

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

**COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE ANÁLISE DE
CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO**

Guaratinguetá
2012

JOYCE CARVALHO DE ALMEIDA

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE ANÁLISE DE CORRENTES DE
CURTO-CIRCUITO

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias

Guaratinguetá
2012

A447c Almeida, Joyce Carvalho de
Comparação entre métodos de análise de correntes de curto-circuito /
Joyce Carvalho de Almeida – Guaratinguetá : [s.n], 2012.
82 f : il.
Bibliografia: f. 80-82

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.
Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias

1. Instalações elétricas 2. Eletrotécnica 3. Circuitos elétricos
I. Título

CDU 621.316.17



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE ANÁLISE DE CORRENTES DE
CURTO-CIRCUITO

JOYCE CARVALHO DE ALMEIDA

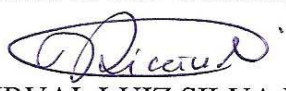
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

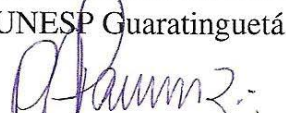
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. Leonardo Mesquita
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. RUBENS ALVES DIAS
Orientador/UNESP Guaratinguetá


Prof. Dr. DURVAL LUIZ SILVA RICCIULLI
UNESP Guaratinguetá


Prof. Ms. PAULO ARMANDO PANUNZIO
UNESP Guaratinguetá - CTIG

Dezembro de 2012

DADOS CURRICULARES

JOYCE CARVALHO DE ALMEIDA

NASCIMENTO	24.07.1988 – APARECIDA / SP
FILIAÇÃO	Lidia de Fátima de Almeida Carvalho Edson José de Almeida
2003/2005	Curso Técnico em Eletroeletrônica na <i>Universidade Estadual Paulista – Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá</i>
2010	Curso rEnergy – International Program on Renewable Energy em Intercâmbio na <i>Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft</i> na Alemanha
2007/2012	Curso de Graduação em Engenharia Elétrica na <i>Universidade Estadual Paulista – Campus de Guaratinguetá</i>

de modo especial, aos meus pais Edson e Lidia e meu irmão Eduardo, que sempre incentivaram e apoiaram minha vida acadêmica, meus amigos que sempre me deram força durante a graduação e que muito me ensinaram.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a *Deus*, pela minha vida, família, colegas, amigos e todas as outras pessoas maravilhosas que Ele me deu a oportunidade de conhecer e que foram parte da minha formação,

aos meus pais *Edson e Lidia*, que sempre incentivaram meus estudos e apoiaram minhas decisões para que eu pudesse aproveitar as oportunidades que surgiram em minha vida, mesmo que, para isso, precisassem enfrentar algumas dificuldades,

ao meu irmão *Eduardo*, responsável pela escolha da minha carreira,

aos meus primos, tios, avós e outros familiares, responsáveis pela minha formação pessoal,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Rubens Alves Dias* por me oferecer a oportunidade de realizar esse trabalho e me incentivar a realiza-lo,

aos membros da banca *Prof. Dr. Durval Luiz Silva Ricciulli e Prof. Dr. Paulo Armando Panunzio*, por aceitarem participar e avaliar este importante obra de minha vida acadêmica,

aos meus queridos amigos *Alexandre N. de Souza Nassabay, Ana Carolina Guerra Dutra, Ana Cláudia Luciano da Silva, Daniel Solferini de Carvalho, Felipe Rafael Gomides, Fernando Lamas Granero, Gabriel Seiji Fontana, Gisele Machado Mota, Guilherme Kinouti Costa, Guilherme Zorzi Pedrazoli, Henrique Yoshikawa, Ildo Borges de Campos Bólico Ferreira, José Carlos Silva Júnior, Juliana Salgueiro Marcon, Luiza Fernandes M. dos Santos, Luiz Felipe Dias, Pedro Raphael de Souza Pedroso Bento, Rafael da Silva Pascoal, Renan Barbosa Rossetti e Tyfany Pereira da Silva*, todos foram muito importantes emocional ou academicamente durante minha formação,

aos meus amigos da *república Palace II*, que me ofereceram sua amizade e seu teto, que foi essencial durante a minha graduação,

aos meus queridíssimos *amigos e colegas formandos 2011 da turma de engenharia elétrica*, com quem compartilhei anos de estudo e companheirismo,

aos meus queridos *amigos e colegas das turmas de engenharia elétrica com quem estudei no 2º semestre de 2011 e em 2012*, que me receberam amigavelmente e com os quais tive o prazer de compartilhar o final da minha graduação,

aos meus amigos do setor de *Energias & Utilidade da BASF S. A.*, em especial os estagiários *Jaqueline Silvério Zancanari, José Cleber dos Santos Lima e Lucas Nascimento e*

Silva, aprendiz *Sarah Pereira Weber* e nosso *Supervisor Marcelo Camargo Brunca* e da *MVA Engenharia*, que muito me ensinaram durante meus estágios, profissional e pessoalmente,

aos meus amigos do *CAEEL*, todos me proporcionaram momentos de amizade e aprendizado que serão de grande importância na minha vida profissional e pessoal,

aos meus amigos da *Lobateria*, atividade extracurricular diversificada na qual pude aliviar a pressão da graduação,

aos meus amigos do *Rotaract Clube de Aparecida*, que foram compreensivos com a minha ausência nos eventos e reuniões devido às obrigações da graduação,

aos amigos da *Divisão de Manutenção de Equipamentos Auxiliares à Geração*, em especial os estagiários, que foram parte da minha primeira experiência profissional e me influenciaram na escolha da graduação e a minhas amigas *Talitha Caires Antoniolo*, *Anelize Queiroz Amaral* e *Patricia Neli*, parte importante dessa fase da minha vida,

aos meus amigos e colegas do curso técnico em eletroeletrônica e ensino médio no *CTIG – Unesp*, em especial *Aline Prudente Botelho*, *Ethienne Bueno Sá*, *Fernando Lemos da Silva*, *Kerolene Barbosa*, *Luciana Cláudia Almeida*, *Marcelo Teberga* e *Talitha Costa*, parte essencial do começo da minha formação,

aos amigos de todas as partes do Mundo com quem compartilhei meu intercâmbio, em especial *Elisa Ferrari*, *Ricardo Cesar Otero* e os membros do *Rotaract Club Karlsruhe* que espero um dia reencontrar e desejo muito sucesso a todos,

a todos os outros amigos e colegas com quem estudei ou compartilhei alguma experiência extracurricular ou ainda simplesmente conheci em algum momento da graduação, agradeço e desejo a todos muito sucesso no futuro,

a todos os *professores da Unesp – Guaratinguetá* e do *Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá*, que me instruíram para formar a profissional que serei, em especial ao *Prof Sérgio Rogério Bruno*, um dos melhores professores que já tive em minha vida acadêmica e ao *Prof. Dr. Daniel Julien B. da S. Sampaio*, que me proporcionou a oportunidade do meu intercâmbio.

“O sábio nada acumula. Quanto mais usa o que tem em benefício dos outros, mais cresce o seu patrimônio.”

Lao Tzu

ALMEIDA, J. C. **Comparação entre métodos de Análise de Correntes de Curto-circuito.** 2012. 82p. Trabalho de graduação. (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

Sobrecorrentes podem colocar em risco todo o sistema elétrico e os seres vivos, elas são resultado de curtos-circuitos e falhas que podem ocorrer nos sistemas elétricos, por mais bem projetado que sejam. Logo é importante prever estas falhas com análises dos sistemas elétricos para que seja possível projetar adequadamente as proteções, a fim de que essas intervenham corretamente e evitem perdas técnicas e, principalmente, humanas. No entanto não há um padrão para os métodos de cálculo das correntes de curto-circuito, os principais autores nacionais das literaturas sobre o assunto sugerem diferentes métodos, conhecer as particularidades entre eles facilita e agiliza a escolha e boa aplicação dos mesmos. Para tanto, é escolhido um caso base, a partir de um sistema elétrico que apresente um curto-circuito, o qual será analisado pelos métodos apresentados.

PALAVRAS-CHAVE: correntes de curto-circuito, análise de falha, curto-circuito.

ALMEIDA, J. C. **Comparison between Methods of Analysis of Short Circuit Currents.** 2012. 82p. Graduate Work (Bachelor in Electrical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

Overcurrents may endanger the whole electrical system and living beings, they are the result of short circuits and failures that can occur in electrical systems, no matter how well designed they are. Therefore it is important to predict these failures with analysis of electrical systems to make it possible to design appropriate protections, to ensure that those intervene properly and avoid technical and mainly human losses. However there is no standard for calculation of the short circuit currents, the main authors of the national literature about the subject suggest various methods, knowing the particularities among them provides quick and easy choice and proper application of them. To do so, a base case from an electrical system that presents a short circuit is chosen, which will be analyzed using the methods presented.

KEYWORDS: short circuit currents, failure analysis, short circuit.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Painel carbonizado após curto-circuito	19
Figura 2.1 – Área de Trabalho do SIMARIS design	29
Figura 2.2 – Opções de Método de Cálculo das Correntes de Curto-circuito do DOCWin	29
Figura 2.3 – Área de Trabalho do DOCWin	30
Figura 3.1 – Corrente simétrica	32
Figura 3.2 – Corrente parcialmente simétrica	32
Figura 3.3 – Corrente totalmente assimétrica	32
Figura 3.4 – Corrente assimétrica e simétrica	33
Figura 3.5 – Curto-circuito trifásico	33
Figura 3.6 – Curto-circuito fase-fase	34
Figura 3.7 – Curto-circuito fase-fase-terra	34
Figura 3.8 – Curto-circuito fase-terra	34
Figura 3.9 – Curto-circuito com contato simultâneo	35
Figura 3.10 – Diagrama unifilar de um sistema elétrico	37
Figura 3.11 – Seção transversal do barramento	47
Figura 3.12 – Relações de assimetria das correntes de curto-circuito	48
Figura 3.13 – Diagrama de um sistema de geração/transmissão/subtransmissão/ distribuição consumidor	49
Figura 3.14 – Layout de uma indústria	50
Figura 3.15 – Diagrama unifilar simplificado	51
Figura 3.16 – Diagrama de blocos	51
Figura 3.17 – Percurso da corrente de curto-circuito fase-terra	60
Figura 4.1 – Diagrama unifilar da subestação	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores típicos de transformadores nacionais (dados fornecidos por fabricantes)	39
Tabela 3.2 – Valores da resistência e da reatância de condutores de cobre	40
Tabela 3.3 – Valores do fator de tensão c	42
Tabela 3.4 – Perdas ôhmicas no cobre	53
Tabela 3.5 – Impedâncias de sequência positiva e zero	56
Tabela 3.6 – Barras de cobre sem pintura	58
Tabela 4.1 – Comparação dos valores obtidos	75
Tabela 4.2 – Comparação entre os métodos quanto aos dados necessários e considerações dos mesmos	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABB	- <i>Asea Brown Boveri</i>
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANAFAS	- Análise de Falhas Simultâneas
ANSI	- <i>American National Standards Institute</i>
AT	- Alta Tensão
BT	- Baixa Tensão
CA	- Corrente Alternada
CC	- Corrente Contínua
CCM	- Centro de Controle de Motores
D	- Disjuntor
DIN	- <i>Deutsches Institut für Normung</i>
ER	- <i>Engineering Recommendation</i>
IEC	- <i>International Electro-technical Commission</i>
IEEE	- <i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
M	- Medição
ME	- Ponto de medição
m	- Motor
NBR	- Normas Brasileiras
P	- Ponto de entrega
PROCOBRE	- Instituto Brasileiro do Cobre
QDL	- Quadro de Distribuição de Luz
QGF	- Quadro Geral de Força
TR	- Transformador
pu	- Por unidade
VDE	- <i>Verband Deutscher Elektrotechnik</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Seção transversal do cabo ou do barramento	mm^2
c_Q	Fator de tensão relativo ao barramento Q	
c	Fator de tensão	
d	Comprimento do barramento	mm
F_a	Fator de assimetria	
h	Altura do barramento	mm
I	Corrente	A
I_b	Corrente de base	A
I_{ca}	Corrente assimétrica de curto-circuito trifásico	kA
I_{cb}	Corrente de curto-circuito bifásico fase-fase	kA
I_{cbt}	Corrente de curto-circuito fase-fase-terra	kA
I_{cft}	Corrente de curto-circuito fase-terra	kA
I_{cim}	Impulso da corrente de curto-circuito	kA
I_{cp}	Corrente de curto-circuito simétrico	kA
I_{cs}	Corrente de curto-circuito simétrico trifásico	kA
I_{cst}	Corrente nos terminais do transformador	kA
I_{ftb}	Corrente de curto-circuito com contato simultâneo	kA
I_{ftma}	Corrente de curto-circuito fase-terra máxima	kA
I_{ftmi}	Corrente de curto-circuito fase-terra mínima	kA
I_k	Corrente de curto-circuito permanente	kA
I_{kA}	Corrente curto trifásica	kA
I_{k3}	Corrente trifásica de curto-circuito (eficaz)	kA
I_{k3}	Corrente de curto-circuito trifásica permanente	kA
I_{k2}	Corrente de curto-circuito bifásica permanente	kA
I_{k1}	Corrente de curto-circuito fase-terra permanente	kA
I''_k	Corrente de curto-circuito trifásica simétrica inicial	kA
I_{kM}	Corrente de contribuição dos motores	kA
I_{kmax}	Corrente de curto-circuito trifásica simétrica máxima	kA
I_{kmin}	Corrente de curto-circuito trifásica simétrica mínima	A
I''_{kQ}	Corrente de curto-circuito trifásica simétrica inicial	kA
$I_{NT,BT}$	Corrente nominal no lado de baixa do transformador	kA
I_n	Corrente nominal do transformador	kA
I_M	Corrente nominal do motor	kA
I_{SA}	Valor de crista da corrente assimétrica	kA
L_b	Comprimento da barra	m
L_c	Comprimento do circuito	m
l	Comprimento do barramento ou do cabo	m
N	Potência aparente do transformador	kVA
N_b	Número de barras em paralelo	
N_c	Número de condutores por fase do circuito mencionado	
N_{trp}	Número de transformadores em paralelo	
n	Número de barras ou condutores por fase	
P_b	Potência de base	W
P_{CC}	Potência de curto-circuito no ponto de entrega da concessionária	kVA
P_{Cu}	Perdas ôhmicas no Cobre	W
P_{kN}	Perdas no cobre	W
R_{0T}	Resistência de curto-circuito de sequência zero do transformador	$m\Omega$
R%	Resistência percentual do transformador	%

R_{at}	Resistência de aterramento	Ω
R_B	Resistência do barramento	$m\Omega$
R_{ct}	Resistência de contato	Ω
$R_{b\Omega}$	Resistência do circuito – barra	Ω
$R_{c\Omega}$	Resistência do circuito – cabo	Ω
$R_{c\Omega 0}$	Resistência de sequência zero do cabo	Ω
R_e	Resistência de entrada	$m\Omega$
R_L	Resistência de curto-circuito de sequência positiva da linha	$m\Omega$
R'_L	Resistência do condutor de cobre na baixa tensão	$m\Omega$
R_{mt}	Resistência de malha terra	Ω
R_Q	Resistência equivalente de curto-circuito da sequência positiva	$m\Omega$
R_{pt}	Resistência relativa percentual	%
R_T	Resistência de sequência positiva do transformador	$m\Omega$
R_{TBT}	Resistência referida ao lado de baixa	$m\Omega$
R_{u0c}	Resistência de sequência zero do cabo	pu
R_{ub}	Resistência do barramento	pu
R_{uc}	Resistência do circuito	pu
R_{uat}	Resistência de malha de aterramento	pu
R_{uct}	Resistência de contato	pu
R_{umt}	Resistência malha terra	pu
R_{us}	Resistência reduzida do sistema	pu
R_{ut}	Resistência reduzida do transformador	pu
$R_{u\Omega}$	Resistência do condutor	$m\Omega/m$
$R_{u\Omega b}$	Resistência do barramento	$m\Omega/m$
S_{NT}	Potência aparente nominal do transformador	kVA
S_{KQ}	Potência aparente da rede	MVA
t_N	Relação de transformação	
U_0	Tensão de fase	V
u_{kN}	Impedância percentual do transformador	%
u_{RN}	Resistência percentual do transformador	%
U_N	Tensão nominal de linha no lado de BT	V
U_{NQ}	Tensão nominal da rede	kV
$U_{NT,AT}$	Tensão nominal no lado de AT do transformador	kV
$U_{NT,BT}$	Tensão nominal no lado de BT do transformador	V
U_Q	Tensão da rede	kV
V_b	Tensão de base	V
V_n	Tensão secundária do transformador	V
V_{np}	Tensão nominal primária no ponto de entrega	kV
V_{nt}	Tensão nominal	V
x'	Reatância relativa do cabo	$m\Omega/m$
x''	Reatância relativa do barramento	$m\Omega/m$
X_{0T}	Reatância de curto-circuito de sequência zero do transformador	$m\Omega$
X_B	Reatância da barra	$m\Omega$
$X_{b\Omega}$	Reatância do circuito – barra	Ω
$X_{c\Omega}$	Reatância do circuito – cabo	Ω
$X_{c\Omega 0}$	Reatância de sequência zero do cabo	Ω
X_e	Reatância de entrada	$m\Omega$
X_L	Reatância de curto-circuito de sequência positiva da linha	$m\Omega$
X'_L	Reatância do condutor de cobre na baixa tensão	$m\Omega$
X_Q	Reatância equivalente de curto-circuito da sequência positiva	$m\Omega$

X_T	Reatância de sequência positiva do transformador	$m\Omega$
X_{TBT}	Reatância referida ao lado de baixa	$m\Omega$
X_{u0c}	Reatância de sequência zero do cabo	pu
X_{uc}	Reatância do circuito	pu
X_{us}	Reatância reduzida do sistema	pu
X_{ut}	Reatância unitária do transformador	pu
$X_{u\Omega}$	Reatância do condutor	$m\Omega/m$
$X_{u\Omega b}$	Reatância do barramento	$m\Omega/m$
Z	Impedância do transformador	Ω
$Z\%$	Impedância percentual do transformador	$\%$
Z_1	Impedância de curto-circuito de sequência positiva	$m\Omega$
Z_2	Impedância de curto-circuito de sequência negativa	$m\Omega$
Z_{0T}	Impedância de curto-circuito de sequência zero do transformador	$m\Omega$
Z_{AT}	Impedância do lado de AT	$m\Omega$
$Z_{AT,t}$	Impedância do lado de AT, referida ao lado de BT	$m\Omega$
Z_b	Impedância-base	$m\Omega$
Z_{cir}	Impedância do circuito	Ω ou pu
Z_{dis}	Impedância do Sistema de Distribuição	$m\Omega$
Z_e	Impedância de entrada	$m\Omega$
Z_g	Impedância do Gerador	$m\Omega$
Z_k	Impedância total vista do ponto em que ocorre a falta	$m\Omega$
Z_L	Impedância de curto-circuito de sequência positiva da linha	$m\Omega$
Z'_L	Impedância do condutor de cobre na baixa tensão	$m\Omega$
Z_N	Impedância do condutor neutro	$m\Omega$
Z_{PE}	Impedância do condutor de proteção	$m\Omega$
Z_{pt}	Impedância relativa percentual	$\%$
$Z_{pt\%}$	Impedância percentual do transformador	$\%$
Z_Q	Impedância equivalente de curto-circuito da sequência positiva	$m\Omega$
Z_s	Impedância Reduzida do Sistema	$m\Omega$
Z_{str}	Impedância do Sistema de Subtransmissão	$m\Omega$
Z_t	Impedância dos transformadores da subestação	$m\Omega$
Z_t	Impedância total referenciada no ponto a ser analisado	$m\Omega$
Z_{tr}	Impedância do Sistema de Transmissão	$m\Omega$
Z_T	Impedância de sequência positiva do transformador	$m\Omega$
Z_{TBT}	Impedância referida ao lado de baixa	$m\Omega$
Z_{tr}	Impedância do Sistema de Transmissão	$m\Omega$
Z_{u0c}	Impedância de sequência zero do cabo	pu
Z_{u0t}	Impedância de sequência zero do transformador	pu
Z_{ub}	Impedância do barramento	pu
Z_{uc}	Impedância do circuito	pu
Z_{us}	Impedância reduzida do sistema	pu
Z_{ut}	Impedância unitária do transformador	pu
Z_{utot}	Impedância total	pu
λ	Fator de assimetria	
ρ	Resistividade do material do cabo ou barramento	$\Omega.mm^2/m$

SUMÁRIO

1	A IMPORTÂNCIA DO CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO.....	19
1.1	Introdução.....	19
1.2	Justificativa.....	19
1.3	Assuntos abordados.....	20
2	PANORAMA GERAL DO CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO.....	21
2.1	Introdução.....	21
2.2	Determinação das Correntes de Curto-circuito: Abordagem Internacional.....	21
2.2.1	IEEE Violet Book.....	21
2.2.2	Publicações de Grandes Empresas.....	21
2.3	Determinação das Correntes de Curto-circuito: Abordagem Nacional.....	22
2.3.1	Programa Análise de Falhas Simultâneas (ANAFAS).....	22
2.3.2	Obras dos autores base da análise.....	23
2.3.3	Obras de outros autores brasileiros.....	23
2.4	Normas de Métodos de Cálculo de Correntes de Curto-circuito.....	24
2.4.1	IEC 60909 (Internacional).....	24
2.4.2	IEC 60949.....	25
2.4.3	ER G7/4 (Reino Unido).....	25
2.4.4	IEEE C37.010 (Estados Unidos).....	25
2.4.5	VDE 0102 (Alemanha).....	25
2.4.6	Comparação do Procedimento de Cálculo de Corrente de Curto-circuito ANSI e IEC.....	26
2.4.7	Normalização no Brasil.....	26
2.4.7.1	ABNT NBR 14039 (Média Tensão).....	27
2.4.7.2	ABNT NBR 5410 (Baixa Tensão).....	28
2.4.7.3	ABNT NBR 12243.....	28
2.5	Softwares de Grandes Empresas.....	28
3	ASPECTOS CONCEITUAIS.....	31
3.1	Introdução.....	31
3.2	Corrente de Curto-circuito.....	31
3.3	Fontes de Correntes de Curto-circuito.....	31
3.4	Formas de Onda das Correntes de Curto-circuito.....	31
3.4.1	Corrente Simétrica de Curto-circuito.....	31
3.4.2	Corrente assimétrica de curto-circuito.....	32
3.5	Tipos de Curto-circuito.....	33
3.5.1	Curto-circuito Trifásico.....	33
3.5.2	Curto-circuito fase-fase.....	33
3.5.3	Curto-circuito fase-fase-terra.....	34
3.5.4	Curto-circuito Fase-terra.....	34
3.6	Efeitos das correntes de curto-circuito.....	35
3.7	Métodos de cálculo das correntes de curto-circuito em instalações elétricas.....	35
3.7.1	Método apresentado em Cotrim (2009).....	35
3.7.1.1	Considerações.....	35
3.7.1.2	Cálculos da impedância de curto-circuito.....	37
3.7.1.3	Cálculos das correntes de falta.....	41
3.7.1.4	Influência dos motores.....	43

3.7.2	Método apresentado em Creder (2007)	43
3.7.2.1	Método simplificado.....	43
3.7.2.2	Método detalhado	45
3.7.3	Método apresentado em Mamede Filho (2011)	48
3.7.3.1	Considerações iniciais	48
3.7.3.2	Impedâncias do sistema.....	49
3.7.3.3	Metodologia de cálculo	50
3.7.3.4	Sequência de cálculo	52
3.7.3.5	Influência dos Motores de Indução nas correntes de falta	61
4	APLICAÇÃO.....	63
4.1	Introdução.....	63
4.2	Sistema elétrico teórico a ser analisado.....	63
4.2.1	Método apresentado em Cotrim (2009).....	64
4.2.2	Método apresentado em Creder (2007)	68
4.2.2.1	Método detalhado	68
4.2.3	Método apresentado em Mamede Filho (2011)	70
4.3	Consolidação dos resultados	75
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
	REFERÊNCIAS	80

1 A IMPORTÂNCIA DO CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

1.1 Introdução

Sistemas elétricos, por mais bem dimensionados que sejam, sempre estão sujeitos às falhas e curtos-circuitos, resultando em sobrecorrentes que podem colocar em risco estes sistemas e os seres vivos, dentre os quais os humanos. Logo é importante que elas sejam previstas com as análises de sistemas para que seja possível projetar as proteções adequadas para proteger o sistema e os cabos, barras, chaves e outras partes para suportar os efeitos térmicos e mecânicos provocados pelas sobrecorrentes (COTRIM, 2009).

1.2 Justificativa

As correntes de curto-circuito são importantes para o dimensionamento de proteções e para prever dos efeitos mecânicos e térmicos aos quais os componentes poderão estar sujeitos.

Os efeitos mecânicos ocorrem devido ao fato de uma corrente passando entre dois condutores em paralelo provoca o aparecimento de uma força entre os condutores, já os térmicos devido ao aumento da corrente que aumenta o aquecimento dos condutores, podendo destruir a isolação (SIEMENS, 2003).

As consequências de uma falha podem carbonizar um cabo ou um painel, ao ponto de ser necessário os substituir e ainda, se as proteções não atuarem como devido, o curto-circuito pode causar incêndios, a Figura 1.1 apresenta um painel carbonizado. Esta imagem evidencia a necessidade de proteções bem projetadas.

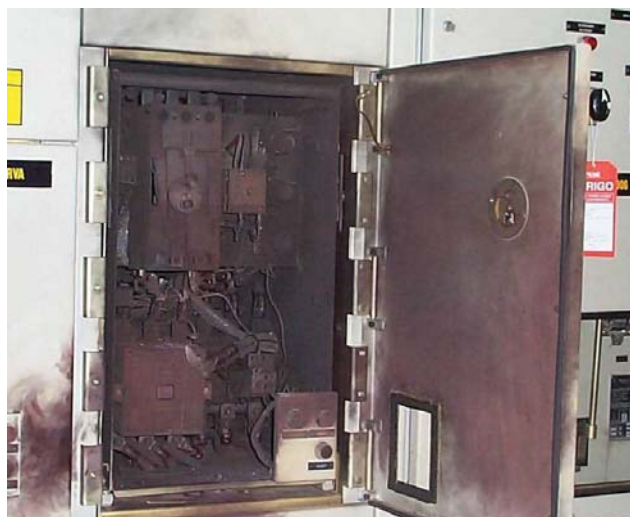


Figura 1.1 Painel carbonizado após curto-circuito (ZERGUI ELETRIC, 2012)

Cada projeto tem sua gama de informações iniciais que são necessárias aos cálculos e saber qual dos métodos é mais adequado a elas é essencial para que não haja desperdício de tempo e recursos.

As literaturas clássicas de instalações elétricas sugerem métodos distintos de cálculo das correntes de curto-circuito, pois não há uma regra básica para executá-lo. Analisar, comparar e concluir sobre esses métodos é o objetivo deste estudo. Aqui são analisados os métodos apresentados por três autores: *Ademaro Cotrim (2009)*, *Hélio Creder (2007)* e *João Mamede Filho (2011)*.

1.3 Assuntos abordados

No segundo capítulo tem-se o panorama geral do cálculo das correntes de curto-circuito iniciando com uma abordagem internacional e nacional, normas (nacionais e estrangeiras) e ainda softwares publicados por organizações empresariais.

No terceiro capítulo têm-se os aspectos conceituais de interesse para o cálculo das correntes de curto-circuito, como sua definição, fontes, formas, tipos de curto-circuito, efeitos das correntes de curto-circuito e, finalmente, uma apresentação dos métodos a serem analisados.

No quarto capítulo os métodos apresentados no capítulo anterior são aplicados em um exemplo de sistema elétrico industrial e finaliza com uma análise dos valores obtidos.

No quinto capítulo é apresentada uma visão geral e interpretação dos resultados obtidos e ainda sugestões para uma análise futura na mesma área.

2 PANORAMA GERAL DO CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO CIRCUITO

2.1 Introdução

Os cálculos de Correntes de Curto Circuito são complexos e trabalhosos, porém são de extrema importância para dimensionamento de proteções de sistemas elétricos. A busca por um método ou software que os simplifique já gerou vários estudos e inúmeras normas. Serão apresentadas algumas normas, métodos, comparações entre métodos e normas e softwares a fim de introduzir o conhecimento do assunto, para seu melhor entendimento.

2.2 Determinação das Correntes de Curto-circuito: Abordagem Internacional

2.2.1 IEEE Violet Book

O *IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems (Violet Book)* (IEEE, 2006). Ele foi lançado como um tratado prático sobre o tema de curto-circuito em sistemas elétricos de potência, cujo foco é o entendimento e aplicação das técnicas de análise de curto-circuito em sistemas de potência industriais e comerciais, os mesmos princípios de engenharia se aplica a todos os sistemas elétricos de potência. Os métodos apresentados no Violet Book não utilizados em outros livros da coleção *IEEE Color Book*[®].

2.2.2 Publicações de Grandes Empresas

Metz-noblat, Dumas e Poulain (2005) comparam o método da IEC com o Método da Impedância aplicando-os em redes de baixa tensão. Praticamente todas as características do circuito são levadas em consideração, tornando o método preciso e de valor instrutivo. Ao longo dos anos os padrões e métodos foram modificados com o intuito de torná-los mais próximos da realidade, portanto mais fiéis e seguros, porém, mais complexos, com a IEC, por exemplo, os cálculos mais simples só podem ser utilizados nos casos mais básicos.

Seip (2000) em sua obra *Electrical Installations Handbook*, da SIEMENS, inicia o capítulo 1.2 *Calculating short-circuits in three-phase systems* com uma introdução apresentando normas, termos, símbolos, tipos de falta, fontes, formas de onda, fatores gerais a

serem utilizados, de modo a facilitar o entendimento posterior. Em seguida, apresenta o método através de vários exemplos diferentes. Então ele fecha o capítulo com a apresentação das impedâncias dos equipamentos (geradores, motores, transformadores, linhas aéreas, cabos e barramentos).

Roeper (1979), na obra *Correntes de curto-circuito em redes trifásicas* da SIEMENS, que é uma tradução da 5ª edição alemã, inicia com alguns casos importantes de curto-circuito e seus cálculos, como componentes simétricas, as impedâncias de seqüências, as equações básicas para cada caso e uma comparação dos casos. Então a variação da mesma em função do tempo, o processo de amortecimento, grandezas características do processo de amortecimento e cálculo dos valores instantâneos das correntes de curto-circuito. No último capítulo encontra-se uma análise de rede e dados para cálculo, cálculo com valores de impedâncias relativas e absolutas, análise de redes com alimentação múltipla em malha, impedância de um ponto da rede, dimensionamento, valores das impedâncias, impedâncias de linhas aéreas e fecha com um exemplo de cálculo.

O Guia Técnico da ABB *Electrical installation handbook – Protection, control and electrical devices*, em seu capítulo 6 *Calculation of short-circuit current*, apresenta alguns aspectos gerais, os tipos de faltas, e então apresenta o método de cálculo utilizando o “short-circuit power method”, é um método simples que considera a influência da rede, geradores, transformadores, motores e cabos de grande seção, o método consistem em calcular as potências de curto-circuito em cada elemento, então calcular a potência na falta e finalmente calcula-se a corrente de curto-circuito. Para finalizar são apresentados alguns exemplos. Também são calculados os picos das correntes de curto-circuito (ABB, 2010).

2.3 Determinação das Correntes de Curto-circuito: Abordagem Nacional

2.3.1 Programa Análise de Falhas Simultâneas (ANAFAS)

O ANAFAS foi desenvolvido pelo para auxiliar no cálculo de curtos-circuitos, é um software flexível, nele podem ser analisados sistemas, especificando várias falhas, simples ou simultâneas, com ou sem carregamento pré-falta, em qualquer fase, através de impedâncias ou sólidas, ele contém ferramentas auxiliares como estudo de superação de equipamentos e cálculo de equivalentes (CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012).

2.3.2 Obras dos autores base da análise

A obra de Cotrim (2009) introduz o capítulo 10 *Cálculo de Correntes de Falta* com noções básicas das fontes de correntes de falha, faz uma análise da corrente de curto-circuito apresentando sua composição (Corrente Contínua – CC e Corrente Alternada – CA), suas variações (simétrica e assimétrica), entre outros aspectos. Apresenta então os fundamentos dos cálculos, ressaltando os tipos de falta, de correntes, quais componentes e fatores que devem ser considerados. Então há uma explicação aprofundada do cálculo das impedâncias de curto-circuito, o cálculo das correntes de falha presumida, a influência dos motores e finalmente finaliza exemplos de aplicação do método.

Creder (2007) apresenta em sua obra apenas uma seção sobre o assunto na seção 7 do capítulo 12 intitulado *Cálculo da Corrente de Curto-circuito Presumível de Subestações Abridadas*, na qual o autor inicia com algumas generalidades sobre o assunto, como o que é necessário para a especificação de um equipamento elétrico, logo em seguida apresenta os efeitos térmicos e dinâmicos das correntes de curto-circuito, algumas noções de proteção de um sistema elétrico, diferencia as correntes simétricas de assimétricas, e em seguida explica o cálculo exemplificando.

Mamede Filho (2011) no capítulo 5 intitulado *Curto-circuito nas Instalações Elétricas* faz uma pequena introdução sobre a importância dos cálculos, logo em seguida começa uma introdução teórica sobre as correntes de curto-circuito, suas formas de onda e localização das fontes, então uma formulação apresenta os detalhes dos cálculos. Apresenta então alguns conceitos de valores por unidade (que serão utilizados nos cálculos). Ele apresenta então os tipos de curto-circuito e, finalmente, passa ao cálculo, como serão determinadas as impedâncias do sistema, toda a metodologia do cálculo, a sequência e, em fim, exemplos de aplicação. Antes de finalizar o capítulo o autor ainda resalta sobre a contribuição dos motores de indução nas correntes de falta, e exemplifica. Para finalizar são apresentadas as aplicações das correntes de curto-circuito, também com exemplos. No anexo à obra de Mamede Filho, é apresentado, detalhadamente, um exemplo completo de cálculo das correntes de curto circuito.

2.3.3 Obras de outros autores brasileiros

Kindermann (1997) em sua obra *Curto-circuito* apresenta detalhadamente toda a modelagem e exemplos para o método proposto por ele. Iniciando pela representação de

Sistemas Elétricos (valores por unidade, diagrama unifilar e os componentes), em seguida apresenta as Componentes Simétricas (teoremas e representação de sistemas), em seguida as modelagens (transformadores, geradores e linhas de transmissão) e finalmente apresenta o curto-circuito no gerador síncrono, no sistema elétrico e em sistemas de distribuição.

Lima Filho (2004) em *Projetos de Instalações Elétricas Prediais* na sessão 9.6 *Determinação da Corrente de Curto-circuito Presumida* apresenta os cálculos, iniciando com considerações preliminares e em seguida apresenta os procedimentos de cálculo e finaliza com um exemplo.

2.4 Normas de Métodos de Cálculo de Correntes de Curto-circuito

Segundo Tleis (2008) diretrizes e padrões para análise de curto-circuito foram desenvolvidas em alguns países. Estas normas geralmente visam gerar resultados suficientemente precisos para a finalidade pretendida. Três abordagens muito populares e amplamente utilizadas são o *International Electro-technical Commission* (IEC) 60909:2001, a *Engineering Recommendation* (ER) G7/4 e a *Institute of Electrical and Electronic Engineers* IEEE C37.010. Além destas ainda será apresentada a *Deutsches Institut für Normung* (DIN) e *Verband Deutscher Elektrotechnik* (VDE) 0102, que deu origem a IEC 60909.

2.4.1 IEC 60909 (Internacional)

Publicada inicialmente em 1988, a IEC 60909 *Short Circuit Current Calculation in Three-phase Networks* é derivada da norma alemã VDE 0102. É a única recomendação internacional para esse tipo de cálculo. Foi desenvolvida pra ser prática, com cálculos simples e gerar um resultado suficientemente preciso. Em 2001 ela foi atualizada, tornando seus resultados mais precisos e sua aplicação mais ampla (TLEIS, 2008, p. 451 e 452).

O Método da IEC 60909 é mais técnico e aplica o princípio do componente simétrico. É mais utilizado em redes de alta tensão e também pode ser aplicado em redes em qualquer tensão. Segundo os autores uma das vantagens desse método é o fato de que o mesmo é muito útil em sistemas desbalanceados. Além de ser exigido nos casos em que a tensão e corrente do sistema não são simétricos e se o sistema contiver transformadores especiais e máquinas rotóricas (METZ-NOBLAT; DUMAS; POULAIN, 2005).

2.4.2 IEC 60949

Publicada em 1988 e intitulada *Cálculo do curto-circuito termicamente admissível, tendo em conta os efeitos não-adiabáticos de aquecimento* a IEC 60949. Nela abrange o cálculo da corrente de curto-circuito adiabática, o cálculo de um fator de modificação que leva em conta o efeito não-adiabático de aquecimento, e a utilização de ambos para obter a corrente de curto-circuito admissível.

2.4.3 ER G7/4 (Reino Unido)

Em 1992 foi publicada a *ER G7/4*, intitulada *Procedimentos para atender aos requisitos da norma IEC 60909 para Cálculos de Correntes de Curto-Circuito em Sistemas Trifásicos CA*, sua origem vem de um grupo de Engenheiros de Sistemas de Potência, reunidos pela Indústria Britânica de Fornecimento de Energia, que tinha por objetivo avaliar a IEC 60909 ou uma alternativa mais adequada. É um procedimento que expõe “boas práticas da indústria”. É aplicada para dimensionar ajustes de disjuntores para Sistemas de Potência em CA com tensões de 380 V a 400 kV. Também é utilizado nos cálculos para ajustes de Reles e forças mecânicas em condutores e barramentos (TLEIS, 2008, p. 463 e 464).

2.4.4 IEEE C37.010 (Estados Unidos)

Inicialmente lançado em 1979, pelo *IEEE* e revisado em 1999 (vigente) é intitulado *Guia de Aplicação para Disjuntores CA de Alta Tensão com Base em Correntes Simétricas do IEEE*. É utilizado em disjuntores de alta tensão acima de 1 kV para aplicações em sistemas de potência industrial e comercial operando em 60Hz. O método proporciona um grau de precisão dentro dos limites práticos de cálculo de curto-circuito, considerando a precisão dos dados. Diferente do IEC 60909 ou G7/4 que são apenas procedimentos de cálculos de correntes de curto-circuito, esta norma visa o dimensionamento e seleção de disjuntores. Isso faz com que esta seja acrescentada a guias de aplicação de disjuntores (TLEIS, 2008, p. 469).

2.4.5 VDE 0102 (Alemanha)

Segundo Kasikci (2002) antes de 1962, VDE 0670 era a norma para os cálculos de circuito. O VDE 0102 foi lançado em 1971 e revisado em 1975, então os cálculos para redes

de baixa e alta tensão eram feitas de maneira uniforme. Enquanto isso, novos desenvolvimentos em sistemas de energia elétrica foram realizadas e diversos softwares surgiram no mercado. A fim de atender às exigências e evolução, em 1985, a DIN VDE 0102 foi estendida para incluir informações sobre os novos equipamentos.

A DIN VDE 0102:1990 descreve um método de cálculo uniforme que visa garantir um padrão seguro, é um método aproximado que não utiliza dados operacionais, mas a norma não abrange todas as condições operacionais relevantes. Ela foi adaptada para o padrão internacional na IEC 60909-0, ela apresenta uma versão mais confiável (NIPPERT; BEHRENS; KNY, 2005).

2.4.6 Comparação do Procedimento de Cálculo de Corrente de Curto-circuito ANSI e IEC

Segundo Knight; Sieling (1991), os engenheiros devem estar familiarizados com as diferenças básicas entre os procedimentos de cálculos de curto-circuito do *American National Standards Institute (ANSI)* e do IEC. Com o aumento da remoção de barreiras ao comércio com a Comunidade Europeia em 1992, a globalização dos fabricantes de equipamentos elétricos e expansão do mercado de engenharia para novos países ao redor do mundo, empresas de engenharia capazes de atravessar fronteiras internacionais vai ganhar uma vantagem competitiva.

A ANSI simplesmente aplica fatores de multiplicação nas impedâncias das máquinas para calcular a sua decomposição no sistema de potência CA, IEC inicialmente calcula cada máquina em referência a cada local de curto-circuito e, em seguida, calcula a decomposição separadamente para cada contribuição com base nessas condições iniciais. ANSI não faz uma clara distinção entre as contribuições de rede radial e malha e a IEC sim. A modelagem dos geradores pelo método da ANSI depende da diferença de impedância entre o local do curto-circuito e do gerador, a IEC considera ambos os motores e geradores a serem sujeitos a essa diferença.

2.4.7 Normalização no Brasil

As publicações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) referentes ao assunto são as Normas Brasileiras – NBR 14039 (ABNT, 2005) e NBR 5410 (ABNT, 2004).

2.4.7.1 ABNT NBR 14039 (Média Tensão)

A NBR 14039 (ABNT, 2005), foi elaborada no Comitê Brasileiro de Eletricidade (ABNT/CB-03), pela Comissão de Estudo de Instalações Elétricas de Alta e Média Tensão (CE-03:064.11), é intitulada *Instalações Elétricas de Média Tensão de 1 kV a 36,2 kV*.

A publicação vigente é a de 2005, que substituiu a publicação de 2003, que por sua vez substituiu a de 1998. (ABNT, 2012)

Segundo a NBR 14039 (ABNT, 2005) sobre a proteção contra correntes de curto-circuito:

4.1.3.2 Proteção contra correntes de curto-circuito

Todo circuito deve ser protegido por dispositivos que interrompam a corrente nesse circuito quando pelo menos um de seus condutores for percorrido por uma corrente de curto-circuito, devendo a interrupção ocorrer num tempo suficientemente curto para evitar a deterioração da instalação (ABNT, 2005, p.4).

Ainda sobre os cálculos de correntes de curto-circuito:

4.2.6 Corrente de curto-circuito

4.2.6.1 As instalações devem ser projetadas e construídas para suportar com segurança os efeitos térmicos e mecânicos resultantes de correntes de curto-circuito.

Quatro tipos de curtos-circuitos devem ser considerados:

- a) trifásico;
- b) bifásico;
- c) entre fase e neutro;
- d) entre duas fases e neutro.

NOTA - Exemplos de cálculos de curtos-circuitos e seus efeitos podem ser obtidos nas IEC 60909-0 e IEC 60949.

4.2.6.2 As instalações devem ser providas de dispositivos automáticos para seccionar os curtos-circuitos entre fases, faltas à terra perigosas ou para indicar a condição de falta, dependendo principalmente do esquema de aterramento (ABNT, 2005, p.8).

2.4.7.2 ABNT NBR 5410 (Baixa Tensão)

A NBR 5410, foi elaborada no Comitê Brasileiro de Eletricidade (ABNT/CB-03), pela Comissão de Estudo de Instalações Elétricas de Baixa Tensão (CE-03:064.01), é intitulada *Instalações Elétricas de Baixa Tensão* (ABNT, 2004).

A versão em vigor é a de 2004 (corrigida em 2008), as versões anteriores foram: 1941, 1960, 1980 e 1997 (ABNT, 2012).

“As correntes de curto-circuito presumidas devem ser determinadas em todos os pontos da instalação julgados necessários. Essa determinação pode ser efetuada por cálculo ou por medição.” (ABNT, 2004, p. 65).

No *Guia Eletricidade Moderna da NBR 5410 (PROCOBRE, 2001)*, é apresentado um método simplificado para determinação das correntes de curto circuito para instalações de 220 V ou 380 V, utilizando-se de uma tabela com valores pré-determinados.

2.4.7.3 ABNT NBR 12243

A ABNT NBR 12243, foi elaborada no Comitê Brasileiro de Navios, Embarcações e Tecnologia Marítima (ABNT/CB-07), é intitulada *Cálculos de correntes de curto-circuito em sistemas C.A. a bordo de navios – Procedimento*. A versão de 1989 é a primeira publicação e ainda está em vigência. Ela fixa as condições exigíveis para cálculos nesta situação. (ABNT, 2012)

2.5 Softwares de Grandes Empresas

O grupo de softwares SIMARIS[®] da SIEMENS tem o intuito de auxiliar o planejamento elétrico, o SIMARIS[®] design faz o cálculo de rede e dimensionamento, sempre baseado em normas técnicas da IEC, incluindo cálculos de correntes de curto-circuito, fluxo de carga, queda de tensão e balanço de energia (SIEMENS, 2012).

A Figura 2.1 apresenta da área de trabalho do software, a distribuição é gratuita no site da SIEMENS.

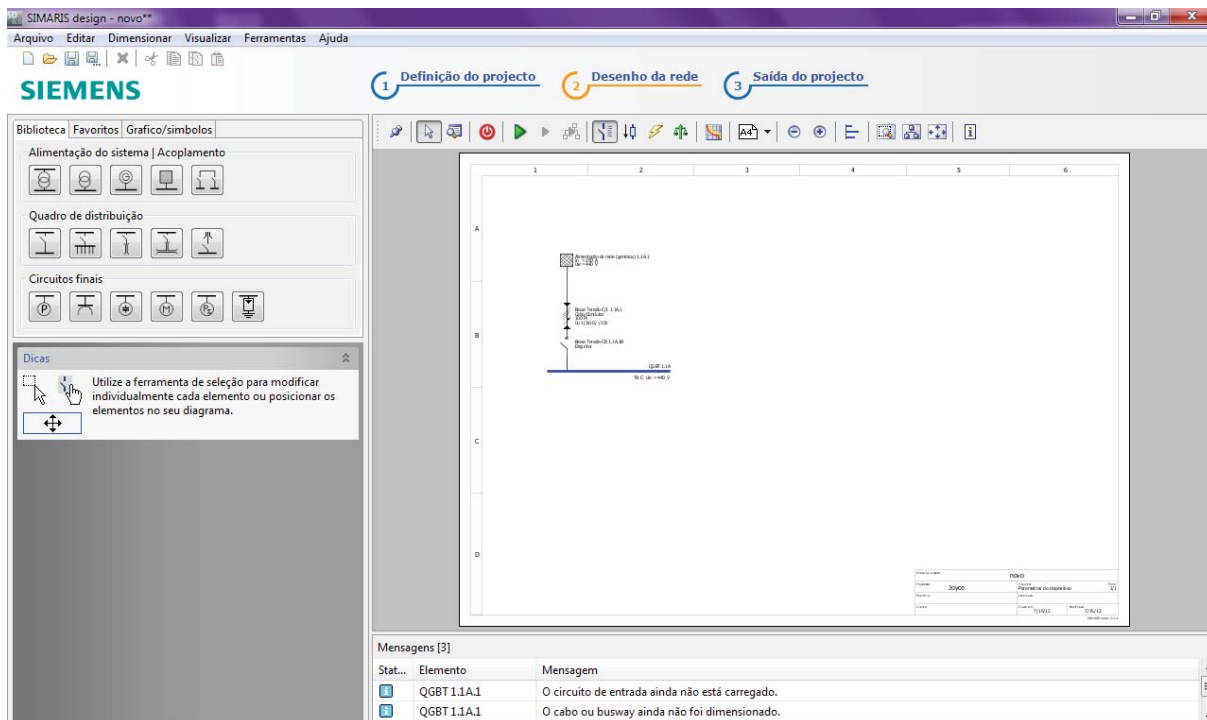


Figura 2.1 Área de Trabalho do SIMARIS design

O software DOCWin da ABB foi criado para o dimensionamento de instalações elétricas, ele calcula as correntes de curto-circuito máximas e mínimas, em todos os pontos da instalação, utilizando a IEC ou outro método (a escolha do projetista, como apresentado na Figura 2.2), e ainda auxilia a seletividade (ABB, 2012).

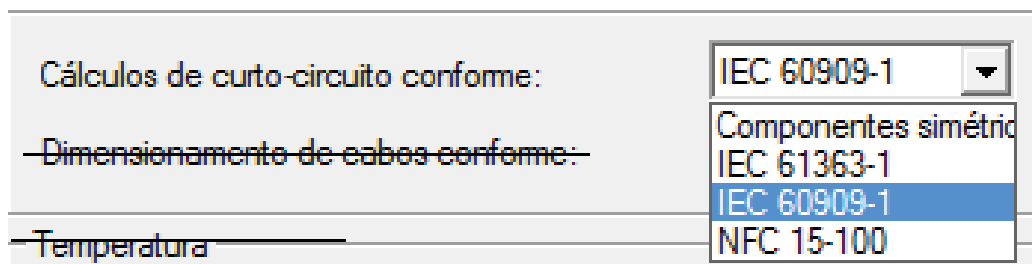


Figura 2.2 Opções de Método de Cálculo das Correntes de Curto-circuito no DOCWin

A Figura 2.3 apresenta a área de trabalho do software. O DOCWin é de distribuição gratuita no site da ABB.

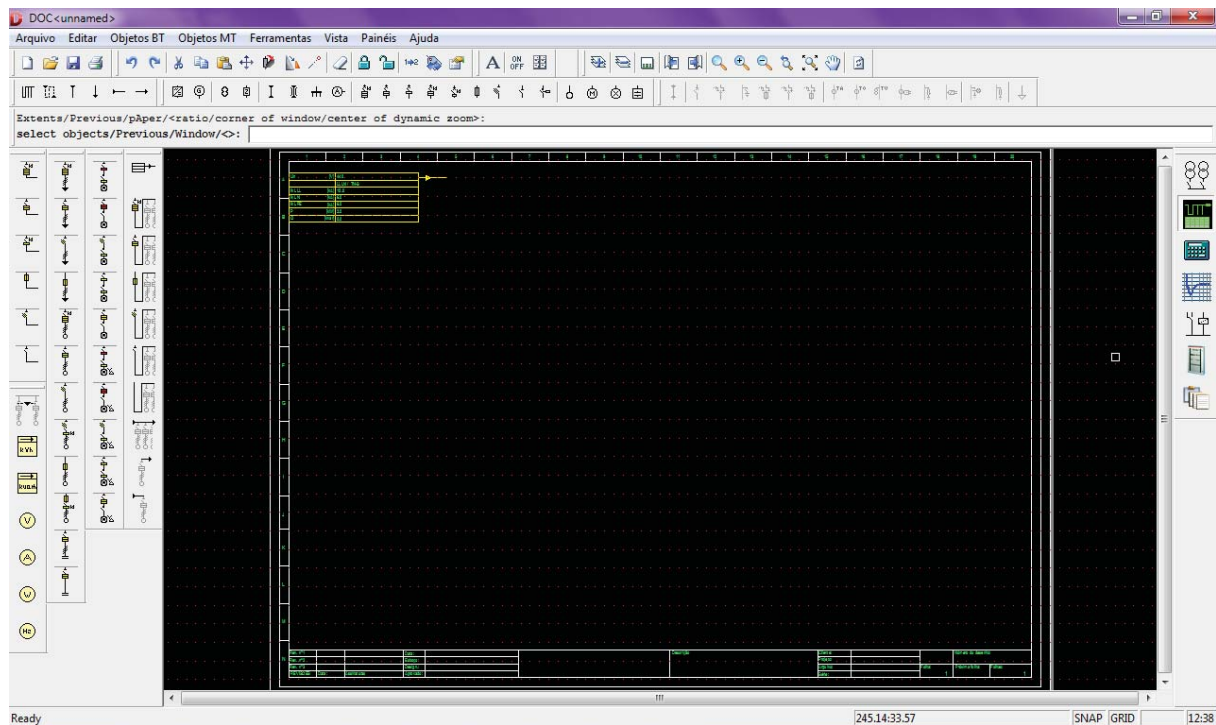


Figura 2.3 Área de Trabalho do DOCWin.

3 ASPECTOS CONCEITUAIS

3.1 Introdução

Os métodos apresentados por Cotrim (2009), Creder (2007) e Mamede Filho (2011) apresentam desenvolvimentos distintos e que envolvem alguns conceitos que devem ser apresentados para a sua compreensão.

3.2 Corrente de Curto-circuito

São correntes com altos valores de pico em curtos períodos (frações de segundos). Segundo Mamede Filho (2011) estes valores de pico são compreendidos entre dez e cem vezes a corrente nominal no ponto de defeito da instalação e dependem da localização deste. E são provocadas pela perda de isolamento de algum elemento energizado do sistema elétrico.

3.3 Fontes de Correntes de Curto-circuito

As correntes de frequência industrial (50/60 Hz) que circulam durante uma falta provêm de máquinas elétricas girantes ou dos capacitores de potência. Consideram-se fontes de correntes de curto-circuito os geradores síncronos, os motores e os compensadores síncronos, os motores e os sistemas das concessionárias (COTRIM, 2009).

3.4 Formas de Onda das Correntes de Curto-circuito

3.4.1 Corrente Simétrica de Curto-circuito

A corrente simétrica de curto-circuito possui a forma apresentada na Figura 3.1, na qual é observada a simetria em relação ao eixo do tempo; essa corrente assume tal condição após o transitório, ou seja, uma corrente de curto-circuito permanente. Esta é utilizada para determinar os efeitos térmicos das correntes de curto-circuito, logo seu cálculo é importante para a determinação dos equipamentos de proteção (MAMEDE FILHO, 2011).

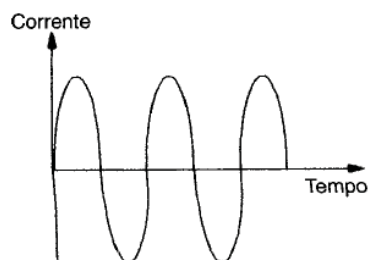


Figura 3.1 Corrente simétrica

3.4.2 Corrente assimétrica de curto-circuito

É aquela cuja componente senoidal da corrente se forma de maneira assimétrica em relação ao eixo do tempo. Pode assumir as seguintes características:

- Corrente parcialmente assimétrica

Nesse caso, a assimetria é de forma parcial, conforme a Figura 3.2.

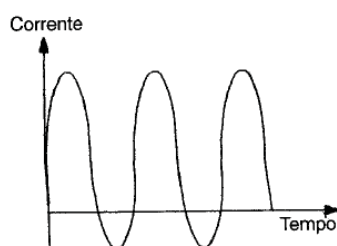


Figura 3.2 Corrente parcialmente assimétrica

- Corrente totalmente assimétrica

Neste caso, toda a onda senoidal se situa acima do eixo dos tempos, conforme a Figura 3.3.

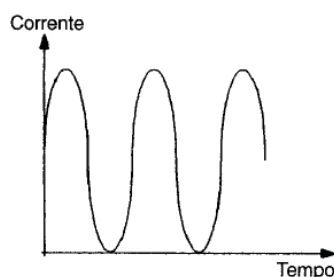


Figura 3.3 Corrente totalmente assimétrica

- Corrente inicialmente assimétrica e posteriormente simétrica.

Assume forma simétrica no início e, em seguida, tem forma assimétrica, conforme a Figura 3.4 (MAMEDE FILHO, 2011). Segundo Creder (2007), esta é o tipo mais comum.

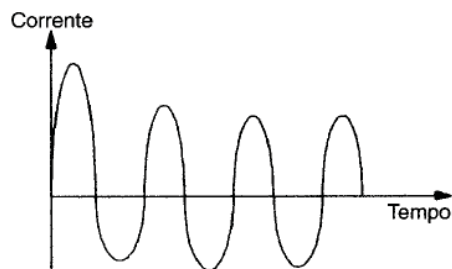


Figura 3.4 Corrente assimétrica e simétrica

3.5 Tipos de Curto-circuito

3.5.1 Curto-circuito Trifásico

Um curto-circuito trifásico se caracteriza quando as tensões nas três fases se anulam no ponto de defeito, conforme se mostra na Figura 3.5.

As correntes de curto-circuito trifásicas assumem valores maiores e são importantes para várias aplicações como:

- Ajustes dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente;
- Capacidade de interrupção dos disjuntores;
- Capacidade térmica dos cabos e equipamentos;
- Capacidade dinâmica dos equipamentos; e
- Capacidade dinâmica dos barramentos coletores.

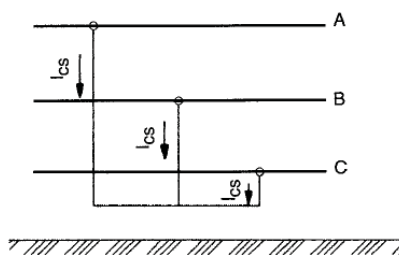


Figura 3.5 Curto-circuito trifásico

3.5.2 Curto-circuito fase-fase

No qual há o contato somente entre dois condutores de fases diferentes, conforme se observa na Figura 3.6.

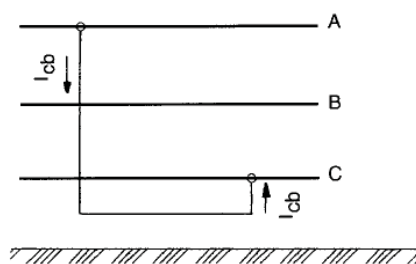


Figura 3.6 Curto-circuito fase-fase

3.5.3 Curto-circuito fase-fase-terra

No qual, além do contato entre as fases há a participação do elemento terra, de acordo com a Figura 3.7.

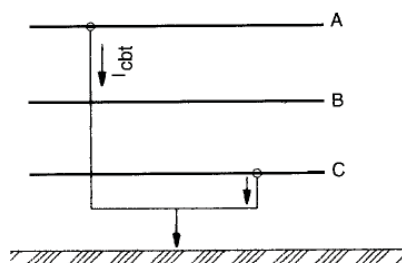


Figura 3.7 Curto-circuito fase-fase-terra

3.5.4 Curto-circuito Fase-terra

Pode ocorrer em duas situações diversas: na primeira, há somente o contato entre o condutor fase e terra, conforme a Figura 3.8; na segunda há o contato entre dois condutores fase e terra, de acordo com a Figura 3.9.

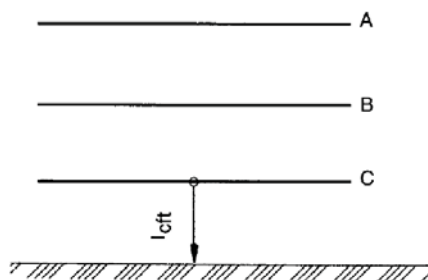


Figura 3.8 Curto-circuito fase-terra

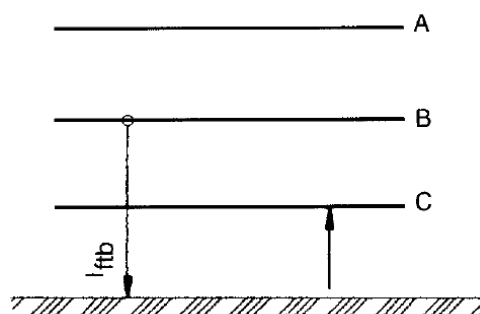


Figura 3.9 Curto-circuito com contato simultâneo

É necessário calcular as correntes de curto-circuito monopolares para os casos:

- Ajuste dos valores mínimos dos dispositivos de proteção contra sobrecorrentes;
- Seção mínima do condutor de uma malha de terra;
- Limite das tensões de passo e de torque; e
- Dimensionamento de resistor de aterramento (MAMEDE FILHO, 2011).

3.6 Efeitos das correntes de curto-circuito

As correntes de curto-circuito geram solicitações de natureza mecânica, atuando principalmente, sobre os barramentos, chaves e condutores, ocasionando o rompimento dos apoios e deformações na estrutura dos quadros de distribuição, caso o dimensionamento deste não seja adequado aos esforços eletromecânicos resultantes (MAMEDE FILHO, 2011).

As correntes de curto-circuito também ocasionam efeitos térmicos que, segundo Creder (2007), trazem consequências desastrosas. Este efeito térmico é traduzido pelo efeito Joule, como na corrente elétrica, porém, no mínimo, dez vezes maior, assim como a corrente de curto-circuito.

3.7 Métodos de cálculo das correntes de curto-circuito em instalações elétricas

3.7.1 Método apresentado em Cotrim (2009)

3.7.1.1 Considerações

A complexidade das instalações e dos equipamentos atuais, bem como a falta de parâmetros, muitas vezes, tornam extremamente complicados e mesmo impossíveis os cálculos de correntes de falta mais exatos. Normalmente, no cálculo de curto-circuito, é

desnecessária uma grande precisão e são usados processos aproximados que envolvem diversas hipóteses simplificadas. São elas:

- A falta é admitida distante de qualquer gerador (fonte) e é alimentada em um único ponto por uma rede de alimentação.
- A rede de baixa tensão é radial.
- Os valores de tensão de alimentação e as impedâncias os diferentes componentes são supostos como constantes.
- As resistências de contato e as impedâncias de falta não são levadas em consideração, isto é, consideram-se faltas diretas.
- A falta é simultânea em todas as fases, se for polifásica.
- As correntes de falta não são calculadas para faltas internas em um cabo de um conjunto de cabos paralelo.
- Não ocorrem modificações nos circuitos durante a falta; o número de fases envolvidas permanece o mesmo (por exemplo, um curto-circuito trifásico permanece trifásico durante a duração do curto).
- As capacitâncias das linhas e as admitâncias paralelas dos elementos passivos são desprezadas.
- As faltas duplas para a terra em diferentes locais não são consideradas.
- Os comutadores de derivações dos transformadores são admitidos na posição principal.
- As impedâncias de sequência negativa são admitidas iguais às de sequência positiva.
- A influência dos motores pode ser desprezada, desde que atendida à condição dada na equação (3.24).

Admitindo-se falta distante do gerador, como demonstra a equação (3.1).

$$I_k = I_k'' \quad (3.1)$$

Sendo:

- I_k = Corrente de curto-circuito permanente
 I_k'' = Corrente de curto-circuito simétrica inicial

3.7.1.2 Cálculos da impedância de curto-circuito

Para apresentação dos cálculos é considerado, na Figura 3.10, um sistema elétrico alimentado através de um transformador, onde ocorre a falta F no lado de baixa tensão.

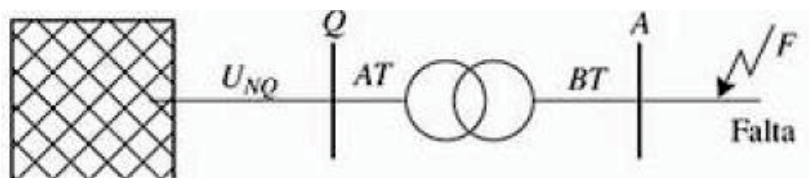


Figura 3.10 Diagrama unifilar de um sistema elétrico

O módulo da impedância equivalente de curto-circuito da sequência positiva Z_Q no ponto Q é dada pela equação (3.2).

$$Z_Q = \frac{c_Q \cdot U_{NQ} \times 10^3}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \quad (3.2)$$

Sendo:

- Z_Q = Impedância equivalente de curto-circuito da sequência positiva
- I''_{kQ} = Corrente de curto-circuito trifásica simétrica inicial.
- c_Q = Fator de tensão relativo ao barramento Q.
- U_{NQ} = Tensão nominal da rede

Se I''_{kmax} e I''_{kmin} não forem conhecidas e Z_Q for conhecido, deve-se calcular R_Q e X_Q pelas equações (3.3) e (3.4).

$$X_Q = 0,995 \cdot Z_Q \quad (3.3)$$

$$R_Q = 0,1 \cdot X_Q \quad (3.4)$$

Sendo

- R_Q = Resistência equivalente de curto-circuito da sequência positiva
- X_Q = Reatância equivalente de curto-circuito da sequência positiva

Se a potência aparente de curto-circuito S''_{kQ} é conhecida, utiliza-se a equação (3.5).

$$Z_Q = \frac{[U_Q]^2}{S''_{kQ}} \times 10^3 \quad (3.5)$$

Sendo:

- S''_{kQ} = Potência aparente de curto-circuito trifásica simétrica inicial.
- U_Q = Tensão da rede

A Impedância de Sequência Zero da rede de alta tensão não se faz necessária, pois os transformadores “desacoplam” esses sistemas do circuito.

Para transformadores utiliza-se a equação (3.6):

$$Z_T = R_T + jX_T \quad (3.6)$$

Sendo:

- Z_T = Impedância de sequência positiva do transformador
- R_T = Resistência de sequência positiva do transformador
- X_T = Reatância de sequência positiva do transformador

A impedância referida ao lado de baixa (Z_{TBT}) é dada pela equação (3.7).

$$Z_{TBT} = \frac{u_{kN}}{100} \cdot \frac{[U_{NT,BT}]^2}{S_{NT}} \quad (3.7)$$

Sendo:

- Z_{TBT} = Impedância do transformador referida ao lado de baixa
- S_{NT} = Potência aparente nominal.
- $U_{NT,BT}$ = Tensão nominal da baixa.
- u_{kN} = Impedância percentual do transformador

E a resistência referida do lado de baixa (R_{TBT}) é dada pela equação (3.8).

$$R_{TBT} = \frac{u_{RN}}{100} \cdot \frac{[U_{NT,BT}]^2}{S_{NT}} \quad (3.8)$$

Sendo:

- R_{TBT} = Resistência do transformador referida ao lado de baixa
- u_{RN} = Resistência percentual do transformador

Se as perdas no cobre P_{kN} e a corrente nominal de baixa tensão $I_{NT,BT}$ são conhecidas, pode-se utilizar a equação (3.9) para a para determinar a resistência referida ao lado de baixa.

$$R_{TBT} = \frac{P_{kN}}{3[I_{NT,BT}]^2} \times 10^3 \quad (3.9)$$

Sendo:

- P_{kN} = Perdas no Cobre
- $I_{NT,BT}$ = Corrente nominal da baixa.

Para a reatância referida ao lado de baixa (X_{TBT}) é dada pela equação (3.10).

$$X_{TBT} = \sqrt{Z_{TBT}^2 - R_{TBT}^2} \quad (3.10)$$

Sendo:

X_{TBT} = Reatância do transformador referida ao lado de baixa

A Tabela 3.1 apresenta valores típicos de tensão de curto-circuito e perdas no cobre de transformadores nacionais em relação a potência nominal, segundo a NBR 5356 (ABNT, 2007). A NBR 5356 considera como “valores típicos”, 4,0% até 630 kVA, inclusive, e 5,0% até 1.250 kVA.

Tabela 3.1 Valores típicos de transformadores nacionais (dados fornecidos por fabricantes) (ABNT, 2007).

Potência nominal (kVA)	Tensão de curto circuito (%)	Perdas no cobre (W)
15	3,5	340
30	3,5	570
45	3,5	780
75	3,5	1.140
112,5	3,5	1.500
150	3,5	1.910
225	4,5	2.700
300	4,5	3.360
500	5,0	6.800
750	5,0	12.650
1.000	5,0	14.550

As relações X_{0T}/X_{TBT} e R_{0T}/R_{TBT} são utilizadas para determinar a impedância de curto-circuito de sequência zero Z_{0T} dos transformadores, quando não informados pelo fabricante.

Para as linhas elétricas a impedância de curto-circuito de sequência positiva é dada pela equação (3.11).

$$Z_L = R_L + jX_L \quad (3.11)$$

Sendo:

Z_L = Impedância de sequência positiva do cabo

R_L = Resistência de sequência positiva do cabo

X_L = Reatância de sequência positiva do cabo

Na qual, para alta tensão, são empregadas as equações (3.12) e (3.13).

$$R_L = l \times \bar{R}'_L \quad (3.12)$$

$$X_L = l \times \bar{X}'_L \quad (3.13)$$

Sendo:

- l = Comprimento
- R'_L = Resistência relativa do cabo
- X'_L = Reatância relativa do cabo

Sendo \bar{R}'_L (mΩ/m) e \bar{X}'_L (mΩ/m) características dos cabos e são obtidos de catálogos dos fabricantes.

E para baixa tensão, são empregadas as equações (3.14) e (3.15):

$$R_L = l \times R'_L \quad (3.14)$$

$$X_L = l \times X'_L \quad (3.15)$$

Os valores mais comuns de R'_L e X'_L são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Valores da resistência e da reatância de condutores de cobre

Seção nominal (mm ²)	Resistência (mΩ/m)	Reatância Indutiva	
		Condutores Isolados (mΩ/m)	Cabos unipolares (mΩ/m)
1,5	12,1	0,1236	0,1585
2,5	7,41	0,1202	0,1459
4,0	4,61	0,1130	0,1430
6,0	3,08	0,1068	0,1335
10,0	1,83	0,1090	0,1262
16,0	1,15	0,1036	0,1175
25,0	0,727	0,1020	0,1146
35,0	0,524	0,0980	0,1095
50,0	0,387	0,0974	0,1090
70,0	0,268	0,0963	0,1038
95,0	0,193	0,0945	0,1024
120,0	0,153	0,0933	0,0993
150,0	0,124	0,0915	0,0990
185,0	0,0991	0,0916	0,0986
240,0	0,0754	0,0911	0,0976
300,0	0,0601	0,0918	0,0968

A impedância de curto-circuito de sequência zero Z_{oL} depende do percurso de retorno da corrente e pode ser medida ou calculada com as relações R_{oL}/R_L e X_{oL}/X_L .

Todas as impedâncias do lado de alta tensão (AT) devem ser referidas ao lado de baixa tensão (BT), através da relação de transformação nominal t_N , conforme a equação (3.16).

$$t_N = \frac{U_{NT,AT}}{U_{NT,BT}} \quad (3.16)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} t_N &= \text{Relação de transformação} \\ U_{NT,AT} &= \text{Tensão nominal no lado de AT} \end{aligned}$$

A impedância do lado de AT referidas ao lado de BT pode ser obtida com a equação (3.17).

$$Z_{AT,t} = \frac{1}{t_N^2} Z_{AT} \quad (3.17)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} Z_{AT,t} &= \text{Impedância do lado de AT, referida ao lado de BT} \\ Z_{AT} &= \text{Impedância total do lado de AT} \end{aligned}$$

3.7.1.3 Cálculos das correntes de falta

Pretende-se calcular:

- I_{k3} : corrente de curto-circuito trifásico permanente.
- I_{k2} : corrente de curto-circuito bifásico permanente.
- I_{k1} : corrente de falta direta fase-terra permanente.

Considerando-se a falta distante do gerador, a corrente trifásica é dada pela equação (3.18).

$$I''_{k3} = I_{k3} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \quad (3.18)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} U_N &= \text{Tensão nominal de linha no lado de BT} \\ Z_k &= \text{Impedância total vista do ponto em que ocorre a falta.} \\ c &= \text{Fator de tensão para o cálculo de correntes de curto-circuito máximo e mínimo, de acordo com a Tabela 3.3.} \end{aligned}$$

Tabela 3.3 Valores do fator de tensão c

Tensões nominais	Fator de tensão para cálculo de corrente de curto-circuito		
	Máxima $c_{\text{máx}}$	Mínima $c_{\text{mín}}$	
Baixa tensão	230/440 V	1,00	0,95
	Outros valores	1,05	1,00
Alta tensão		1,10	1,00

A equação (3.19) é utilizada no curto-circuito bifásico, utilizando-se as componentes simétricas, considerando $Z_1 = Z_2 = Z_k$.

Sendo:

Z_2 = Impedância de sequência negativa total

$$I''_{k2} = I_{k2} = \frac{c \cdot U_N}{2Z_k} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_{k3} \quad (3.19)$$

Para falta direta fase-terra (também com componentes simétricos), utiliza-se a equação (3.20).

$$I''_{k1} = I_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_N}{|2Z_1 + Z_0|} \quad (3.20)$$

Sendo:

Z_1 = Impedância de sequência positiva total

Z_0 = Impedância de sequência zero total

Onde, $Z_1 = Z_k$ é a impedância de curto-circuito total de sequência positiva e Z_0 a de sequência zero, dada pela equação (3.21).

$$Z_0 = Z_1 + 3Z_N \text{ ou } Z_0 = Z_1 + 3Z_{PE} \quad (3.21)$$

Sendo:

Z_N = Impedância do condutor neutro

Z_{PE} = Impedância do condutor de proteção

A equação (3.22) é conhecida.

$$U_0 = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \quad (3.22)$$

Sendo:

U_0 = Tensão de fase

Substituindo as equações (3.21) e (3.22) em (3.20), tem-se a equação (3.23).

$$I''_{k1} = I_{k1} = \frac{cU_0}{|Z_1 + Z_{PE}|} \quad (3.23)$$

3.7.1.4 Influência dos motores

A contribuição dos motores assíncronos à corrente de curto-circuito I''_k será desprezível se a equação (3.24) for verdadeira.

$$\sum I_M \leq 0,01 I''_k \quad (3.24)$$

Sendo:

$$\sum I_M = \text{Somatório das correntes nominais dos motores ligados diretamente à rede onde ocorre a falta.}$$

$$I''_k = \text{Corrente de curto-circuito simétrica inicial na ausência dos motores}$$

Quando esta condição não for satisfeita, pode-se considerar na maioria dos sistemas de baixa tensão uma contribuição, dada pela equação (3.25).

$$I_{kM} = 4 \cdot \sum I_M \quad (3.25)$$

Sendo:

$$I_{kM} = \text{Corrente de contribuição dos motores}$$

3.7.2 Método apresentado em Creder (2007)

3.7.2.1 Método simplificado

Inicialmente consideram-se apenas as impedâncias dos transformadores e despreza-se a resistência percentual do transformador, ou seja, $Z = X$.

Então se consideram equações de (3.26) a (3.31).

$$Z_b = \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} \quad (3.26)$$

$$Z\% = \frac{Z}{Z_b} \times 100 \quad (3.27)$$

$$N = \sqrt{3} \cdot V_n \cdot I_n \quad (3.28)$$

$$I = \frac{N}{\sqrt{3} \cdot V_n} \quad (3.29)$$

$$Z = \frac{Z\% \times Z_b}{100} \quad (3.30)$$

$$Z = Z\% \frac{V_n^2}{N \times 100} \quad (3.31)$$

Sendo:

- Z = Impedância do transformador em ohms;
- Z_b = Impedância-base em ohms;
- Z% = Impedância percentual do transformador;
- V_n = Tensão secundária do transformador;
- N = Potência aparente do transformador;
- I = Corrente
- I_n = Corrente nominal do transformador;
- I_{k₃} = Corrente trifásica de curto-circuito (eficaz).

Trabalhando a equação (3.26), obtêm-se a equação (3.32).

$$Z_b = \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} \rightarrow I_n = \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot Z_b} \quad (3.32)$$

É conhecido que a corrente de curto circuito é dada pela equação (3.33).

$$I_{k_3} = \frac{V_n}{\sqrt{3} \times Z} \quad (3.33)$$

Substituindo Z e I_n da equação (3.33) pelas equações (3.30) e (3.32), respectivamente, obtém-se a equação (3.34).

$$I_{k_3} = \frac{V_n}{\sqrt{3} \times Z} = \frac{V_n}{\sqrt{3} \times \left(\frac{Z\% \cdot Z_b}{100} \right)} = \frac{I_n}{Z\%} \times 100$$

$$I_{k_3} = \frac{I_n}{Z\%} \times 100 \quad (3.34)$$

Ou seja, para se conhecer a corrente de curto-circuito basta conhecer a corrente nominal e a impedância percentual.

Este método considera que o curto ocorrerá nos terminais do secundário do transformador, sendo indicado para estimativa da sobrecorrente nas proximidades do referido equipamento; tal procedimento não deve ser aplicado em circuitos, principalmente em decorrência de seu comprimento, cuja impedância alteraria significativamente os valores de corrente de curto-circuito.

3.7.2.2 Método detalhado

Tem-se um sistema elétrico com a sua fonte de Entrada, Transformadores, Cabos e Barramentos. Neste método é necessário conhecer as impedâncias da linha de entrada, dos transformadores, cabos e barramentos, por isso os valores finais devem ser inferiores aos apresentados no método simplificado.

1) Entrada

Dada a impedância de entrada pela equação (3.35), considerando a resistência nula.

$$Z_e = X_e = \frac{1,1 \cdot V^2}{N_{CC} \cdot 10^3} \quad R_e = 0 \quad (3.35)$$

Sendo:

V	=	Tensão de entrada
N_{CC}	=	Capacidade de ruptura exigida pela Concessionária
Z_e	=	Impedância de entrada
R_e	=	Resistência de entrada
X_e	=	Reatância de entrada

E dada a equação (3.36).

$$Z_e = \sqrt{R_e^2 + X_e^2} \quad (3.36)$$

2) Transformadores

São dadas as equações de (3.37) a (3.39).

$$Z_T = Z\% \cdot \frac{V^2}{N \cdot 100} \quad (3.37)$$

$$R_T = R\% \cdot \frac{V^2}{N \cdot 100} \quad (3.38)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (3.39)$$

Sendo:

- Z_T = Impedância do transformador
- R_T = Resistência do transformador
- X_T = Reatância do transformador
- $R\%$ = Resistência percentual do transformador

3) Cabos

- Resistência do cabo é dada pela equação (3.40).

$$R_L = \frac{\rho \cdot l}{An} \cdot 10^3 \quad (3.40)$$

Sendo:

- R_L = Resistência do cabo
- n = Número de condutores por fase
- A = Seção transversal do cabo
- l = Comprimento do cabo
- ρ = Resistividade elétrica do material do cabo

- Reatância do cabo é dada por (3.41).

$$X_L = x' \cdot \frac{l}{n} \quad (3.41)$$

Sendo:

- X_L = Reatância do cabo
- x' = Reatância relativa do cabo

4) Barramento

- Resistência do barramento é dada pela equação (3.42).

$$R_B = \frac{\rho \cdot l}{An} \cdot 10^3 \quad (3.42)$$

Sendo:

- n = Número de barramentos por fase
- A = Seção transversal do barramento
- R_B = Resistência do barramento

- Área da seção transversal do barramento, apresentado na Figura 3.11 é dada pela equação (3.43).

$$A = d \times h \quad (3.43)$$

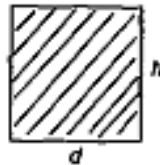


Figura 3.11 Seção transversal do barramento

Sendo:

- h = Altura do barramento
- d = Comprimento do barramento

- Reatância do barramento é dada pela equação (3.44).

$$X_B = x'' \cdot l \quad (3.44)$$

Sendo:

- X_B = Reatância do barramento
- x'' = Reatância relativa

Calcula-se então a impedância em cada ponto do circuito, e utilizando o valor obtido calcula-se a corrente de curto trifásica através da equação (3.32), com $Z_b = Z_t$ e obtém-se a equação (3.45).

$$I_{kA} = \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot Z_t} \quad (3.45)$$

Sendo:

- I_{kA} = Corrente de curto trifásica
- Z_t = Impedância total referenciada no ponto a ser analisado

Então, obtém-se λ (fator de assimetria), calculando R/X e utilizando-se a relação da Figura 3.12.

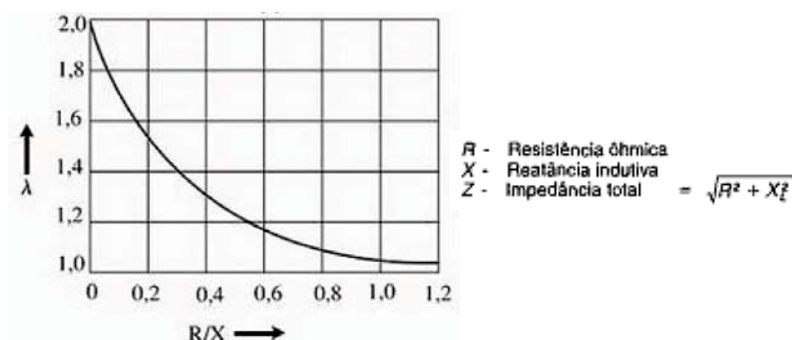


Figura 3.12 Relações de assimetria das correntes de curto-circuito

E, finalmente, calcula-se o valor de crista da corrente de curto-circuito trifásica, assimétrica, obtendo-se a equação (3.46).

$$I_{SA} = \lambda \cdot \sqrt{2} \cdot I_{kA} \quad (3.46)$$

Sendo:

I_{SA} = Valor de crista da corrente de curto assimétrica
 λ = Fator de assimetria

3.7.3 Método apresentado em Mamede Filho (2011)

3.7.3.1 Considerações iniciais

As correntes de curto-circuito devem ser calculadas em todos os pontos do circuito onde serão instalados os equipamentos de proteção, e os locais mais comuns desses equipamentos são:

- Ponto de entrega de energia (geralmente é fornecido pela concessionária);
- Barramento do Quadro Geral de Força (QGF);
- Barramento dos Centros de Controle de Motores (CCM);
- Terminais dos motores; e
- Barramentos dos Quadros de Distribuição de Luz (QDL).

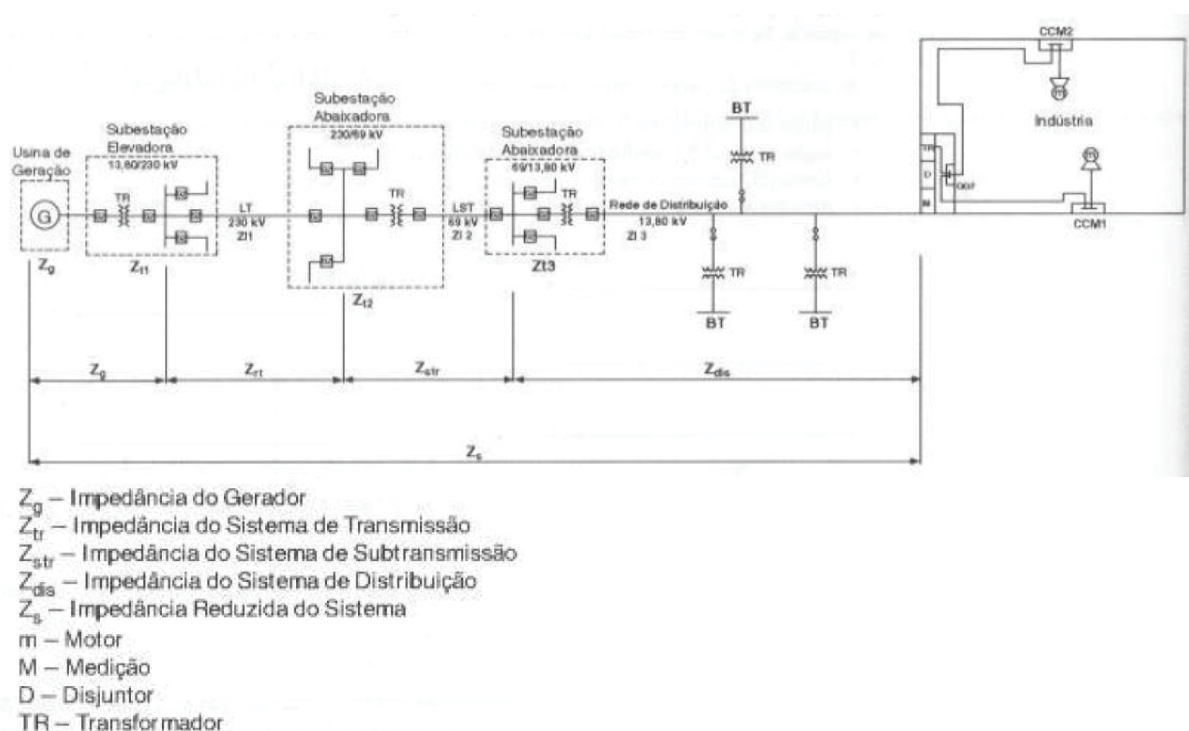
3.7.3.2 Impedâncias do sistema

No cálculo das correntes de curto-circuito os elementos do circuito são representados através de impedâncias, mas algumas dessas impedâncias podem ser desprezadas.

Quanto menor a tensão do sistema, mais impedâncias devem ser representadas, dado a sua importância no valor final da corrente.

a) Impedância reduzida do sistema

Representa todas as impedâncias do sistema, da fonte ao ponto de entrega de energia, como apresentado na Figura 3.13.



3.13 Diagrama de um sistema de geração/transmissão/subtransmissão/distribuição consumidor

A concessionária, geralmente, fornece o valor da Impedância Reduzida do Sistema (Z_s) ou a corrente de curto-circuito no ponto de entrega de energia.

b) Impedância do sistema primário (tensão acima de 2400 V)

Representa as impedâncias dos componentes conectados na tensão superior a 2400 V. Isto é:

- Transformadores de força;
- Circuitos condutores nus ou isolados de grande comprimento; e

- Reatores limitadores.

c) Impedância do sistema secundário

Representa as impedâncias de todos os componentes dos circuitos de tensão a partir do transformador abaixador.

- Circuitos condutores nus ou isolados de grande comprimento;
- Reatores limitadores;
- Barramentos de painéis de comando de comprimento superior a 4m; e
- Impedância dos motores quando se levar em consideração a sua contribuição.

Podem ser dispensadas as impedâncias dos autotransformadores.

3.7.3.3 Metodologia de cálculo

Inicia-se considerando uma indústria com o layout apresentado na Figura 3.14.

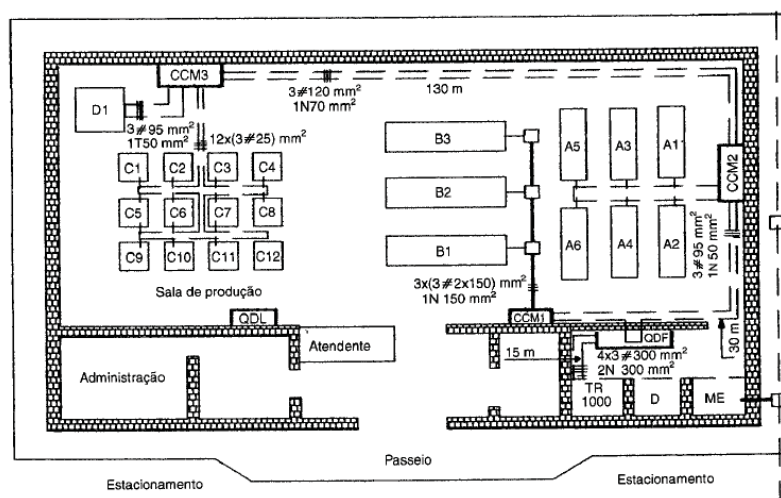


Figura 3.14 Layout de uma indústria

A Figura 3.14 é a base para elaborar o diagrama unifilar simplificado da Figura 3.15 e o diagrama de blocos da Figura 3.16.

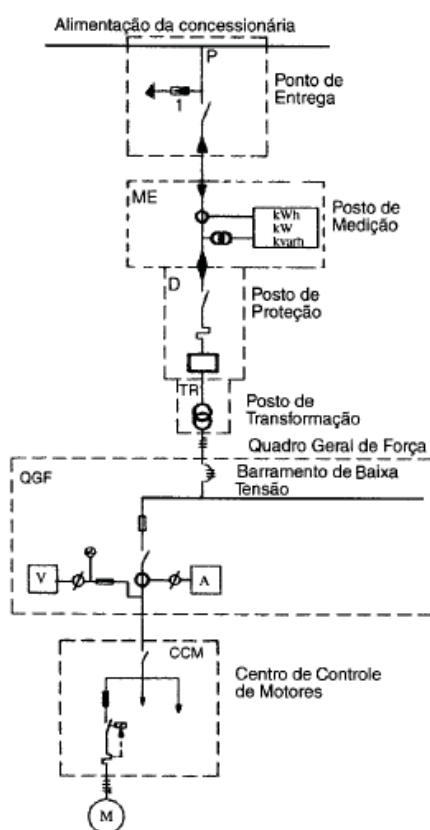


Figura 3.15 Diagrama unifilar simplificado

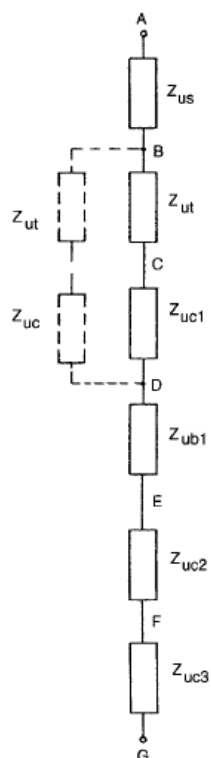


Figura 3.16 Diagrama de blocos

Para simplificar os cálculos utilizará de valores por unidade (pu), tendo como P_b , em kVA e a tensão secundária do transformador da subestação V_b , em kV.

Considera-se também que o valor da impedância do diagrama de sequência negativa é igual ao da impedância de sequência positiva, logo é necessário calcular apenas a impedância de sequência zero e positiva.

3.7.3.4 Sequência de cálculo

a) Impedância reduzida do sistema (Z_{us})

A resistência reduzida do sistema é muito pequena em relação à reatância reduzida do sistema, logo essa pode ser desprezada, como apresentado na equação (3.47).

$$R_{us} \cong 0 \quad (3.47)$$

Sendo:

R_{us} = Resistência de entrada

A potência de curto-circuito é dada pela equação (3.48).

$$P_{cc} = \sqrt{3} \times V_{np} \times I_{cp} \quad (3.48)$$

Sendo:

P_{cc} = Potência de curto-circuito no ponto de entrega da concessionária

V_{np} = Tensão nominal primária no ponto de entrega

I_{cp} = Corrente de curto-circuito simétrica

A reatância reduzida do sistema em pu é dada pela equação (3.49), logo a impedância reduzida do sistema é dada pela equação (3.50).

$$X_{us} = \frac{P_b}{P_{cc}} \quad (3.49)$$

$$\vec{Z}_{us} = R_{us} + jX_{us} \quad (3.50)$$

Sendo:

X_{us} = Reatância do sistema

P_b = Potência de base

Z_{us} = Impedância do sistema

b) Impedância dos transformadores da subestação (Z_t)

Considerando:

P_{Cu} = Perdas ôhmicas no cobre, obtida na Tabela 3.4

P_{nt} = Potência nominal

Z_{pt} = Impedância percentual no transformador

V_{nt} = Tensão nominal

Então a resistência relativa percentual será dada pela equação (3.51).

$$R_{pt} = \frac{P_{Cu}}{10 \times P_{nt}} \quad (3.51)$$

Sendo:

R_{pt} = Resistência relativa percentual

Tabela 3.4 Perdas ôhmicas no cobre

Potência kVA	Tensão V	Perdas no Cobre W
15	220 a 440	300
30	220 a 440	570
45	220 a 440	750
75	220 a 440	1200
112,5	220 a 440	1650
150	220 a 440	2050
225	380 ou 440	900
300	220 380 ou 440	1120
500	220 380 ou 440	1700
750	220 380 ou 440	2000
1000	220 380 ou 440	3000
1500	220 380 ou 440	4000

A reatância do circuito que conecta o transformador ao QGF é dada pela equação

R_{ut} é dado pela equação (3.52).

$$R_{ut} = R_{pt} \times \frac{P_b}{P_{nt}} \times \left(\frac{V_{nt}}{V_b} \right)^2 \quad (3.52)$$

Sendo:

R_{ut} = Resistência do transformador

V_b = Tensão base

A impedância unitária do transformador (Z_{ut}) é dada, então, pela equação (3.53).

$$Z_{ut} = Z_{pt} \times \frac{P_b}{P_{nt}} \times \left(\frac{V_{nt}}{V_b} \right)^2 \quad (3.53)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} Z_{ut} &= \text{Impedância do transformador} \\ Z_{pt} &= \text{Impedância percentual do transformador} \end{aligned}$$

E a reatância unitária do transformador X_{ut} é dada pela equação (3.54).

$$X_{ut} = \sqrt{Z_{ut}^2 - R_{ut}^2} \quad (3.54)$$

Sendo:

$$X_{ut} = \text{Reatância do transformador}$$

Finalmente, a impedância do transformador é dada pela equação (3.55)

$$\vec{Z}_{ut} = R_{ut} + jX_{ut} \quad (3.55)$$

- c) Impedância do circuito que conectam o transformador ao QGF (Z_{uc1}) e do circuito que conecta o QGF ao CCM (Z_{uc2})

A resistência do circuito ($R_{c1\Omega}$) que conecta o transformador ao QGF é dada pela equação (3.56) em ohms e pela equação (3.58) em pu (R_{uc1}) e a do circuito que conecta o QGF ao CCM é dada pela equação (3.57) em ohms ($R_{c2\Omega}$) e pela equação (3.59) em pu (R_{uc2}).

$$R_{c1\Omega} = \frac{R_{u\Omega} \times L_{c1}}{1.000 \times N_{c1}} \quad (3.56)$$

$$R_{c2\Omega} = \frac{R_{u\Omega} \times L_{c2}}{1.000 \times N_{c2}} \quad (3.57)$$

$$R_{uc1} = R_{c1\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \quad (3.58)$$

$$R_{uc2} = R_{c2\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \quad (3.59)$$

Sendo:

- $R_{u\Omega}$ = Resistência do condutor de sequência positiva
- L_{c2} = Comprimento do circuito, medido entre os terminais do barramento do QGF e o ponto de conexão com o barramento do CCM
- L_{c1} = Comprimento do circuito, medido entre os terminais do transformador e o ponto de conexão com o barramento
- N_{c1} = Número de condutores por fase do circuito mencionado.
- ou
- N_{c2}

A reatância do circuito ($X_{c1\Omega}$) que conecta o transformador ao QGF é dada pela equação (3.60) em ohms e pela equação (3.62) em pu (X_{uc1}) e a do circuito que conecta o QGF ao CCM é dada pela equação (3.61) em ohms ($X_{c2\Omega}$) e pela equação (3.63) em pu (X_{uc2}).

$$X_{c1\Omega} = \frac{X_{u\Omega} \times L_{c1}}{1.000 \times N_{c1}} \quad (3.60)$$

$$X_{c2\Omega} = \frac{X_{u\Omega} \times L_{c2}}{1.000 \times N_{c2}} \quad (3.61)$$

$$X_{uc1} = X_{c1\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \quad (3.62)$$

$$X_{uc2} = X_{c2\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \quad (3.63)$$

Sendo:

- $X_{u\Omega}$ = Reatância relativa de sequência positiva do condutor fase
- $X_{c\Omega}$ = Reatância do circuito, em ohm
- X_{uc} = Reatância do circuito, em pu

Os valores da resistência e reatância do condutor de sequência positiva são dados pela Tabela 3.5.

Tabela 3.5 Impedâncias de sequência positiva e zero

Seção	Impedância de sequência positiva (mΩ/m)		Impedância de sequência zero (mΩ/m)	
	Resistência	Reatância	Resistência	Reatância
1,5	14,8137	0,1378	16,6137	2,9262
2,5	8,8882	0,1345	10,6882	2,8755
4	5,5518	0,1279	7,3552	2,8349
6	3,7035	0,1225	5,5035	2,8000
10	2,2221	0,1207	4,0222	2,7639
16	1,3899	0,1173	3,1890	2,7173
25	0,8891	0,1164	2,6891	2,6692
35	0,6353	0,1128	2,4355	2,6382
50	0,4450	0,1127	2,2450	2,5991
70	0,3184	0,1096	2,1184	2,5681
95	0,2352	0,1090	2,0352	2,5325
120	0,1868	0,1076	1,9868	2,5104
150	0,1502	0,1074	1,9502	2,4843
185	0,1226	0,1073	1,9226	2,4594
240	0,0958	0,1070	1,8958	2,4312
300	0,0781	0,1068	1,8781	2,4067
400	0,0608	0,1058	1,8608	2,3757
500	0,0507	0,1051	1,8550	2,3491
630	0,0292	0,1042	1,8376	2,3001

A reatância do circuito que conecta o transformador ao QGF é dada pela equação (3.64) em pu (Z_{uc1}) e a do circuito que conecta o QGF ao CCM em pu (Z_{uc2}) é dada pela equação (3.65).

$$\vec{Z}_{uc1} = R_{uc1} + jX_{uc1} \quad (3.64)$$

$$\vec{Z}_{uc2} = R_{uc2} + jX_{uc2} \quad (3.65)$$

Sendo:

$$Z_{uc} = \text{Impedância do condutor}$$

Quando há dois ou mais transformadores ligados em paralelo, deve-se calcular a impedância série de cada transformador com o circuito que o liga ao QGF e então calcular o paralelo destes valores.

Para transformadores de impedâncias iguais e circuitos com condutores de mesma seção e comprimento, a impedância do circuito que conecta o transformador aos QGF é dada pela equação (3.66).

$$\vec{Z}_{c1\Omega} = \frac{\vec{Z}_{1cir}}{N_{trp}} \quad (3.66)$$

Sendo:

\vec{Z}_{1cir} = Impedância do circuito, compreendendo o transformador e condutores
 N_{trp} = Número de transformadores em paralelo.

d) Impedância do barramento do QGF (Z_{ub1})

Cálculo da resistência do barramento do QGF (R_{ub1}) é dado, em ohms, pela equação (3.67) e em pu pela equação (3.68).

$$R_{b1\Omega} = \frac{R_{u\Omega} \times L_b}{1.000 \times N_{b1}} \quad (3.67)$$

$$R_{ub1} = R_{b1\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \quad (3.68)$$

Sendo:

$R_{b\Omega}$ = Resistência ôhmica da barra
 L_b = Comprimento da barra
 N_{b1} = Número de barras em paralelo
 R_{ub} = Resistência da barra

Cálculo da reatância do barramento do QGF (X_{ub1}) é dado, em ohms, pela equação (3.69) e em pu pela equação (3.70).

$$X_{b1\Omega} = \frac{X_{u\Omega} \times L_b}{1.000 \times N_{b1}} \quad (3.69)$$

$$X_{ub1} = X_{b1\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \quad (3.70)$$

Sendo:

$X_{ub\Omega}$ = Reatância ôhmica da barra
 X_{ub} = Reatância da barra

Os valores da impedância e reatância ôhmica da barra são dados pela Tabela 3.6.

Tabela 3.6 Barras de cobre sem pintura

Dimensões (mm x mm)	Corrente (A)	Resistência (mΩ/m)	Reatância (mΩ/m)
12,7 x 1,59	96	0,8843	0,2430
19,0 x 1,59	128	0,8591	0,2300
25,4 x 1,59	176	0,4421	0,2280
12,7 x 1,59	144	0,4421	0,2430
19,0 x 3,18	208	0,2955	0,2330
25,4 x 3,18	250	0,2210	0,2070
38,1 x 3,18	370	0,1474	0,1880
25,4 x 4,77	340	0,1474	0,2100
38,1 x 4,77	460	0,0982	0,1880
50,8 x 4,77	595	0,0736	0,1700
25,4 x 6,35	400	0,1110	0,2100
38,1 x 6,35	544	0,0738	0,1870
50,8 x 6,35	700	0,0553	0,1670
63,5 x 6,35	850	0,0442	0,1550
70,2 x 6,35	1.000	0,0400	0,1510
88,9 x 6,35	1.130	0,0316	0,1450
101,6 x 6,35	1.250	0,0276	0,1320
25,4 x 12,70	600	0,0553	0,1870
50,8 x 12,70	1.010	0,0276	0,1630
76,2 x 12,70	1.425	0,0184	0,1450
101,6 x 12,77	1.810	0,0138	0,1300

Então, finalmente, a impedância do barramento do QGF é dada pela equação (3.71).

$$\vec{Z}_{ub1} = R_{ub1} + jX_{ub1} \quad (3.71)$$

Sendo:

$$Z_{ub} = \text{Impedância da barra}$$

e) Impedância do circuito que conecta o CCM aos terminais do motor

A impedância total neste caso é desprezível, pois as dimensões do barramento são pequenas. Se as dimensões forem maiores que 4m deve-se considerar o efeito da impedância como nas equações de (3.57) a (3.65). Com relação ao barramento do QGF também é válido este comentário.

f) Cálculo das correntes

Para obter a corrente simétrica de curto-circuito trifásico é necessária a impedância total, através da soma vetorial das impedâncias do circuito, calculadas anteriormente dada pela equação (3.72).

$$\vec{Z}_{utot} = \sum_{i=1}^{i=n} (R_{ui} + jX_{ui}) \quad (3.72)$$

Sendo:

$$Z_{utot} = \text{Impedância total}$$

Corrente de base para utilização dos valores pu é dada pela equação (3.73).

$$I_b = \frac{P_b}{\sqrt{3} \times V_b} \quad (3.73)$$

Sendo:

$$I_b = \text{Corrente base}$$

A corrente de curto-circuito simétrica, valor eficaz, é então dada pela equação (3.74).

$$\vec{I}_{cs} = \frac{I_b}{1.000 \times \vec{Z}_{utot}} \quad (3.74)$$

Sendo:

$$I_{cs} = \text{Corrente de curto-circuito trifásica}$$

A equação (3.75) é utilizada para calcular a corrente nos terminais do transformador.

$$I_{cst} = \frac{I_n}{Z_{pt\%}} \times 100 \quad (3.75)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} I_{cst} &= \text{Corrente de curto-circuito nos terminais do transformador} \\ I_n &= \text{Corrente nominal do transformador} \\ Z_{pt\%} &= \text{Impedância percentual do transformador} \end{aligned}$$

Para a corrente assimétrica de curto-circuito trifásico utiliza-se a equação (3.76).

$$I_{ca} = F_a \times I_{cs} \quad (3.76)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} F_a &= \text{Fator de assimetria determinado segundo a relação obtida na Figura 3.11.} \\ I_{ca} &= \text{Corrente de curto-circuito assimétrica} \end{aligned}$$

Impulso da corrente de curto-circuito (I_{cim}) é obtido através da equação (3.77).

$$I_{cim} = \sqrt{2} \times I_{ca} \quad (3.77)$$

Sendo:

I_{cim} = Impulso da corrente de curto-circuito

E a corrente de curto-circuito bifásica (I_{cb}) é dada pela equação (3.78).

$$I_{cb} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{cs} \quad (3.78)$$

Sendo:

I_{cb} = Corrente de curto-circuito bifásica

Para o cálculo da corrente de curto-circuito fase-terra é necessário conhecer as impedâncias de sequência zero, que são a resistência de contato (R_{ct}), resistência de malha terra (R_{mt}) e resistência de aterramento (R_{at}) apresentadas no esquema da Figura 3.17.

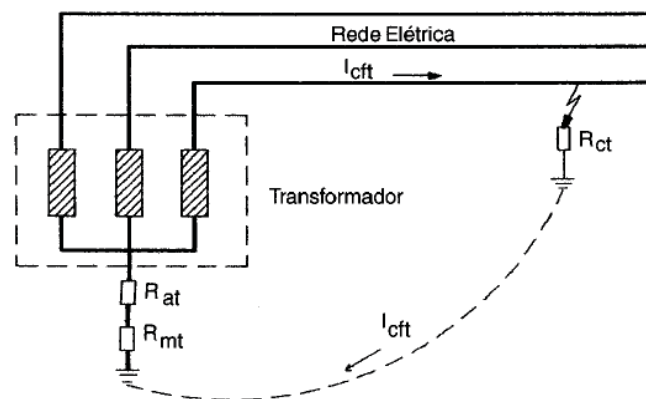


Figura 3.17 Percurso da corrente de curto-circuito fase-terra

Para resistência da malha terra pode-se medir ou calcular, o valor máximo permitido pelas concessionárias é de 10Ω , nos sistemas de 15 a 25 kV é caracterizado por seu componente resistivo. A impedância de aterramento depende do projeto. Então, a corrente de curto circuito fase-terra máxima (I_{fctma}) é dada pela equação (3.79).

$$\vec{I}_{fctma} = \frac{3 \times I_b}{2 \times \vec{Z}_{utot} + \vec{Z}_{u0t} + \vec{Z}_{u0c}} \quad (3.79)$$

Sendo:

Z_{u0t} = Impedância de sequência zero do transformador que é igual à sua impedância de sequência positiva.

Z_{u0c} = Impedância de sequência zero de contato

Para o cálculo de \vec{Z}_{u0c} é utilizada a equação (3.80) e são utilizadas a resistência e a reatância de sequência zero dos condutores, como apresentado nas equações (3.81) e (3.82), para os barramentos esta pode ser desprezada pois é muito insignificante nos cálculos.

$$\vec{Z}_{u0c} = R_{u0c} + jX_{u0c} \quad (3.80)$$

$$R_{u0c} = R_{c\Omega 0} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \quad (3.81)$$

$$X_{u0c} = X_{c\Omega 0} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \quad (3.82)$$

Sendo:

- $R_{c\Omega 0}$ e $X_{c\Omega 0}$ = Resistência e reatância de sequência zero (Tabela 3.5).
- R_{u0c} = Resistência de sequência zero de contato
- X_{u0c} = Reatância de sequência zero de contato

Para calcular a corrente de curto-circuito fase-terra mínima (I_{cftmi}) utiliza-se a equação (3.83).

$$\vec{I}_{cftmi} = \frac{3 \times I_b}{2 \times \vec{Z}_{utot} + \vec{Z}_{u0c} + \vec{Z}_{u0t} + 3 \times (R_{uct} + R_{umt} + R_{uat})} \quad (3.83)$$

Sendo:

- R_{uct} = Resistência de contato, em pu.
- R_{umt} = Resistência malha terra, em pu
- R_{uat} = Resistência de aterramento, em pu

Para calcular tais resistências utilizam-se as equações de (3.84) a (3.86).

$$R_{uct} = R_{ct} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \quad (3.84)$$

$$R_{umt} = R_{mt} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \quad (3.85)$$

$$R_{uat} = R_{at} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \quad (3.86)$$

3.7.3.5 Influência dos Motores de Indução nas correntes de falta

Segundo o autor, quando ocorre uma falta os motores de indução ficam submetidos a uma tensão praticamente nula, provocando sua parada. Porém a inércia do rotor e da carga faz com que o movimento continue e o motor passa a atuar no sistema como um gerador. Nos

motores de tensão nominal acima de 600 V e de alta potência tem grande influência nas correntes de falta (25% nas bases de potência e tensão nominais), para os motores pequenos (220 V, 380 V e 440 V – comuns em sistemas industriais) a influência é pequena, cuja reatância equivalente é igual a 25% na base das potências e para os motores de alta potência e tensão nominal inferior a 600 V a impedância será de 28% (na base da potência e tensões nominais).

4 APLICAÇÃO

4.1 Introdução

Tendo em vista que o conceito de curto-circuito é algo bem estabelecido, coexistem métodos de cálculo de diferentes graus de complexidade, toda via existem necessidades distintas que exigem ferramentas analíticas que tornam o cálculo mais eficaz.

4.2 Sistema elétrico teórico a ser analisado

A estrutura apresentada na Figura 4.1 é a base para os métodos propostos por Cotrim (2009), Creder (2007) e Mamede Filho (2008), onde-se calcula as correntes de curto-circuito devido à falha F indicada.

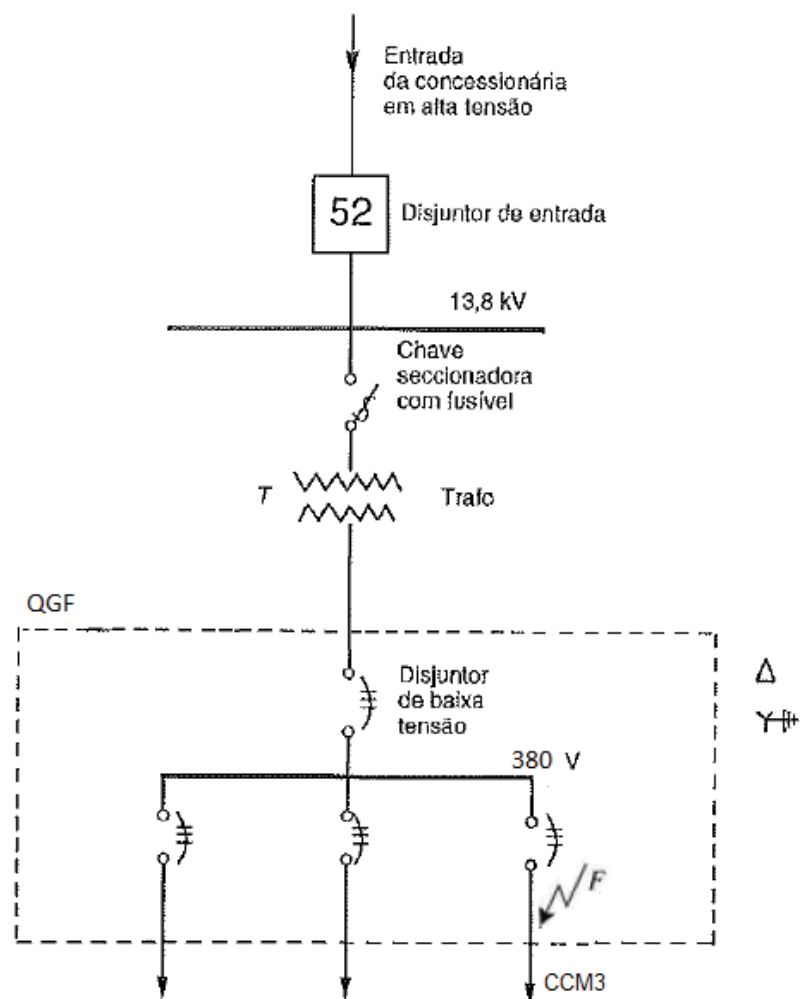


Figura 4.1 Diagrama unifilar da subestação

Dados:

S_t	=	1000	kVA	Potência dos transformadores
V_p	=	13,8	kV	Tensão primária
V_s	=	380	V	Tensão secundária
$Z_{\%}$	=	5,5	%	Impedância percentual do transformador
$R_{\%}$	=	1,1	%	Resistência percentual do transformador
I_{cc}	=	5,0	kA	Corrente de curto-circuito no ponto de entrega
S_{CC}	=	120	MVA	Potência de curto-circuito da concessionária
Conexão dos transformadores:				Δ/Y

4.2.1 Método apresentado em Cotrim (2009)

Iniciando a análise pela concessionária, aplicando a equação (3.2) com os dados:

$$\begin{aligned} c_Q &= 1,1 \quad (\text{Tabela 3.3}) \\ U_{nQ} &= 13,8 \quad \text{kV} \\ I''_{kQ} &= 5,0 \quad \text{kA} \end{aligned}$$

$$Z_Q = \frac{c_Q \cdot U_{nQ} \times 10^3}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} = \frac{1,1 \times 13,8 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 5,0} \Rightarrow Z_Q = 1.752,8 \text{ m}\Omega$$

Em seguida, utilizam-se as equações (3.3) e (3.4).

$$\begin{aligned} X_Q &= 0,995 \cdot Z_Q = 0,995 * 1752,8 \Rightarrow X_Q = 1.744,1 \text{ m}\Omega \\ R_Q &= 0,1 \cdot X_Q = 0,1 * 1744,1 \Rightarrow R_Q = 174,4 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

Logo,

$$\underline{Z_Q = 174,4 + j1.744,1 \text{ [m}\Omega\text{]}}$$

Então, faz-se o cálculo da impedância do cabo da concessionária ao transformador, aplicando as equações (3.14) e (3.15), com os dados do cabo.

$$\begin{aligned} l &= 1,7 \quad \text{km} \\ R'_{L1} &= 0,1510 \quad \text{m}\Omega/\text{m} \\ X'_{L1} &= 0,1320 \quad \text{m}\Omega/\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{L1} &= l \times R'_{L1} = 1700 \times 0,1510 \Rightarrow R_{L1} = 256,7 \text{ m}\Omega \\ X_{L1} &= l \times X'_{L1} = 1700 \times 0,1320 \Rightarrow X_{L1} = 224,4 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

Logo,

$$\underline{Z_{L1} = 256,7 + j224,4 \text{ [m}\Omega\text{]}}$$

Então, é necessário referir as impedâncias no lado de baixa, aplicando a equação (3.16), sabe-se a relação de transformação.

$$t_N = \frac{U_{NT,AT}}{U_{NT,BT}} = \frac{13.800}{380} \Rightarrow t_N = 36,3$$

Referindo as impedâncias do lado de AT ao lado de BT, utiliza-se a equação (3.17).

$$Z_{AT,t} = \frac{1}{t_N^2} Z_{AT} = \frac{1}{36,3^2} [(174,4 + 256,7) + j(1744,1 + 224,4)] \Rightarrow$$

$$Z_{AT,t} = 0,327 + j1,493 [m\Omega]$$

Para calcular a impedância e a resistência do transformador, utilizam-se as equações (3.7) e (3.8) e a impedância e resistência percentuais dadas.

$$Z_{TBT} = \frac{u_{kN}}{100} \cdot \frac{[U_{NT,BT}]^2}{S_{NT}} = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{380^2}{1000} \Rightarrow Z_{TBT} = 7,942 \text{ m}\Omega$$

$$R_{TBT} = \frac{u_{RN}}{100} \cdot \frac{[U_{NT,BT}]^2}{S_{NT}} = \frac{1,1}{100} \cdot \frac{380^2}{1000} \Rightarrow R_{TBT} = 1,588 \text{ m}\Omega$$

E para a reatância do transformador utiliza-se a equação (3.10).

$$X_{TBT} = \sqrt{Z_{TBT}^2 - R_{TBT}^2} = \sqrt{7,942^2 - 1,588^2} \Rightarrow X_{TBT} = 7,782 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{TBT} = 1,588 + j7,782 [m\Omega]$$

No cabo do transformador ao barramento principal, utilizando as equações (3.14) e (3.15) e os dados abaixo.

$$\begin{aligned} l_{L2} &= 15 \text{ m} \\ S_{L2} &= 300 \text{ mm}^2 \\ R'_{L2} &= 0,0601 \text{ m}\Omega/\text{m} \quad (\text{Tabela 3.2}) \\ X'_{L2} &= 0,0918 \text{ m}\Omega/\text{m} \quad (\text{Tabela 3.2}) \end{aligned}$$

$$R_{L2} = l \times R'_{L2} = 15 \times 0,0601 \Rightarrow R_{L2} = 0,902 \text{ m}\Omega$$

$$X_{L2} = l \times X'_{L2} = 15 \times 0,0918 \Rightarrow X_{L2} = 1,377 \text{ m}\Omega$$

Logo,

$$Z_{L2} = 0,902 + j1,377 [m\Omega]$$

Para o cálculo do cabo do barramento principal ao CCM, utilizam-se as equações (3.14) e (3.15) e os dados abaixo.

$$\begin{aligned} l &= 130 \text{ m} \\ S &= 120 \text{ mm}^2 \\ R'_{L3} &= 0,1530 \text{ m}\Omega/\text{m} \quad (\text{Tabela 3.2}) \\ X'_{L3} &= 0,0933 \text{ m}\Omega/\text{m} \quad (\text{Tabela 3.2}) \end{aligned}$$

$$R_{L3} = l \times R'_{L3} = 130 \times 0,1530 \Rightarrow R_{L3} = 19,89 \text{ m}\Omega$$

$$X_{L3} = l \times X'_{L3} = 130 \times 0,0933 \Rightarrow X_{L3} = 12,13 \text{ m}\Omega$$

Logo,

$$Z_{L3} = 19,89 + j12,13 [m\Omega]$$

Para calcular a corrente de curto-circuito é necessário somar todas as impedâncias e obter a impedância total do sistema.

$$Z_t = (0,327 + 1,588 + 0,902 + 19,89) + j(1,493 + 7,782 + 1,377 + 12,13) \Rightarrow$$

$$Z_t = 22,71 + j22,78 [m\Omega] = 32,2[45,1^\circ [m\Omega]$$

Utilizando a equação (3.18) obtém a corrente de curto-circuito simétrica trifásica.

$$c = 1,00 \quad (\text{Tabela 3.3})$$

$$I''_{k3} = I_{k3} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{1,0 \times 380}{\sqrt{3} \times 32,2} \Rightarrow$$

$$I_{k3} = 6,82 \text{ kA}$$

No curto-circuito bifásico a corrente é dada pela equação (3.19).

$$I''_{k2} = I_{k2} = \frac{c \cdot U_N}{2Z_k} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_{k3} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 6,82 \Rightarrow$$

$$I_{k2} = 5,91 \text{ kA}$$

Para o curto-circuito fase-terra é necessária a impedância de sequência zero. Não é apresentada nenhuma fórmula para calculá-la (segundo Cotrim, o valor deve ser fornecido pelo fabricante), então, foram adotadas as impedâncias relativas segundo Mamede Filho (2011).

$$\begin{aligned} R'_{L01} &= 1,8781 \text{ m}\Omega/\text{m} && \text{(Tabela 3.5)} \\ X'_{L01} &= 2,4067 \text{ m}\Omega/\text{m} && \text{(Tabela 3.5)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{L01} &= l \times R'_{L3} = 15 \times 1,8781 \Rightarrow R_{L01} = 244,15 \text{ m}\Omega \\ X_{L01} &= l \times X'_{L3} = 15 \times 2,4067 \Rightarrow X_{L01} = 312,87 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

Logo,

$$Z_{L01} = 244,15 + j312,87 \text{ [m}\Omega\text{]}$$

$$\begin{aligned} R'_{L02} &= 1,9868 \text{ m}\Omega/\text{m} && \text{(Tabela 3.5)} \\ X'_{L02} &= 2,5104 \text{ m}\Omega/\text{m} && \text{(Tabela 3.5)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{L02} &= l \times R'_{L3} = 130 \times 1,9868 \Rightarrow R_{L02} = 258,28 \text{ m}\Omega \\ X_{L02} &= l \times X'_{L3} = 130 \times 2,5104 \Rightarrow X_{L02} = 236,35 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

Logo,

$$Z_{L02} = 258,28 + j236,35 \text{ [m}\Omega\text{]}$$

Somando as impedâncias de sequência zero.

$$\begin{aligned} Z_{t0} &= (244,15 + 258,28) + j(312,87 + 236,35) \Rightarrow \\ Z_{t0} &= 502,44 + j639,22 \text{ [m}\Omega\text{]} = 813,05 \angle 51,8^\circ \text{ [m}\Omega\text{]} \end{aligned}$$

$$I''_{k1} = I_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_N}{|2Z_1 + Z_0|} = \frac{\sqrt{3} \times 1,0 \times 380}{2 \times 32,2 + 813,05} \Rightarrow$$

$$I_{k1} = 0,75 \text{ kA}$$

4.2.2 Método apresentado em Creder (2007)

4.2.2.1 Método detalhado

Iniciando com o cálculo da impedância de entrada, com a equação (3.35).

$$\begin{aligned}
 R_e &= 0 \\
 Z_e = X_e &= \frac{1,1 \cdot V^2}{N_{CC} \cdot 10^3} = \frac{1,1 \times 13,8^2}{120 \times 10^3} \Rightarrow X_e = 1,753 \text{ m}\Omega \\
 \frac{R_e}{X_e} &= 0,25 \Rightarrow R_e = 0,438 \text{ m}\Omega \\
 Z_e &= 0,438 + j1,753 \text{ [m}\Omega]
 \end{aligned}$$

Para a impedância do transformador, utilizam-se as equações (3.37), (3.38) e (3.39).

$$\begin{aligned}
 Z_T &= Z\% \cdot \frac{V^2}{N \cdot 100} = 5,5 \cdot \frac{380^2}{1000 \cdot 100} \Rightarrow Z_T = 7,94 \text{ m}\Omega \\
 R_T &= R\% \cdot \frac{V^2}{N \cdot 100} = 1,1 \cdot \frac{380^2}{1000 \cdot 100} \Rightarrow R_T = 1,588 \text{ m}\Omega \\
 X_T &= \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{7,94^2 - 1,588^2} \Rightarrow X_T = 7,782 \text{ m}\Omega \\
 Z_T &= 1,588 + j7,782 \text{ [m}\Omega]
 \end{aligned}$$

A impedância do cabo que liga o Transformador ao QGF é calculada com as equações (3.40) e (3.41), com os dados:

$$\begin{aligned}
 n_1 &= 4 \text{ condutores por fase} \\
 A_1 &= 300 \text{ mm}^2 \\
 l_1 &= 15,0 \text{ m} \\
 \rho &= 0,01778 \text{ }\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} \\
 x_1' &= 0,1068 \text{ m}\Omega/\text{m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{\rho \cdot l}{An} \cdot 10^3 = \frac{0,01778 \cdot 15}{300 \cdot 4} \Rightarrow R_{L1} = 0,222 \text{ m}\Omega \\
 X &= x' \cdot \frac{l}{n} = \frac{15}{4} \cdot 0,1068 \Rightarrow X_{L1} = 0,401 \text{ m}\Omega \\
 Z_{L1} &= 0,222 + j0,401 \text{ [m}\Omega]
 \end{aligned}$$

Para calcular a impedância do Barramento, utilizam-se as equações (3.42), (3.43) e (3.44).

$$\begin{aligned}
 n_b &= 2 \text{ barras por fase} \\
 A_b &= 645,2 \text{ mm}^2 \\
 l_b &= 5,0 \text{ m} \\
 h &= 50,8 \text{ mm} \\
 d &= 12,7 \text{ mm} \\
 \rho &= 0,01778 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} \\
 x_b' &= 0,1630 \text{ m}\Omega/\text{m}
 \end{aligned}$$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{An} \cdot 10^3 = \frac{0,01778 \cdot 5}{645,2 \cdot 2} \Rightarrow R_b = 0,069 \text{ m}\Omega$$

$$X = x' \cdot \frac{l}{n} = \frac{5}{2} \cdot 0,1630 \Rightarrow X_b = 0,408 \text{ m}\Omega$$

$$Z_b = 0,069 + j0,408 \text{ [m}\Omega\text{]}$$

Os cabos do QGF também contribuem com sua impedância, calculada com as equações (3.40) e (3.41).

$$\begin{aligned}
 n_2 &= 1 \text{ barras por fase} \\
 A_2 &= 120 \text{ mm}^2 \\
 l_2 &= 130,0 \text{ m} \\
 \rho &= 0,01778 \text{ m}\Omega/\text{m} \\
 x_2' &= 0,0960 \text{ m}\Omega/\text{m}
 \end{aligned}$$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{An} \cdot 10^3 = \frac{0,01778 \cdot 130}{120 \cdot 1} \Rightarrow R_{L2} = 19,26 \text{ m}\Omega$$

$$X = x' \cdot \frac{l}{n} = \frac{130}{1} \cdot 0,0960 \Rightarrow X_{L2} = 12,48 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{L2} = 19,26 + j12,48 \text{ [m}\Omega\text{]}$$

Somando as impedâncias, tem-se a impedância total do sistema.

$$\begin{aligned}
 Z_t &= (0,438 + 1,588 + 0,222 + 0,069 + 19,260) \\
 &+ j(1,753 + 7,782 + 0,401 + 0,408 + 12,480) \Rightarrow \\
 Z_t &= \mathbf{21,58 + j22,82 \text{ [m}\Omega\text{]} = 31,41[46,6^\circ \text{ [m}\Omega\text{]}}
 \end{aligned}$$

A corrente de curto-circuito trifásica é calculada com a equação (3.45).

$$I_{kA} = \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot Z_t} = \frac{380 [0^\circ]}{\sqrt{3} \cdot 31,41 [46,6^\circ]} \Rightarrow$$

$$\mathbf{I_{kA} = 6,99 [-46,6^\circ \text{ kA}]}$$

Fazendo R/X, têm-se 0,95, da Figura 3.12, obtém-se $\lambda=1,08$.

Calcula-se o valor de crista da corrente de curto-circuito trifásica, assimétrica, pela equação (3.46).

$$I_{SA} = \lambda \cdot \sqrt{2} \cdot I_{kA} = 1,08 \cdot \sqrt{2} \cdot 6,99 \Rightarrow$$

$$\mathbf{I_{SA} = 10,68 [-46,6^\circ \text{ kA}]}$$

4.2.3 Método apresentado em Mamede Filho (2011)

Como o método faz uso dos valores *pu*, inicia-se definindo as bases. Com I_b dada pela equação (3.73).

$$I_b = \frac{P_b}{\sqrt{3} \times V_b} = \frac{1000}{\sqrt{3} \times 380} \Rightarrow$$

$$\mathbf{I_b = 1519 \text{ A}}$$

$$\begin{aligned} S_b &= 1000 \text{ VA} \\ V_b &= 380 \text{ V} \\ I_b &= 1519 \text{ A} \end{aligned}$$

Então, faz-se a consideração da equação (3.47).

$$\mathbf{R_{us} \cong 0}$$

Calcula-se com as equações (3.48), (3.49) e (3.50), a impedância de entrada do circuito.

$$P_{cc} = \sqrt{3} \times V_{np} \times I_{cp} = \sqrt{3} \cdot 13,8 \cdot 5,0 \Rightarrow P_{cc} = 120 \text{ MVA}$$

$$X_{us} = \frac{P_b}{P_{cc}} = \frac{1000}{120 \cdot 10^3} \Rightarrow X_{us} = 0,00837 \text{ pu}$$

$$\vec{Z}_{us} = R_{us} + jX_{us} \Rightarrow$$

$$\mathbf{Z_{us} = j0,00837 [pu]}$$

A impedância do transformador é calculada utilizando as impedâncias percentuais, para isso é necessário as Perdas no Cobre.

$$P_{Cu} = 11000 \text{ W}$$

$$P_{nt} = S_t = 1000 \text{ kW}$$

$$R_{pt} = \frac{P_{Cu}}{10 \times P_{nt}} = \frac{11000}{10 \cdot 1000} \Rightarrow R_{pt} = 1,1\%$$

$$R_{ut} = R_{pt} \times \frac{P_b}{P_{nt}} \times \left(\frac{V_{nt}}{V_b}\right)^2 = \frac{1,1}{100} \cdot \frac{1000}{1000} \cdot \left(\frac{380}{380}\right)^2 \Rightarrow R_{ut} = 0,011 \text{ pu}$$

$$Z_{ut} = Z_{pt} \times \frac{P_b}{P_{nt}} \times \left(\frac{V_{nt}}{V_b}\right)^2 = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{1000}{1000} \cdot \left(\frac{380}{380}\right)^2 \Rightarrow Z_{ut} = 0,055 \text{ pu}$$

$$X_{ut} = \sqrt{Z_{ut}^2 - R_{ut}^2} = \sqrt{0,055^2 - 0,011^2} \Rightarrow X_{ut} = 0,054 \text{ pu}$$

$$\vec{Z}_{ut} = R_{ut} + jX_{ut} \text{ (pu)} \Rightarrow$$

$$Z_{ut} = 0,011 + j0,054 \text{ [pu]}$$

Para calcular a impedância do cabo do transformador ao QGF e do QGF ao CCM utilizam-se as equações de (3.56) a (3.63).

$$\begin{aligned} N_{c1} &= 4 \text{ condutores por fase} \\ S_{c1} &= 300 \text{ mm}^2 \\ R_{u\Omega 1} &= 0,0781 \text{ m}\Omega/\text{m} \quad (\text{Tabela 3.5}) \\ X_{u\Omega 1} &= 0,1068 \text{ m}\Omega/\text{m} \quad (\text{Tabela 3.5}) \\ L_{c1} &= 15,0 \text{ m} \end{aligned}$$

$$R_{c1\Omega} = \frac{R_{u\Omega} \times L_{c1}}{1000 \times N_{c1}} = \frac{0,0781 \times 15}{1000 \times 4} \Rightarrow R_{c1\Omega} = 0,293 \text{ m}\Omega$$

$$R_{uc1} = R_{c1\Omega} \times \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} = 0,293 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1000}{1000 \times 0,38^2} \Rightarrow R_{uc1} = 0,0020 \text{ pu}$$

$$X_{c1\Omega} = \frac{X_{u\Omega} \times L_{c1}}{1000 \times N_{c1}} = \frac{0,1068 \times 15}{1000 \times 4} \Rightarrow X_{c1\Omega} = 0,401 \text{ m}\Omega$$

$$X_{uc1} = X_{c1\Omega} \times \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} = 0,401 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1000}{1000 \times 0,38^2} \Rightarrow X_{uc1} = 0,0028 \text{ pu}$$

$$Z_{uc1} = 0,0020 + j0,0028 \text{ [pu]}$$

$$\begin{aligned}
N_{c2} &= 1 \text{ condutores por fase} \\
S_{c2} &= 120 \text{ mm}^2 \\
R_{u\Omega 2} &= 0,1868 \text{ m}\Omega/\text{m} \quad (\text{Tabela 3.5}) \\
X_{u\Omega 2} &= 0,1076 \text{ m}\Omega/\text{m} \quad (\text{Tabela 3.5}) \\
L_{c2} &= 130,0 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$R_{c2\Omega} = \frac{R_{u\Omega} \times L_{c2}}{1000 \times N_{c2}} = \frac{0,1868 \times 130}{1000 \times 1} \Rightarrow R_{c2\Omega} = 24,284 \text{ m}\Omega$$

$$R_{uc2} = R_{c2\Omega} \times \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} = 24,3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1000}{1000 \times 0,38^2} \Rightarrow R_{uc2} = 0,1682 \text{ pu}$$

$$X_{c2\Omega} = \frac{X_{u\Omega} \times L_{c2}}{1000 \times N_{c2}} = \frac{0,1076 \times 130}{1000 \times 1} \Rightarrow X_{c2\Omega} = 13,988 \text{ m}\Omega$$

$$X_{uc2} = X_{c2\Omega} \times \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} = 13,99 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1000}{1000 \times 0,38^2} \Rightarrow X_{uc2} = 0,0969 \text{ pu}$$

$$Z_{uc2} = 0,1682 + j0,0969 \text{ [pu]}$$

O cálculo da impedância dos barramentos utiliza as equações de (3.67) a (3.70).

$$\begin{aligned}
N_b &= 2 \text{ barramentos por fase} \\
S_b &= 50,8 \times 12,7 \text{ mm}^2 \\
R_{u\Omega b} &= 0,0276 \text{ m}\Omega/\text{m} \quad (\text{Tabela 3.6}) \\
X_{u\Omega b} &= 0,1630 \text{ m}\Omega/\text{m} \quad (\text{Tabela 3.6}) \\
L_b &= 5,0 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$R_{b\Omega} = \frac{R_{u\Omega} \times L_b}{1000 \times N_b} = \frac{0,0276 \times 5}{1000 \times 2} \Rightarrow R_{b\Omega} = 0,0690 \text{ m}\Omega$$

$$R_{ub} = R_{b\Omega} \times \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} = 0,069 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1000}{1000 \times 0,38^2} \Rightarrow R_{ub} = 0,0005 \text{ pu}$$

$$X_{b\Omega} = \frac{X_{u\Omega} \times L_b}{1000 \times N_b} = \frac{0,1630 \times 5}{1000 \times 2} \Rightarrow X_{b\Omega} = 0,4075 \text{ m}\Omega$$

$$X_{ub} = X_{b\Omega} \times \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} = 0,4075 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1000}{1000 \times 0,38^2} \Rightarrow X_{ub} = 0,0028 \text{ pu}$$

$$Z_{ub} = 0,0005 + j0,0028 \text{ [pu]}$$

Somando as impedâncias, tem-se a impedância total do sistema dada pela equação (3.72).

$$\begin{aligned} Z_{utot} &= (0,011 + 0,0020 + 0,0005 + 0,1682) \\ &\quad + j(0,00837 + 0,0539 + 0,0028 + 0,0028 + 0,0969) \Rightarrow \\ \mathbf{Z_{utot} = 0,18169 + j0,16472 [pu] = 0,24523[42,2^\circ [pu]} \end{aligned}$$

A corrente de curto-circuito trifásica simétrica é dada pela equação (3.74).

$$\begin{aligned} \vec{I}_{cs} &= \frac{I_b}{1000 \times \vec{Z}_{utot}} = \frac{1519}{1000 \times 0,24523} \Rightarrow \\ \mathbf{I_{cs} = 6,20 kA} \end{aligned}$$

A corrente assimétrica de curto-circuito trifásica é calculada com a equação (3.76). Dado $R/X = 0,82$, na Figura 3.11, então $F_a = 1,02$.

$$\begin{aligned} I_{ca} &= F_a \times I_{cs} = 1,08 \times 6,20 \Rightarrow \\ \mathbf{I_{ca} = 6,70 kA} \end{aligned}$$

O impulso da corrente é dado pela equação (3.77).

$$\begin{aligned} I_{cim} &= \sqrt{2} \times I_{ca} = \sqrt{2} \times 6,70 \Rightarrow \\ \mathbf{I_{cim} = 9,46 kA} \end{aligned}$$

A corrente de curto-circuito bifásica é calculada pela equação (3.78).

$$\begin{aligned} I_{cb} &= \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{cs} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 6,20 \Rightarrow \\ \mathbf{I_{cb} = 5,37 kA} \end{aligned}$$

Para calcular a corrente de curto-circuito fase-terra é necessário conhecer a impedância de sequência zero do sistema, calculando as impedâncias de sequência zero dos condutores com as equações (3.81) e (3.82) e as resistências de aterramento dadas pelas equações de (3.84) a (3.86).

$$\begin{aligned} R_{\Omega 01} &= 1,8781 \text{ m}\Omega/\text{m} && \text{(Tabela 3.5)} \\ X_{\Omega 01} &= 2,4067 \text{ m}\Omega/\text{m} && \text{(Tabela 3.5)} \end{aligned}$$

$$R_{c\Omega 01} = \frac{R_{\Omega 01} \times L_{c1}}{1000 \times N_{c1}} = \frac{1,8781 \times 15}{1000 \times 4} \Rightarrow R_{c\Omega 01} = 0,00704 \text{ }\Omega$$

$$R_{u0c1} = R_{c\Omega 01} \times \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} = 0,0070 \cdot \frac{1000}{1000 \times 0,38^2} \Rightarrow R_{u0c1} = 0,0488 \text{ pu}$$

$$X_{c\Omega 01} = \frac{X_{\Omega 01} \times L_{c1}}{1000 \times N_{c1}} = \frac{2,4067 \times 15}{1000 \times 4} \Rightarrow X_{c\Omega 01} = 0,00903 \text{ }\Omega$$

$$X_{u0c1} = X_{c\Omega 01} \times \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} = 0,00903 \cdot \frac{1000}{1000 \times 0,38^2} \Rightarrow X_{u0c1} = 0,0625 \text{ pu}$$

$$Z_{u0c1} = 0,0488 + j0,0625 \text{ [pu]}$$

$$\begin{aligned} R_{\Omega 02} &= 1,9868 \text{ m}\Omega/\text{m} && \text{(Tabela 3.5)} \\ X_{\Omega 02} &= 2,5104 \text{ m}\Omega/\text{m} && \text{(Tabela 3.5)} \end{aligned}$$

$$R_{c\Omega 02} = \frac{R_{\Omega 02} \times L_{c2}}{1000 \times N_{c2}} = \frac{1,9868 \times 130}{1000 \times 1} \Rightarrow R_{c\Omega 02} = 0,2583 \text{ }\Omega$$

$$R_{u0c2} = R_{c\Omega 02} \times \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} = 0,2583 \cdot \frac{1000}{1000 \times 0,38^2} \Rightarrow R_{u0c2} = 1,7887 \text{ pu}$$

$$X_{c\Omega 02} = \frac{X_{\Omega 02} \times L_{c2}}{1000 \times N_{c2}} = \frac{2,5104 \times 130}{1000 \times 1} \Rightarrow X_{c\Omega 02} = 0,3264 \text{ }\Omega$$

$$X_{u0c2} = X_{c\Omega 02} \times \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} = 0,3264 \cdot \frac{1000}{1000 \times 0,38^2} \Rightarrow X_{u0c2} = 2,2601 \text{ pu}$$

$$Z_{u0c2} = 1,7887 + j2,2601 \text{ [pu]}$$

$$Z_{u0c} = (0,0488 + 1,7887) + j(0,0625 + 2,2601) \Rightarrow$$

$$\mathbf{Z_{utot} = 1,8375 + j2,3226 \text{ [pu]}}$$

$$\begin{aligned} R_{ct} &= 40/3 \text{ }\Omega && \text{Resist\^encia de falha da isolamento} \\ R_{mt} &= 10 \text{ }\Omega && \text{Resist\^encia da malha de terra} \end{aligned}$$

$$R_{uct} = R_{ct} \times \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} = \frac{40}{3} \cdot \frac{1000}{1000 \times 0,38^2} \Rightarrow R_{uct} = 92,3 \text{ pu}$$

$$R_{umt} = R_{mt} \times \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} = \frac{10}{3} \cdot \frac{1000}{1000 \times 0,38^2} \Rightarrow R_{umt} = 23,1 \text{ pu}$$

A corrente de curto-circuito fase-terra mínima é dada pela equação (3.83) e a máxima é dada pela equação (3.79).

$$\vec{I}_{ftma} = \frac{3 \times I_b}{2 \times \vec{Z}_{utot} + \vec{Z}_{u0t} + \vec{Z}_{u0c}} = \frac{3 \times 1519}{2 \times 0,25905 + 0,055 + 2,9616} \Rightarrow$$

$$I_{ftma} = 1,30 \text{ kA}$$

$$\vec{I}_{ctmi} = \frac{3 \times I_b}{2 \times \vec{Z}_{utot} + \vec{Z}_{u0c} + \vec{Z}_{u0t} + 3 \times (R_{uct} + R_{umt} + R_{uat})} =$$

$$\frac{1,30}{3 \times (92,3 + 23,1)} \Rightarrow$$

$$I_{ctmi} = 13,03 \text{ A}$$

4.3 Consolidação dos resultados

A Tabela 4.1 apresenta as correntes calculadas em cada método.

Tabela 4.1 Comparação dos valores obtidos

Método	Curto-circuito [kA]					
	Trifásico		Bifásico		Fase-terra	
<i>Cotrim</i>	I''_{k3}	6,82	I''_{k2}	5,91	I''_{k1}	0,75
<i>Creder</i>	I_{k3}	6,99	-	-	-	-
<i>Mamede Filho</i>	I_{cs}	6,20	I_{cb}	5,37	I_{cftma}	1,30

a) Método apresentado em Cotrim (2009)

Este método faz uso de dados adicionais como o fator de tensão (Tabela 3.3), logo é necessário que se conheça esses valores. Ele considera a influência dos motores calculada pela equação (3.25), enquanto o método apresentado por Mamede Filho (2011) apresenta os valores percentuais das impedâncias. Também apresenta os cálculos da impedância do transformador tanto através da resistência percentual, como no método apresentado por Creder (2007), quanto através das perdas no cobre, como no método apresentado por Mamede Filho (2011). Declara que os valores de impedância de sequência zero dos cabos são fornecidos pelo fabricante, enquanto o

método apresentado por Mamede Filho (2011) fornece uma tabela com os valores das impedâncias dos cabos. E, ainda, faz a referência as impedâncias do lado de alta, como a da rede e da linha 1 (concessionária), ao lado de baixa, através da relação de transformação. Também considera a impedância do cabo da entrada ao transformador.

b) Método apresentado em Creder (2007)

Calcula a impedância do transformador utilizando o valor da resistência percentual do transformador, como em uma das formas do método apresentado por Cotrim (2009). Ao contrário dos outros dois métodos, utiliza a resistividade elétrica do material do cabo para calcular a impedância do mesmo e não a resistência relativa, ele menciona a influência dos motores e apenas realiza os cálculos da corrente de curto-circuito trifásico. Necessita de experiência para ser utilizado, pois adota os valores da relação R/X que não apresentam fonte. Calcula a resistência do transformador utilizando a resistência percentual do mesmo (sendo necessário conhecer este valor).

c) Método apresentado em Mamede Filho (2011)

Ao contrário dos outros métodos, faz o cálculo utilizando valores *por unidade*, sendo necessário ter habilidade com estes e apresenta os valores máximo e mínimo da corrente de curto-circuito fase-terra. Calcula o valor da impedância do transformador utilizando-se das perdas no cobre, sendo necessário conhecer este valor. Faz considerações dos valores percentuais da influência dos motores nas correntes de falta.

A Tabela 4.2 é uma comparação analítica dos métodos, resumindo a comparação acima e apresentando as considerações e valores necessários em cada método.

Tabela 4.2 Comparação entre os métodos quanto aos dados necessários e considerações dos mesmos

Consideração	Método apresentado por		
	Cotrim (2009)	Creder (2007)	Mamede Filho (2011)
<i>Influência dos motores</i>	Apresenta equação	Não considera	Apresenta valores percentuais das impedâncias
<i>Resistência dos cabos</i>	Utiliza a resistência relativa do material do cabo no cálculo	Utiliza a resistividade do material do cabo no cálculo	Utiliza a resistência relativa do material do cabo no cálculo
<i>Resistência do transformador</i>	Utiliza as perdas no cobre ou a resistência percentual do mesmo no cálculo	Utiliza a resistência percentual do mesmo no cálculo	Utiliza as perdas no cobre no cálculo
<i>Valor extra a conhecer</i>	Fator de tensão, informações do cabo da entrada ao transformador, impedância de sequência zero do cabo (fornecidas pelo fabricante)	Resistência percentual do transformador, resistividade do material do cabo	Perdas ôhmicas no cobre, resistências de aterramento
<i>Particularidades</i>	Referencia a impedância do transformador e linha do lado de alta ao lado de baixa do transformador	Calcula apenas as correntes de curto-circuito trifásico	Utiliza valores em <i>pu</i> , apresenta valores de correntes de curto circuito máxima e mínima

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O curto-circuito algo indesejado, consequência de uma falha e que pode ocasionar diversos problemas, sendo de extrema importância a proteção dos sistemas, indústrias investem muitos recursos nas proteções de sua instalação elétrica, logo o projeto deve prevê-lo e estar preparado para minimizar seus efeitos.

Existem diversas obras sobre o assunto e normas que regulam a sua aplicação nos sistemas elétricos.

As correntes de curto-circuito são classificadas segundo suas fontes e formas. E os curto-circuitos são classificados quanto ao número de fases envolvidas. Os efeitos das correntes de curto-circuito têm consequências e efeitos diversos que só reafirmam a necessidade de que se conheça e previna o sistema elétrico das mesmas.

Os métodos apresentados pelos autores estudados são bem simples, utilizam de ferramentas matemáticas básicas, com exceção do método que faz uso dos valores por unidade, e necessitam de alguns conceitos da engenharia, mas são todos de fácil compreensão.

Na aplicação dos métodos em um sistema elétrico foi necessário conhecer alguns valores tabelados fornecidos pelos autores, como as impedâncias, resistências e admitâncias relativas nos cabos e barramentos, perdas no cobre e fator de tensão que alguns dos métodos utilizam e podem ser encontrados em outras literaturas. Alguns dos dados necessários para o cálculo são comuns como potência do transformador, corrente ou potência máxima de curto-circuito exigida pela concessionária, tensão primária e secundária do transformador, impedância percentual do transformador e as conexões do transformador, além de dimensões dos barramentos e cabos. Mas todos eles necessitam de valores particulares que influenciam os cálculos e tornam diferentes. As considerações de cada método, alguns cálculos que utilizam equações diferentes e suas particularidades também compõem as suas peculiaridades. A experiência do usuário também influencia, pois há necessidade de algumas considerações ou a utilização de ferramentas matemáticas, como os valores por unidade, em alguns dos métodos. E são estas diferenças que devem ser consideradas na escolha do método, pois estes são semelhantes em complexidade. A tabela apresentada no quarto capítulo tem a função de auxiliar nesta escolha, resumindo as diferenças e particularidades dos métodos.

Numa análise dos valores obtidos nota-se que eles tem a mesma ordem de grandeza, logo são todos consistentes e não há diferenças nesse aspecto. Pode-se então concluir que os únicos fatores que vão influenciar a escolha são os dados conhecidos pelo projetista, como comentado anteriormente.

O estudo apresentado ainda pode ser complementado comparando os métodos com as correntes de curto-circuito calculadas através de softwares, como os apresentados na introdução teórica, ou ainda em outros métodos.

REFERÊNCIAS

ABB. **ABB Service de Baixa Tensão.** Disponível em: <<http://abbservicedebaixatensao.blogspot.com.br/2009/11/doc-ferramenta-de-dimensionamentos-de.html>> Acesso em: 01 jul. 2012.

ABB. **Electrical installation handbook – Protection, control and electrical devices.** 6. ed. Bergamo: ABB SACE, 2010. 536p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT Catálogo.** Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/>>. Acesso em: 13 jun. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356:** Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410:** Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14039:** Instalações Elétricas de Média Tensão de 1 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro, 2005.

CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA. **ANAFAS – Análise de Falhas Simultâneas.** Disponível em: <<http://www.anafas.cepel.br/>> Acesso em: 31 mar. 2012.

COTRIM, Ademaro A. M. B. **Instalações Elétricas** 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. 496p.

CREDER, Hélio. **Instalações Elétricas** 15. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 428p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **551:** IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems. New York, 2006.

KASIKCI, I. **Short Circuits in Power Systems: A practical Guide to IEC 60909.** Weinheim: Wiley-VCH, 2002. 278p.

KINDERMANN, G. **Curto-circuito** 2^a ed. Porto Alegre: SAGRA LUZZATO, 1997. 214p.

KNIGHT, G.; SIELING, H. **Comparison of ANSI and IEC 909 Short-circuit Current Calculation Procedures**. Toronto: IEEE Xplore, 2002.

LIMA FILHO, D. L. **Projeto de Instalações Elétricas Prediais**. 6^a ed. São Paulo: Ed. Érica, 2001. 254p.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 666p.

METZ-NOBLAT, Benoit de; DUMAS, Frédéric; POULAIN, Christophe. **Cahier Technique Schneider Electric n° 158: Calculation of Short-circuit Currents**. Grenoble: Schneider Electric, 2005. 32p.

NIPPERT, T.; BEHRENS, T.; KNY, K.-H. **Short-circuit Current Calculation According to DIN VDE 0102 (Issue 2002) in Planning and Operation of an Urban Distribution System**. Turin: IEEE Xplore, 2005

PROCOBRE – INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE. **Guia Eletricidade Moderna da NBR 5410**. São Paulo: Revista Eletricidade Moderna, 2001.

TLEIS, Nasser D.. International standards for short-circuit analysis in ac power systems. In: **Power Systems Modelling and Fault Analysis: Theory and Practice**. Oxford: Elsevier, 2008. p. 451-484.

ROEPER, R. **Correntes de curto-circuito em redes trifásicas**. São Paulo: EPU: Siemens A.G. 1975, reimpressão 1979. 98p.

SEIP, G. G. **Electrical Installations Handbook**. 3.ed. Munique: WILEY:SIEMENS, 2000. 728P.

SIEMENS. **Aplicativos para projeto SIMARIS® desing.** Disponível em: <<http://www.automation.siemens.com/mcms/electrical-design-software/pt/software-de-projeto-de-rede/Pages/default.aspx>> Acesso em: 01 jul. 2012.

SIEMENS. **Proteção das instalações elétricas de BT contra os efeitos das sobrecargas através dos disjuntores e fusíveis.** São Paulo: SIEMENS, 2003. 68p.

ZERGUI ELETRIC. **Manutenção Elétrica – Introdução.** Disponível em: <<http://zergui.com/?p=305>> Acesso em: 06 nov. 2012.