} = \frac{I_{M_k2EL3}^{cc_L} \cdot Z_{B \rightarrow M}^{cc}}{Z_{B \rightarrow M}^{cc} + Z_{A \rightarrow M}^{cc}} \cdot \frac{U_M}{\sqrt{3} \cdot U_A} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (B.123)$$

$$I_{A_kE2E}^{cc_D} = \frac{I_{M_kE2E}^{cc_L} \cdot Z_{B \rightarrow M}^{cc}}{Z_{B \rightarrow M}^{cc} + Z_{A \rightarrow M}^{cc}} \cdot \frac{U_M}{\sqrt{3} \cdot U_A} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (B.124)$$

$$I_{B_k2ELS}^{cc_D} = \frac{I_{M_k2EL2}^{cc_L} \cdot Z_{A \rightarrow M}^{cc}}{Z_{B \rightarrow M}^{cc} + Z_{A \rightarrow M}^{cc}} \cdot \frac{U_M}{\sqrt{3} \cdot U_B} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (B.125)$$

$$I_{B_k2ELT}^{cc_D} = \frac{I_{M_k2EL3}^{cc_L} \cdot Z_{A \rightarrow M}^{cc}}{Z_{B \rightarrow M}^{cc} + Z_{A \rightarrow M}^{cc}} \cdot \frac{U_M}{\sqrt{3} \cdot U_B} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto}$$

será zero) (B.126)

$$I_{B_k2EE}^{cc_D} = \frac{I_{M_k2EE}^{cc_L} \cdot Z_{A \rightarrow M}^{cc}}{Z_{B \rightarrow M}^{cc} + Z_{A \rightarrow M}^{cc}} \cdot \frac{U_M}{\sqrt{3} \cdot U_B} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto}$$

será zero) (B.127)

Alta:

Cálculo da corrente de curto-circuito na linha:

$$I_{A_k2ELS}^{cc_L} = I_{A_k2ELS}^{cc_Y} = 1000 \cdot U_A \times \frac{\left| \frac{Z_A^{cc_h}}{Z_A^{cc}} - \alpha \right|}{\left| Z_A^{cc} + 2 \cdot Z_A^{cc_h} \right|} \text{ (fase S)} \quad (B.128)$$

$$I_{A_k2ELT}^{cc_L} = I_{A_k2ELT}^{cc_Y} = 1000 \cdot U_A \times \frac{\left| \frac{Z_A^{cc_h}}{Z_A^{cc}} - \alpha^2 \right|}{\left| Z_A^{cc} + 2 \cdot Z_A^{cc_h} \right|} \text{ (fase T)} \quad (B.129)$$

$$I_{A_k2EE}^{cc_L} = I_{A_k2EE}^{cc_Y} = \frac{3 \times 1000 \cdot U_A}{\left| Z_A^{cc} + 2 \cdot Z_A^{cc_h} \right|} \text{ (terra)} \quad (B.130)$$

$$I_{M_k2ELS}^{cc_L} = I_{M_k2ELS}^{cc_Y} = \frac{I_{A_k2EL2}^{cc_L} \cdot Z_{B \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} \cdot \frac{U_A}{U_M} \quad (B.131)$$

$$I_{M_k2ELT}^{cc_L} = I_{M_k2ELT}^{cc_Y} = \frac{I_{A_k2EL3}^{cc_L} \cdot Z_{B \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} \cdot \frac{U_A}{U_M} \quad (B.132)$$

$$I_{M_k2EE}^{cc_L} = I_{M_k2EE}^{cc_Y} = \frac{I_{A_k2EE}^{cc_L} \cdot Z_{B \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} \cdot \frac{U_A}{U_M} \quad (B.133)$$

$$I_{B_k2ELS}^{cc_L} = I_{B_k2ELS}^{cc_Y} = \frac{I_{A_k2EL2}^{cc_L} \cdot Z_{M \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} \cdot \frac{U_A}{U_B} \quad (B.134)$$

$$I_{B_k2ELT}^{cc-L} = I_{B_k2ELT}^{cc-Y} = \frac{I_{A_k2EL3}^{cc-L} \cdot Z_{M \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} \cdot \frac{U_A}{U_B} \quad (B.135)$$

$$I_{B_kE2E}^{cc-L} = I_{B_kE2E}^{cc-Y} = \frac{I_{A_kE2E}^{cc-L} \cdot Z_{M \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} \cdot \frac{U_A}{U_B} \quad (B.136)$$

Se o enrolamento for em estrela, o valor da corrente de curto-circuito será o mesmo da linha calculado em cima, se for em triângulo teremos:

$$I_{M_k2ELS}^{cc-D} = 0A \quad (B.137)$$

$$I_{M_k2ELT}^{cc-D} = 0A \quad (B.138)$$

$$I_{M_kE2E}^{cc-D} = 0A \quad (B.139)$$

$$I_{M_k2ELS}^{cc-D} = \frac{I_{A_k2EL2}^{cc-L} \cdot Z_{B \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} \cdot \frac{U_A}{\sqrt{3} \cdot U_M} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (B.140)$$

$$I_{M_k2ELT}^{cc-D} = \frac{I_{A_k2EL3}^{cc-L} \cdot Z_{B \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} \cdot \frac{U_A}{\sqrt{3} \cdot U_M} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (B.141)$$

$$I_{M_kE2E}^{cc-D} = \frac{I_{A_kE2E}^{cc-L} \cdot Z_{B \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} \cdot \frac{U_A}{\sqrt{3} \cdot U_M} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (B.142)$$

$$I_{B_k2ELS}^{cc-D} = \frac{I_{A_k2EL2}^{cc-L} \cdot Z_{M \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} \cdot \frac{U_A}{\sqrt{3} \cdot U_B} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (B.143)$$

$$I_{B_k2ELT}^{cc-D} = \frac{I_{A_k2EL3}^{cc-L} \cdot Z_{M \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} \cdot \frac{U_A}{\sqrt{3} \cdot U_B} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (B.144)$$

$$I_{B_kE2E}^{cc_D} = \frac{I_{A_kE2E}^{cc_L} \cdot Z_{M \rightarrow A}^{cc}}{Z_{M \rightarrow A}^{cc} + Z_{B \rightarrow A}^{cc}} \cdot \frac{U_A}{\sqrt{3} \cdot U_B} \text{ (se o enrolamento do outro lado for em triângulo, isto será zero)} \quad (\text{B.145})$$

Em relação ao cálculo das correntes e tensões por fase, de um curto-circuito bifásico para um monofásico, muda apenas a equação das correntes simétricas sendo elas:

$$I_{[dih]} = \begin{bmatrix} \frac{1000 \times U_{\text{enrolamnto}} \times (2 \times Z_{\text{enrolamnto}} + 3 \times Z_{\text{enrolamento}}^{\text{neutro}})}{\sqrt{3} \times (Z_{\text{enrolamento}} \times (Z_{\text{enrolamento}} + 2 \times Z_{\text{enrolamento}}^{\text{hom opolar}} + 6 \times Z_{\text{enrolamento}}))} \times \frac{1}{I_{\text{enrolamento}}^{\text{base}}} \\ \frac{1000 \times U_{\text{enrolamnto}} \times (2 \times Z_{\text{enrolamento}}^{\text{hom opolar}} + 3 \times Z_{\text{enrolamento}}^{\text{neutro}})}{\sqrt{3} \times (Z_{\text{enrolamento}} \times (Z_{\text{enrolamento}} + 2 \times Z_{\text{enrolamento}}^{\text{hom opolar}} + 6 \times Z_{\text{enrolamento}}))} \times \frac{1}{I_{\text{enrolamento}}^{\text{base}}} \\ \frac{1000 \times U_{\text{enrolamnto}} \times 2 \times Z_{\text{enrolamnto}}}{\sqrt{3} \times (Z_{\text{enrolamento}} \times (Z_{\text{enrolamento}} + 2 \times Z_{\text{enrolamento}}^{\text{hom opolar}} + 6 \times Z_{\text{enrolamento}}))} \times \frac{1}{I_{\text{enrolamento}}^{\text{base}}} \end{bmatrix} \quad (\text{B.146})$$

6. Cálculo das correntes de pico

Já tínhamos as reactâncias do transformador e da rede, juntamos os dados das resistências do transformador e da rede e conseguimos calcular assim o valor exacto do factor k :

$$k = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3R/X} \quad (\text{B.147})$$

Após obter o factor k , podemos facilmente calcular o valor da corrente de pico dos vários curto-circuitos utilizando as equações já dadas no capítulo 3.8.

7. Relação entre ligações em triângulo e em estrela

Nos transformadores trifásicos podemos ter as ligações em estrela e em triângulo, por isso, importa ver a relação que existe entre as componentes simétricas das correntes e das tensões nestas ligações.

Representam-se as ligações em triângulo e em estrela, sendo as impedâncias em cada sistema iguais respectivamente a Z_{Δ} e Z_Y .

Se aplicarmos a tensão directa, podemos escrever:

$$V_{RS}^d = V_{Rn}^d - V_{Sn}^d = V_{Rn}^d - \alpha^2 V_{Rn}^d = (1 - \alpha^2) \times V_{Rn}^d = (\sqrt{3} \times e^{j\frac{\pi}{6}}) \times V_{Rn}^d \quad (\text{B.148})$$

E se aplicarmos as tensões em sequência inversa temos:

$$V_{RS}^i = V_{Rn}^i - V_{Sn}^i = V_{Rn}^i - \alpha V_{Rn}^i = (1 - \alpha) \times V_{Rn}^i = (\sqrt{3} \times e^{-j\frac{\pi}{6}}) \times V_{Rn}^i \quad (\text{B.149})$$

Portanto, as tensões (e as correntes) da linha apresentam um avanço de 30° relativamente às tensões fase neutro, no sistema directo, e um atraso de 30° no sistema inverso.

Este valor foi obtido com os pressupostos que o transformador se encontra no grupo horário 11. Noutro grupo de ligação, existirá uma rotação diferente mas os desvios relativos serão sempre simétricos.