

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Fernando Antonio Grigoletto

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS METODOLOGIAS ANSI E
IEC PARA O CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO EM SISTEMAS
INDUSTRIAIS**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência.

Orientador: Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho.

Setembro de 2013

Itajubá

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Jacqueline Balducci- CRB_6/1698

G857a

Grigoletto, Fernando Antonio.

Análise comparativa entre as metodologias ANSI e IEC para
o cálculo de curto-circuito em sistemas industriais / Fernando
Antonio Grigoletto. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2013.

269 p. il.

Orientador: Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Correntes de curto-circuito. 2. Norma ANSI. 3. Norma
IEC. 4. Superação de disjuntores. I. Carvalho Filho, José Maria
de, orient. II. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Fernando Antonio Grigoletto

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS METODOLOGIAS ANSI E
IEC PARA O CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO EM SISTEMAS
INDUSTRIAIS**

Tese aprovada por banca examinadora em 25 de Setembro de 2013, conferindo ao autor o título de ***Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.***

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho.

Prof. Dr. Ronaldo Rossi.

Prof. Dr. Claudio Ferreira.

Itajubá

2013



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

A N E X O II

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: **“Análise Comparativa entre as Metodologia ANSI IEC para Cálculo de Curto Circuito em Sistemas Industriais”**

Autor: **Fernando Antonio Grigoletto**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito A = Aprovado - R = Reprovado - I = Insuficiente	Rubrica
1º	A	
2º	A	
3º	A	

Observações:

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
- (2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
- (3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.

Este documento terá a validade de 60 (sessenta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.

Resultado Final: Conceito: A , ou seja, APROVADO

Observações: _____

Itajubá, 25 de Setembro de 2013.

Prof. Dr. Ronaldo Rossi
1º Examinador - UNESP

Prof. Dr. Claudio Ferreira
2º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho
3º Examinador (Orientador) - UNIFEI

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Rosangela, pelo estímulo, solidariedade e compreensão nas horas em que precisei ficar ausente e à Carolina, pelo apoio, suporte e incentivo que tornaram possível a realização desta conquista.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a DEUS por mais esta oportunidade que me foi concedida, de aprendizado e realização pessoal.

A Rosangela, por seu carinho, seu apoio e compreensão pelo tempo de convívio furtado.

A Carolina, pela amizade, incentivo e carinho.

Aos meus pais, Orlando e Aparecida, pelo incentivo.

Aos queridos Orlando e Jubeide que sempre torceram pelo meu sucesso.

A todo corpo docente da UNIFEI e equipe de apoio da instituição.

Ao meu orientador, professor Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho, pelo apoio, pela orientação e profissionalismo, contribuindo positivamente para a realização deste trabalho.

Aos colegas e aos que se tornaram amigos, pela convivência agradável nas aulas, neste período transcorrido.

“Nossa existência não é mais que um curto-circuito de luz entre duas eternidades de escuridão”.

(Vladimir Nabokov)

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo final”.

(Chico Xavier)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Relevância do tema e objetivos da dissertação	1
1.2	Estrutura da dissertação	2
2	CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO E ASSIMETRIA	3
2.1	Considerações iniciais	5
2.2	Correntes de curto-circuito	6
2.3	Correntes simétricas e assimétricas	6
2.4	Cálculos de curto-circuito	9
2.5	Teorema da Compensação	10
2.6	Solução da equação geral do curto-circuito	12
2.7	Corrente de curto-circuito total	13
2.8	Importância da assimetria	18
2.9	Aplicação da assimetria da corrente	19
2.10	Corrente de pico máxima	20
2.11	Equações da máxima corrente de pico	22
2.11.1	Equação do “ <i>meio ciclo</i> ”	22
2.11.2	Equação da norma IEC 60909	23
2.11.3	Equação da norma IEEE 551-2006	24
2.12	Corrente assimétrica rms	24
2.12.1	Equação de “ <i>meio ciclo</i> ”	25
2.12.2	Equação da “ <i>IEC 60609</i> ”	25
2.12.3	Equação da norma “ <i>IEEE 551-2006</i> ”	25
2.13	Considerações finais	25
3	CÁLCULO DE CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO CONFORME “ANSI”	26
3.1	Considerações iniciais	26
3.2	Análise da relação X/R utilizada nos cálculos de curto-circuito	28
3.3	Premissas básicas para modelagem de sistemas conforme “ANSI”	31
3.4	Metodologia para os cálculos de curto-circuito	32
3.4.1	Tipos de cálculos	32
3.4.2	Modelagem de “ <i>decremento ac</i> ” em motores de Indução	32
3.4.3	Modelagem de “ <i>decremento ac</i> ” em geradores síncronos	39

3.4.4	Modelagem do “ <i>decremento dc</i> ” conforme a norma “ANSI” e implicações no dimensionamento de disjuntores	40
3.4.4.1	Curvas de “ <i>decremento dc</i> ” de disjuntores construídos e avaliados na base de “ <i>corrente total</i> ”	43
3.4.4.2	Curvas de “ <i>decremento dc</i> ” de disjuntores fabricados e avaliados numa base de “ <i>corrente simétrica</i> ”	45
3.4.4.3	Curvas graduadas	51
3.5	Roteiro para o cálculo das Correntes de Interrupção conforme “ANSI”	55
3.6	Correntes de Primeiro Ciclo conforme “ANSI”	57
3.7	Roteiro para o cálculo das correntes de primeiro ciclo conforme “ANSI”	59
3.8	Contribuição de capacitores para correntes de curto-circuito	60
3.9	Contribuição de conversores estáticos para correntes de curto-circuito	60
3.10	Aplicações das correntes de curto-circuito calculadas conforme “ANSI”	61
3.10.1	Disjuntores de média e alta tensão	61
3.10.1.1	Definições e dados de placa	62
3.10.1.2	Aplicações para disjuntores de média e alta tensão	67
3.10.2	Disjuntores de baixa tensão	71
3.10.3	Fusíveis de baixa tensão	73
3.10.4	Fusíveis de média tensão	73
3.11	Considerações finais	74
4	CÁLCULO DE CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO CONFORME IEC-60909	75
4.1	Considerações iniciais	75
4.2	Escopo da Norma “IEC-60909”	76
4.3	Conceitos da Norma “IEC-60909”	77
4.4	As correntes de curto-circuito	81
4.4.1	Fatores de Tensão “ <i>voltage factor</i> ”	81
4.4.2	Correntes de curto-circuito máximas	82
4.4.3	Correntes de curto-circuito mínimas	82
4.4.4	Impedâncias de curto-circuito.	84
4.4.4.1	Geral	84
4.4.4.2	Sistema (Concessionária)	84
4.4.4.3	Transformadores de dois enrolamentos	87

4.4.4.4	Geradores síncronos	91
4.4.4.4.1	Geral	91
4.4.4.5	Motores e Compensadores síncronos	105
4.4.4.6	Gerador e transformador unitário com “ <i>OLTC</i> ” (comutador de taps sob carga)	106
4.4.4.7	Gerador e transformador unitário sem “ <i>OLTC</i> ” (comutador de taps sob carga)	108
4.4.4.8	Motores assíncronos	109
4.4.4.8.1	Contribuições de motores assíncronos para correntes de curto-circuito	111
4.4.4.9	Capacitores	114
4.4.4.10	Conversores estáticos	115
4.5	Cálculo das correntes de curto-circuito	115
4.5.1	Cálculo da corrente de curto-circuito inicial simétrica	116
4.5.1.1	Cálculo da corrente de curto-circuito inicial simétrica I_k'' em sistemas radiais	116
4.5.1.2	Cálculo da corrente de curto-circuito inicial simétrica I_k'' em sistemas em malha	117
4.5.2	Cálculo das correntes de curto-circuito de pico	118
4.5.2.1	Cálculo das correntes de curto-circuito de pico em sistemas radiais	118
4.5.2.2	Cálculo das correntes de curto-circuito de pico para sistemas em MALHA (“ <i>Meshed</i> ”)	119
4.5.3	Cálculo da componente “ <i>dc</i> ” da corrente de curto-circuito	122
4.5.4	Cálculo das correntes de curto-circuito de interrupção	123
4.5.4.1	Cálculo das correntes de curto-circuito de interrupção em pontos “longe da geração”	123
4.5.4.2	Cálculo das correntes de curto-circuito de interrupção em pontos “próximos à geração”	123
4.5.4.3	Cálculo das correntes de curto-circuito de interrupção em sistemas em “malha”	124
4.5.4.4	Correntes de curto-circuito de interrupção assimétricas	125
4.5.5	Cálculo das correntes de curto-circuito de regime	125
4.5.5.1	Cálculo das correntes de curto-circuito de regime em sistemas radiais	126
4.5.5.2	Cálculo das correntes de curto-circuito de regime em sistemas em malha	127
4.6	Exemplos de Cálculo das correntes de curto-circuito	128
4.6.1	Exemplo-1 Cálculo das correntes de curto-circuito para sistema em malha	128

4.6.2	Exemplo-2 Contribuição de motores de indução	135
4.7	Aplicações das correntes de curto-circuito calculadas conforme “IEC”	142
4.7.1	Disjuntores de média e alta tensão	142
4.7.1.1	Exemplo-3	145
4.7.1.2	Exemplo-4	146
4.7.2	Fusíveis de alta tensão (>1000 V)	149
4.7.2.1	Exemplo-5	150
4.7.3	Disjuntores de baixa tensão	151
4.7.4	Fusíveis de baixa tensão	152
4.8	Considerações finais	152
5	ANÁLISE COMPARATIVA DAS CORRENTES DE CURTO CIRCUITO CALCULADAS CONFORME MÉTODO ABRANGENTE, NORMA ANSI E NORMA IEC	153
5.1	Introdução	153
5.2	Análise de caso segundo o método Abrangente	155
5.3	Análise de caso segundo a metodologia de cálculo “ANSI/IEEE”	159
5.3.1	Correntes de interrupção para fatores de correção interpolados e remotos	159
5.3.2	Correntes de curto-circuito calculadas conforme “ANSI C37.010” e “ANSI C37.13” e calculadas conforme MÉTODO COMBINADO	164
5.4	Análise de caso segundo metodologia de cálculo IEC	169
5.4.1	Características dos componentes segundo critérios IEC	169
5.4.2	Contribuições para as correntes de Curto-circuito	169
5.4.3	Análise do efeito do fator “c” sobre as correntes de curto-circuito conforme IEC	172
5.4.3.1	Comparação entre os cálculos para c_{max} conforme tabela 5.7 e com $c_{max} = 1,0$	174
5.4.4	Análise das correntes de regime em várias configurações de sistema de excitação	179
5.5	Análise comparativa entre as duas normas e o método Abrangente	184
5.5.1	Conceituais	184
5.5.1.1	Tipos de cálculos	184
5.5.1.2	Decaimento “ ac ”	184
5.5.1.3	Decaimento “ dc ”	185
5.7.1.4	Tensões de pré-falta	185
5.5.2	Corrente de falta inicial	185

5.5.3	Correntes assimétricas rms	189
5.5.4	Correntes de pico – Valores Teóricos	192
5.5.5	Correntes de pico – Valores calculados no Caso-estudo	194
5.5.6	Correntes de interrupção	197
5.5.7	Correntes de regime	202
5.6	Estudo de Caso de Superação de Disjuntores de média tensão no sistema elétrico do ANEXO-3	207
5.7	Estudo comparativo de correntes de curto-circuito de pico e fatores de correção de correntes de interrupção de disjuntores de baixa tensão quando X/R calculado é maior X/R de teste.	213
5.8	Considerações finais	214
6	CONCLUSÕES	215
6.1	Conclusões gerais	215
6.2	Conclusões finais	221
6.3	Propostas para futuros trabalhos	222
7	REFERÊNCIAS	223
8	ANEXOS	228
8.1	ANEXO-1 SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DIFERENCIAL DO CURTO-CIRCUITO	228
8.2	ANEXO-2 ALGORITMO UTILIZADO PARA O CÁLCULO DAS CORRENTES DE PICO MÁXIMAS	233
8.3	ANEXO-3 DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA EXEMPLO	235
8.4	ANEXO-4 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ELÉTRICO PARA SIMULAÇÃO DOS CALCULOS CONFORME “ANSI”	237
8.5	ANEXO-5 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ELÉTRICO PARA SIMULAÇÃO DOS CALCULOS CONFORME “IEC”	242
8.6	ANEXO-6 SISTEMAS DE EXCITAÇÃO “IEEE SERIES-1” E “SERIES-2”	244

LISTA DE FIGURAS

Figura-2.1	Forma de onda “ ac ” simétrica	7
Figura-2.2	Forma de onda “ ac ” totalmente deslocada	7
Figura-2.3	Forma de onda “ ac ” simétrica com decaimento	8
Figura 2.4	Forma de onda da componente “ dc ”	8
Figura 2.5	Forma de onda típica de corrente de curto-circuito assimétrica	9
Figura 2.6	Circuito para estudo de assimetria	10
Figura 2.7	Teorema da Compensação	11
Figura-2.8	Forma de onda de corrente com $\alpha=60$ graus e $X/R=15$	13
Figura-2.9	Ilustração das três componentes da corrente de curto-circuito	15
Figura 2.10	Componente “ dc ” em função do ângulo α de início da falta	15
Figura 2.11	Componente “ dc ” em função de X/R (ângulo $\alpha=0$)	16
Figura 2.12	Corrente assimétrica constituída de componente “ dc ” e corrente “ ac ” simétrica	18
Figura 2.13	Correntes de pico máximas	20
Figura 2.14	Fator k em função de X/R	23
Figura 3.1	Sistema exemplo	28
Figura 3.2	Redução de impedâncias	28
Figura 3.3	Reduções das impedâncias em PU base 10 MVA	29
Figura 3.4	Componentes “ dc ” das fontes em separado e total	30
Figura 3.5	Representação das reduções da figura 3.3	30
Figura 3.6	Opções previstas em software comercial para cálculo por “ANSI” “C37.010”, “C37.5”, “C37-13” ou pelo Método Combinado	35
Figura 3.7	X/R para pequenos geradores e motores síncronos (rotor de pólos lisos e pólos salientes)	38
Figura 3.8	X/R típicos para motores de indução trifásicos	39
Figura 3.9	Eventos e tempos entre o início e a interrupção de uma falta por um disjuntor	42
Figura 3.10	Fatores de multiplicação para disjuntores avaliados conforme critério de “ <i>corrente total</i> ”	44
Figura 3.11	Fatores de multiplicação REMOTO para disjuntores avaliados conforme critério de “ <i>corrente simétrica</i> ”. Faltas trifásicas e fase-terra. Inclui somente o componente do “ decremento dc ”.	46
Figura 3.12	Fatores de multiplicação LOCAL para disjuntores avaliados conforme critério de “ <i>corrente simétrica</i> ”. Faltas trifásicas alimentadas predominantemente por geradores. Inclui os componentes de decremento “ ac ” e “ dc ”.	46

Figura 3.13	Fatores de multiplicação LOCAL para disjuntores avaliados conforme critério de “ <i>corrente simétrica</i> ”. Faltas Fase-terra alimentadas predominantemente por geradores. Inclui os componentes de decremento “ <i>ac</i> ” e “ <i>dc</i> ”.	47
Figura 3.14	Fatores de assimetria “S” versus tempos de separação dos contatos de disjuntores	48
Figura 3.15	Requisitos de construção de disjuntor para “ componente dc ” (extraída da “ANSI C47.010”)	50
Figura 3.16	Fatores de multiplicação de equipamentos avaliados como SIMÉTRICOS para faltas trifásicas com contribuição de LOCAL a REMOTA	52
Figura 3.17	Fatores de multiplicação de equipamentos avaliados como TOTAL para faltas trifásicas com contribuição de LOCAL a REMOTA	53
Figura 3.18	Sistema elétrico com geração local	54
Figura-4.1	Corrente de curto-circuito em um ponto “ <i>longe da geração</i> ”, “ <i>far from generator</i> ”, com a componente a.c. da corrente constante.	79
Figura-4.2	Corrente de curto-circuito em um ponto “ <i>próximo da geração</i> ”, “ <i>near to generator</i> ”, com a componente a.c. da corrente decaindo.	80
Figura-4.3	Sistema (Concessionária) sem transformador	85
Figura-4.4	Sistema (Concessionária) com transformador	86
Figura-4.5	Extraída da “ANSI C37.010”– X/R típicos para transformadores FOA (OFAF)	89
Figura-4.6	Diagrama fasorial de um gerador síncrono em condições nominais	92
Figura-4.7	Diagrama fasorial para o gerador síncrono acima em condições nominais.	93
Figura 4.8	Fator μ para o cálculo das correntes de interrupção I_b	97
Figura 4.9	Coeficientes λ_{max} e λ_{min} para geradores com rotor cilíndrico	99
Figura 4.10	Coeficientes λ_{max} e λ_{min} para geradores com rotor de pólos salientes	99
Figura 4.11	Diagrama unifilar de sistema exemplo	101
Figura-4.12	Estação geradora (S) – Transformador unitário com “OLTC” (comutador de taps sob carga)	106
Figura-4.13	Exemplo (extraído da “IEC”) para estimativa da contribuição de motores assíncronos em relação à corrente de curto-circuito total.	112
Figura 4.14	Curvas do fator p para cálculo da corrente de curto-circuito de interrupção simétrica de motores assíncronos (“IEC- 60909”)	114
Figura 4.15	Sistema radial com várias contribuições para falta em F	117
Figura 4.16	Sistema em malha	117
Figura 4.17	Sistema em malha para cálculo das correntes I''_k e i_p	128

Figura 4.18	Sistema de sequência positiva cálculo das correntes I''_k e i_p no ponto F1	130
Figura 4.19	Sistema exemplo com contribuição de motores	135
Figura 4.20	Percentual de " componente dc " no momento da separação dos contatos de um disjuntor, conforme IEC	144
Figura 5.1	Diagrama unifilar do sistema em estudo	152
Figura-5.2	Gráfico dos desvios entre os métodos Interpolado e remoto em função da relação X/R para cálculos em 2, 3 e 5 ciclos	165
Figura 8.1	Circuito para estudo de assimetria	229
Figura 8.2	Termos individuais da equação (8.2) e sua resultante	230
Figura 8.3	Resposta de um circuito RL a uma fonte de tensão senoidal - plotagem da equação (8.10) com $\phi=90^\circ$ e $\theta=45^\circ$	232
Figura 8.4	Sistema de excitação estático " <i>IEEE Series-1</i> " alimentado pelos terminais do gerador	244
Figura 8.5	Diagrama de blocos do modelo " <i>IEEE Series-1</i> "	244
Figura 8.6	Sistema de excitação estático " <i>IEEE Series-2</i> " alimentado pelos terminais do gerador por meio de tensões e correntes	245
Figura 8.7	Diagrama de blocos do modelo " <i>IEEE Series-2</i> "	245

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Tempos de ocorrência de pico	22
Tabela 3.1	Reatâncias de equipamentos rotativos conforme “ <i>IEEE Std C37.010</i> ” e “ <i>IEEE Std C37.13</i> ” - <i>X</i> ” Motores de indução <i>X</i> =16,7% (extraída da “ <i>IEEE Std 551-2006</i> ”)	34
Tabela 3.2	Reatâncias típicas para máquinas síncronas e de indução em “por unidade” do kVA nominal	37
Tabela 3.3	kVA/Hp ou kVA/kW típicos para motores síncronos	37
Tabela 3.4	Multiplicadores ou Reatâncias para utilização do “método combinado” da Tabela 3.1, coluna 3	38
Tabela 3.5	kVA/Hp ou kVA/kW típicos para motores indução	38
Tabela 3.6	Reatâncias típicas de motores de indução	38
Tabela 3.7	Tempos de separação dos contatos e de interrupção de disjuntores	44
Tabela 3.8	Fatores de assimetria “S”, tempo de interrupção e tempo de separação dos contatos de disjuntores	48
Tabela 3.9	Parâmetros da equação (3.7) para determinação das curvas “LOCAL _{TOTAL} ” e “LOCAL _{SIMETRICO} ”	49
Tabela 3.10	Características básicas de disjuntores de média tensão	62
Tabela 3.11	Características básicas de disjuntores de alta tensão para uso interno conforme “ <i>ANSI C37.06-2000</i> ”	66
Tabela 3.12	Características básicas de disjuntores de alta tensão para uso externo conforme “ <i>ANSI C37.06-2000</i> ”	66
Tabela 3.13	Valores típicos de <i>X/R</i> de teste em equipamentos de Alta tensão concebidos em corrente simétrica	67
Tabela 3.14	Valores típicos de <i>X/R</i> de teste em equipamentos de Baixa tensão concebidos em “corrente de pico”	72
Tabela 4.1	Fator de tensão “ <i>c</i> ”	81
Tabela 4.2	Valores de <i>X/R</i> para o Sistema, conforme “ <i>IEC-60909</i> ”	87
Tabela 4.3	Valores estimados para <i>X/R</i> do sistema	87
Tabela 4.4	Valores característicos para transformadores de alta tensão	89
Tabela 4.5	Fatores de correção para <i>X/R</i> da figura 4.5 quando a classe de resfriamento do transformador não é “FOA” (ou OFAF Óleo Forçado Ar Forçado)	89
Tabela 4.6	Valores de R_{Gf} e <i>X/R</i> para máquinas síncronas recomendados pela “ <i>IEC</i> ”	93
Tabela 4.7	Tipos de excitação e limites para cálculos de contribuição de regime de máquinas síncronas	100
Tabela 4.8	Impedâncias típicas para motores síncronos	106

Tabela 4.9	kVA/Hp ou kVA / kW típicos para motores síncronos	106
Tabela 4.10	Reatâncias e relações X/R para motores assíncronos conforme “IEC”	110
Tabela 4.11	Valores típicos de I_{LR}/I_{RM} para motores assíncronos	110
Tabela 4.12	Correntes de curto-circuito nos terminais de motores	114
Tabela 4.13	Frequência equivalente para o cálculo da componente “dc” (extraída da “IEC-60909”)	122
Tabela 4.14	Resumo das correntes de pico obtidas nos quatro métodos para falta em F1	135
Tabela 4.15	Dados de placa de disjuntor de média tensão de acordo com a norma “IEC”	142
Tabela 4.16	Constantes de tempo para disjuntores de média e alta tensão conforme “IEC”	145
Tabela 4.17	Valores típicos de X/R de teste em equipamentos de Alta tensão concebidos em corrente simétrica	145
Tabela 4.18	Características do disjuntor da aplicação do Exemplo-4	146
Tabela 4.19	Valores típicos de X/R de teste em fusíveis de alta tensão	149
Tabela 4.20	Valores típicos de X/R de teste em disjuntores de Baixa tensão concebidos em “corrente de pico”	151
Tabela 5.1	Correntes de curto-circuito - método Abrangente	157
Tabela 5.2	Correntes de interrupção conforme “ANSI” para fatores de correção interpolados e remotos	161
Tabela 5.3	Desvios entre o método interpolado e o remoto	162
Tabela 5.4	Comparação entre métodos de cálculos de interrupção em baixa tensão	165
Tabela 5.5	Comparação entre métodos de cálculos momentâneos em média e alta tensão	166
Tabela 5.6	Desvios entre os métodos de cálculos momentâneos em média e alta tensão	167
Tabela 5.7	Fatores de correção de tensão conforme “IEC-60909”	170
Tabela 5.8	Resumo das correntes de curto-circuito conforme “IEC”	171
Tabela 5.9	Resumo das correntes de curto-circuito conforme “IEC” para $C_{max}=1,0$	173
Tabela 5.10	Resumo comparativo e desvios entre X/R, correntes de curto-circuito inicial de pico com C_{max} conforme tabela 5.7 e $C_{max}=1,0$.	175
Tabela 5.11	Resumo comparativo e desvios entre correntes de curto-circuito de interrupção com C_{max} conforme tabela 5.7 e $C_{max}=1,0$	178
Tabela 5.12	Resumo das correntes de curto-circuito de regime conforme IEC	181
Tabela 5.13	Contribuições do gerador TG-2 para as correntes de curto-circuito de regime I_k	183

Tabela 5.14	Designação para cada tipo de corrente de curto-circuito calculada	184
Tabela 5.15	Correntes de curto-circuito iniciais e de pico – Abrangente – “ANSI” – “IEC”	187
Tabela 5.16	Correntes de curto-circuito Assimétricas rms – Abrangente – “ANSI” – “IEC”	190
Tabela 5.17	Valores das correntes de pico, em PU, e erros percentuais verificados pelas equações de “ Meio ciclo ”, “IEC” e “ IEEE std-551 ”	193
Tabela 5.18	Correntes de curto-circuito de Pico – Abrangente – “ANSI” – “IEC”	195
Tabela 5.19	Multiplicadores de reatâncias de máquinas para faltas nos terminais	198
Tabela 5.20	Correntes de interrupção calculadas em 2 ciclos conforme “ANSI” e “IEC”	199
Tabela 5.21	Correntes de interrupção calculadas em 3 ciclos conforme “ANSI” e “IEC”	200
Tabela 5.22	Correntes de interrupção calculadas em 5 ciclos conforme “ANSI” e “IEC”	201
Tabela 5.23	Correntes de Regime – Abrangente – “ANSI” - “IEC”	203
Tabela 4-24	Desvios nas Correntes de Regime Abrangente e “IEC”	205
Tabela 5.25	Características de disjuntores de média tensão analisados	208
Tabela 5.26	Verificação da Superação dos disjuntores	208
Tabela 5.27	Fatores de correção de correntes de interrupção para disjuntores de Baixa tensão	213
Tabela 8.1	Características da concessionária (“ANSI”)	237
Tabela 8.2	Características dos geradores (“ANSI”)	237
Tabela 8.3	Características dos Transformadores	237
Tabela 8.4	Características dos cabos	239
Tabela 8.5	Características dos motores (“ANSI”)	240
Tabela 8.6	Características dos geradores conforme “IEC”	242
Tabela 8.7	Características dos motores conforme “IEC”	242

ABREVIATURAS E SIMBOLOS

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ANSI	American National Standards Institute
CTSC	Comutador de taps sob carga
FA	Forced air
FOA	Forced Air, Forced Oil
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
OFAF	Óleo forçado, Ar forçado
OLTC	On Load tap Changer
ONAF	Óleo natural, ar forçado
ONAN	Óleo natural, ar natural
UL	Underwriters Laboratories

Siglas e abreviaturas conforme “ANSI”

a	operador simétrico componente = 120 graus
e	tensão instantânea
e_o	tensão inicial
E	tensão rms
E_{max}	Tensão pico ou a tensão de crista
$E_{LN\ rms}$	Tensão fase-neutro
$E_{LL\ rms}$	Tensão da fase-fase
f	freqüência em Hertz
i	corrente instantânea
I_{dc}	corrente “ dc ” instantânea
I_{ac}	corrente “ ac ” instantânea
L	Indutância

Q	carga elétrica
R	resistência
R_a	resistência da armadura
t	tempo
T_{a3}	constante de tempo trifásica de circuito aberto
X_d'	reatância transitória de eixo direto
X_d''	reatância subtransitória de eixo direto
X_q'	reatância transitória de eixo de quadratura
X_q''	reatância subtransitória de eixo de quadratura
X_{2v}	tensão nominal de seqüência negativa
Z	impedância: $Z = R + jX$
α	ângulo de fase
Φ	$\alpha = \tan^{-1}(\omega L / R) = \tan^{-1}(X / R)$
ω	frequência angular $\omega = 2\pi f$
ζ	tempo intermediário

Siglas e abreviaturas conforme “IEC”

A	valor inicial do componente i_{dc}
\underline{a}	um operador complexo
a	relação entre uma corrente de curto-circuito desequilibrada e a corrente de curto-circuito trifásica
c	fator de tensão
$cU_n / \sqrt{3}$	fonte de tensão equivalente (rms)
E''	tensão subtransitória de uma máquina síncrona
f	freqüência (50 Hz ou 60 Hz)
I_b	corrente de curto-circuito simétrica de interrupção (rms)
I_k	corrente de curto-circuito de regime (rms)
I_{KP}	corrente de curto-circuito de regime nos terminais (pólos) de um gerador com excitação “compound”
I_k''	corrente de curto-circuito inicial simétrica (rms)
I_{LR}	corrente simétrica de rotor bloqueado de um motor assíncrono
I_f	corrente nominal de equipamentos elétricos

I_{th}	corrente de curto-circuito térmica equivalente
i_{dc}	componente “ dc ” da corrente de curto-circuito
i_p	corrente de curto-circuito de pico
K_G, K_T e K_{SO}	fatores de correção de impedâncias de geradores, transformadores e unidades geradoras (gerador e transformador com comutador de taps sob carga)
m	fator para o efeito de aquecimento pelo componente “ dc ”
n	fator para o efeito de aquecimento pelo componente “ ac ”
p	par de pólos de um motor assíncrono
p_G	faixa de regulação de tensão do gerador
p_T	faixa de ajuste da tensão do transformador
P_{krT}	perda total nos enrolamentos do transformador sob corrente nominal
P_{RM}	potência ativa de um motor assíncrono ($P_{RM} = S_{RM} \cos \varphi_{rM} \eta_{rM}$)
q	fator q para o cálculo da corrente de interrupção de motores assíncronos
q_n	seção nominal
R resp. r	resistência absoluta, respectivamente, relativa
R_G	resistência de uma máquina síncrona
R_{GF}	resistência fictícia de uma máquina síncrona para o cálculo de i_p
S''_k	potência inicial de curto-circuito simétrica
S_r	potência aparente nominal de equipamentos elétricos
t_{min}	atraso de tempo mínimo
t_r	relação de transformação nominal (comutador na posição principal); $t_r \geq 1$
T_k	duração da corrente de curto-circuito
U_m	máxima tensão do equipamento, fase-fase (rms)
U_n	tensão nominal do sistema, fase-fase (rms)
U_r	tensão nominal fase-fase (rms)
u_{KR}	tensão nominal de curto-circuito de um transformador, em por cento
u_{kr}	tensão nominal de curto-circuito de um reator limitador de corrente de curto-circuito, em por cento

u_{Rr}	componente resistiva da tensão de curto-circuito de um transformador, em porcento
u_{Xr}	componente reativa da tensão de curto-circuito de um transformador, em porcento
Z_k	impedância de curto-circuito de um sistema “ ac ” trifásico
$Z_{(1)}$	impedância de curto-circuito de seqüência positiva
$Z_{(2)}$	impedância de curto-circuito de seqüência-negativa
$Z_{(0)}$	impedância de curto-circuito de seqüência zero
η	eficiência dos motores assíncronos
k	fator k para o cálculo da corrente de curto-circuito de pico
λ	fator λ para o cálculo da corrente de curto-circuito de regime
μ	fator μ para o cálculo da corrente de curto-circuito de interrupção simétrica
ρ	resistividade
φ	ângulo de fase (o mesmo que α na simbologia da IEEE)
θ_e	temperatura do condutor, no final do curto-circuito.

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um estudo comparativo entre as metodologias da norma “ANSI” e da norma “IEC” para o cálculo das correntes de curto-circuito trifásicas em sistemas industriais. O desenvolvimento teve por base a análise das características específicas de cada norma, as quais foram aplicadas em um estudo de caso de um sistema elétrico em uma instalação industrial. Os resultados obtidos mediante a aplicação das duas metodologias foram comparados com os valores calculados por um terceiro método de cálculo de correntes de curto-circuito, o método “Abrangente”. Além da análise comparativa das correntes de curto-circuito calculadas através de três softwares comerciais dedicados, este trabalho apresenta um caso prático de análise de superação de disjuntores de média tensão, o qual ilustra a aplicação dos procedimentos apresentados.

Palavras-chave – Correntes de curto-circuito, norma “ANSI”, norma “IEC”, superação de disjuntores.

ABSTRACT

This work presents a comparative study between the methodologies of ANSI and IEC standards for the calculation of short-circuit currents in three-phase industrial systems. The development of this study was based on the analysis of specific characteristics of each standard, which have been applied in a case study of an industrial facility electrical system. The obtained results by applying the two methodologies were compared with values generated by a third short-circuit currents calculating method, called the "Comprehensive method". In addition to the comparative analysis of the calculated short-circuit currents using three dedicated commercial softwares, this paper presents a case study analysis of medium voltage circuit breakers overcoming, which illustrates the application of the presented procedures.

Keywords - short-circuit currents, ANSI, IEC, overcoming circuit breakers.

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 Relevância do tema e objetivos da dissertação

Equipamentos de origem americana tem seus critérios de dimensionamento com base na norma “ANSI”, enquanto que equipamentos de origem européia são dimensionados conforme a norma “IEC”, a qual constitui a base das normas da ABNT para disjuntores de alta, média e baixa tensão aplicadas no país.

A utilização simultânea desses dois padrões de equipamentos em um mesmo “*site*” requer o completo entendimento dos critérios, suas diferenças e semelhanças para a correta aplicação e verificação do dimensionamento de cada um, frente às correntes de curto-circuito impostas.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo, por meio do estudo de um caso exploratório, comparar os métodos de cálculos de correntes de curto-circuito representados pela norma americana “ANSI” e os métodos representados pela norma européia “IEC”. A utilização de um terceiro método de cálculo, o chamado “*Abrangente*”, puramente teórico, forneceu os subsídios necessários para a análise dos resultados comparativos entre as duas normas supracitadas.

O estudo foi dirigido, tendo-se como base norma “*IEEE Std 551-2006*”- “*IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems*”, que apresenta os critérios das normas americana e européia. Tal norma, publicada em 2006, diferentemente das já existentes, além de apresentar as metodologias “mais recentes” da ANSI, também apresenta a metodologia da “IEC”, com base na norma “*IEC-60909-0*” - “*Short-circuit Currents in Three-phase A.C. Systems*”, para o cálculo das correntes de curto circuito.

A partir da “*IEEE Std 551-2006*” os critérios da “*ANSI*” foram analisados, principalmente, em suas normas “*IEEE Std C37.010*” - “*IEEE Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis*” e “*IEEE Std C37.13*” - “*IEEE Standard for Low-voltage AC Power Circuit Breakers Used in Enclosures*”.

Com relação à “*IEC*”, a análise ocorreu, também a partir de “*IEEE Std-551*”, sob as prescrições da norma “*IEC 60909-0:2001*” – “*Short-circuit currents in three-phase systems—Part 0: Calculation of Currents*”.

Vale ressaltar que, tanto as normas supracitadas, quanto suas correlatas americanas e européias, têm sido, nos últimos anos, objeto de atualizações e adequações as quais, não têm sido reportadas nas bibliografias acadêmicas. Destarte, a identificação e o entendimento dessas atualizações foi um ponto de destaque desta dissertação. Acredita-se, outrossim, que a grande quantidade de informação agregada numa única obra, complementada, por exemplos práticos revelam a singularidade deste trabalho como guia de aplicação na área dos estudos de curto-circuito, sobretudo em sistemas industriais.

1.2 Estrutura da dissertação

Para atingir os objetivos propostos, esta dissertação está estruturada em sete capítulos e seis anexos.

No segundo capítulo são tratados os aspectos qualitativos e quantitativos da corrente de curto-circuito, mostrando a importância da relação X/R na assimetria da forma de onda e sua aplicação na definição das correntes de interrupção e momentâneas de disjuntores de alta, média e baixa tensão.

O terceiro capítulo é caracterizado pelos conceitos das normas americanas, representadas pela “*ANSI*”, aplicados ao cálculo das correntes de curto-circuito de primeiro ciclo, de interrupção e de regime. A metodologia da ANSI é empregada na definição e verificação das características de interrupção e suportabilidade das correntes de curto-circuito de disjuntores de alta, média e

baixa tensão. O texto teórico é enriquecido com exemplos práticos de aplicação dos conceitos das normas, assim como no entendimento das características dimensionamento dos equipamentos de manobra.

O quarto capítulo segue o mesmo desenvolvimento do capítulo anterior, porém, voltado para os conceitos, definições e aplicações, consoante com o que preceitua a “IEC”.

O quinto capítulo apresenta um estudo de caso onde são comparadas as três metodologias para os cálculos das correntes de curto-circuito; o método abrangente, a metodologia prescrita pela “ANSI” e a metodologia definida pela “IEC”, utilizando como caso teste, um sistema real de uma planta de celulose e papel de grande porte.

O estudo comparativo entre as três metodologias é precedido de um estudo quantitativo detalhado, de cada uma das normas, verificando-se os efeitos das várias alternativas nelas prescritas, acerca das correntes de curto-circuito calculadas.

O sexto capítulo apresenta as conclusões extraídas dos resultados auferidos.

O sétimo capítulo disponibiliza as referências bibliográficas utilizadas na dissertação.

Os anexos são assim apresentados:

Anexo-1 Solução da equação diferencial do curto-circuito;

Anexo-2 Algoritmo utilizado para o cálculo das correntes de curto-circuito de pico máximas;

Anexo-3 Diagrama unifilar do sistema elétrico utilizado no caso teste;

Anexo-4 Características do sistema elétrico para simulação dos cálculos conforme a norma “ANSI”;

Anexo-5 Características do sistema elétrico para simulação dos cálculos conforme a norma IEC;

Anexo-6 Sistemas de excitação “*IEEE Series-1*” e “*IEEE Series-2*”.

Com essa disposição, acredita-se que os objetivos de reunir uma vasta quantidade de informações dispersas em inúmeras normas e publicações, num único trabalho; apresentar os descritivos e as particularidades de cada norma, visando facilitar o estudo e entendimento dos vários aspectos de cada uma delas e, finalmente, apresentar um compêndio que possa ser utilizado como guia de consulta para os profissionais da área tenham sido alcançados.

CAPÍTULO 2

CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO E ASSIMETRIA

2.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos de correntes de curto-circuito simétricas e assimétricas.

Serão obtidos, a partir da solução da equação geral de um circuito “*RL*” – série, alimentado por fonte de tensão senoidal, as componentes da corrente de curto-circuito e suas dependências com o ângulo de fase da onda de tensão em que o curto circuito é iniciado e com a relação X/R do sistema no ponto da falta.

Alguns conceitos intuitivos sobre o momento em que ocorre o maior valor de pico de corrente serão esclarecidos, juntamente com a apresentação das três equações conhecidas para sua determinação, a saber: equação de “meio ciclo”, do método teórico, equação da norma “*IEC-60909*” e equação da norma “*IEEE Std 551-2006*”.

2.2 Corrente de curto-circuito

Denomina-se corrente de curto-circuito disponível o maior valor possível de corrente que pode ocorrer numa instalação elétrica durante uma falta considerando nenhum outro efeito ou influência, como a impedância de arco, que atua na redução da corrente de falta [IEEE Std 551, 2006].

A corrente de curto-circuito disponível está diretamente relacionada ao porte e à capacidade das fontes (rede elétrica, geradores e motores) que suprem o sistema e, tipicamente não depende da corrente de carga. Geralmente, quanto maiores as capacidades das fontes de potência que suprem o sistema, maiores serão as correntes de curto-circuito disponíveis.

Os principais fatores que determinam a magnitude e duração das correntes de curto-circuito são: o tipo de falta, as fontes presentes e as impedâncias entre as fontes e o local da falta.

Há de se lembrar da importância das contribuições de motores síncronos e motores de indução, atuando como geradores, fornecendo correntes para o curto-circuito através da energia elétrica armazenada. Em sistemas industriais a contribuição dos motores é bastante significativa [Huening JR, 1982] [Luke YU, 1982].

2.3 Correntes simétricas e assimétricas

Os termos “*corrente simétrica*” e “*corrente assimétrica*” descrevem a forma da onda de corrente “**ac**”, ou de corrente alternada, com relação ao eixo das abscissas.

Se as envoltórias dos picos positivos e negativos da forma de onda são simétricos em relação ao eixo das abscissas, então essa forma de onda é dita simétrica.

A figura 2.1 mostra uma forma de onda simétrica. A figura 2.2 mostra uma forma de onda totalmente deslocada, “*fully offset*”, onde os envelopes

não são simétricos em relação ao eixo das abscissas. Trata-se de uma forma de onda assimétrica.

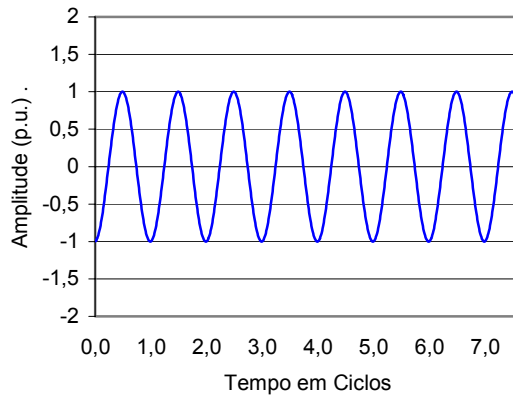


Figura 2.1 - Forma de onda “ac” simétrica.

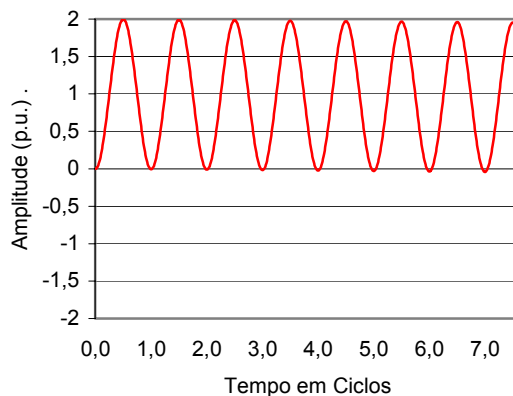


Figura 2.2 - Forma de onda “ac” totalmente deslocada.

O deslocamento que ocorre em uma forma de onda de corrente de curto-circuito depende do ângulo de fase da tensão (α_o) em que a falta ocorre e das resistências e reatâncias do sistema. Num sistema puramente reativo, o deslocamento pode ser desde nulo até totalmente deslocado, “*fully offset*”, dependendo do momento de ocorrência da falta e o deslocamento seria sustentado, sem decaimento.

No sistema puramente resistivo o deslocamento da forma de onda da corrente é nulo.

Como os sistemas contêm resistências e reatâncias, a forma de onda de corrente inicia com algum deslocamento e, gradualmente, se torna simétrica devido ao decaimento do deslocamento.

A figura 2.3 mostra uma forma de onda de corrente de contribuição simétrica um motor e, devido à quantidade limitada de energia elétrica armazenada as correntes decaem com o tempo.

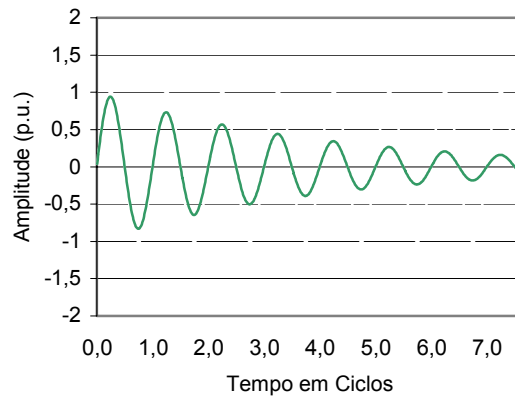


Figura 2.3 - Forma de onda “**ac**” simétrica com decaimento.

As correntes de curto-circuito são quase sempre assimétricas durante os primeiros ciclos após a falta e contêm componentes “**ac**” e “**dc**” (componente de corrente contínua), conforme será demonstrado posteriormente. A figura 2.4 mostra a componente “**dc**” de uma corrente de curto-circuito.

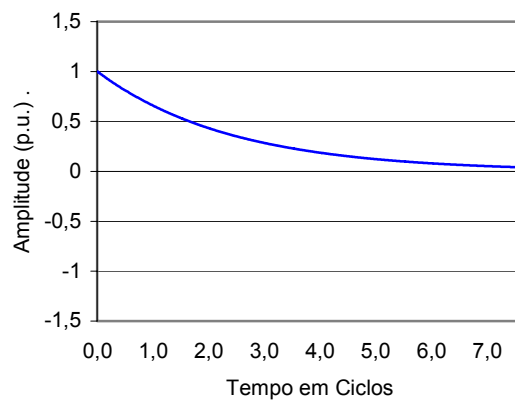


Figura 2.4 - Forma de onda da componente “**dc**”.

A componente assimétrica “**dc**” é sempre máxima durante o primeiro ciclo após a falta e gradualmente decai a zero. A figura 2.5 apresenta uma forma de onda típica de corrente de curto de curto-circuito assimétrica, que se torna simétrica em torno de 5 a 6 ciclos.

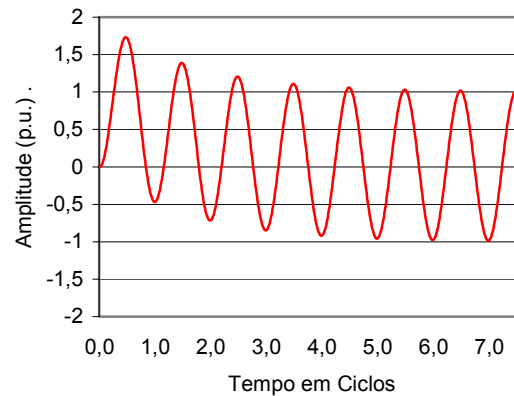


Figura 2.5 - Forma de onda típica de corrente de curto-circuito assimétrica.

2.4 Cálculos de curto-circuito.

A determinação dos valores precisos das correntes de curto-circuito em cada momento após a ocorrência da falta requer cálculos computacionais complexos. Entretanto, a adoção de simplificações fornece resultados confiáveis para seleção e aplicação de equipamentos elétricos [Olaf E. Roennspiess, 1990].

Com o tempo, foram desenvolvidos métodos simplificados que apresentam valores conservativos das correntes de curto-circuito e podem ser comparados com as capacidades nominais de ensaio de equipamentos de manobra e interrupção de circuitos elétricos.

Considerando-se o circuito da figura 2.6 que consiste de uma fonte com forma de onda senoidal e uma combinação de um resistor, uma indutância e uma chave em série.

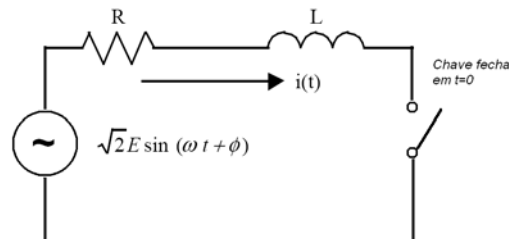


Figura 2.6 - Circuito para estudo de assimetria

A falta é iniciada com o fechamento da chave em $t=0$. Tem-se:

$$I = E/Z \quad (2.1)$$

Sendo “Z” a impedância de Thevenin equivalente do sistema no ponto de falta.

Como as tensões internas das fontes reais (máquinas) variam com o tempo durante um curto-circuito, utilizou-se do “**Teorema da Compensação**” para introduzir uma simplificação nos cálculos.

2.5 Teorema da Compensação

O Teorema da Compensação [K.C.A. Smith, 1996] sustenta que uma variação na impedância em um circuito percorrido por uma corrente pode ser simulada (compensada) através de uma variação de tensão de magnitude adequada.

Para a representação de máquinas durante um curto-circuito o inverso é aplicado, ou seja, uma variação na fonte de tensão $E(t)$ de um circuito como na figura 2.7a, percorrido por uma corrente pode ser simulada (compensada) por uma variação de impedância $Z(t)$ de uma magnitude

adequada como na figura 2.7b. Essa simplificação reduz muito os cálculos ou o tempo de processamento dos programas.

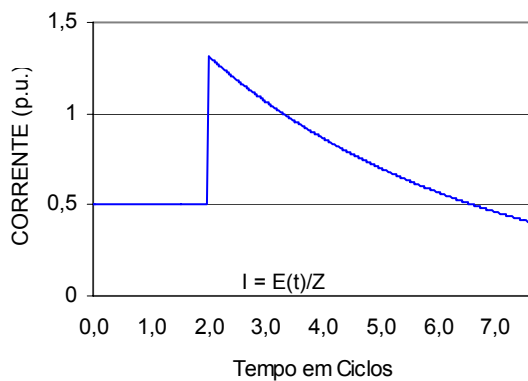


Figura 2.7a

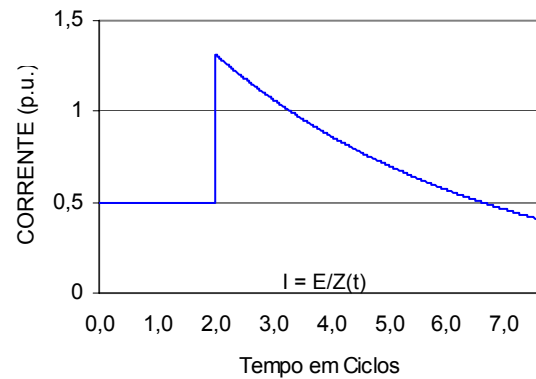


Figura 2.7b

Figura 2.7 - Teorema da Compensação.

O valor da impedância a ser aplicada está relacionado com qual característica do equipamento elétrico se quer avaliar. Equipamentos distintos requerem diferentes impedâncias para determinação de suas respectivas capacidades de corrente de operação.

Exemplificando, equipamentos ensaiados sob critério das correntes de primeiro ciclo, requerem nos cálculos de curto-circuito a utilização de impedâncias mais baixas do que equipamentos ensaiados com critérios de interrupção (de 1,5 a 4,0 ciclos). Essas impedâncias e suas aplicações serão abordadas detalhadamente nos próximos capítulos.

Expandindo-se a equação (2.1) para o circuito da figura 2.6 tem-se:

$$Ri(t) + Ldi(t)/dt = \sqrt{2} E \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.2)$$

Onde:

E - valor eficaz da tensão senoidal da fonte;

$i(t)$ - corrente instantânea no circuito em qualquer tempo, após o fechamento da chave;

R - resistência do circuito em Ohms;

L - indutância do circuito em Henries;

t - tempo em segundos;

α - ângulo de fase da tensão em radianos quando a falta ocorre;

Φ - ângulo do fator de potência;

ω - $2\pi f$

2.6 Solução da equação geral do curto-circuito

A solução da equação (2.2) é apresentada em detalhes no ANEXO-1 tomando como base a referência [R. M. Kerchner, 1938].

Assumindo que a corrente pré falta no circuito é zero (corrente de carga=0) então a solução da equação (2.2) corresponde às equações (2.3) e (2.4).

$$i = -\sqrt{2} E/Z \text{sen}(\alpha - \Phi) e^{-\omega t R/X} + \sqrt{2} E/Z \text{sen}(\omega t + \alpha - \Phi) \quad (2.3)$$

$$i = -i_{dc} \text{sen}(\alpha - \Phi) e^{-\omega t R/X} + \sqrt{2} I_{ac,rms} \text{sen}(\omega t + \alpha - \Phi) \quad (2.4)$$

Onde:

Φ - $\tan^{-1}(\omega L/R) = \tan^{-1}(X/R)$;

α - ângulo de fase da tensão quando a falta ocorre;

X - ωL ;

Z - $\sqrt{(R^2 + X^2)}$.

Para "t" expresso em ciclos, da equação (2.4) obtém-se (2.5):

$$i = -i_{dc} \text{sen}(\alpha - \Phi) e^{-2\pi t R/X} + \sqrt{2} I_{ac,rms} \text{sen}(2\pi t + \alpha - \Phi) \quad (2.5)$$

O primeiro termo da equação (2.3) representa a componente “**dc**” transitória da solução, onde o módulo inicial $\sqrt{2} E/Z\text{sen}(\alpha - \Phi)$ decresce conforme a expressão exponencial $e^{-2\pi tR/X}$ e, após transcorrido certo tempo, desaparece.

O segundo termo representa a componente de corrente alternada de regime da solução. É uma função senoidal no tempo cujo valor de crista é o máximo valor de pico da tensão da fonte dividido pelo módulo da impedância equivalente de Thevenin do sistema, vista no ponto de falta. A diferença entre magnitude da corrente inicial de falta e a da corrente de regime depende apenas da relação “**X/R**” do circuito e do ângulo de fase α da tensão no momento da falta.

A figura 2.8 mostra a forma de onda para uma falta que ocorre quando o ângulo α da tensão é de 60 graus para a relação X/R igual a 15.

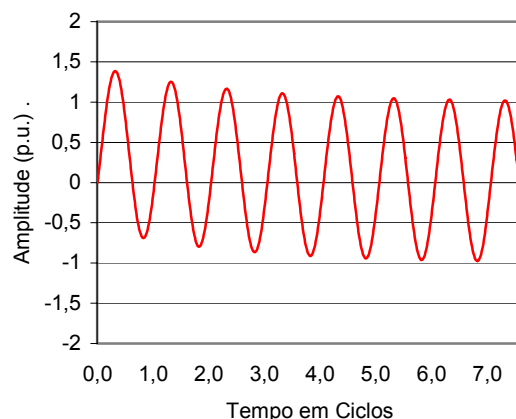


Figura 2.8 - Forma de onda de corrente com $\alpha=60$ graus e $X/R=15$.

2.7 Corrente de curto-circuito total

A corrente total disponível no ponto do sistema elétrico é constituída basicamente por três componentes: a concessionária, interligada à rede, que se comporta como um imenso gerador; a geração local ou próxima, constituída por geradores da planta ou plantas vizinhas e uma terceira categoria constituída principalmente por motores síncronos e motores de indução.

As últimas duas categorias apresentam correntes que decaem significativamente com o tempo, devido à redução do fluxo magnético na máquina durante um curto-circuito. A corrente de curto-circuito nos terminais de um motor de indução desaparece em 1 a 10 ciclos, enquanto a corrente de um motor síncrono se mantém, porém, em um valor mais baixo que o inicial, devido à existência do enrolamento de campo.

Considerando-se um sistema com muitos motores de indução a corrente de curto-circuito inicial é, em muitos casos, significativamente maior do que a corrente verificada alguns ciclos depois. Este efeito é conhecido como “**decremento ac**”

Portanto, pode-se representar a corrente de curto-circuito total pelas equações (2.7) a (2.9):

$$i = i_{dc \text{ decremento}} + i_{ac \text{ regime}} + i_{ac \text{ decremento}} \quad (2.6)$$

com:

$$i_{dc \text{ decremento}} = \sqrt{2} I_s \text{sen}(\alpha - \Phi) e^{-wtR/X} \quad (2.7)$$

$$i_{ac \text{ regime}} = \sqrt{2} I_s \text{sen}(w t + \alpha - \Phi) \quad (2.8)$$

$$i_{ac \text{ decremento}} = \sqrt{2} I_s \text{sen}(w t + \alpha - \Phi) e^{-kt} \quad (2.9)$$

onde:

I_s - magnitude da corrente simétrica rms de regime (E/Z);

i_{dc} - corrente de decremento rms simétrica;

k - constante de tempo da corrente de decremento “**ac**”;

t - tempo em segundos.

A figura 2.9 ilustra as três componentes da corrente de curto-circuito citadas.

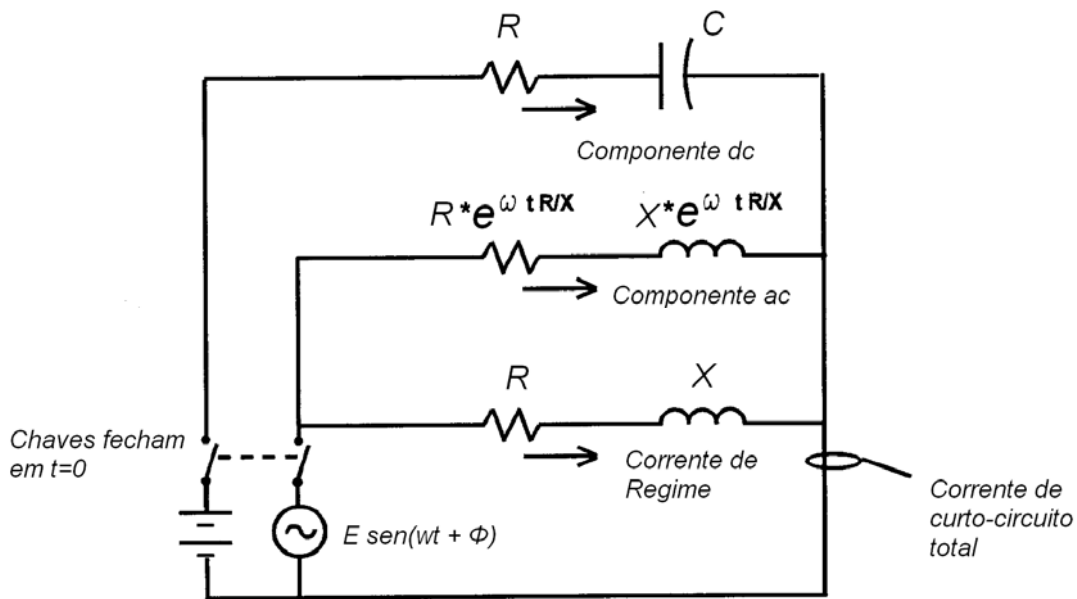


Figura 2.9 - Ilustração das três componentes da corrente de curto-circuito.

A magnitude e a duração das correntes assimétricas dependem de dois parâmetros:

- 1- Relação X/R ;
- 2- Angulo de fase da onda da tensão quando ocorre o curto-circuito.

Quanto mais elevada a relação X/R mais longo será o tempo de decaimento da corrente de falta assimétrica. Para um valor específico de relação X/R , o ângulo da tensão no momento do início do circuito determina o grau de assimetria da corrente de falta esperado para aquela relação X/R . A figura 2.10 apresenta a componente “*dc*” para vários ângulos de início da falta para $X/R=15$.

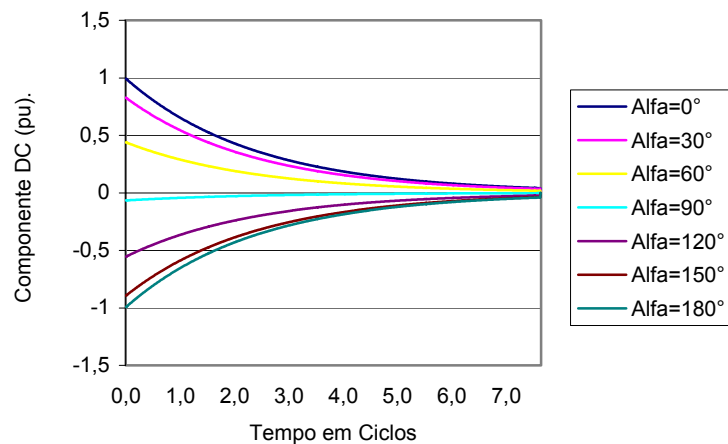


Figura 2.10 - Componente “*dc*” em função do ângulo α para $X/R=15$

A figura 2.11 apresenta a variação da componente “**dc**” em função de X/R para $\alpha=0$

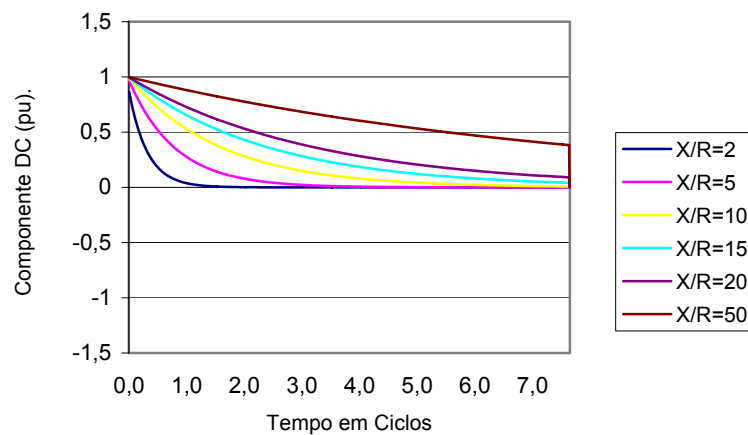


Figura 2.11 - Componente “**dc**” em função de X/R para ângulo $\alpha=0$

Num circuito puramente indutivo, a componente “**dc**” máxima é produzida quando o curto-circuito tem seu início no momento em que a tensão aplicada é zero ($\alpha = 0^\circ$ ou $\alpha = 180^\circ$). A corrente será então totalmente deslocada da origem “*fully offset*” na direção positiva ou negativa.

A máxima assimetria ocorre para qualquer relação X/R quando o curto-circuito é iniciado próximo de tensão zero. O valor inicial da componente “**dc**” é independente se a componente “**ac**” permanece constante ou tem decremento a partir de seu valor inicial.

Para qualquer valor de relação X/R , a forma de onda da tensão e da corrente estarão defasadas de um ângulo igual a $\tan^{-1}(X/R)$.

Num circuito puramente indutivo a corrente estará defasada da tensão de 90° (atrasada). A adição de resistência ao circuito causa diminuição na defasagem angular até o limite do circuito puramente resistivo onde a onda da corrente está em fase com a da tensão. Em circuitos puramente resistivos

a defasagem angular entre a corrente e a tensão é zero e não há assimetria na forma de onda da corrente.

Se a falta ocorrer no pico da tensão em um circuito puramente indutivo, a corrente inicia em zero e representará uma senóide simétrica em relação ao eixo das abscissas. Se a falta ocorre quando a tensão estiver passando por zero, a corrente inicia em zero, mas, não é simétrica em relação ao eixo das abscissas porque, num circuito indutivo, a corrente está atrasada de 90° em relação à tensão. Isso só ocorre quando a corrente é totalmente deslocada do eixo das abscissas como mostrado na figura 2.2.

Esses dois casos representam os extremos com a corrente totalmente simétrica e totalmente assimétrica. Se a falta ocorre entre esses dois extremos, a forma de onda da corrente apresentará algum grau de assimetria, que também depende da relação X/R .

As correntes de curto-circuito são normalmente analisadas através de duas componentes:

- Componente simétrica da corrente;
- Componente total da corrente, e que inclui a componente “**dc**”.

Também se pode verificar que a componente assimétrica máxima ocorre durante o primeiro ciclo do curto-circuito decaindo para valores de regime devido às variações dos fluxos dos campos magnéticos nas máquinas rotativas.

Em circuitos reais, contendo reatâncias e resistências, a componente “**dc**” decai até zero à medida que a energia representada pela componente “**dc**” é dissipada como i^2R em perdas por aquecimento no circuito. A taxa de decaimento da componente “**dc**” é função da relação X/R e, na prática, ela decai a zero entre 1 e 30 ciclos.

2.8 Importância da assimetria

A assimetria da corrente é importante por duas razões [Craig N. Harman, 1985]:

- 1- As forças eletromagnéticas exercidas sobre os componentes dos equipamentos;
- 2- Energia térmica contida na corrente de curto-circuito.

As características de pico das forças magnéticas e de efeito térmico são função do quadrado da corrente.

Na figura 2.12 o primeiro pico da corrente assimétrica de falta tem magnitude de aproximadamente 1,6 vezes o valor de crista de regime. No primeiro pico de corrente as forças magnéticas exercidas sobre o equipamento são da ordem de 2,56 vezes as forças de pico produzidas por correntes simétricas durante o primeiro ciclo. Da mesma forma, a componente de i^2t (efeito térmico ou de aquecimento) da corrente assimétrica é muito maior.

As forças magnéticas e os efeitos térmicos afetam o projeto e a aplicação dos equipamentos de proteção utilizados no sistema de potência.

No projeto e aplicação de componentes sujeitos a faltas devem ser consideradas as correntes transitórias, neste caso, assimétricas, e correntes de regime, “*steady-state*”, devido aos esforços mecânicos e térmicos impostos pelo período inicial das correntes de curto-circuito.

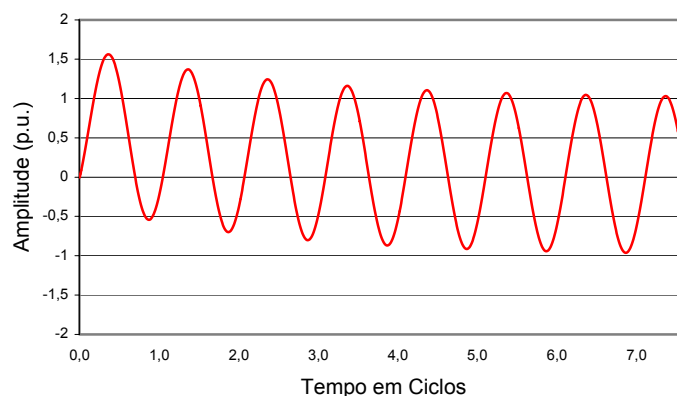


Figura 2.12 - Corrente assimétrica constituída de componente “**dc**” e corrente “**ac**” simétrica.

2.9 Aplicação da assimetria da corrente

As análises até aqui discutidas abordaram circuitos monofásicos. Em circuitos trifásicos submetidos à falta trifásica sólida tem-se que a soma das três correntes em qualquer momento do defeito deve ser zero. Assim, se uma fase apresenta-se com um deslocamento máximo “*offset*” então as outras duas fases somadas devem apresentar um deslocamento negativo de forma a equilibrar as correntes em zero.

Do ponto de vista do equipamento elétrico submetido aos esforços impostos pela corrente de curto-circuito, a fase de interesse é a que apresenta a maior corrente de falta. Essa corrente submete o equipamento às mais elevadas forças magnéticas. O maior pico de corrente de falta tipicamente ocorre no primeiro ciclo de corrente, quando o início da falta se dá no ponto em que a tensão passa por zero. Essa condição é definida como “**Condição de máxima assimetria**”.

Na aplicação de todos os equipamentos que conduzem e, principalmente os que interrompem correntes de falta como disjuntores e fusíveis, a corrente de curto-circuito total deve ser determinada.

O conhecimento do valor de X/R ou do fator de potência em que o componente foi ensaiado conforme “ANSI”, “NEMA”, “UL” ou “IEC” é fundamental para a correta aplicação do equipamento. Correntes de pico são importantes para alguns equipamentos como disjuntores de baixa tensão, enquanto valores de corrente assimétricos rms são importantes para disjuntores de alta tensão.

Criou-se então a necessidade do desenvolvimento de cálculos de correntes de curto-circuito dependentes da relação X/R para comparação com as dos equipamentos aplicados. O cálculo das correntes de curto-circuito deve levar em conta a componente “**ac**” e a componente transitória “**dc**” da corrente de falta para determinar o valor de pico ou rms máximo total que pode ocorrer no sistema, não esquecendo evidentemente as contribuições dos motores. Quando o valor calculado de X/R da falta é maior do que o X/R de norma do equipamento, este primeiro deve ser considerado

no dimensionamento deste através da utilização de fatores de correção adequados.

2.10 Correntes de pico máximas

Após o início de uma falta trifásica sólida, o pico máximo de corrente acontece em uma fase durante a primeira metade do ciclo e, erroneamente, se presume que ocorre quando a componente “**ac**” simétrica da corrente está em seu pico.

A assunção da “*corrente de meio ciclo*” sugere que a maior corrente de pico ocorre em meio ciclo na fase que apresenta a maior componente “**dc**” inicial, o que também é um equívoco, exceto para circuitos puramente indutivos.

Para circuitos onde se considera a resistência, a máxima corrente de pico ocorre antes da corrente simétrica de pico e antes de meio ciclo. Observa-se também que a corrente de pico máxima não ocorre para a corrente de componente “**dc**” máxima. Tais fatos são ilustrados na figura 2.13, a qual considera que a falta ocorre quando a tensão passa por zero e $X/R=5$ no ponto da falta.

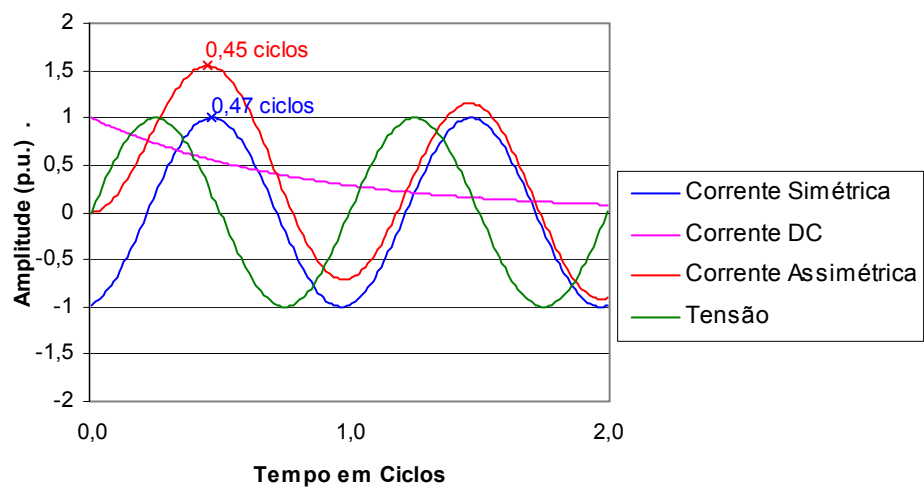


Figura 2.13 - Correntes de pico máximas – $X/R=5$

As características representadas na figura 2.13 são:

- O curto-circuito ocorre quando a tensão está passando pelo zero;
- A corrente assimétrica inicial é zero, assumindo-se que a corrente pré-falta é zero;
- A corrente "**dc**" no momento do início da falta tem módulo igual corrente "**ac**", mas com sinal oposto;
- O pico máximo de corrente de falta ocorre antes do primeiro pico da corrente simétrica.

A título de ilustração, Tabela 2.1 apresenta nas colunas 2 e 3 os valores das correntes de pico assimétricas e o respectivo tempo.

Nas colunas 4 e 5 são apresentadas, respectivamente, os valores das componentes contínuas e o tempo, em ciclos, para a ocorrência dos valores de pico nas correntes simétricas.

Vale esclarecer que os valores da Tabela 2.1 foram determinados por meio de processos iterativos, cujo algoritmo é apresentado no ANEXO-2.

Da Tabela 2.1 podem ser extraídas algumas conclusões importantes, quais sejam:

- 3- O pico máximo de corrente ocorre em uma das fases durante o primeiro ciclo e não necessariamente em meio ciclo, como pode ser verificado na tabela 2.1 coluna 2;
- 4- A máxima corrente de pico ocorre **antes** de meio ciclo, tabela 2.1, coluna 2;
- 5- A máxima corrente de pico ocorre **antes** do pico da corrente simétrica de curto-circuito, o que pode ser comprovado por uma análise comparativa entre os valores da coluna 2, tempo para corrente de pico, e da coluna 5, tempo para pico de corrente simétrica.

Tabela 2.1 - Tempos de ocorrência de pico.

X/R	Corrente Assimétrica		Idc (PU)	Corrente Simétrica
	Tempo para pico (ciclos)	Máximo pico (PU)		Tempo para pico (ciclos)
0,5	0,321	1,0078	0,0078	0,324
1,0	0,364	1,0694	0,0694	0,379
2,0	0,406	1,2418	0,2418	0,426
3,0	0,428	1,3786	0,3786	0,449
4,0	0,442	1,4774	0,4774	0,461
5,0	0,451	1,5503	0,5503	0,469
6,0	0,457	1,6057	0,6057	0,474
7,0	0,463	1,6492	0,6492	0,477
8,0	0,466	1,6842	0,6842	0,480
9,0	0,467	1,7128	0,7128	0,482
10,0	0,472	1,7368	0,7368	0,484
15,0	0,481	1,8143	0,8143	0,489
17,0	0,483	1,8339	0,8339	0,491
25,0	0,488	1,8832	0,8832	0,494
100,0	0,497	1,9692	0,9692	0,498

2.11 Equações da máxima corrente de pico

A corrente de curto-circuito de pico é obtida por meio de três equacionamentos distintos: a “*equação de meio ciclo*”, tradicionalmente utilizada; a equação da norma “*IEC 60909*” e a equação da norma “*IEEE-Std-551*”. A equação da norma “*IEEE Std-551*”, é vista como uma correção da “*equação do meio ciclo*”, pois, na figura 2.13 e na Tabela 2.1 ficam demonstradas que a corrente de pico ocorre em algum momento anterior ao “*meio ciclo*” e que é dependente da relação X/R . Salienta-se, outrossim, que a própria norma “*IEEE-Std-551*” não recomenda a aplicação da “*equação do meio ciclo*” que leva a obtenção de valores não conservativos das correntes de pico.

2.11.1 Equação de “meio ciclo”

A equação de “*meio ciclo*” ou “*half-cycle equation*” como é conhecida na literatura internacional, é apresentada em (2.10) e é aplicada para $t=0,5$ ciclos.

$$I_{pico} = \sqrt{2} I_{ac,rms} \left(1 + e^{-\frac{2\pi t}{X/R}} \right) \quad (2.10)$$

2.11.2 Equação da norma “IEC 60909”

A norma europeia “IEC 60909”, [IEC 60909-0, 2001-07] apresenta em seus procedimentos de cálculos de curto-circuito a equação (2.11).

$$I_{pico} = k \sqrt{2} I_{ac,rms} \quad (2.11)$$

Onde fator k é definido empiricamente de acordo com a equação (2.12):

$$k = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3}{X/R}} \quad (2.12)$$

A figura 2.14 apresenta o gráfico de k em função de X/R .

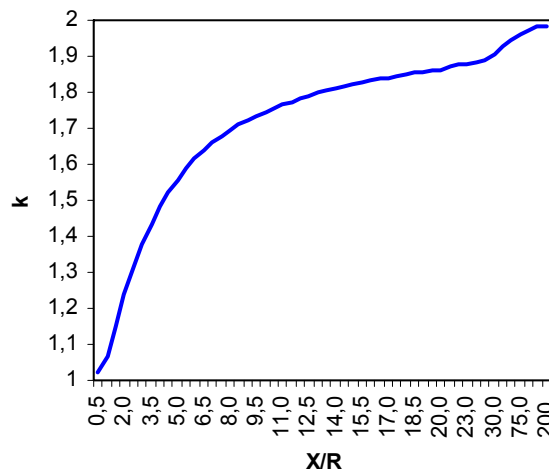


Figura 2.14 - Fator k em função de X/R .

Ainda, dos procedimentos da “IEC” a componente “dc” é calculada pela equação (2.13).

$$I_{dc} = \sqrt{2} I_{ac, rms} \left(0,02 + 0,98 e^{-\frac{3}{(X/R)}} \right) \quad (2.13)$$

2.11.3 Equação da norma “IEEE Std 551-2006”

A “IEEE Std 551-2006”, [IEEE Std 551, 2006] propõe um cálculo alternativo. A equação empírica (2.14) que define um tempo ζ , fictício, e a equação (2.15), idêntica a equação (2.10) com t substituído por ζ .

$$\zeta = 0,49 - 0,1 e^{-\frac{X/R}{3}} \quad (2.14)$$

$$I_{pico} = \sqrt{2} I_{ac, rms} \left(1 + e^{-\frac{2\pi\zeta}{(X/R)}} \right) \quad (2.15)$$

2.12 Corrente assimétrica rms

O valor eficaz da corrente assimétrica é determinado pela equação (2.16).

$$I_{rms} = \sqrt{I_{acrms}^2 + I_{dc}^2} \quad (2.16)$$

Lembrando da dificuldade da determinação do valor rms de uma onda não periódica, a equação (2.16) só é válida se o componente I_{dc} for constante. Como foi demonstrado, a componente “**dc**” da corrente de curto-circuito é uma exponencial decrescente, portanto não constante. Entretanto, é uma prática comum determinar-se a parcela “**dc**” da corrente de falta em 0,5 ciclos após seu início, ainda que este ponto, no tempo, não corresponda, necessariamente, ao valor de pico máximo da corrente assimétrica de falta.

2.12.1 Equação de “meio ciclo”

$$I_{\text{meio ciclo rms}} = I_{ac rms} \sqrt{1 + 2[e^{-\pi/(X/R)}]^2} \quad (2.17)$$

2.12.2 Equação da norma IEC 60609

$$I_{IEC rms} = I_{ac rms} \sqrt{1 + 2[0,02 + 0,98e^{-3/(X/R)}]^2} \quad (2.18)$$

2.12.3 Equação da norma IEEE Std 551-2006.

$$I_{IEEE rms} = I_{ac rms} \sqrt{1 + 2e^{-\frac{4\pi\zeta}{(X/R)}}} \quad (2.19)$$

2.13 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos sobre as correntes de curto-circuito, como o da assimetria, e sua dependência do ângulo de fase da tensão em que ocorre a falta e da relação X/R , cujo entendimento é a base para todo o desenvolvimento apresentado nos próximos capítulos.

As equações aqui apresentadas, para cálculo dos valores de pico e assimétricas demandam um estudo comparativo que será apresentado no penúltimo capítulo deste trabalho, o qual se constitui num dos objetivos desta dissertação.

CAPÍTULO 3

CÁLCULO DE CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO CONFORME A NORMA ANSI

3.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem como principal objetivo apresentar as metodologias para cálculo de correntes de curto-circuito em sistemas trifásicos conforme a norma norte-americana “ANSI” em suas “Standards” atualmente em vigor.

Os procedimentos abrangem os cálculos das contribuições e decaimento (decremento) das correntes de motores de indução, motores síncronos e geradores síncronos nas correntes de curto-circuito e se aplica inclusive à sistemas trifásicos de baixa e média tensão. O decremento da corrente “**dc**” durante o curto-circuito também é contabilizado, a fim de tratar corretamente os requisitos de assimetria aplicados no dimensionamento de equipamentos de interrupção, sobretudo os disjuntores de alta, média e baixa tensão e fusíveis de média e baixa tensão.

O capítulo tem como ponto de partida as prescrições da norma “*IEEE Std 551-2006*”, “*IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems*”, [IEEE Std 551, 2006, e, entre as normas “ANSI” referenciadas e aplicáveis, incluem-se a “ANSI C37.5-1979”, “*Guide for Calculation of Fault Currents for Application of AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Total Current Basis*”, “*IEEE Std C37.010-2005*” “*IEEE Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis*”, abordando procedimentos de cálculo de faltas em média e alta tensão para sistemas trifásicos, “*IEEE Std C37.13-2008*” “*IEEE Standard for Low-voltage AC Power Circuit Breakers Used in Enclosures*”, abordando procedimentos de cálculo de faltas em sistemas de baixa tensão, juntamente com as normas do “*IEEE Std 141-*

1993” *“IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants”, “IEEE Std 241-1990”, “IEEE Recommended Practice for Electric Power Systems for Commercial Buildings” e “IEEE Std 242-2001”, “IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems”.*

O objetivo secundário, mas não menos importante, é a apresentação de uma coletânea de informações, conceitos, tabelas e características de disjuntores de Alta Média e Baixa tensão até então não encontrada nas publicações e normas referenciadas.

3.2 Análise da relação X/R utilizada nos cálculos de curto-circuito

Este tópico será iniciado com dois questionamentos sobre a relação X/R da corrente de curto-circuito, ou sejam:

- Qual é a relação X/R que deve ser utilizada no ponto da falta?
- Ela pode ser obtida da impedância equivalente $Z=R + jX$?

De plano, a “ANSI C37.10” [IEEE Std C37.010, 2005], recomenda que se utilizem reduções separadas de R_s e X_s na determinação do valor X/R no ponto da falta. Nos próximos parágrafos será demonstrado como essa recomendação e o conservatismo que dela advém procedem.

As figuras 3.1 e 3.2, [GER-2660, 1969], mostram um sistema simples e o respectivo circuito equivalente para investigação de duas fontes com X/R diferentes, de valores 100 e 10, respectivamente. A componente “ dc ” da segunda fonte irá decair mais rapidamente do que a primeira, assumindo que a constante de tempo de decaimento é igual a relação X/R de seu ramo, em radianos, na frequência do sistema. A componente “ dc ” da corrente total de curto circuito será a soma das contribuições de cada componente “ dc ”. Esta componente “ dc ” total não tem uma única constante de tempo exponencial, ou seja, uma componente “ dc ” total tem tantas constantes de tempo quantos são os diferentes ramos de fontes no circuito equivalente e uma constante de tempo única somente é possível se os ramos têm a mesma relação X/R .

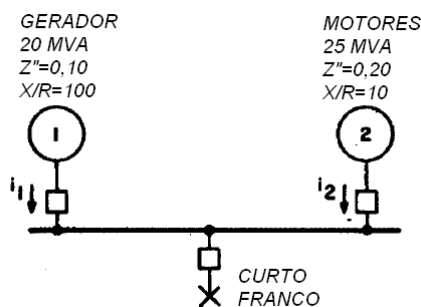


Figura 3.1 - Sistema exemplo.

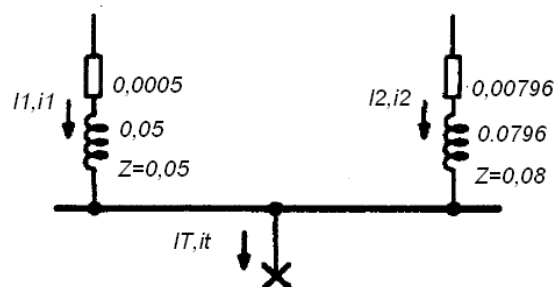


Figura 3.2 - Redução de impedâncias – Base 10 MVA

Uma estimativa de decremento "**dc**" total usando uma única constante de tempo seria útil na simplificação dos cálculos, entretanto, deverá ser conservativa. Existem duas maneiras simples que podem ser utilizadas como estimativas das constantes de tempo:

- Proceder a uma redução complexa para obter um equivalente $R + jX$ e daí calcular a relação X/R , ou
- Reduzir os X s separadamente para obter um equivalente X , os R s separadamente para obter um R equivalente, e daí obter a relação X/R .

As figuras 3.3 (a) e 3.3 (b) mostram os resultados dessas reduções a partir do circuito equivalente da figura 3.2. As impedâncias estão em por unidade na base de 10 MVA.

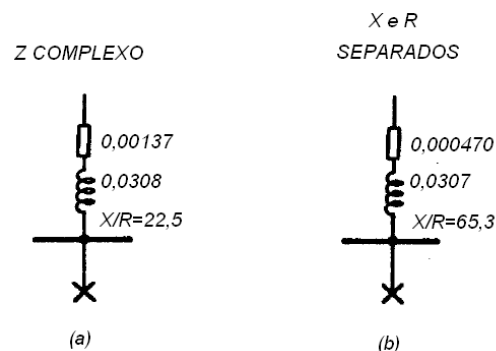


Figura 3.3 - Reduções das impedâncias em p.u. base 10 MVA.

A equação para a componente "**dc**" de um ramo, assumindo que a máxima assimetria possível cria uma magnitude de corrente "**dc**" inicial igual à crista da corrente alternada inicial, uma constante de tempo de decaimento única, " t ", em ciclos, e o módulo em "por unidade" da corrente "**ac**" rms, com $E = 1.0$, é apresentada em 3.1

$$I_{dc} = \frac{\sqrt{2}e^{-2\pi t / X/R}}{\sqrt{R^2 + X^2}}, \text{ p.u.} \quad (3.1)$$

A figura 3.4 mostra as contribuições do gerador e motor, I_{GERADOR} e I_{MOTOR} , com as componentes “*dc*” originais usando a equação (3.1), e a corrente total, I_{TOTAL} obtida por adição das duas contribuições citadas.

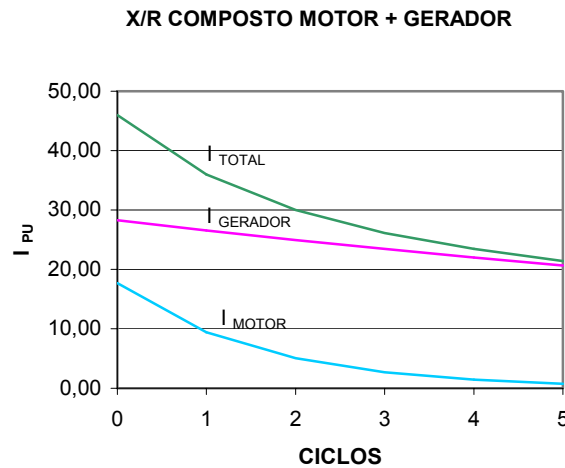


Figura 3.4 - Componentes “*dc*” das fontes em separado e total.

A figura 3.5 mostra I_{TOTAL} novamente, assim como as estimativas da componente “*dc*” total a partir das duas reduções apresentadas na figura 3.3.

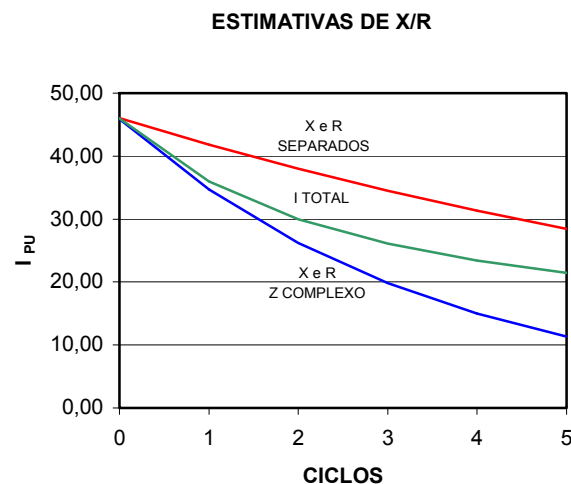


Figura 3.5 - Representação das reduções da figura 3.3.

Como se pode observar, a estimativa da redução “Z complexa” não é **conservativa** enquanto que a redução “em separado” dos Xs e Rs é **conservativa**, sendo, portanto o procedimento recomendado, [GER-2660, 1969].

3.3 Premissas básicas para modelagem de sistemas conforme a norma “ANSI”

As orientações da norma “ANSI” aplicam-se a sistemas de corrente alternada trifásicos de baixa, média e alta tensão nas seguintes condições:

- O sistema permanece equilibrado sob frequência nominal e constante;
- Durante o curto-circuito não há variação de tensão da fonte que deu origem à corrente de falta;
- As correntes de carga *pré-falta* são desprezadas, uma vez que se presume serem muito menores que as correntes de curto-circuito. Como conseqüência, para efeito de cálculos de correntes de falta, as tensões nominais do sistema são consideradas como sendo as “*tensões pré-falta*”;
- Em sistemas com vários níveis de tensão, consideram-se as relações de transformação para todos os transformadores como sendo, 1,00 pu e as tensões nominais dos transformadores são consideradas como sendo as tensões nominais das barras do sistema;
- A impedância de falta é nula, portanto, não há nenhum efeito limitador de corrente;
- As contribuições de motores síncronos e de indução variam em magnitude desde o início do curto-circuito e não podem ser consideradas desprezíveis.

3.4 Metodologia para os cálculos de curto-circuito

3.4.1 Tipos de cálculos

Por conveniência analítica, a “ANSI” reconhece três tipos de correntes de falta associadas a três diferentes períodos de tempo.

- Correntes de "primeiro ciclo": São relevantes até e, inclusive, um ciclo imediatamente após a ocorrência da falta. Estas correntes são também conhecidas como correntes de "**primeiro ciclo**" "*first cycle duty*", correntes "**momentâneas**" "*momentary duty*" ou correntes de "**fechamento e travamento**" "*close and latching duty*" e, em seu cálculo não se considera o efeito do "**decremento ac**".
- Correntes de "interrupção": São aplicáveis a disjuntores de média e alta tensão e são relevantes para o período de tempo entre 1,5 a 4 ciclos. Estas correntes são conhecidas como correntes de "interrupção" "*interrupting ou breaking duty*". Nessa faixa de tempo de duração das correntes de falta o efeito do "**decremento ac**" torna-se relevante.
- Correntes de “regime”: São relevantes para tempos superiores ao tempo médio de abertura de disjuntores de média tensão, mesmo com temporização de atraso intencional, numa janela de tempo que pode ir além de 30 ciclos após o início da falta.

3.4.2 Modelagem de “**decremento ac**” em motores de Indução

O termo “**decremento ac**” reflete a tendência natural das correntes de curto-circuito, originárias da contribuição de equipamentos rotativos, terem a magnitude diminuída após o início da falta. As contribuições de máquinas síncronas, bem como dos motores de indução, apresentam este mesmo

comportamento qualitativo no sentido de que sua corrente de curto-circuito decai com o tempo.

O primeiro passo para os cálculos conforme a “ANSI” é a determinação dos valores das reatâncias de máquinas a serem utilizadas. Para tanto, a Tabela 3.1, extraída da “IEEE Std 551-2006”, [IEEE Std 551, 2006] apresenta o resumo das reatâncias de máquinas recomendadas para cada tipo de cálculo de curto-circuito.

Com relação à Coluna 3 da Tabela 3.1 compete-se um esclarecimento: As diferenças preceituadas entre as normas para média e alta tensão (“ANSI C37.5 / IEEE std C37.010”), [ANSI C37.5, 1979] / [IEEE Std C37.010, 2005], e para baixa tensão (“IEEE Std C37.13”), [IEEE Std C37.13, 2008], na prática, requerem dois cálculos de “primeiro ciclo” e um cálculo para “interrupção”.

Contudo, buscou-se, tendo em vista sistemas com vários níveis de tensão, um método que determine, com razoável precisão, as influências de motores de indução e síncronos de média e baixa tensão utilizando-se apenas **um cálculo** de “primeiro ciclo”, método esse que combinasse os preceitos da “IEEE Std C37.13” e da “IEEE std C37.010” em um único cálculo. Tal método é apresentado da Coluna 3 da Tabela 3.1, por meio das reatâncias nela definidas, como “**método combinado**” [IEEE Std 551, 2006], [Huening JR, 1982], onde, utilizando-se a aproximação da Coluna 3, pode-se determinar as correntes de primeiro ciclo para disjuntores e fusíveis de baixa e alta tensão com apenas uma redução de impedâncias.

Tabela 3.1 - Reatâncias de equipamentos rotativos conforme “IEEE Std C37.010” e “IEEE Std C37.13” - Motores de indução X”=16,7% (extraída da “IEEE Std 551-2006”).

Tipo de Fonte	Média e Alta Tensão IEEE Std C37.010	Baixa Tensão IEEE Std C37.13	Reatâncias para sistemas com várias tensões IEEE Std C37.010/IEEE Std C37.13
Cálculo de Primeiro ciclo ou Momentânea 0 – 1 ciclo			
Sistema	Xs	Xs	Xs
Máquinas Síncronas			
Todos os turbo geradores, hidro geradores com enrolamento de amortecimento e condensadores síncronos	X" d	X" d	X" d
Hidro geradores sem enrolamento de amortecimento	0.75 X" d	0.75 X" d	0.75 X" d
Motores Síncronos	X" d	X" d	X" d
Grandes Motores de Indução			
Acima de 1000 HP	X"	X"	X"
Acima de 250 HP, 3600 rpm	X"	X"	X"
Médios Motores de Indução			
Todos os outros de 50 Hp e acima	1.2 X"	1.2 X"	1.2 X" (ver Nota 1)
Pequenos Motores de Indução			
Todos menores de 50 hp	Desprezar	X"	1.67 X" (ver Nota 2)
Cálculo de Interrupção, 1.5 – 5 ciclos			
Sistema	Xs	N/A	Xs
Máquinas Síncronas			
Todos os turbo geradores, hidro geradores com enrolamento de amortecimento e condensadores síncronos.	X" d	N/A	X" d
Hidro geradores sem enrolamento de amortecimento	0.75 X" d	N/A	
Motores Síncronos	1.5 X" d	N/A	1.5 X" d
Grandes Motores de Indução			
Acima de 1000 hp	1.5 X"	N/A	1.5 X" (ver Nota 3)
Acima 250 hp, 3600 rpm	1.5 X"	N/A	1.5 X" (ver Nota 3)
Médios Motores de Indução			
Todos os outros de 50 hp e acima	3.0 X"	N/A	3.0 X"
Pequenos Motores de Indução			
Todos menores de 50 hp	Desprezar	N/A	Desprezar

NOTA 1- Para motores de indução de baixa tensão de maior porte descritos como "médios > 50 hp" usando uma contribuição de "4,8 vezes a corrente nominal", atribuída na "IEEE Std. C37.13" para motores síncronos é considerada também aplicável a esses motores de indução e determina uma reatância de 20,8%.

Isto é efetivamente o mesmo que multiplicar a reatância assumida de 16,7% por aproximadamente 1,2 como mostrado na coluna 2 da Tabela 2-1. Para esse grupo de motores, portanto, há uma razoável correspondência entre os procedimentos de baixa e média tensão.

NOTA 2- Para um típico motor de indução, a reatância subtransitória de 16,7% é determinada pela magnitude inicial (rms) das correntes que contribuiriam para um curto-circuito nos terminais do mesmo assumindo-se uma contribuição de seis vezes a corrente nominal. Para motores de indução de pequeno porte “<50 hp”, pela Tabela 2-1, uma estimativa conservativa de corrente de falta, de acordo com a norma “IEEE C37.13” é de “3,6 vezes a corrente nominal” (equivalente de 0,278 por unidade de reatância). Esta é efetivamente a mesma que se obtém multiplicando-se reatância subtransitória de 16,7% por 1,67, como mostrado na coluna 3.

NOTA 3- Grandes motores de indução (> 1000 hp, 4 pólos ou mais e > 250 hp, 2-pólos) são presumidos contribuindo com seis vezes a sua corrente nominal num circuito-circuito nos terminais, quando não há dados disponíveis. A reatância de 16,7% correspondente é modificada, conforme a Tabela 2-1, dependendo do tipo de cálculo. Os mesmos multiplicadores, porém, se aplicam quando a reatância do motor é conhecida. Por exemplo, um motor de 500 cv, 900 rpm com uma reatância de rotor bloqueado conhecida de 15% teria uma reatância primeiro ciclo de 18% e uma reatância de interrupção de 45%, (três vezes 15%).

A figura 3.6 apresenta a tela de configuração de um software comercial para cálculos de correntes de curto-circuito conforme “ANSI”, onde é disponibilizada a escolha de cálculo por meio das “ANSI” C37 ou pelo método combinado.

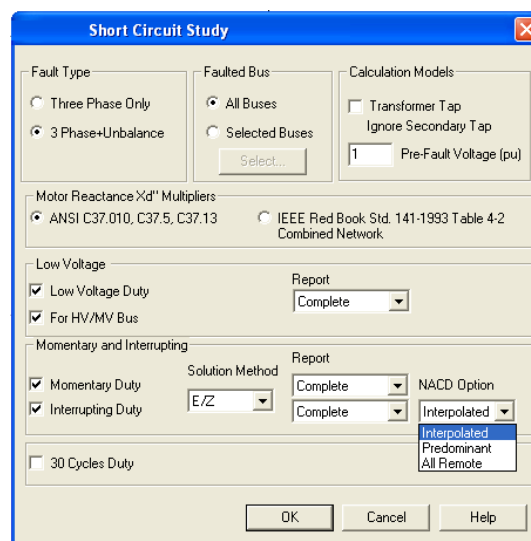


Figura 3.6 - Opções previstas em software comercial para cálculo pela “ANSI C37.010”, “C37.5, C37-13” ou pelo Método Combinado.

No caso das contribuições de motores de indução devem ser utilizados os valores das reatâncias apresentados na Tabela 3.1 onde, é conveniente ressaltar, que as informações efetivas dos parâmetros dos motores de indução no cálculo de curto-circuito são de extrema importância para um resultado preciso, particularmente em sistemas industriais com um

grande índice de motores de indução. Os portes dos motores são mandatários na precisão das informações utilizadas, uma vez que estes têm maior influência nos cálculos de curto-circuito.

Para grupos de motores de pequeno porte a utilização de uma reatância de primeiro ciclo de 28% é suficientemente conservativa. A representação individual de motores de grande e médio portes (ou grupos distintos de motores médios) é normalmente justificada e aumenta a confiabilidade dos resultados obtidos.

Nos casos em que as contribuições de motores de indução são relevantes, dados adicionais pertinentes às constantes de tempo dos mesmos que reflitam com maior exatidão o “**decremento ac**” característico de cada máquina podem ser justificados.

Neste ponto certamente caberia uma pergunta: E quando não se dispõe das folhas de dados das máquinas, que valores podem ser adotados?

A Tabela 3.2, extraída da “*IEEE std 141-1993*”, [IEEE Std 141, 1993], apresenta valores típicos de reatâncias de máquinas rotativas. A Tabela 3.3, também extraída de [St Pierre C., 2001] apresenta valores de típicos kVA / Hp ou kVA / kW para motores síncronos.

A Tabela 3.4 apresenta valores Multiplicadores ou Reatâncias para utilização do “método combinado” da Tabela 3.1, coluna 3.

As tabelas 3.5 e 3.6, extraídas da “*IEEE std 141-1993*”, [IEEE Std 141, 1993], apresenta valores de típicos kVA / Hp ou kVA / kW para motores de indução e valores de Reatâncias típicas de motores de indução, respectivamente.

A figura 3.7, extraída da “*IEEE std 141-1993*”, [IEEE Std 141, 1993], apresenta valores de X/R típicos para pequenos geradores e motores síncronos (rotor de pólos lisos e pólos salientes).

A figura 3.8, também extraída da “*IEEE std 141-1993*” [IEEE Std 141, 1993], apresenta valores de X/R típicos para motores de indução trifásicos que, na falta de valores de folha de dados do fabricante podem ser utilizados.

Tabela 3.2 - Reatâncias típicas para máquinas síncronas e de indução em “por unidade” do kVA nominal, [IEEE Std 141, 1993].

Tipo de Máquina	X_d''	X_d'
Turbo Geradores ¹ 2 pólos 4 pólos	0.09 0.15	0.15 0.23
Geradores de Pólos Salientes com enrolamentos amortecedores ¹ 12 pólos ou menos 14 pólos ou menos	0.16 0.21	0.33 0.33
Motores Síncronos 6 pólos 8–14 pólos 16 pólos ou mais	0.15 0.20 0.28	0.23 0.30 0.40
Condensadores Síncronos ¹	0.24	0.37
Conversores Síncronos ¹ 600 V dc 250 V dc	0.20 0.33	— —
Grandes motores de Indução individuais, usualmente $V_n > 600$ V	0.17	—
Motores pequenos, usualmente $V_n \leq 600$ V	Ver Tabela 3.4	

Notas

¹ X_d' normalmente não utilizado em cálculos de curto-circuito

Tabela 3.3 - kVA/Hp ou kVA / kW típicos para motores síncronos, [St Pierre C., 2001]

Fator de potência nominal	kVA aproximado
80% adiantado	1,0 kVA / Hp ou 1,33 kVA / kW
90% adiantado	0,9 kVA / Hp ou 1,18 kVA / kW
100%	0,8 kVA / Hp ou 1,06 kVA / kW

Tabela 3.4 - Multiplicadores ou Reatâncias para utilização do “método combinado” da Tabela 3.1, coluna 3, [IEEE Std 141, 1993].

Tipo de máquina	Reatâncias de “Primeiro ciclo”	Reatâncias de “Interrupção”
Motores de Indução		
Todos os outros, 50 hp e acima	$1.2 X_d''$ ou $X_d'' = 0,20^*$	$3.0 X_d''$ ou $X_d'' = 0,50^*$
Menores que 50 hp	$1.67 X_d''$ ou $X_d'' = 0,28^*$	Desprezar

* X_d'' em “por unidade” na base do motor

Tabela 3.5 - kVA/Hp ou kVA/kW típicos para motores indução, [St Pierre C., 2001].

Hp do motor	kVA aproximado
1 - 100	1,0 kVA / Hp ou 1,33 kVA / kW
101 - 1000	0,95 kVA / Hp ou 1,26 kVA / kW
> 1000	0,9 kVA / Hp ou 1,20 kVA / kW

Tabela 3.6 - Reatâncias típicas de motores de indução [St Pierre C., 2001].

Tipo	Reatância X_d''
Eficiência normal	16,6 %
Alta Eficiência	13,3 %

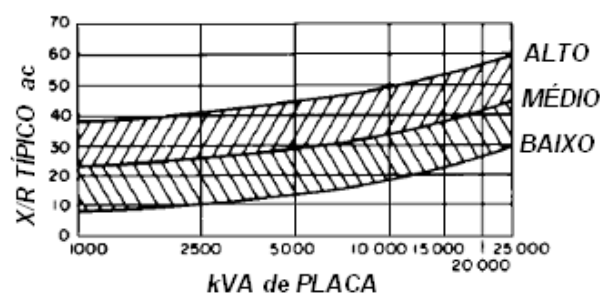


Figura 3.7 – Valores de X/R para pequenos geradores e motores síncronos (rotor de pólos lisos e pólos salientes), [IEEE Std 141, 1993].

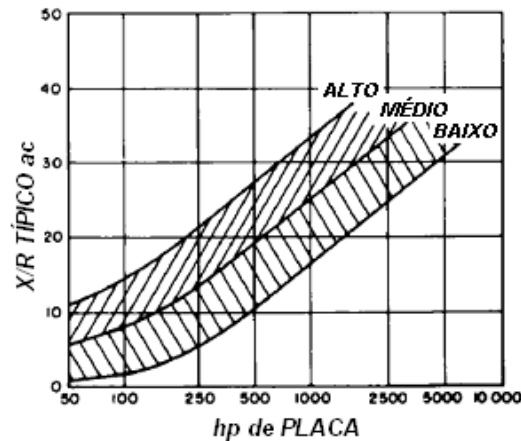


Figura 3.8 – Valores de X/R típicos para motores de indução trifásicos, [IEEE Std 141, 1993].

3.4.3 Modelagem do “*decremento ac*” em geradores síncronos

A análise detalhada de máquinas síncronas no domínio do tempo exige reatâncias de eixo direto e de quadratura, bem como várias constantes de tempo de forma a refletir corretamente as dinâmicas do campo e do estator. Para a simulação simplificada dos efeitos do curto-circuito, em termos computacionais, o fenômeno do “*decremento ac*” pode ser convenientemente modelado usando impedâncias variáveis no tempo sob uma tensão de campo constante utilizando o Teorema da Compensação

As normas “ANSI C37.5”, [ANSI C37.5, 1979] e “IEEE Std C37.010”, [IEEE Std C37.010, 2005], prescrevem que reatâncias de eixo direto são suficientemente precisas para representação de máquinas síncronas. As impedâncias subtransitórias são utilizadas primeiramente para os cálculos de “*primeiro ciclo*” e, são a base para os cálculos de “*interrupção*” subsequentes.

A Tabela 3.1 não sugere qualquer tipo de ajuste nas impedâncias de gerador síncrono para os cálculos de “*interrupção*”. Isso é proposital, pois o “*decremento ac*” de geradores é contabilizado juntamente com o “*decremento dc*”, a ser apresentado no item 3.4.4.

A modelagem do “**decremento ac**” de geradores permanece, contudo condicionada à **proximidade** do gerador ao local da falta. Se um gerador está eletricamente próximo do local do curto-circuito, a sua contribuição é considerada do tipo “*local*”. Se não, a sua contribuição, assim como o gerador, são considerados “*remotos*”.

O critério segundo o qual a contribuição do gerador síncrono é classificada como “*local*” ou “*remoto*” consiste em comparar a magnitude da real contribuição do gerador “*I_g*” para um curto circuito, com a contribuição do gerador “*i_t*” para uma falta hipotética em seus terminais. Se a relação de ***I_g / i_t*** é maior ou igual a 0,4, o gerador em questão é considerado “*local*” para aquela falta em particular. Se este não for o caso, o gerador é classificado como “*remoto*” para aquela determinada falta, [IEEE Std 551, 2006].

O mesmo critério pode, de forma equivalente, ser quantificado em termos da impedância subtransitória do gerador X''_d , em comparação com a impedância equivalente externa, Z_{ext} . De acordo com a essa formulação, a contribuição gerador é considerada “*remota*” se a relação Z_{ext} / X''_d for igual ou superior a 1,5, assumindo-se que ambas as impedâncias são expressas no mesmo MVA de base. Especial atenção deve ser dada para cálculo em sistemas não radiais

3.4.4 Modelagem do “decremento dc**” conforme a norma “ANSI” e implicações no dimensionamento de disjuntores**

Partindo-se dos conceitos firmados no capítulo anterior sobre assimetria, componente “**dc**”, “**decremento dc**” e, com a apresentação descrita em 3.2, a “ANSI” reafirma a utilização de redução separada para X e R na determinação da relação X/R no ponto da falta.

Nota-se que, a despeito disto, pela “ANSI IEEE Std C37.10”, [IEEE Std C37.010, 2005], é aceitável a utilização da magnitude da impedância complexa total, Z , ao invés da reatância equivalente total no ponto da falta. A resistência equivalente, entretanto, deve ser obtida a partir da redução da

parte resistiva do circuito. Este método é conhecido como “aproximação Z/R ” e só pode ser aplicado se a impedância complexa utilizada para a determinação da relação X/R for “*a mesma*” utilizada no cálculo da corrente de falta.

As correntes de “primeiro ciclo” quando quantificadas em termos de ampere “assimétrico total”, rms ou de pico, são diretamente dependentes da relação X/R no ponto da falta determinada a partir das reatâncias e resistências apropriadas por meio da utilização das técnicas estabelecidas.

Similarmente, as correntes de “interrupção”, calculadas conforme os preceitos da “ANSI” e aplicáveis a disjuntores de média e alta tensão, são quantificadas em termos de ampères rms assimétricos e são dependentes da relação X/R no ponto da falta, obtida a partir das reduções apropriadas de X e R , de acordo com os parâmetros da Tabela 3.1.

Além disso, as correntes de interrupção são muito dependentes da estrutura do disjuntor. Ainda, as normas “ANSI” fazem a distinção entre disjuntores fabricados e avaliados numa base de “*corrente total*”, amparados pela “ANSI C37.5”, [ANSI C37.5, 1979], e os disjuntores fabricados e avaliados numa base de “*corrente simétrica*”, amparados pela “IEEE Std C37.10”, [IEEE Std C37.010, 2005].

Ambas as classificações, “total” e “simétrica”, aplicam a noção de fonte de corrente “local” e “remota” com relação à localização da falta, conforme definido em 3.4.3. As duas classificações recomendam a aplicação de multiplicadores às correntes simétricas supridas pelos dois tipos de fonte (local e remota) para a obtenção das correntes assimétricas. São utilizados multiplicadores diferentes obtidos de vários conjuntos de curvas para as correntes supridas por fontes “locais” e “remotas”.

Esses multiplicadores são função da estrutura do disjuntor, da relação X/R do sistema no ponto da falta, da velocidade de interrupção do disjuntor, assim como seu tempo de “separação dos contatos” “*contact parting time*”.

Existe, entretanto, uma diferença importante; correntes de interrupção calculadas para disjuntores fabricados e avaliados numa base de “*corrente total*”, são as correntes efetivas, reais, enquanto que as correntes calculadas

para disjuntores avaliados numa base de “*corrente simétrica*” são aquelas a serem somente “*comparadas*” com as capacidades de interrupção simétricas dos disjuntores.

Os multiplicadores sugeridos pelas “*curvas remotas*” são maiores, em módulo, do que aqueles sugeridos pelas “*curvas locais*” porque o “*decremento ac*” dos geradores está computado nestes últimos. Assim, para se evitar superestimar a magnitude da corrente assimétrica de falta, apenas por se aplicar os multiplicadores “*remotos*”, recomenda-se considerar uma média ponderada entre as componentes “*local*” e “*remota*” da corrente simétrica de falta, [IEEE Std 551, 2006]. Os multiplicadores sugeridos nas curvas “*local*” devem ser aplicados à componente “*local*” da corrente simétrica e enquanto que os multiplicadores sugeridos nas curvas “*remoto*” devem ser aplicadas ao componente “*remoto*” da corrente simétrica, utilizando-se “*o mesmo valor de X/R no ponto da falta*”.

Neste ponto torna-se conveniente a apresentação de algumas definições e conceitos sobre os eventos e tempos relacionados à abertura de um disjuntor quando da eliminação de uma falta. A figura 3.9 apresenta os eventos e as definições dos tempos envolvidos entre o início de uma falta e a extinção total do arco num disjuntor de média ou alta tensão [Garzon Ruben D., 2002].

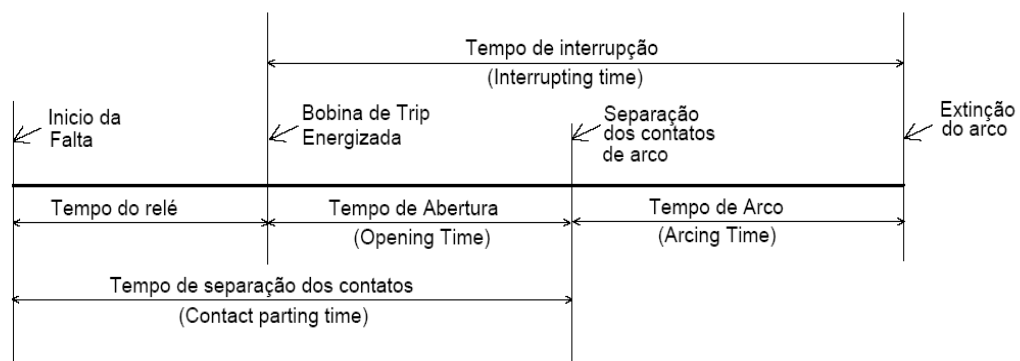


Figura 3.9 - Eventos e tempos entre o início e a interrupção de uma falta por um disjuntor.

Um método alternativo conhecido como “*NACD ratio*” ou “*no ac decrement ratio*” ou relação “*sem decremento ac*” consiste na aplicação de

um **único multiplicador composto** ao módulo da corrente de falta simétrica. O termo “*NACD ratio*” é quantificado como o conteúdo “remoto” da corrente de falta simétrica, expresso em p.u. da corrente simétrica total de interrupção [Huening JR, 1981]), conforme equação (3.2).

$$NACD_{ratio} = \left(\sum \text{Correntes } NACD \right) / \left(\frac{E}{Z} \right) \quad (3.2)$$

No quadro 3.1 se apresenta um exemplo de aplicação da relação $NACD = 5,895_{(\text{total remoto})} / 13,065_{(E/Z)}$ $NACD = 0,4513$

Quadro 3.1 - Listagem de cálculo de interrupção com a aplicação da relação NACD, [SKM, PTW Short-circuit A_Fault].

03:MILL-1	E/Z:	13.065 KA AT	-86.71 DEG (312.27 MVA)	X/R:	18.16
VOLTAGE:		13800.	EQUIV. IMPEDANCE=	0.0350 + j 0.6088	OHMS
T1	01-69-1		6.376 KA	ANG:	-266.07
C-G1	26-FDR G		0.066 KA	ANG:	90.89
C-1A	50-GEN-1		5.734 KA	ANG:	92.60
C-H1	06-FDR H		0.554 KA	ANG:	92.87
C-F1	05-FDR F		0.236 KA	ANG:	-266.52
C-E1	09-FDR E		0.099 KA	ANG:	-265.07
GENERATOR NAME -- AT BUS -- KA VOLTS PU LOCAL/REMOTE					
UTIL-1			5.895	0.86	R
GEN-2			0.311	0.92	L
GEN-1			5.673	0.03	L
TOTAL REMOTE:		5.895 KA	NACD RATIO:		0.4513

3.4.4.1 Curvas de “*decremento dc*” de disjuntores construídos e avaliados na base de “*corrente total*”

A aplicação de disjuntores avaliados (concebidos) segundo este tipo de cálculo é descrito na “ANSI C37.5”, (fora de circulação), [ANSI C37.5, 1979], e representa a base de avaliação de disjuntores mais antigos.

Quando se calculam as correntes de interrupção de um disjuntor deste tipo, o “*decremento dc*” é quantificado através da aplicação de multiplicador “local” para a componente da corrente simétrica “local” e um multiplicador “remoto” para a componente da corrente simétrica “remota”.

Estes multiplicadores são função da relação X/R no ponto da falta, do tempo de separação dos contatos do disjuntor “*contact parting time*” e

podem ser obtidos das figuras 3.10a, 3.10b e 3.10c, extraídas da norma “IEEE Std 551-2006”, [IEEE Std 551, 2006], que, por sua vez, foram transcritas da norma “ANSI C37.5”, [ANSI C37.5, 1979].

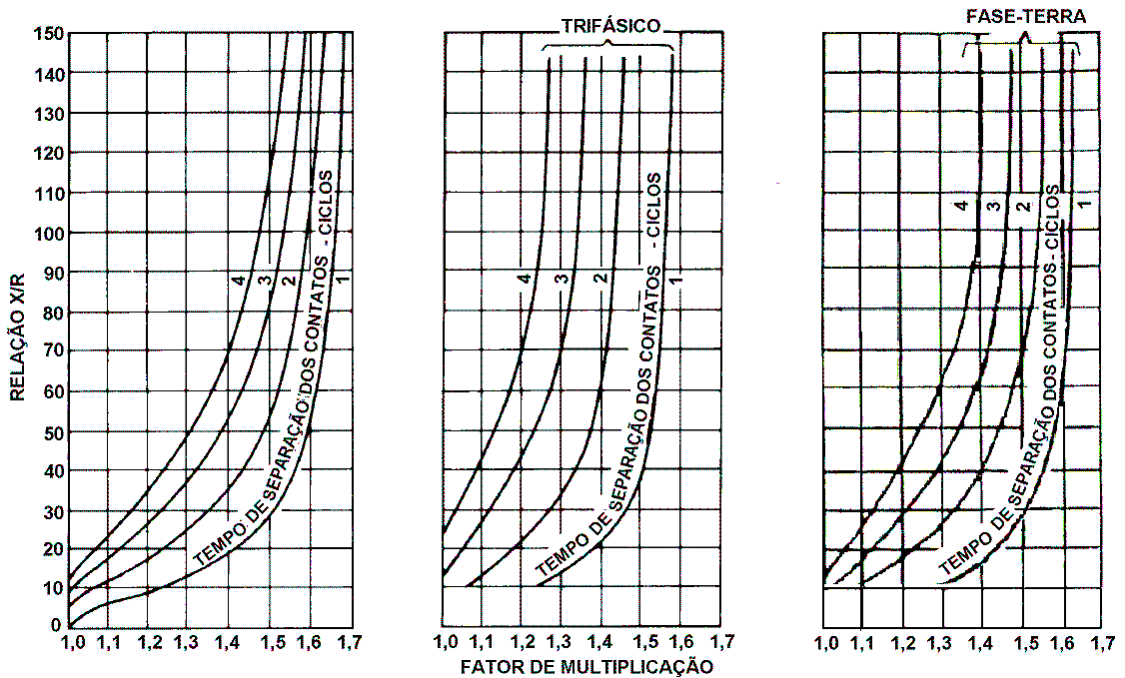


Figura 3.10a
Multiplicador REMOTO
Para faltas trifásicas e
fase-terra remotas
alimentadas por
geradores.
Inclui componentes de
“decremento dc” apenas.

Figura 3.10b
Multiplicador LOCAL
Para faltas trifásicas
alimentadas
predominantemente por
geradores.
Inclui componentes de
“decremento ac” e “dc”.

Figura 3.10c
Multiplicador LOCAL
Para faltas fase-terra
alimentadas
predominantemente por
geradores.
Inclui componentes de
“decremento ac” e “dc”.

Figura 3.10 - Fatores de multiplicação para disjuntores avaliados conforme critério de “corrente total”.

As curvas apresentadas, parametrizadas em termos de “tempo de separação dos contatos” do disjuntor, podem também ser aplicadas a partir do “tempo de interrupção” utilizando-se da Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Tempos de separação dos contatos e de interrupção de disjuntores.

Tempo de separação dos contatos “contact parting time” em ciclos	Tempo de interrupção “interrupting time” em ciclos
1	2
2	3
3	5
4	8

Os fatores de multiplicação “remoto” para disjuntores avaliados conforme o critério da corrente “total” mostrados na figura 3.10a são expressos pela equação (3.3), [St Pierre C., 2001]:

$$\text{Fator de multiplicação "remoto"}_{\text{TOTAL}} = \left(1 + 2e^{\frac{-4\pi C}{X/R}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

com

C=tempo de separação dos contatos de disjuntores “*contact parting time*”, em ciclos.

3.4.4.2 Curvas de “*decremento dc*” para disjuntores fabricados e avaliados na base de “*corrente simétrica*”

A aplicação de disjuntores avaliados segundo este tipo de cálculo é descrita na “ANSI C37.10”, [IEEE Std C37.010, 2005], e representa a base da fabricação e avaliação dos disjuntores atuais. Quando se calculam as correntes de interrupção de um disjuntor deste tipo, o “*decremento dc*” é quantificado através da aplicação de multiplicadores “local” para a componente da corrente simétrica “local” e um multiplicador “remoto” para a componente da corrente simétrica “remota”. Estes multiplicadores são também função da relação X/R no ponto da falta, do tempo de separação dos contatos do disjuntor “*contact parting time*” e podem ser obtidos das figuras 3.11, 3.12 e 3.13, extraídas da norma “IEEE Std 551-2006” [IEEE Std 551, 2006], que por sua vez foram transcritas da norma “ANSI C37.10” [IEEE Std C37.010, 2005].

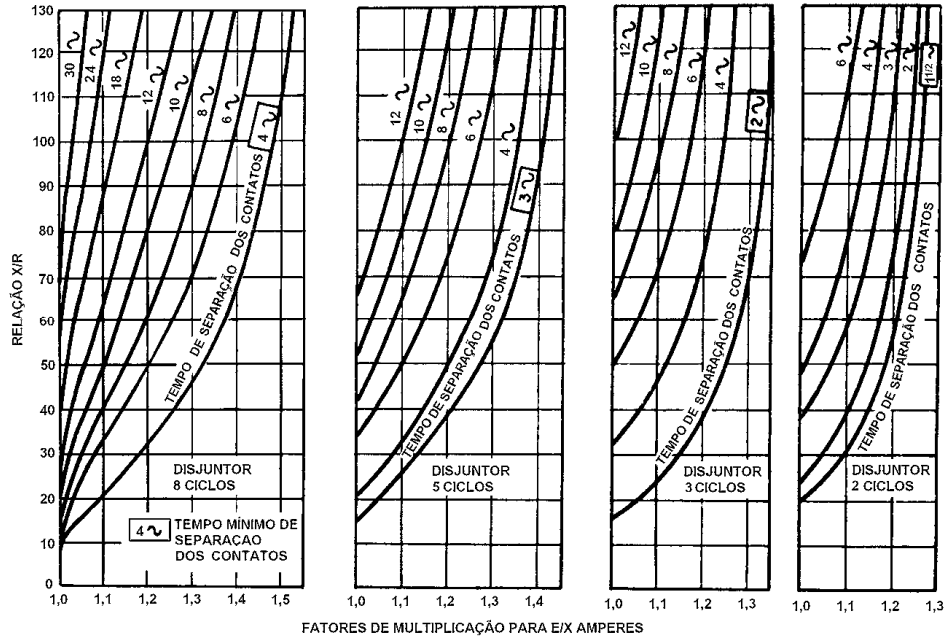


Figura 3.11 - Fatores de multiplicação REMOTO para disjuntores avaliados conforme critério de “corrente simétrica”. Falta trifásica e fase-terra. Inclui somente o componente do “decremento dc”.

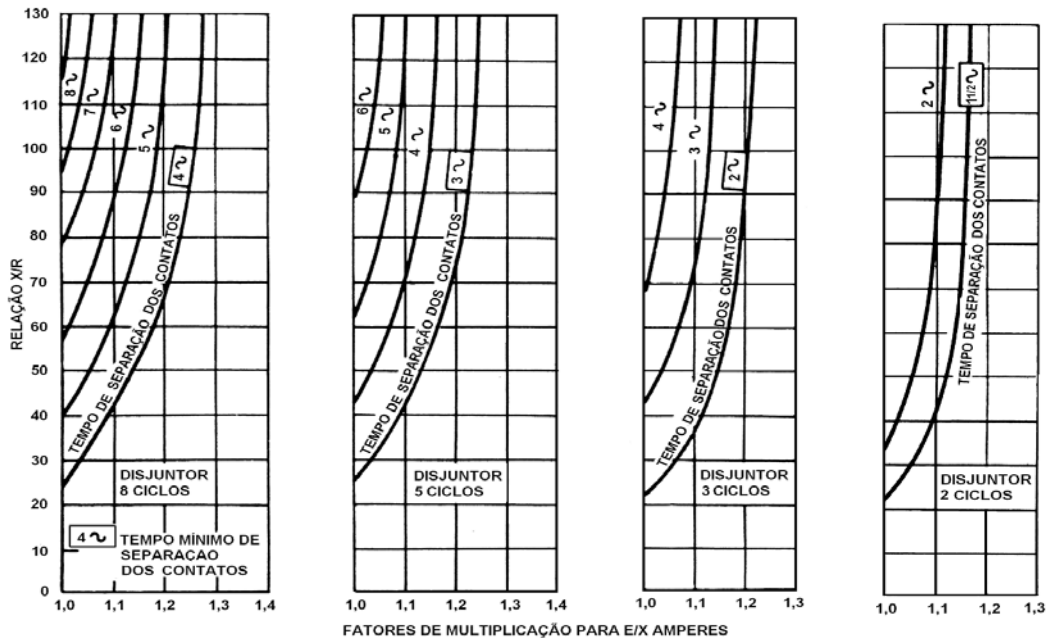


Figura 3.12 - Fatores de multiplicação LOCAL para disjuntores avaliados conforme critério de “corrente simétrica”. Falta trifásica alimentada predominantemente por geradores. Inclui os componentes de “decremento ac” e “dc”.

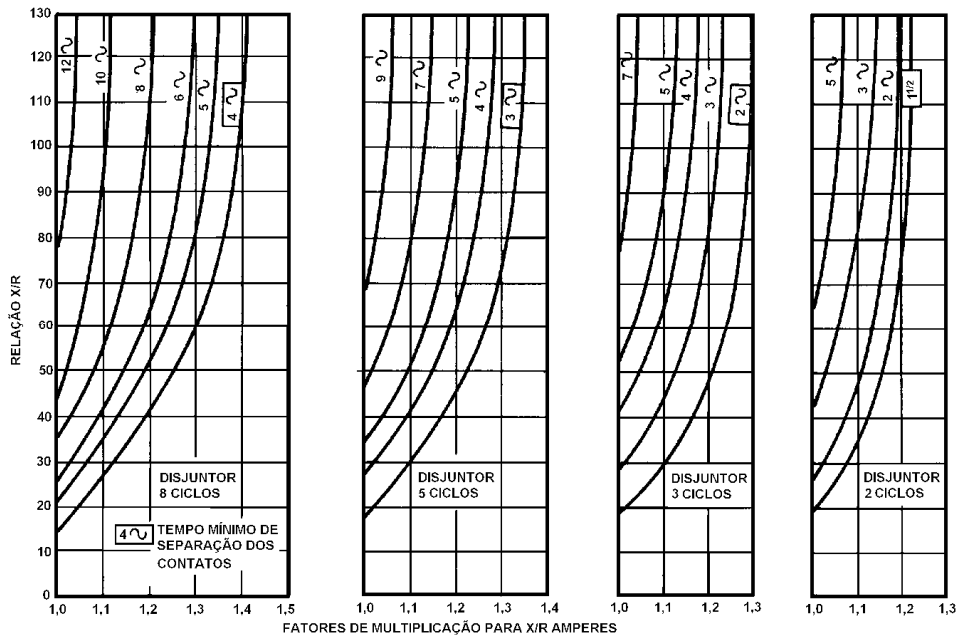


Figura 3.13 - Fatores de multiplicação LOCAL para disjuntores avaliados conforme critério de “*corrente simétrica*”.

Faltas Fase-terra alimentadas predominantemente por geradores.
Inclui os componentes de “*decremento ac*” e “*dc*”.

A figura 3.11 representa os fatores de multiplicação “remotos” aplicáveis tanto para faltas trifásicas quanto fase-terra. Salienta-se que nestes, apenas o “**decremento dc**” é considerado. As figuras 3.12 e 3.13 representam os fatores de multiplicação “locais” para faltas trifásicas e fase-terra, respectivamente. São considerados os decrementos “**ac**” e “**dc**”.

Se a corrente de curto-circuito é alimentada predominantemente por fonte “remota” o multiplicador “remoto” pode ser utilizado para uma estimativa conservadora. Da mesma maneira, se as fontes são “locais” o multiplicador “local” pode ser utilizado. Para faltas alimentadas por fontes remotas e locais deve ser aplicada uma média ponderada entre os fatores “remoto” e “local”.

As curvas “REMOTO” da figuras 3.11 e 3.10a são determinadas pelas equações (3.4) e (3.5), [Skuderna, John E., 1959].

$$\text{Fator de multiplicação "remoto" SIMETRICA} = \left(1 + 2e^{\frac{-4\pi C}{X/R}} \right)^{\frac{1}{2}} / S \quad (3.4)$$

com

$$\text{Fator de multiplicação "remoto" SIMETRICO} = \frac{\text{Fator de multiplicação "remoto" TOTAL}}{S} \quad (3.5)$$

com

C=tempo de separação dos contatos "*contact parting time*", em ciclos

S=Fator de assimetria (relação entre as correntes de interrupção assimétrica e simétrica, conforme Tabela 3.8).

Tabela 3.8 - Fatores de assimetria "S", tempo de interrupção e tempo de separação dos contatos de disjuntores.

Tempo de interrupção " <i>interrupting time</i> " em ciclos	Fator de assimetria "S"	Tempo de separação dos contatos " <i>contact parting time</i> " em ciclos
8	1,0	4
5	1,1	3
3	1,2	2
2	1,4	1

A Tabela 3.8 foi obtida a partir do gráfico da figura 3.14 extraída de [Huening JR, 1981].

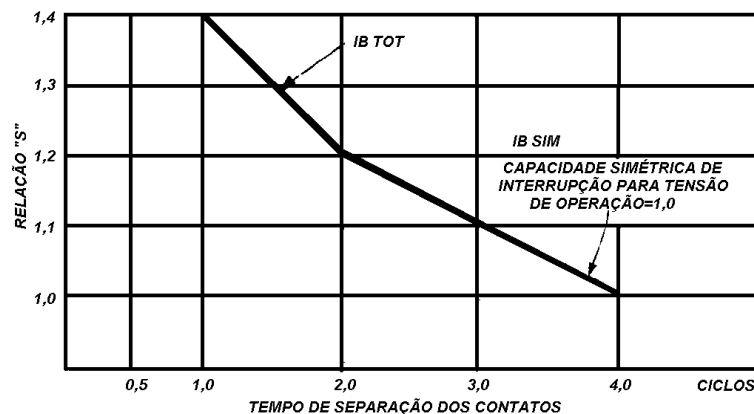


Figura 3.14 - Fatores de assimetria "S" versus tempos de separação dos contatos de disjuntores.

Já as equações utilizadas para as curvas “LOCAL” não são conhecidas (sua origem também não é apresentada nas referências). Entretanto, a referência [St Pierre C., 2001] apresenta um conjunto de equações **empíricas** para as curvas “LOCAL”, conforme equações:

$$\text{Fator de multiplicação LOCAL}_{\text{TOTAL}} = \left(K^2 + 2e^{\frac{-4\pi C}{X/R}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

$$\text{Fator de multiplicação LOCAL}_{\text{SIMETRICO}} = \left(K^2 + 2e^{\frac{-4\pi C}{X/R}} \right)^{\frac{1}{2}} / S \quad (3.7)$$

Onde:

C: Tempo de separação dos contatos “*contact parting time*” em ciclos, 60 Hertz;

K: Varia com a relação X/R conforme equação (3.8) e Tabela 3.9 abaixo;

$$K = A_0 + A_1(X/R) + A_2(X/R)^2 + A_3(X/R)^3 \quad (3.8)$$

S: Fator de Assimetria obtido da Tabela 3.8

Tabela 3.9 - Parâmetros da equação (3.8) para determinação das curvas “LOCAL_{TOTAL}” e “LOCAL_{SIMETRICO}”.

Tempo de Separação dos Contatos (ciclos)	A0	A1	A2	A3
1.0	0.9922	-0.003087	1.758E-05	-3.2101E-08
1.5	0.9949	-0.00365	1.5406E-05	-1.6553E-08
2.0	1.0035	-0.00461	2.3036E-05	-4.8874E-08
3.0	1.0034	-0.00659	4.7513E-05	-1.5705E-07
4.0	0.9994	-0.006365	3.6843E-05	-1.2899E-07

A diferença entre os conceitos de SIMÉTRICO E TOTAL é, de acordo com a “ANSI C37.010”, [IEEE Std C37.010, 2005], que o conceito TOTAL inclui um fator de assimetria que determina a componente “**dc**” da corrente de curto-circuito num determinado tempo de separação de contatos, em função da corrente rms total expresso na equação (2.16).

$$I_{TOTALrms} = I_{SIM} \sqrt{1 + I_{dc}^2} \quad (2.16)$$

Onde I_{dc} é expresso em p.u. da corrente rms de falta simétrica I_{SIM} para um determinado tempo de separação dos contatos do disjuntor. A “ANSI C37.010”, [IEEE Std C37.010, 2005], assume que um curto-circuito em qualquer sistema de corrente alternada deve produzir o máximo deslocamento da forma de onda de corrente e o quantifica assimetricamente para disjuntores construídos e ensaiados sob o critério “SIMETRICO” assumindo uma relação X/R de 17, equivalendo a uma componente de decaimento “**dc**” de constante de tempo L/R de 45 ms para sistemas em 60 Hz, conforme a figura 3.15, ou X/R igual a 14 para sistemas em 50 Hz.

O disjuntor é dimensionado para interromper uma corrente de curto-circuito assimétrica definida pelo componente “**dc**” apresentado na figura 3.15.

Esse critério veio a substituir o Fator de assimetria “S” apresentado anteriormente.

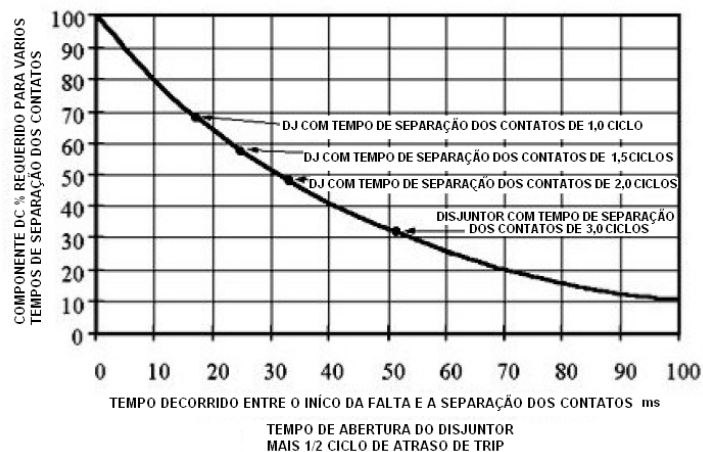


Figura 3.15 - Requisitos de construção de disjuntor para componente “**dc**” (extraída da “ANSI C47.010”).

Analicamente, a taxa de decaimento da componente “**dc**” é dada pela constante de tempo L/R do circuito em segundos através da equação (3.9).

$$T_{dc} = [X/R \text{ do circuito}] / 2\pi f \text{ (Hz)} \quad (3.9)$$

Assim, a “**componente dc**” em % da “**componente ac**” será:

$$[\%dc] = e^{-c/T_{dc}} \times 100 \text{ ou } [\%dc] = e^{(-c/45)} \times 100$$

onde “**c**” é o tempo de separação dos contatos em ms.

A “**componente dc**” da corrente de falta é apresentado na equação (3.10).

$$I_{dc} = [\%dc] \times \sqrt{2} I_{SIM} \quad (3.10)$$

E, finalmente,

$$I_{TOTALrms} = I_{SIM} \sqrt{1 + 2 \left(\frac{\%dc}{100} \right)^2} \quad (3.11)$$

Relembre-se que os valores de X/R e da constante de tempo, especificados por norma, são 17 e 45 ms respectivamente. Para valores de X/R e constante de tempo superiores utilizam-se as curvas das figuras 3.11, 3.12 e 3.13.

3.4.4.3 Curvas graduadas

Na referência [Huening JR, 1981] Huening apresentou mais dois conjuntos de curvas “**graduadas**” entre LOCAL (NACD=0) e REMOTO (NACD=1,0) para equipamentos avaliados sob o critério da corrente

SIMÉTRICA na figura 3.16, (SYM), e, para equipamentos avaliados segundo o critério de corrente TOTAL, na figura 3.17, (TOT), respectivamente. Esses dois conjuntos podem ser de particular interesse em sistemas industriais que apresentam fontes de corrente de curto-circuito locais e remotas sem a predominância desta ou daquela.

Tais situações podem ser adequadamente resguardadas por um fator de multiplicação intermediário dentre aqueles obtidos de cada uma das curvas separadamente. Consiste na utilização da relação NACD “*no ac decrement*”, cujo conceito já foi apresentado.

Por meio da relação NACD, da relação X/R no ponto de falta e, com do tempo de separação de contatos do disjuntor, obtém-se um fator único, que abrange os dois componentes da corrente de curto-circuito.

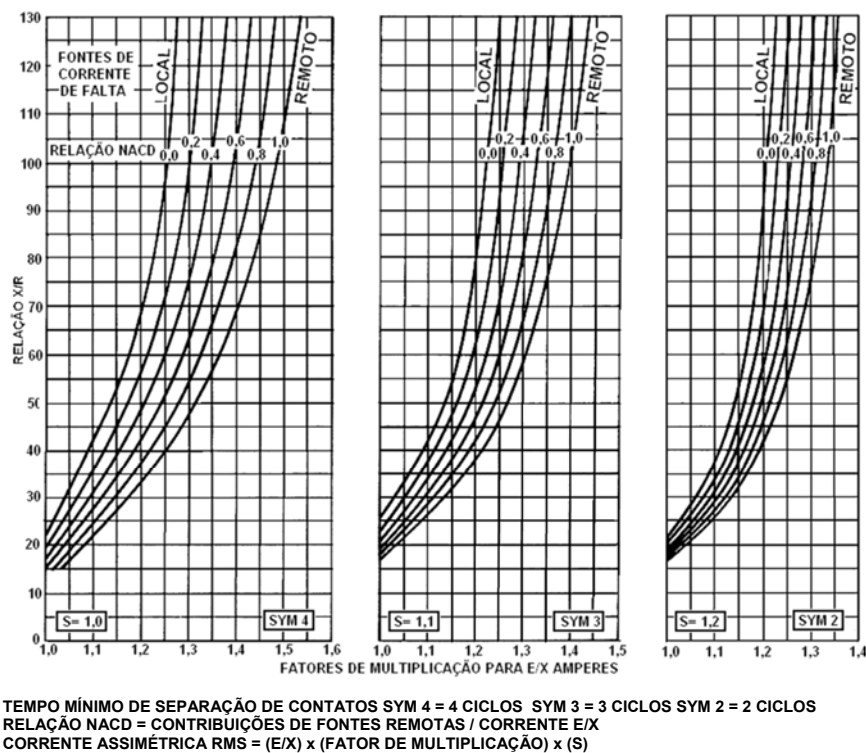


Figura 3.16 - Fatores de multiplicação de equipamentos avaliados conforme critério de corrente SIMÉTRICA para faltas trifásicas com contribuição de LOCAL a REMOTA.

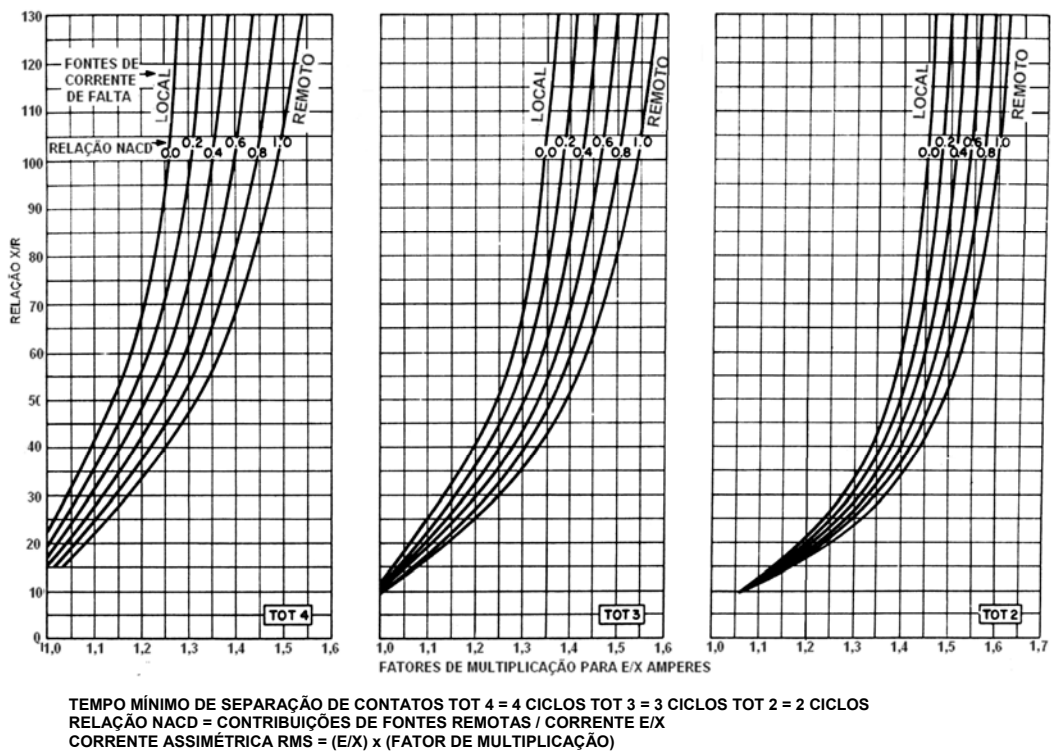


Figura 3.17 - Fatores de multiplicação de equipamentos avaliados conforme critério de corrente TOTAL para faltas trifásicas com contribuição de LOCAL a REMOTA.

A título de ilustração, considere-se a ocorrência de uma falta no ponto “A” do sistema elétrico com cogeração apresentado na figura 3.18. Uma vez que o curto-circuito ocorre praticamente nos terminais do gerador, sua contribuição é LOCAL. A contribuição do Sistema é REMOTO. A corrente de falta total é 25,0 kA da qual 38% é LOCAL.

Considerando-se a definição apresentada em 3.4.3, a contribuição do gerador é considerada REMOTO quando for menor que 40%, o que é o caso.

Assim, considerando-se um disjuntor concebido conforme o critério da corrente TOTAL, com tempo de separação dos contatos de 2 ciclos e a relação X/R no ponto “A” igual a 30, o gráfico da figura 3.10a apresenta um fator de multiplicação de 1,35, que deve ser aplicado à corrente total, ou seja a corrente de interrupção requerida é de $25,0 \times 1,35 = 37,75$ kA. Contudo, se cada fonte for considerada separadamente ter-se-á o multiplicador REMOTO de 1,35, da figura 3.10a, aplicado à parcela REMOTO da corrente de falta,

ou $1,35 \times 15,5 \text{ kA}$ e um multiplicador de 1,28, da figura 3.10b, aplicado à parcela LOCAL, ou $1,28 \times 9,5 \text{ kA}$. Essa combinação resulta numa corrente de interrupção de 33,08 kA.

Utilizando-se as curvas graduadas, para NACD de 0,62, a figura 3.17 (TOT2) apresenta um fator de multiplicação de 1,33 que define uma corrente de interrupção de 33,25 kA.

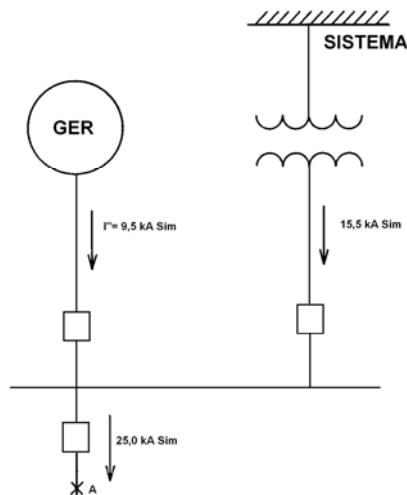


Figura 3.18 - Sistema elétrico com geração local.

Os softwares comerciais de cálculo de curto-circuito conforme a norma “ANSI” geralmente oferecem algumas opções para a determinação das correntes de interrupção segundo os preceitos da norma. As opções oferecidas por um software para o cálculo das correntes de interrupção e que podem ser identificadas na tela da Figura 3.6, campo “NACD option”, podem ser:

REMOTO – Nesta opção todas as contribuições são consideradas remotas, ou seja, $N^{\circ}D=1,0$. Toda a geração é assumida como REMOTO e apenas as curvas de decaimento “**dc**” são utilizadas (figura 3.10a e figura 3.11), que, conforme pode ser visto no exemplo apresentado, corresponde à solução mais conservativa.

PREDOMINANTE – Nesta opção, se a relação NACD é maior ou igual a 0,5, as curvas de decaimento “**dc**” são utilizadas, (figura 3.10a e figura 3.11), se NACD for menor que 0,5 as curvas que consideram os

decaimentos “*ac*” e “*dc*”, (figura 3.10b, figura 3.10c, figura 3.12 e figura 3.13), são utilizadas.

INTERPOLADO – Utiliza-se uma interpolação entre as curvas de decaimento “*dc*” e as de decaimento “*ac*” e “*dc*” com base no percentual da contribuição dos geradores que é local ou remota.

O Quadro 3.2 ilustra uma listagem de cálculo de correntes de interrupção onde se utilizou o método da “*interpolação*” para determinação dos fatores de multiplicação das correntes de interrupção para disjuntores concebidos pelo critério da corrente TOTAL e da corrente SIMÉTRICA

Quadro 3.2 - Listagem de cálculo de interrupção com a aplicação da dos fatores de correção pelo método da interpolação.

03:MILL-1	E/Z:	13.065 KA AT	-86.71 DEG	(312.27 MVA)	X/R:	18.16
	VOLTAGE:	13800.	EQUIV. IMPEDANCE=	0.0350 + J	0.6088	OHMS
	T1	01-69-1		6.376 KA	ANG:	-266.07
	C-G1	26-FDR G		0.066 KA	ANG:	90.89
	C-1A	50-GEN-1		5.734 KA	ANG:	92.60
	C-H1	06-FDR H		0.554 KA	ANG:	92.87
	C-F1	05-FDR F		0.236 KA	ANG:	-266.52
	C-E1	09-FDR E		0.099 KA	ANG:	-265.07
	GENERATOR NAME	-- AT BUS --	KA	VOLTS PU	LOCAL/REMOTE	
	UTIL-1		5.895	0.86	R	
	GEN-2		0.311	0.92	L	
	GEN-1		5.673	0.03	L	
	TOTAL REMOTE:		5.895 KA	NACD RATIO:	0.4513	
		SYM2	SYM3	SYM5	SYM8	
	MULT. FACT:	1.000	1.015	1.014	1.034	
	DUTY (KA) :	13.065	13.255	13.243	13.508	
		TOT2	TOT3	TOT5	TOT8	
	MULT. FACT:	1.377	1.183	1.069	1.023	
	DUTY (KA) :	17.991	15.457	13.960	13.365	

3.5 Roteiro para o cálculo das Correntes de Interrupção conforme a norma “ANSI”

Os cálculos podem ser feitos em p.u. (por unidade) ou em Ohms considerando-se as relações de tensão dos transformadores. Neste trabalho presumem-se os cálculos executados em p.u., e, recomenda-se o seguinte roteiro:

- 1- Obtenção do Diagrama Unifilar atualizado do sistema a ser analisado;
- 2- Obtenção do equivalente do sistema da concessionária ou do sistema remoto a qual a unidade sob análise está conectada;
- 3- Determinação da impedância de cada fonte e ramo para o tipo de falta a ser calculado, conforme Tabela 3.1;
- 4- Redução do sistema de impedâncias a uma única impedância no ponto da falta. Utilizam-se duas reduções, uma para X_{separado} e outra para R_{separado} ;
- 5- Cálculo da corrente de falta simétrica;
- 6- Cálculo da relação X/R no ponto da falta a partir dos valores de X e R obtidos em 4;
- 7- Determinação das correntes de interrupção
 - Correntes de geradores próximos à falta;
 - Corrente dos geradores para falta em seus terminais;
 - Determinação se cada gerador em questão é LOCAL ou REMOTO;
 - Aplicação dos fatores de multiplicação a partir da relação NACD, relação X/R , tipo e tempo de interrupção do disjuntor;
- 8- Comparação dos valores calculados com as características dos disjuntores após a realização das correções necessárias.

Observações:

- Se a aproximação da relação NACD for utilizada tanto em disjuntores avaliados pela corrente TOTAL ou SIMÉTRICA e o fator de multiplicação obtido for menor do que 1,0, um valor de 1,0 deve ser utilizado;
- A “IEEE std C37.10” permite um cálculo simplificado quando a relação X/R no ponto da falta for < 15 e a corrente calculada for menor que 80% da corrente de interrupção simétrica do disjuntor. Neste caso a corrente E/X calculada é comparada diretamente com a corrente do equipamento sob análise;

- As contribuições de motores de indução podem ser consideradas LOCAL, entretanto, se um grau extra de conservatismo for desejado é permitido considerá-las como REMOTO;

- Geradores que representem a entrada da concessionária são considerados REMOTO, uma vez que são assumidos “**sem decremento ac**”.

3.6 Correntes de Primeiro Ciclo conforme a norma “ANSI”

As correntes de primeiro ciclo, “*first cycle duty*”, ou correntes “**momentâneas**”, “*momentary duty*”, ou correntes de “**fechamento e travamento**”, “*close and latching duty*” são calculadas a partir do roteiro já apresentado, adotando-se as impedâncias para cálculo de primeiro ciclo, conforme Tabela 3.1, e são grandezas simétricas. Também, neste caso, sua utilização na comparação com as capacidades nominais de disjuntores deve ser precedida de correções, com a aplicação de fatores de multiplicação convenientes.

Os cálculos para disjuntores de média e alta tensão tem tratamento diferente dos aplicados para disjuntores de baixa tensão, devido ao método pelo qual os equipamentos são concebidos e testados.

Até 1991, disjuntores de alta tensão eram definidos por correntes “*rms*” de primeiro ciclo assimétricas. A “*corrente de pico*” para caracterização desses disjuntores somente foi introduzida em 1991. Multiplicadores, inicialmente 2,7 e 1,6 e, atualmente 2,6 e 1,6, são utilizados sobre a máxima corrente de interrupção do disjuntor para definição da corrente de pico “*peak current*” e da corrente de fechamento e travamento, “*close and latch current duty*”. O fator 1,6 corresponde a uma relação X/R de aproximadamente 25 e o fator 2,6 corresponde a uma relação X/R de aproximadamente 17, [IEEE Std C37.010, 2005], [IEEE Std 551, 2006].

Se os valores calculados de $X/R_{separados}$ forem inferiores aos X/R 's acima definidos os fatores obtidos são **conservativos**. Caso contrário, tais

valores não são **conservativos** se os valores de $X/R_{separado}$ forem superiores.

As equações atualmente utilizadas para determinação dos valores de primeiro ciclo de pico foram definidas no capítulo 2 e são:

$$\zeta = 0,49 - 0,1e^{-\frac{X/R}{3}} \quad (2.14)$$

$$I_{pico} = \sqrt{2} I_{ac, rms} \left(1 + e^{-\frac{2\pi\zeta}{(X/R)}} \right) \quad (2.15)$$

Frequentemente o multiplicador 2,6 é também utilizado, por simplificação, para os cálculos de disjuntores de alta e média tensão.

A equação (1.17), definida no capítulo 1, é utilizada pela “ANSI” para determinação dos valores de primeiro ciclo rms assimétrico.

$$I_{assim} = I_{sim} \sqrt{1 + 2e^{-2\pi / (X/R)}} \quad (2.17)$$

Essencialmente, a equação acima determina a corrente rms assimétrica total em 0,5 ciclos. Frequentemente, o multiplicador 1,6 é também utilizado, por simplificação, para os cálculos de disjuntores de alta e média tensão.

Abaixo, a título de ilustração dos conceitos, o quadro 3.3 apresenta um exemplo de listagem de cálculo de curto-circuito de correntes de primeiro ciclo em uma barra de média tensão.

Quadro 3.3 - Listagem das correntes de primeiro ciclo para média tensão, [SKM, PTW Short-circuit A_Fault].

3:MILL-1	E/Z:	13.985 KA AT	-86.60 DEG (334.27 MVA)	X/R:	17.71
	SYM*1.6:	22.375 KA	MOMENTARY BASED ON X/R:	21.677 KA	
	SYM*2.6:	36.361 KA	CREST BASED ON X/R:	36.341 KA	
	VOLTAGE:	13800.	EQUIV. IMPEDANCE=	0.0337 + J 0.5687	OHMS
	T1	01-69-1	6.383 KA	ANG:	-266.06
	C-G1	26-FDR G	0.191 KA	ANG:	93.27
	C-1A	50-GEN-1	5.812 KA	ANG:	92.65
	C-H1	06-FDR H	0.802 KA	ANG:	93.13
	C-F1	05-FDR F	0.414 KA	ANG:	-265.32
	C-E1	09-FDR E	0.384 KA	ANG:	-265.18

Os disjuntores de baixa tensão apresentam dados de placa de “correntes de interrupção simétricas” que, na verdade, são calculadas como correntes de primeiro ciclo, uma vez que as correntes de interrupção se iniciam no primeiro ciclo. Os fatores de assimetria empregados serão abordados posteriormente.

3.7 Roteiro para o cálculo das correntes de primeiro ciclo conforme norma “ANSI”

Os cálculos podem ser feitos em p.u., (por unidade), ou em Ohms considerando-se as relações de tensão dos transformadores. Neste trabalho presumem-se os cálculos executados em p.u., e recomenda-se o seguinte roteiro:

- 1- Obtenção do Diagrama Unifilar atualizado do sistema a ser analisado;
- 2- Obtenção do equivalente do sistema da concessionária ou do sistema remoto a qual a unidade sob análise está conectada;
- 3- Determinação da impedância de cada fonte e ramo para o tipo de falta a ser calculado;
- 4- Redução do sistema de impedâncias a uma única impedância no ponto da falta. Utilizam-se duas reduções, uma para $X_{separado}$ e outra para $R_{separado}$;
- 5- Cálculo da corrente de primeiro ciclo de falta simétrica;
- 6- Cálculo da relação X/R no ponto da falta a partir dos valores de X e R obtidos em 4;
- 7- Cálculo das correntes primeiro ciclo assimétricas e de pico;
- 8- Comparação dos valores calculados com as características dos disjuntores, após a realização das correções necessárias

3.8 Contribuição de capacitores para correntes de curto-circuito

Sob condições de falta, a descarga de um capacitor tem lugar em algum momento entre $1/30$ e $1/8$ de ciclo, dependendo da constante de tempo do sistema.

Sabendo-se que o elemento de proteção e os contatos do disjuntor ainda não operaram nesse curto intervalo de tempo, a descarga do capacitor ocorre com os contatos do disjuntor FECHADOS.

As simulações apresentadas no Capítulo 7 da “*IEEE std 551-2006*”, [IEEE Std 551, 2006], demonstram que as correntes de descarga de capacitores não apresentam efeitos durante as operações de abertura e interrupção das faltas.

Portanto, a norma ***não recomenda*** a inclusão de capacitores nos cálculos das correntes de curto-circuito momentâneas para disjuntores.

3.9 Contribuição de conversores estáticos para correntes de curto-circuito

O Capítulo 8 da norma da “*IEEE std 551-2006*”, [IEEE Std 551, 2006], trata da contribuição de conversores estáticos para correntes de curto-circuito.

Para faltas no sistema “**ac**”, o “*barramento dc*” de um conversor ou inversor provê contribuição de corrente quando este último possui fontes de corrente como motores, baterias ou células fotovoltaicas, ou quando o conversor opera como inversor, “*IEEE Std 551-2006*”, parágrafo 8.9.

Drivers, com conversores estáticos regenerativos, são considerados apenas para cálculos de curto-circuitos *trifásicos* se as massas rotativas dos motores e o equipamento estático provê transferência reversa de energia para desaceleração no momento da falta. A contribuição se apresenta apenas nas correntes de curto-circuito de primeiro ciclo, não há, portanto contribuição para correntes de interrupção e de regime.

Como resultado, conversores estáticos regenerativos são tratados, para correntes de curto-circuito, como motor de indução, sendo utilizados os seguintes parâmetros:

- Corrente de rotor bloqueado do motor de indução associado de 3,0 p.u. ou 33% com base no kVA nominal do equipamento, que deve ser o kVA nominal do transformador do conversor, ou, na inexistência de transformador, o kVA do próprio conversor.
- A relação X/R deve ser similar a do transformador do conversor ou pode se utilizar o valor de $X/R = 10$.

3.10 Aplicações das correntes de curto-circuito calculadas conforme a norma “ANSI”

Este tópico e os subsequentes tratarão de pontos relevantes da aplicação da metodologia “ANSI”, sobretudo no correto dimensionamento de disjuntores e fusíveis. Algumas definições e conceitos são necessários para o correto entendimento e aplicação adequada dos resultados dos cálculos.

3.10.1 Disjuntores de média e alta tensão

Os disjuntores de média e alta tensão apresentam características de interrupção que variam desde o método em que foi concebido, até com o ano de sua fabricação, de acordo com a evolução das normas aplicadas. Não há como prosseguir neste trabalho sem a apresentação dessas características e suas evoluções em decorrência das normas.

Esta análise terá como ponto de partida as informações de dados de placa de disjuntores de média tensão.

3.10.1.1 Definições e dados de placa

A Tabela 3.10 o foi extraída da “ANSI C37.06-2000”, [ANSI C37.06, 2000], para ilustração das características básicas de disjuntores de média tensão anteriores a 2005, quando da revisão da “ANSI Std C37.10”, [IEEE Std C37.010, 2005].

Tabela 3.10 - Características básicas de disjuntores de média tensão.

Classe de Tensão Nominal kV rms	Classe de Capacidade Nominal MVA	Máxima Tensão Nominal kV rms (1)	Fator K (2)	Corrente Nominal Amperes rms (60 Hz) (3)	Corrente de Curto-circuito Nominal (@max kV) kA rms (4)	Tempo de Interrupção Nominal Ciclos (5)	Mínima Tensão Nominal kV rms (6)	Capacidade de Interrupção simétrica Máxima kA rms (7)	Capacidade de condução de corrente de 3s kA rms (8)	Capacidade Momentânea “closing and latching” kA rms (9)	Capacidade Momentânea “closing and latching” kA crista (10)
4,16	75	4,76	1,36	1200	8,8	5	3,5	12	12	19	32
4,16	150	4,76	1,36	1200	18	5	3,5	24	24	39	65
4,16	250	4,76	1,24	1200	29	5	3,85	36	36	58	97
7,20	250	8,25	1,79	1200	17,0	5	4,6	30	30	49	81
7,20	500	8,25	1,25	1200	33,0	5	6,6	41	41	66	110
7,20	500	8,25	1,25	2000	33,0	5	6,6	41	41	66	110
13,8	250	15	2,27	1200	9,3	5	6,6	21	21	34	56
13,8	500	15	1,30	1200	18	5	11,5	23	23	37	62
13,8	500	15	1,30	2000	18	5	11,5	23	23	37	62
13,8	750	15	1,3	1200	28	5	11,5	36	36	58	97
13,8	750	15	1,30	2000	28	5	11,5	36	36	58	97

Inicialmente serão apresentadas as principais definições relativas aos dados mostrados na tabela:

(1) Máxima tensão nominal – É a máxima tensão para a qual o disjuntor é designado e seu limite superior de operação.

(2) Fator K – É a relação entre a máxima tensão nominal de operação e a tensão limite inferior da faixa de operação do disjuntor na qual as correntes de interrupção simétricas e assimétricas variam inversamente com a tensão de operação ($K=V_{\max}/V_{\min}$).

(3) Corrente nominal – A corrente nominal de um disjuntor é o limite estabelecido de corrente, em rms, à frequência nominal, que pode ser conduzida continuamente sem exceder qualquer uma das limitações impostas pela norma “ANSI C37.04-1999 (R2006)” [IEEE Std C37.04, 1999 (R2006)], relativas à elevação de temperatura.

(4) Corrente de Curto-circuito nominal ou corrente de interrupção – Para obtenção da corrente de interrupção do disjuntor em uma determinada tensão entre $1/K$ vezes a tensão nominal máxima e a tensão nominal máxima utiliza-se a seguinte equação:

Corrente de Interrupção para $V_{\max}/K \leq V \leq V_{\max}$

$$\text{Corrente de Interrupção Nominal} \left(\frac{\text{Tensão Nominal Máxima}}{\text{Tensão de Operação}} \right) \quad (3.12)$$

Corrente de Interrupção para $V \leq V_{\max}/K$

$$\text{Corrente de Interrupção Nominal} \times K \quad (3.13)$$

(5) Tempo de Interrupção Nominal – Tempo decorrido entre a energização da bobina de desligamento do disjuntor e a extinção total do arco em todos os pólos.

(6) Tensão Nominal Mínima – Tensão Nominal Máxima/ K

(7) Capacidade (Corrente) de Interrupção Máxima – Corrente de interrupção Nominal $\times K$.

Não deve ser excedida mesmo quando em tensões de operação menores que V_{\max}/K .

(8) Capacidade de condução de corrente de 3,0s – Apresenta o mesmo valor da Corrente de Interrupção Máxima.

(9) Capacidade momentânea rms ou “Close and Latch” - Corrente rms assimétrica que representa 1,6 x Corrente de Interrupção Máxima.

(10) Se a capacidade momentânea for referida a valor de crista ou de pico, o fator de multiplicação é de 2,7 x Corrente de interrupção Máxima (2,6 para disjuntores atuais).

Obviamente, como citado anteriormente, algumas dessas definições estão obsoletas, contudo, os disjuntores assim concebidos ainda estão em operação e cabe ao engenheiro identificá-las e atuar corretamente na verificação da aplicação do equipamento.

As definições expostas até agora são aplicáveis à maioria dos equipamentos existentes, contudo, em equipamentos modernos, posteriores a 2005, alguns requisitos foram alterados:

Fator K – A norma “ANSI std C37.010 1999 (R2005)”, [IEEE Std C37.010, 2005], adota, para disjuntores modernos, fator K unitário ($K=1,0$). O fator K unitário modifica o critério da utilização da corrente de interrupção apresentado anteriormente. Se um disjuntor apresenta capacidade de interrupção de 22 kA em 38 kV sua utilização em 34 kV implica em uma capacidade de interrupção também de 22 kA.

Corrente de crista – O fator 2,7, inicialmente utilizado equivalente a X/R de ensaio de aproximadamente 30, foi alterado para 2,6, equivalente a relação X/R de 17.

Máximo tempo para trip - Y - Foi incorporado às correntes nominais de fechamento, “*closing*”, travamento, “*latching*” e corrente de curta duração.

O disjuntor deve fechar e travar, “*close and latch*” para qualquer corrente cujo valor máximo de pico é igual ou inferior a 2,6 vezes em 60 Hz,

ou 2,5 vezes em 50 Hz, a corrente nominal de curto-circuito e, suportar, na posição fechado, a corrente nominal de curta duração, “*short time current*” por um período de tempo máximo como especificado em “C37.06-2000”, [ANSI C37.06, 2000]. Esses tempos estabelecem um “tempo máximo permitido para trip”, “**Y**”, “*tripping delay*” para cada grupo de disjuntores. Define-se assim o máximo tempo de trip permitido **T** conforme a equação (3.14).

$$T = Y \left[\frac{\text{Corrente de curto - circuito nominal}}{\text{Corrente de curto - circuito no disjuntor}} \right]^2 \quad (3.14)$$

O tempo especificado pela “ANSI” até 1998 era de 3 s, depois, 2 s para disjuntores com tensões nominais inferiores 100 kV e 1,0 s para disjuntores com tensões nominais superiores a 100 kV. Hoje definido como o máximo tempo/atraso permitido para trip.

Exemplificando, considere-se um disjuntor de uso externo cuja corrente de curto-circuito nominal é de 25 kA. Se a corrente de curto-circuito no sistema é de 22 kA e Y é de 2 s, qual é o máximo tempo de trip permitido?

$$T = 2,0(25/22)^2 = 2,58 \text{ s}$$

As tabelas 3.11 e 3.12, parcialmente extraídas da norma “ANSI C37.06-2000”, [ANSI C37.06, 2000], exprimem as características de curto-circuito atuais de disjuntores de alta tensão (> 1,0 kV) para uso interno (Tabela 3.11) e externo (Tabela 3.12), onde são apresentadas as definições explanadas nos parágrafos supra.

Tabela 3.11 - Características básicas de disjuntores de alta tensão para uso interno, conforme "ANSI C37.06-2000".

Tensão Nominal Máxima (kV) rms	Fator K nominal	Corrente nominal (Amperes) rms	Corrente de curto-circuito e corrente de curta duração nominais (kA) rms	Tempo de interrupção nominal (ms)	Máximo tempo de trip permitido Y (s)	Corrente de Fechamento e Travamento nominal (kA) pico
4.76	1.0	1200, 2000	31.5	83	2	82
4.76	1.0	1200, 2000	40	83	2	104
4.76	1.0	1200, 2000, 3000	50	83	2	130
8.25	1.0	1200, 2000, 3000	40	83	2	104
15	1.0	1200, 2000	20	83	2	52
15	1.0	1200, 2000	25	83	2	65
15	1.0	1200, 2000	31.5	83	2	82
15	1.0	1200, 2000, 3000	40	83	2	104
15	1.0	1200, 2000, 3000	50	83	2	130
15	1.0	1200, 2000, 3000	63	83	2	164
27	1.0	1200	16	83	2	42
27	1.0	1200, 2000	25	83	2	65
38	1.0	1200	16	83	2	42
38	1.0	1200, 2000	25	83	2	65
38	1.0	1200, 2000, 3000	31.5	83	2	82
38	1.0	1200, 2000, 3000	40	83	2	104

Tabela 3.12 - Características básicas de disjuntores de alta tensão para uso externo conforme "ANSI C37.06-2000".

Tensão Nominal Máxima (kV) rms	Fator K nominal	Corrente nominal (Amperes) rms	Corrente de curto-circuito e corrente de curta duração nominais (kA) rms	Tempo de interrupção nominal (ms)	Máximo tempo de trip permitido Y (s)	Corrente de Fechamento e Travamento nominal (kA) pico
123	1.0	1200, 2000	31.5	50	1	82
123	1.0	1600, 2000, 3000	40	50	1	104
123	1.0	2000, 3000	63	50	1	164
145	1.0	1200, 2000	31.5	50	1	82
145	1.0	1600, 2000, 3000	40	50	1	104
145	1.0	2000, 3000	63	50	1	164
145	1.0	2000, 3000	80	50	1	208
170	1.0	1600, 2000	31.5	50	1	82
170	1.0	2000, 3000	40	50	1	104
170	1.0	2000, 3000	50	50	1	130
170	1.0	2000, 3000	63	50	1	164
245	1.0	1600,2000,3000	31.5	50	1	82
245	1.0	2000, 3000	40	50	1	104
245	1.0	2000, 3000	50	50	1	130
245	1.0	2000, 3000	63	50	1	164
362	1.0	2000, 3000	40	33	1	104
362	1.0	2000, 3000	50	33	1	130
362	1.0	2000, 3000	63	33	1	164
550	1.0	2000, 3000	40	33	1	104
550	1.0	3000, 4000	50	33	1	130
550	1.0	3000, 4000	63	33	1	164
800	1.0	2000, 3000	40	33	1	104
800	1.0	3000, 4000	50	33	1	130
800	1.0	3000, 4000	63	33	1	164

3.10.1.2 Aplicações para disjuntores de média e alta tensão

Cada tipo de equipamento é concebido e ensaiado conforme um critério normalizado. A Tabela 3.13 apresenta os critérios de ensaio para vários equipamentos alta tensão com os respectivos fatores de multiplicação assimétricos.

Tabela 3.13 - Valores típicos de X/R de teste em equipamentos de Alta tensão concebidos em corrente simétrica.

Equipamento	X/R de teste	Corrente de Primeiro Ciclo	Multiplicador Assimétrico de teste	Norma
Disjuntor de Alta tensão	25	Assimétrica	1,6011	C37.10-2005
Fusíveis de potência - Não Limitadores	15 (1)	Assimétrica	1,5217 (1)	C37.41-2008
Fusíveis de potência - Limitadores	15 (1)	Assimétrica	1,5217 (1)	C37.41-2008
Fusíveis de Partida de Motores - Limitadores	15 (1)	Assimétrica	1,5217 (1)	C37.41-2008
Fusíveis de distribuição - Limitadores	10	Assimétrica	1,4377	C37.41-2008
Seccionadoras	25	Assimétrica	1,5986	IEEE Std 551
Dutos de barras e Barramentos de painéis	25	Assimétrica	1,5986	IEEE Std 551

(1) A “ANSI” estabelece X/R de 15 e alguns fabricantes utilizam fator de assimetria de 1,6

Capacidade momentânea ou “close & latching”

A “ANSI” aplica o fator de multiplicação de 1,6 vezes a corrente de interrupção simétrica rms, que corresponde a um X/R de aproximadamente 25. Para o valor de pico, utiliza-se um fator de multiplicação de 2,6 vezes a corrente de interrupção simétrica rms máxima, o que corresponde a um X/R de teste de aproximadamente 17.

Como proceder quando o valor da relação X/R calculado é superior ao X/R em que o equipamento foi concebido?

Primeiramente, para valores de X/R calculados inferiores aos de teste do equipamento, nenhuma correção adicional é necessária, contudo, para valores calculados superiores aos de teste, devem ser utilizados fatores de correção para se contabilizar a corrente “**dc**” adicional relativa ao X/R calculado. As equações (3.15), [St Pierre C., 2001], para correntes rms e, (3.16), [St Pierre C., 2001], para correntes de pico devem ser utilizadas.

$$\text{Multiplicador}_{\text{rms}} = \frac{\text{Fator de multiplicação com base no X/R calculado}}{\text{Fator de multiplicação com base no X/R de teste}} \quad (3.15)$$

$$\text{Multiplicador}_{\text{Pico}} = \frac{\text{Fator de multiplicação de pico com base no X/R calculado}}{\text{Fator de multiplicação de pico com base no X/R de teste}} \quad (3.16)$$

Assim, para valores de X/R calculados acima daqueles previstos em norma, devem ser obtidos os fatores de correção apropriados.

As equações (3.15) e (3.16), juntamente com as equações (2.10) ou (2.14) e (2.15) determinam os fatores de correção necessários.

Como ilustração da aplicação considere-se a listagem de cálculo de primeiro ciclo do quadro 3.4 onde se deseja verificar a correta aplicação, para corrente momentânea, do disjuntor de 15 kV da Tabela 3.11, com as seguintes características:

Tensão nominal máxima: 15 kV

Fator K nominal: 1,0

Corrente nominal: 1200A

Corrente de curto-circuito e corrente de curta duração: 20 kA

Tempo de interrupção nominal: 83 ms

Tempo máximo de trip permitido Y: 2s

Corrente de fechamento e travamento nominal de pico: 52 kA

Quadro 3.4 - Listagem das correntes de primeiro ciclo para média tensão.

04-MILL-2	E/Z:	14.047 KA AT	-87.02 DEG (335.76 MVA)	X/R:	22.83
	SYM*1.6:	22.475 KA		MOMENTARY BASED ON X/R:	22.294 KA
	SYM*2.6:	36.522 KA		CREST BASED ON X/R:	37.177 KA
	VOLTAGE:	13800.	EQUIV. IMPEDANCE=	0.0294 + J	0.5664 OHMS
	CONTRIBUTIONS:	GEN-2	4.084 KA	ANG:	-88.40
	C-L1	08-FDR L	1.747 KA	ANG:	91.89
	C-I1	15-FDR I	0.705 KA	ANG:	-266.82
	T2	02-69-2	6.383 KA	ANG:	-266.06
	C-M1	24-FDR M	0.628 KA	ANG:	-266.44
	AUX	AUX-1	0.503 KA	ANG:	-265.42

À primeira vista, a corrente momentânea de pico do disjuntor de 52 kA atende à corrente disponível na barra de 37,17 kA. Contudo, essa assunção contém um erro: o disjuntor foi concebido para corrente momentânea de pico sob $X/R = 17$ e o valor de X/R da aplicação é 22,83.

Neste caso, demonstrar-se-á que essa assunção não demanda consequências sérias, porém há situações em que a correção do valor do X/R torna a aplicação impeditiva.

Utilizando-se a equação (3.16):

$$\text{Multiplicador}_{\text{Pico}} = \frac{2,6466}{2,60} = 1,01792$$

Assim, a corrente momentânea de pico a ser comparada a nominal do disjuntor será $37,177 \times 1,01792$, ou seja 37,809 kA.

Corrente de interrupção

Como aplicação em disjuntores de alta tensão especificados na base de corrente TOTAL, considere-se um disjuntor com os dados de placa abaixo, aplicado a uma barra de 13,8 kV conforme quadro 3.5.

Tensão Nominal Máxima:	15 kV
Capacidade de interrupção:	500 MVA
Corrente de interrupção Máxima:	25 kA
Corrente momentânea:	40 kA
Tempo de interrupção:	50 ms

Quadro 3.5 - Listagem das correntes de interrupção em 13,8 kV, [SKM, PTW Short-circuit A_Fault].

04-MILL-2	E/Z:	12.686 KA AT	-87.08 DEG (303.22 MVA)	X/R:	23.25
	VOLTAGE:	13800.	EQUIV. IMPEDANCE=	0.0320 + J	0.6272 OHMS
	CONTRIBUTIONS:	GEN-2	4.084 KA	ANG:	-88.40
	C-L1	08-FDR L	1.166 KA	ANG:	91.82
	C-I1	15-FDR I	0.513 KA	ANG:	-267.07
	T2	02-69-2	6.378 KA	ANG:	-266.06
	C-M1	24-FDR M	0.415 KA	ANG:	-266.94
	AUX	AUX-1	0.132 KA	ANG:	-266.40
	GENERATOR NAME	-- AT BUS --	KA	VOLTS PU	LOCAL/REMOTE
	UTIL-1		5.884	0.86	R
	GEN-2		4.084	0.00	L
	GEN-1		0.420	0.93	R
	TOTAL REMOTE:	6.303 KA	NACD RATIO:	0.4969	
		SYM2	SYM3	SYM5	SYM8
	MULT. FACT:	1.024	1.051	1.038	1.062
	DUTY (KA) :	12.988	13.338	13.173	13.467
		TOT2	TOT3	TOT5	TOT8
	MULT. FACT:	1.439	1.248	1.120	1.050
	DUTY (KA) :	18.257	15.832	14.209	13.326

Partindo-se dos dados de placa fornecidos, sabe-se, por meio da potência de interrupção e corrente momentânea, que o equipamento foi avaliado numa base de corrente de curto-circuito TOTAL. Esses disjuntores são considerados com MVA constante para valores de tensão entre a máxima e a mínima e, como CORRENTE constante para tensões abaixo da mínima. Portanto, a corrente de interrupção do disjuntor na tensão do barramento será $I_{INT} = 500 / 13,8/\sqrt{3} = 20,9$ kA.

Da corrente de interrupção máxima, se obtém a mínima tensão de operação que é $V_{min} = 500/25/\sqrt{3} = 11,54$ kV. Para qualquer tensão abaixo de 11,54 kV a corrente de interrupção a ser utilizada é 25,0 kA.

Com relação à tensão mínima, sabe-se que o fator $K = \text{Tensão máxima de operação}/\text{Tensão mínima de operação} = 1,29$.

Para utilização desse equipamento em 13,8 kV considera-se a corrente de interrupção de 20,9 kA com o tempo de separação dos contatos de 2,0 ciclos (Tabela 3.8 para tempo de interrupção de 50 ms ou 3 ciclos).

Os valores calculados do quadro 3.5 para disjuntor tipo **TOT2** apresentam uma corrente de interrupção disponível é de 18,257 kA que, quando comparada a uma corrente de interrupção corrigida para 13,8 kV de 20,9 kA, trata-se de uma aplicação no limite da capacidade do disjuntor.

3.10.2 Disjuntores de baixa tensão

Os cálculos das correntes de curto-circuito, regidos pela norma “ANSI/C37.13”, [IEEE Std C37.13, 2008], apresentam as correntes de primeiro ciclo e a relação X/R para disjuntores de baixa tensão no ponto da falta. Apresenta-se no Quadro 3.6 e Quadro 3.7 as listagens típicas dos cálculos de correntes de primeiro ciclo para disjuntores de baixa tensão por dois softwares comerciais distintos.

Quadro 3.6 - Listagem-1 de correntes de curto-circuito para disjuntores de baixa tensão, [SKM, PTW Short-circuit A_Fault].

30-T12SEC	FAULT:	36.117 KA AT	-82.51 DEG (30.03 MVA)	X/R:	8.83
	VOLTAGE:	480.	EQUIV. IMPEDANCE=	0.0010 + J	0.0076	OHMS
	LOW VOLTAGE POWER CIRCUIT BREAKER	37.891 KA				
	MOLDED CASE CIRCUIT BREAKER > 20KA	40.230 KA				
	CONTRIBUTIONS:	M-T12-2	3.005 KA	ANG:	-87.04	
		M-T12-1	2.403 KA	ANG:	-86.75	
	C-T12-2	35-T12MCC	1.792 KA	ANG:	94.07	
	T12	27-T12PRI	28.940 KA	ANG:	-261.48	

Quadro 3.7 - Listagem-2 de correntes de curto-circuito para disjuntores de baixa tensão, [GE, SC Short-circuit calculation program, 1989].

*BUS S-21	E/Z=	38.718 KA(25.48MVA)AT-79.30DEG.,X/R=	5.37,	0.380 KV
	Z=	0.072875 +J	0.385582		
	MAX. LOW VOLTAGE FUSE DUTY =	39.48 SYM			
	MAX. LOW VOLTAGE POWER CIRCUIT BREAKER DUTY =	38.72			
	MAX. LV MCCB OR ICCB (RATED >20KA INT.) DUTY =	39.48			
	MAX. LV MCCB OR ICCB (RATED 10-20KA INT.) DUTY =	43.92			
	CONTRIBUTIONS IN KA				
BUS TO BUS	MAG	ANG	BUS TO BUS	MAG	ANG
TR-21P S-21	35.269	-79.366	INDMOT S-21	1.874	-81.409
	INDMOT	S-21	1.581	-75.255	

MCCB – Molded Case Circuit Breaker (Disjuntor de Caixa Moldada)

LVPCB – Low Voltage Power Circuit Breaker (Disjuntor de potência de baixa tensão)

ICCB – Insulated Case Circuit Breaker (Disjuntor de Caixa Isolada)

Verifica-se, nos quadros citados, a aplicação de valores diferenciados para fusíveis de baixa tensão, disjuntores de potência de baixa tensão, disjuntores de caixa moldada com correntes de interrupção >20kA e disjuntores de caixa moldada com corrente de interrupção entre 10 e 20 kA.

A justificativa dos valores apresentados serem diferentes está fundamentada na norma, e conseqüentemente, na relação X/R de teste, de cada equipamento. A Tabela 3.14 resume para os principais equipamentos de baixa tensão, a relação X/R de ensaio e os fatores de multiplicação para obtenção das correntes assimétricas de pico.

Convém salientar que, nas listagens, são aplicadas correntes assimétricas rms, onde os fatores de multiplicação são obtidos a partir da equação (3.17).

$$F_{LFV} = I_{rms-simetrico} \times \frac{1 + e^{\frac{-\pi}{X/R_{calculado}}}}{1 + e^{\frac{-\pi}{X/R_{teste}}}} \quad (3.17)$$

Quando as correntes de interrupção são calculadas para valores de X/R superiores aos da Tabela 3.14, faz-se necessária correção do valor calculado, o que é feito por meio da equação (3.17), originada da equação (2.10), para $t=0,5$ ciclos.

Tabela 3.14 - Valores típicos de X/R de ensaio em equipamentos de Baixa tensão concebidos em “corrente de pico”.

Equipamento	X/R de teste	Corrente de Primeiro Ciclo	Multiplicador Assimétrico de teste	Norma
Disjuntores de Potência de baixa tensão	6,598 (1)	Pico	2,3088	C37.13-2008
DJs de Potência de baixa tensão c/ Fusíveis	4,9	Pico	2,1834	C37.13-2008
DJs de caixa moldada de baixa tensão > 20 kA int	4,9	Pico	2,1834	UL-489
DJs de caixa moldada de baixa tensão 10-20 kA int	3,18	Pico	1,9782	UL-489
DJs de caixa moldada de baixa tensão < 10 kA int	1,73	Pico	1,73	UL-489
Fusíveis limitadores de baixa tensão	4,9	Pico	2,1834	UL-248
Duto de barras de baixa tensão	4,9	Pico	2,1834	IEEE Std 551

(1) Usualmente arredondado para 6,6

Assim, tomando-se como exemplo o caso do disjuntor do Quadro 3.7 identificado por:

MAX. LV MCCB OR ICCB (RATED > 20KA INT.)DUTY = 39,48 kA

Ter-se-á:

I rms simétrico calculado: 38,718 kA

X/R calculado: 5,37

X/R de ensaio: 4,90

Fator de correção = $1,557/1,527 = 1,0198$

Valor da capacidade da corrente de interrupção corrigido: = 39,49 kA

3.10.3 Fusíveis de baixa tensão

Para fusíveis de baixa tensão a Tabela 3.14 apresenta valor de X/R de teste de 4,9. Assim, ainda para o Quadro 3.7 o fusível é calculado de maneira similar, ou seja:

MAX. LOW VOLTAGE FUSE DUTY = 39.48 SYM

Ter-se-á:

I rms simétrico: 38,718 kA

X/R calculado: 5,37

X/R de ensaio: 4,90

Fator de correção = $1,557/1,53 = 1,02$

Valor da capacidade da corrente de interrupção corrigido: = 39,48 kA

3.10.4 Fusíveis de média tensão

Os fusíveis de média tensão são ensaiados em correntes assimétricas com $X/R=15$, assim, para valores de X/R superiores faz-se necessária a correção da corrente de interrupção.

Como exemplo, refira-se ao Quadro 3.4 para a aplicação de fusível de média tensão na barra 04-MILL-2. Do quadro 3.4 sabe-se:

04-MILL-2 E/Z: 14.047 KA AT -87.02 DEG (335.76 MVA) X/R : 22.83

Daí:

I rms simétrico: 14,047 kA

X/R calculado: 22,83

X/R de ensaio: 15,0

Fator de correção conforme equação (2.17) e equação (3.15) será:

$$F_c = 1,587_{(X/R=22,83)} / 1,522_{(X/R=15)} = 1,0429$$

Valor da capacidade da corrente de interrupção corrigido: = 14,65 kA

3.11 Considerações finais

No presente capítulo apresentou-se a metodologia “**ANSI**” para cálculos de correntes de curto-circuito e, como ponto mais relevante, uma explanação sobre a aplicação dos valores obtidos por meio de softwares comerciais para o dimensionamento de equipamentos de interrupção de alta, média e baixa tensão.

A atenção dispensada à grande quantidade de informações, equações, tabelas e gráficos condensados neste capítulo se deu pelo fato de tais elementos se encontrarem disseminados em várias normas e publicações e, pela necessidade de um trabalho único que reunisse todos esses dados e que fossem apresentados de forma didática.

Indispensável salientar-se também a necessidade da difusão dos Estudos de Superação de Disjuntores de alta, média e baixa tensão, principalmente num contexto atual de crescimento industrial e consequente ampliação dos sistemas elétricos correspondentes.

O próximo capítulo irá tratar da metodologia “**IEC**”, europeia, para os cálculos das correntes de curto-circuito e aplicação no dimensionamento de equipamentos de interrupção.

CAPÍTULO 4

CÁLCULO DE CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO CONFORME NORMA IEC-60909

4.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos associados à metodologia europeia “*IEC*” para cálculos das correntes de curto-circuito e dimensionamento de disjuntores de alta, média e baixa tensão e fusíveis de média e baixa tensão.

O ponto de partida desta vez são as impedâncias utilizadas nos cálculos da norma europeia salientando-se sempre a relação X/R .

Outro destaque é a coletânea de informações, conceitos e tabelas sobre disjuntores de alta, média e baixa até então dispersas entre as publicações referenciadas.

O objetivo final deste capítulo é o de tornar acessíveis as metodologias empregadas na norma e apresentar exemplos práticos de aplicação envolvendo disjuntores de média e baixa tensão, concebidos segundo a norma “*IEC*”, da qual se originaram, inclusive, as normas brasileiras que regulamentam esses equipamentos.

4.2 Escopo da Norma IEC-60909, Short-circuit Currents in Three-phase A.C. Systems.

A “IEC-60909”, [IEC 60909-0, 2001-07], é aplicável para cálculos de correntes de curto-circuito em sistemas trifásicos a.c. de baixa tensão e em sistemas trifásicos a.c. de alta tensão até 230 kV em frequências nominais de operação de 50 ou 60 Hz.

Este segmento da “IEC” estabelece um procedimento geral, conciso e aplicável, estipulando resultados que são “*geralmente*” de exatidão aceitável.

A norma apresenta um método de cálculo onde se introduz uma fonte de tensão equivalente no ponto do curto-circuito. Apesar do fato de que a utilização de técnicas de cálculos rigorosas como o método da “*superposição de Helmholtz*” ou análise no domínio do tempo não são excluídas, a “IEC-60909”, [IEC 60909-0, 2001-07], recomenda a técnica muito mais simples para fonte equivalente onde se assume a existência de uma única fonte, no local do curto-circuito, alimentando o restante do sistema, enquanto todas as outras fontes se mantêm inativas.

Para o modelamento do “**decremento ac**” a “IEC-60909” utiliza os conceitos de “longe do gerador”, “*far from generator*”, e “próximo ao gerador”, “*near to generator*”,. No cálculo de correntes de curto-circuito de pico e no modelamento do “**decremento dc**” a norma aplica conceitos diferenciando quando a corrente no ponto de falta provém de um sistema “em malha”, “*meshed*”, ou de um sistema “radial”, “*non meshed*”.

Na determinação das correntes de curto-circuito de regime a “IEC-60909” prescreve a possível necessidade de se considerar os sistemas de excitação de máquinas síncronas (inclusive dos motores síncronos em circunstâncias especiais). A importância das considerações supra no contexto das correntes de curto-circuito reside na imposição de técnicas de cálculos específicas e muito diferenciadas das apresentadas pela norma “ANSI”.

4.3 Conceitos da Norma IEC-60909

O correto entendimento e aplicação da norma “IEC-60909” exige a apresentação de alguns termos e nomenclaturas.

I'_k - Corrente de curto-circuito simétrica inicial

Valor r.m.s. da componente simétrica da corrente de curto-circuito presumida no instante da falta, considerando-se que a impedância correlacionada conserva seu valor inicial.

i_{dc} - Componente aperiódica decrescente da corrente de curto-circuito

Valor médio dos envelopes superior e inferior de uma corrente de curto-circuito que decresce a partir de um valor inicial até zero, conforme figuras 4.1 e 4.2.

i_p - Valor de pico, “crista”, da corrente de curto-circuito

Máximo valor instantâneo possível da corrente de curto-circuito presumida.

Nota 4.1 - A amplitude da corrente de curto-circuito de crista varia de acordo com o instante em que a falta ocorre. O cálculo do valor de crista (pico), i_p , da corrente de curto-circuito trifásica é efetuado na fase e no instante onde se verifica a máxima corrente de curto-circuito possível, [IEC 60909-0, 2001-07].

I_b - Corrente de curto-circuito simétrica de interrupção

Trata-se do valor eficaz de um ciclo completo da “**componente ac**”, simétrica da corrente de curto-circuito presumida, no instante da separação dos contatos do primeiro pólo do dispositivo de manobra a abrir.

I_k - Corrente de curto-circuito de regime permanente

Valor eficaz, rms, da corrente de curto-circuito que permanece, após a extinção dos fenômenos transitórios.

U_n - Tensão nominal do sistema

Tensão rms, fase-fase, pela qual o sistema é designado e à qual são referidas certas características de operação.

- Fonte de tensão equivalente $cU_n / \sqrt{3}$.

Tensão, rms, de uma fonte ideal aplicada ao ponto de curto-circuito, considerando-se o sistema de sequência positiva para cálculo da corrente de curto-circuito. Trata-se da única fonte de tensão ativa no sistema

c - Fator de Tensão “*voltage factor*”.

Relação entre a tensão equivalente da fonte e a tensão nominal do sistema U_n dividida por $\sqrt{3}$. Os valores de c são apresentados na Tabela 4.1 e a introdução do fator c se faz necessária devido a:

- Variações de tensão dependentes do tempo e local;
- Mudanças em taps de transformadores;
- Omissão de cargas e capacitâncias;
- Comportamento subtransitório de geradores e motores.

- Curto-circuito longe do Gerador, “*far from generator*”.

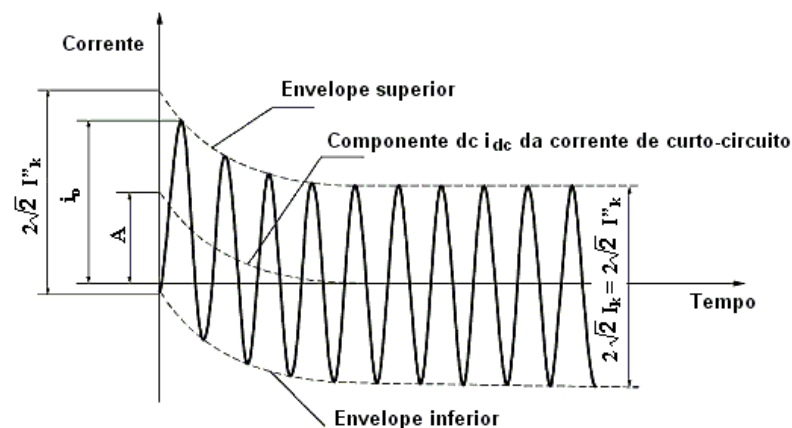
Curto-circuito durante o qual o módulo da “**componente ac**” simétrica da corrente permanece essencialmente constante

- **Curto-circuito próximo ao Gerador, “near to generator”.**

Curto-circuito durante o qual, pelo menos uma máquina síncrona contribui com uma corrente de curto-circuito simétrica maior que duas vezes sua corrente nominal, ou, um curto-circuito no qual a contribuição de motores assíncronos é maior que 5% da corrente inicial simétrica de curto-circuito I''_k , sem motores.

Formas de onda da corrente de curto-circuito

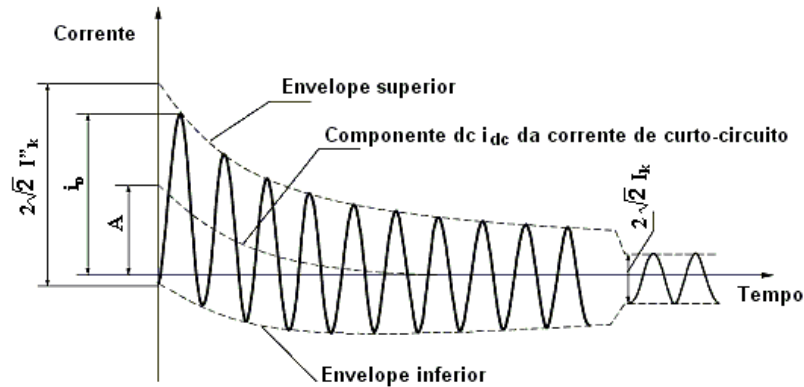
A Figura 4.1 apresenta a forma de onda para correntes de curto-circuito “longe da geração” segundo as definições da “IEC-60909”.



- I''_k - Corrente de curto-circuito simétrica inicial.
- i_p - Corrente de curto-circuito de crista (pico).
- I_k - Corrente de curto-circuito de regime.
- i_{dc} - Componente “**dc**” da corrente de curto-circuito.
- A - Valor inicial da componente i_{dc} .

Figura 4.1 - Corrente de curto-circuito em um ponto “longe da geração”, “far from generator” com a “**componente ac**” da corrente constante, [IEC 60909-0, 2001-07].

A Figura 4.2 apresenta a forma de onda para correntes de curto-circuito “próxima da geração” conforme as definições da “IEC-60909”.



- I''_k - Corrente de curto-circuito simétrica inicial.
- i_p - Corrente de curto-circuito de crista (pico).
- I_k - Corrente de curto-circuito de regime.
- i_{dc} - Componente “**dc**” da corrente de curto-circuito.
- A - Valor inicial da componente i_{dc}

Figura 4.2 - Corrente de curto-circuito em um ponto “próximo da geração”, “*near to generator*” com a “**componente ac**” da corrente decaindo, [IEC 60909-0, 2001-07].

“Decremento ac” e “decremento dc”

Para modelagem do “**decremento ac**” a “IEC-60909”, [IEC 60909-0, 2001-07], faz distinção entre curto-circuitos “*longe da geração*” e curto-circuitos “*próximos à geração*”.

Entretanto, no cálculo das correntes de curto-circuito de pico e na modelagem do “**decremento dc**” a norma diferencia quando a corrente de falta provém de um “*sistema em malha*” ou de um “*sistema não em malha*”.

Para cálculo das correntes de regime, a “IEC-60909”, [IEC 60909-0, 2001-07] prescreve que pode ser necessária a consideração dos sistemas de excitação das máquinas síncronas, incluindo motores síncronos, sob determinadas circunstâncias.

4.4 As correntes de curto-circuito

Nos tópicos a seguir serão apresentados os procedimentos para cálculo das correntes de curto-circuito conforme a norma “IEC 60909”, a partir do fator de tensão “ c ” e seus valores máximos e mínimos, das impedâncias recomendadas e suas correções, das contribuições do sistema, dos motores e geradores e suas particularidades.

4.4.1 Fatores de Tensão, “voltage factors”

A técnica da “fonte equivalente” adotada pela “IEC-60909” recomenda a aplicação de um fator de tensão c (c_{max} ou c_{min}) à tensão pré-falta nominal do sistema, com a finalidade da obtenção do módulo da tensão da fonte equivalente no local da falta. Esses fatores de tensão c são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Fator de tensão “ c ”

Tensão nominal U_n	Fator de correção de tensão “ c ” para cálculo de:	
	Correntes de curto-circuito Máximas $c_{max}^{(1)}$	Correntes de curto-circuito Mínimas c_{min}
Baixa tensão 100V a 1000V (IEC 60038, Tabela-I)	1,05 ⁽³⁾ 1,10 ⁽⁴⁾	0,95
230/400V (sistema a quatro fios)	1,00 ⁽⁵⁾	
Média tensão > 1,0 kV até 35 kV (IEC 60038, Tabela III)	1,10	1,00
Alta tensão ⁽²⁾ > 35 kV (IEC 60038, Tabela IV)		
(1) $c_{max} U_n$ não deve exceder a tensão mais alta U_m dos equipamentos do sistema de potência (2) Se nenhuma tensão nominal é definida então $c_{max} U_n = U_m$ ou $c_{min} U_n = 0,9 \times U_m$ (3) Para sistemas de baixa tensão com tolerância de +6%, exemplo sistema de 380 operando em 400V (4) Para sistemas de baixa tensão com tolerância de +10%, exemplo sistema de 440V operando em 480V (5) Conforme Tabela 12-1 IEEE Std 551-2006 [2]		
U_m máxima tensão fase-fase rms do equipamento U_n tensão nominal fase-fase rms do sistema		

4.4.2 Correntes de curto-circuito máximas

A norma em referência, de pronto, especifica dois cálculos de correntes de curto-circuito, cálculo dos valores máximos das correntes de curto-circuito e dos valores mínimos.

No cálculo das correntes de curto-circuito máximas se faz necessária a introdução das seguintes condições:

- O fator de tensão c_{max} conforme Tabela-4.1 deve ser aplicado para o cálculo das correntes de curto-circuito máximas, na ausência de normas regionais específicas;
- Deve ser escolhida a configuração do sistema que corresponda à máxima contribuição da geração e da concessionária, que incorram no máximo valor da corrente de curto-circuito no ponto escolhido;
- Quando as impedâncias equivalentes Z_Q são utilizadas para representar o sistema externo (concessionária, no caso de indústrias), a impedância equivalente a ser utilizada deve ser a *mínima* dentre as fornecidas, que deverá corresponder à máxima contribuição do sistema externo;
- As contribuições de motores devem ser incluídas de forma apropriada, conforme prescrição posterior;
- Resistências R_L de linhas aéreas e cabos devem ser introduzidas corrigidas para 20°C, [IEC 60909-0, 2001-07].

4.4.3 Correntes de curto-circuito mínimas

Para o cálculo das correntes de curto-circuito mínimas faz-se necessária a introdução das seguintes condições:

- O fator de tensão c_{min} , obtido da Tabela 4.1, deve ser aplicado no cálculo das correntes de curto-circuito mínimas;
- Deve ser escolhida a configuração do sistema que represente a mínima contribuição do sistema elétrico que incorram no mínimo valor da corrente de curto-circuito no ponto de interesse;
- Contribuição de motores deve ser **excluída**;
- Resistências R_L de linhas aéreas e cabos (condutores de fase e neutro) devem ser corrigidas para a temperatura esperada no final do curto-circuito utilizando-se a equação (4.1), [IEC 60909-0, 2001-07].

$$R_L = [1 + \alpha(\theta_e - 20 \text{ °C})] \times R_{L20} \quad (4.1)$$

Onde:

R_{L20} - é a resistência a 20°C;

θ_e - é a temperatura em graus Celcius no final do curto-circuito;

α - é um fator igual a 0,004/ K_θ , válido com suficiente precisão na maioria das aplicações para cobre, alumínio, e ligas de alumínio.

Onde K_θ é calculado para condutores de cobre com ou sem revestimento metálico por meio da equação (4.2), [IEC 60909-0, 2001-07].

$$K_\theta = \frac{254,5}{234,5 + \theta_e} = \frac{1}{1 + 0,00393(\theta_e - 20)} \quad (4.2)$$

Para condutores de alumínio ou liga de alumínio K_θ é calculado conforme a equação (4.3), [IEC 60909-0, 2001-07].

$$K_\theta = \frac{248}{228 + \theta_e} = \frac{1}{1 + 0,00403(\theta_e - 20)} \quad (4.3)$$

4.4.4- Impedâncias de curto-circuito.

Neste tópico, serão apresentadas as impedâncias prescritas pela norma “IEC-60909-0-2001” a serem utilizadas nos cálculos subseqüentes.

4.4.4.1- Geral

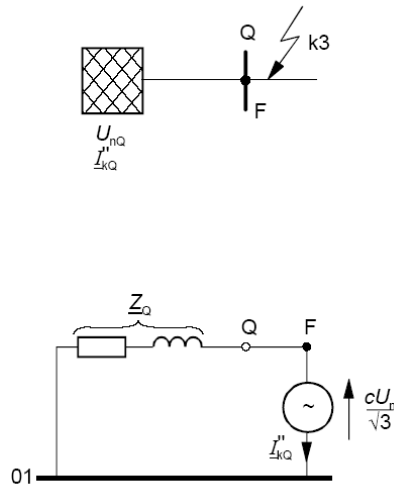
Inicialmente, considera-se para alimentadores, transformadores, linhas aéreas, cabos, reatores e equipamentos similares que as impedâncias de curto-circuito de seqüência positiva e de seqüência negativa são iguais: $Z_{(1)}=Z_{(2)}$.

A impedância de curto-circuito de seqüência zero $Z_{(0)} = U_{(0)}/I_{(0)}$ é determinada assumindo-se uma tensão a.c. entre os três condutores em paralelo e o retorno pela terra. Neste caso, a corrente que circula pelo retorno é igual a 3 vezes a corrente de que circula pelos condutores.

As impedâncias de geradores (G), transformadores (T) e unidades geradoras (gerador e transformador unitário com “OLTC”) (S), quando são calculadas as correntes de curto-circuito com a fonte de tensão equivalente no ponto da falta, conforme preceitua a “IEC-60909”, devem ser multiplicadas pelos fatores de correção de impedâncias K_G , K_T e K_{SO} , respectivamente.

4.4.4.2- Sistema (Concessionária)

Para o curto-circuito trifásico representado na Figura 4.3, alimentado por um sistema (sistema elétrico da concessionária local, no caso de indústria), no qual apenas a corrente inicial simétrica inicial I''_{kQ} no ponto Q é conhecida. A impedância Z_Q (impedância de seqüência positiva) no ponto Q deve ser determinada por (4.4).



(Fonte: IEC 60909-0)

Figura 4.3 – Sistema (Concessionária) sem transformador.

$$Z_Q = \frac{U_{nQ}}{I''_{kQ}} \times \frac{c}{\sqrt{3}} \quad (4.4)$$

Se R_Q/X_Q é conhecido pode-se calcular X_Q utilizando-se 4.5:

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_Q}{X_Q}\right)^2}} \quad (4.5)$$

Em p.u., o fator c deve ser incluído através da equação (4.6) e as diferenças nas tensões de base são tratadas pela equação (4.7).

$$Z_{\text{BASE COMUM}} = \frac{c \cdot (Z_{\text{BASE DO EQUIPAMENTO}})(\text{MVA}_{\text{BASE COMUM}})}{\text{MVA}_{\text{BASE DO EQUIPAMENTO}}} \quad (4.6)$$

$$Z_{\text{BASE COMUM}} = Z_{\text{EQUIPAMENTO}} \frac{\text{kV}_{\text{EQUIPAMENTO}}^2}{\text{kV}_{\text{BASE COMUM}}^2} \quad (4.7)$$

Se um curto-circuito trifásico é alimentado através um transformador ligado a um sistema, (concessionária), de alta ou média tensão, conforme Figura-4.4, no qual apenas a corrente inicial simétrica inicial I''_{kQ} no ponto Q é conhecida, a impedância Z_{Qt} (impedância de sequência positiva) referida ao lado da baixa tensão do transformador é determinada por (4.8).

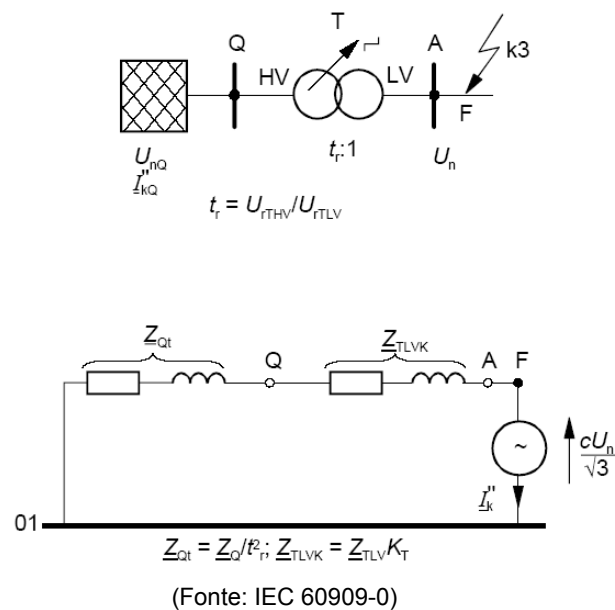


Figura 4.4 - Sistema (Concessionária) com transformador.

$$Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}}{I''_{kQ}\sqrt{3}} \times \frac{1}{t_r^2} \quad (4.8)$$

Onde:

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

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

t_r - é relação de transformação nominal com o "OLTC" ou Comutador de Taps sob Carga, na posição principal (posição na qual as características nominais do transformador foram definidas)

A relação X/R normalmente é obtida com a informação da impedância do sistema, entretanto, se o valor da resistência não pode ser obtido, de acordo com a "IEC", pode-se utilizar os valores apresentados na Tabela 4.2.

Não obstante, a utilização de resistência zero pode levar à relações X/R e à correntes de pico elevadas no ponto da falta. Assim, a utilização de valores mais reais de X/R é certamente aconselhável.

A Tabela 4.3, extraída de [St Pierre C., 2001], apresenta sugestões mais realistas de valores a serem adotados para X/R .

Tabela 4.2 - Valores de X/R para o Sistema, conforme "IEC 60909-0"

Tensão kV	X/R
≥ 35 kV	∞ ($X_Q=Z_Q$ e $R_Q=0$)
< 35 kV	10 ($X_Q=0,995 Z_Q$ e $R_Q=0,1X_Q$)

Tabela 4.3 - Valores estimados para X/R do sistema

Localização	X/R
Remota ou final de linha longa	3 - 8
Próximo a subestação abaixadora	10 - 15
Próximo a estação geradora	20 - 25

As correntes de curto-circuito simétricas iniciais I''_{kQmax} e I''_{kQmin} do lado de alta tensão do transformador, normalmente são fornecidas pela concessionária.

4.4.4.3- Transformadores de dois enrolamentos

As impedâncias de curto-circuito de sequência positiva de transformadores de dois enrolamentos com ou sem "OLTC", "on-load tap changer" ou comutador de taps sob carga, podem ser calculadas a partir dos dados de placa do equipamento conforme equações (4.9) a (4.11):

$$Z_T = \frac{U_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (4.9)$$

$$R_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \quad (4.10)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (4.11)$$

Onde:

U_{rT} - é a tensão nominal do lado da alta ou da baixa tensão;

I_{rT} - é a corrente nominal do transformador do lado da alta ou da baixa tensão;

S_{rT} - é a potência aparente nominal do transformador;

P_{krT} - é a perda total nos enrolamentos para corrente nominal;

u_{kr} - é a tensão de curto-circuito para corrente nominal em %;

u_{Rr} - é a componente resistiva da tensão de curto-circuito em %.

A componente resistiva u_{Rr} pode ser calculada das perdas totais nos enrolamentos P_{krT} para corrente nominal I_{rT} , ambas referidas ao mesmo lado do transformador.

Pode-se também utilizar a equação (4.12), a partir das perdas no cobre em carga do transformador, obtidas da folha de ensaios do fabricante (que normalmente apresenta as perdas em carga e perdas em vazio). As perdas em vazio são as relativas à magnetização, enquanto que as perdas em carga correspondem às de magnetização mais as perdas nos enrolamentos (perdas no cobre).

A Tabela 4.4, extraída de [Kasikci, Ismail, 2002], apresenta valores característicos para transformadores de média e alta tensão.

$$\%R = \frac{(\text{Perdas em carga} - \text{Perdas em vazio}) * 100}{\text{Potência nominal}} \quad (4.12)$$

As unidades de perdas em carga e em vazio e potência nominal deverão ser as mesmas, seja kW ou kVA.

Tabela 4.4 Valores característicos para transformadores de alta tensão

Tensão nominal U_r (kV)	Potência nominal S_r (MVA)	Tensão de curto-circuito u_{kr} (%)	Perdas nos enrolamentos P_{krT} (%)	Perdas em vazio P_{0rT} (%)	Corrente em vazio i_{0rT} (%)
≤ 30	2 - 4	6,0	0,9 - 0,8	0,17 - 0,14	1,3 - 1,1
	5 - 10	7,0	0,8 - 0,7	0,13 - 0,11	1,0 - 0,8
	12,5 - 40	10,0	0,6 - 0,4	0,08 - 0,06	0,8 - 0,5
30 < U_{rTHV} ≤ 110	6,3 - 10	10,0	0,9 - 0,8	0,18 - 0,14	0,9 - 0,8
	12,5 - 40	11,0	0,8 - 0,5	0,10 - 0,07	0,8 - 0,5
	50 , 60	13,0	0,4	0,06	0,5 - 0,05
	80	14,0	0,5	0,05	0,45 - 0,05
110	100 - 350	12 - 16	0,31 - 0,19	0,05 - 0,03	0,45 - 0,05
110 < U_{rTHV} ≤ 220	100 - 1000	10 - 20	0,32 - 0,19	0,065 - 0,035	0,47 - 0,04
220 < U_{rTHV} ≤ 380	100 - 1000	11 - 20	0,4 - 0,2	0,07 - 0,04	0,48 - 0,04

Quando não se dispõe da folha de ensaios do fabricante sugere-se a utilização de valores típicos de relação X/R como aqueles apresentados na Figura 4.5, e Tabela 4.5, extraídas da “ANSI C37.010”, [IEEE Std C37.010, 2005].

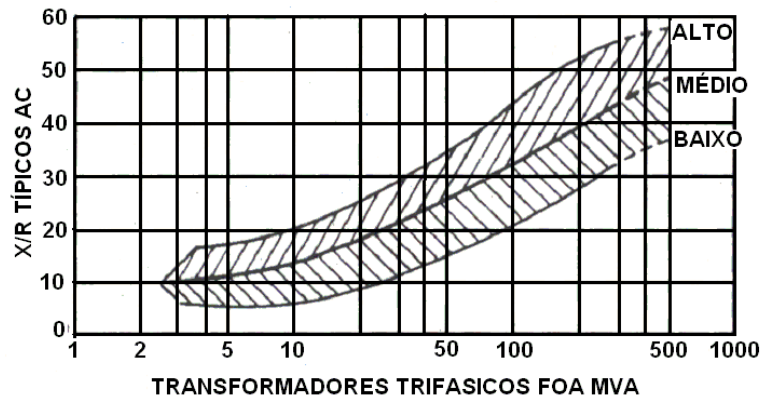


Figura 4.5 - X/R típicos para transformadores FOA, “Forced-oil forced air”, ou OFAF óleo-forçado ar-forçado - Extraída da “ANSI C37.010-2005”

Tabela 4.5 - Fatores de correção para X/R da Figura 4.5 quando a classe de resfriamento do transformador não é “FOA” (OFAF)

Classe	MVA	Fator
ONAN (óleo-natural ar natural) (OA)	Todos	1,67
ONAF (óleo-natural ar-forçado) (FA)	Até 14,9	1,33
ONAF (óleo-natural ar-forçado)(FA)	16,0 e acima	1,25
OFAF (óleo-forçado ar-forçado) (FOA)	Todos	1,00

Para os cálculos da corrente de curto-circuito de pico, i_p , ou da “**componente dc**”, i_{dc} a resistência deve ser considerada.

Fatores de correção

Para transformadores de dois enrolamentos com ou sem “*OLTC*” adicionalmente, deve ser introduzido um fator de correção de impedância, K_T , conforme as equações (4.13) e (4.14).

A justificativa para sua utilização é a correção do valor calculado da corrente de curto-circuito “máxima” no caso de transformadores com impedância elevada a qual possa provocar quedas de tensão superiores a 10%, mesmo considerando-se o fator de correção de tensão “ c_{max} ”.

$$K_T = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_T} \quad (4.13)$$

Onde:

$$x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT}) \quad (4.14)$$

Assim, a impedância corrigida será conforme (4.15).

$$Z_{TK} = K_T Z_T = K_T (R_T + jX_T) \quad (4.15)$$

4.4.4.4- Geradores síncronos

Neste tópico serão tratados os aspectos das contribuições de geradores síncronos à luz da “IEC-60909”. Alguns conceitos serão introduzidos, como o fator de decremento “ μ ” e o coeficiente de escala de corrente de regime máxima e mínima, “ λ_{max} e λ_{min} ”, relativos ao comportamento do regulador de tensão do gerador, para correntes de regime.

4.4.4.4.1- Geral

Quando se calcula a corrente de curto-circuito inicial simétrica em sistemas alimentados diretamente por geradores, sem transformadores, como em sistemas industriais ou em sistemas de baixa tensão, a impedância definida na equação (4.16) é a que deve ser utilizada para sequência positiva, tomando como referência o diagrama fasorial apresentado na Figura-4.6.

$$Z_{GK} = K_G Z_G = K_G (R_G + jX''_d) \quad (4.16)$$

Com o fator de correção obtido das equações (4.17) e (4.18).

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{C_{max}}{1 + X''_d \text{sen}(\phi_{rG})} \quad (4.17)$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{C_{max}}{1 + X''_d \text{sen}(\text{arcos}(pf_R))} \quad (4.18)$$

Onde:

C_{max} - é o fator de correção de tensão, conforme Tabela-4.1;

U_m - é a tensão nominal do sistema;

U_{rG} - é a tensão nominal do gerador;

Z_{GK} - é a impedância subtransitória do gerador corrigida;

Z_G - é a impedância subtransitória de sequência positiva do gerador $Z_G = R_G + jX''_d$;

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

pf_R - é o fator de potência nominal do gerador

x''_d - é a reatância subtransitória relativa do gerador referida à impedância

nominal $x''_d = \frac{X''_d}{Z_G}$ onde $Z_G = \frac{U_{rG}^2}{S_G}$

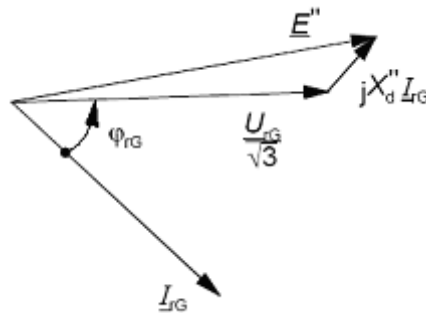


Figura 4.6 - Diagrama fasorial de gerador síncrono em condições nominais.

O fator de correção K_G para cálculo da impedância subtransitória corrigida Z_{GK} foi introduzido devido a utilização da fonte de tensão equivalente $cU_r/\sqrt{3}$ ao invés da tensão subtransitória E'' , atrás da reatância subtransitória do gerador síncrono.

Em outras palavras, o fator K_G possibilita tensões internas mais elevadas através da redução da impedância da fonte de forma que se possa utilizar tensão de fonte de 1,0 pu. Um software que calcule a tensão interna com base na corrente a plena carga e utilize esta tensão no cálculo das correntes de falta, não requer o ajuste de impedância por K_G .

A título de exemplo, a Figura 4.7 demonstra o cálculo da tensão interna de uma máquina síncrona quando $R=0$.

A corrente de falta será aproximadamente igual quando a tensão interna é calculada e utilizada para a determinação da corrente de falta nos terminais do gerador. A tensão interna será 1,131 pu, assim $I_{pu} = V_{pu}/X_{pu} = 1,131/0,2 = 5,65$ pu quando a reatância sem correção é utilizada com a tensão interna da máquina.

Para comparação, a reatância subtransitória do gerador utilizando as equações (4.16) e (4.17) será $K_G \times Z_G = 0,893 \times 0,2 = 0,1786$ pu.

Utilizando-se a tensão de fonte de 1,0 pu, a corrente de falta será $V_{PU}/X_{PU} = 1,0/0,1786 = 5,60$ pu. Ou seja, a correção da reatância proposta pela equação (4.16) leva a uma margem de erro dentro de 1,0% da corrente real.

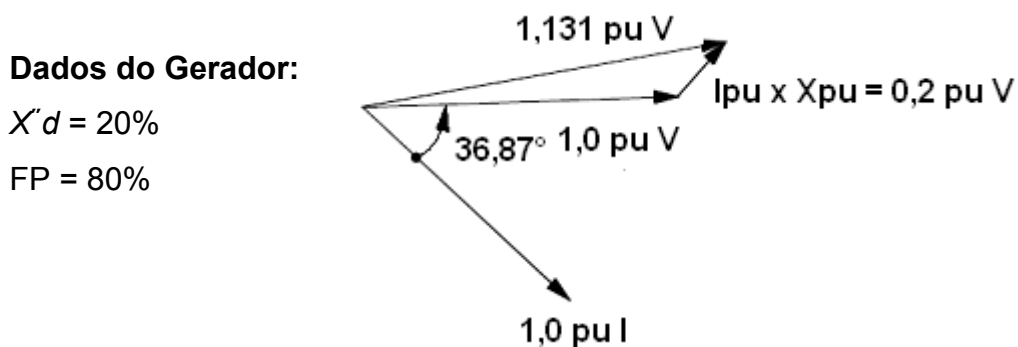


Figura 4.7 - Diagrama fasorial para o gerador síncrono em condições nominais.

A “IEC-60909” prescreve que, os valores da Tabela 4.6, para resistências R_{Gf} , podem ser utilizados na corrente de curto-circuito de pico com suficiente precisão.

Tabela 4.6 - Valores de R_{Gf} e X/R para máquinas síncronas recomendados pela “IEC”.

kV	MVA	R_{Gf}	X/R	R/X
$\geq 1,0$	≥ 100	$0,05 X'_d$	20,00	0,05
$\geq 1,0$	< 100	$0,07 X'_d$	14,29	0,07
$< 1,0$	Todos	$0,15 X'_d$	6,67	0,15

Além do decaimento da “**componente dc**”, os fatores 0,05, 0,07 e 0,15 apresentados na Tabela 4.6 também levam em consideração o decaimento da “**componente ac**” da corrente de curto-circuito durante o primeiro meio ciclo após o estabelecimento da falta. A influência das temperaturas dos enrolamentos em R_{Gf} não é considerada.

Nota 4.2 - Os valores de R_{Gf} devem ser utilizados para os cálculos de correntes de curto-circuito de pico. Esses valores, entretanto, não podem ser utilizados para os cálculos apropriados da componente aperiódica, $i_{d.c.}$, da corrente de curto-circuito, conforme a equação $i_{d.c.} = \sqrt{2}I_k'' e^{-2\pi.f.t/RX}$. O valor efetivo da resistência do estator de máquinas síncronas é geralmente muito menor do que os R_{Gf} fornecidos acima. Neste caso, o fabricante da máquina deve fornecer os valores corretos a serem utilizados, [IEC 60909-0, 2001-07].

Quando a tensão de saída do gerador é diferente de U_{rG} , é necessária a utilização de U_G indicada na equação (4.19) ao invés de U_{rG} na equação (4.17) para os cálculos das correntes de curto-circuito.

$$U_G = U_{rG} (1 + p_G) \quad (4.19)$$

Onde p_G é a faixa de regulação de tensão do gerador.

Para impedâncias de sequência negativa de geradores síncronos aplica-se K_G da equação (4.17) conforme (4.20):

$$Z_{(2)GK} = K_G(R_{(2)G} + jX_{(2)G}) = K_G Z_{(2)G} \approx K_G Z_G = K_G(R_G + jX''_d) \quad (4.20)$$

Se os valores de X''_d e X''_q são diferentes, o valor determinado pela equação (4.21) pode ser utilizado.

$$X_{(2)G} = (X''_d + X''_q)/2 \quad (4.21)$$

Para impedância de curto-circuito de sequência zero de geradores síncronos aplica-se, ainda com K_G , conforme a equação (4.22):

$$Z_{(0)GK} = K_G(R_{(0)G} + jX_{(0)G}) \quad (4.22)$$

A existência de uma impedância de aterramento entre o fechamento da estrela do gerador e terra deve ser representada **sem** o fator de correção K_G .

4.4.4.4.2- Contribuições de geradores síncronos para as correntes de curto-circuito

- Corrente de curto-circuito inicial máxima

A corrente de curto-circuito inicial é calculada para a condição de corrente “*longe da geração*”, sendo que os fatores de correção para geradores e subestações geradoras unitárias, já apresentados, devem ser considerados.

- Corrente de curto-circuito de pico

A corrente de pico também deve ser calculada considerando curto-circuito “*longe da geração*”. As particularidades apresentadas, se o caminho da falta é em “malha” ou “radial”, aplicam-se também neste caso. A impedância do gerador, assim como da subestação gerador/transformador elevador deve considerar os fatores de correção já apresentados.

- Corrente de curto-circuito de interrupção simétrica

O decréscimo da corrente simétrica de curto-circuito, para uma falta nos terminais do gerador é quantificado em função do fator μ , conforme equação (4.23):

$$I_b = \mu I''_k \quad (4.23)$$

Onde:

- I_b - Corrente de interrupção simétrica no tempo t ;
 I'_k - Corrente de curto-circuito inicial;
 μ - Fator de decremento para um tempo t , definido por 4.24:

$$\mu = 0,84 + 0,26e^{-0,26r}, \text{ para } t_{\min} = 0,02 \text{ s} \quad (4.24)$$

$$\mu = 0,71 + 0,51e^{-0,30r}, \text{ para } t_{\min} = 0,05 \text{ s}$$

$$\mu = 0,62 + 0,72e^{-0,32r}, \text{ para } t_{\min} = 0,10 \text{ s}$$

$$\mu = 0,56 + 0,94e^{-0,38r}, \text{ para } t_{\min} \geq 0,25 \text{ s}$$

Sendo r definido como a relação da corrente de curto-circuito I'_{kG} , nos terminais do gerador e a corrente nominal, I_{rG} , do gerador. Se r é menor que 2,0, então, o fator μ é tomado com valor igual a 1,0 para todos os tempos de separação dos contatos. A Figura 4.8, extraída da “IEC-60909-0-2001”, apresenta o fator μ para vários tempos t_{\min} e vários valores de r .

Pode-se utilizar interpolação na obtenção de outros valores de μ para valores de t_{\min} diferentes dos apresentados. A equação (4.24) é aplicável a turbo geradores, geradores de pólos salientes e compensadores síncronos com excitação rotativa ou estática (excitações estáticas com atraso mínimo de 0,25 s e com a tensão máxima de excitação não excedendo 1,6 vezes a tensão nominal em carga).

Para todos os outros casos, o fator μ deve ser tomado como sendo igual a 1,0. Se a falta é alimentada por mais de um gerador síncrono em paralelo, a corrente de interrupção total é a soma das correntes de interrupção individuais. Numa falta suprida por vários geradores de uma malha, como primeira aproximação, pode se estipular a corrente de interrupção como sendo igual a corrente de curto-circuito inicial. O cálculo é então reduzido à determinação da corrente de curto-circuito inicial I'_k no ponto da falta.

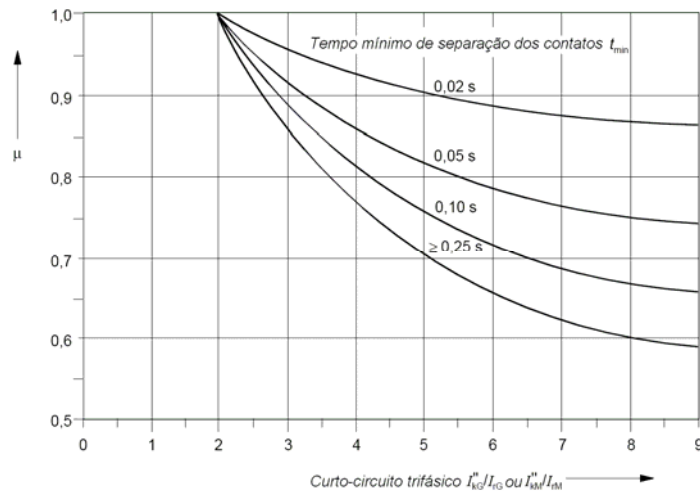


Figura 4.8 - Fator μ para o cálculo das correntes de interrupção I_b

- Correntes de curto-circuito de regime

A corrente de curto-circuito de regime de um gerador depende de sua reatância síncrona, da influência da saturação, do desempenho do regulador de tensão e da máxima tensão de excitação da máquina. A "IEC" prescreve dois cálculos de corrente de curto-circuito de regime: máxima e mínima.

Corrente de curto-circuito de regime máxima

Para a corrente de curto-circuito de regime máxima o gerador síncrono deve estar operando para condição de excitação máxima, conforme (4.25).

$$I_{kmax} = \lambda_{max} I_{rG} \quad (4.25)$$

Onde:

I_{kmax} Corrente de regime máxima;

I_{rG} é a corrente nominal do gerador;

λ_{max} coeficiente de escala de corrente de regime máxima.

O coeficiente λ_{max} pode ser obtido das figuras 4.9 e 4.10, extraídas da “IEC 60909”, tanto para máquinas de pólos lisos como de pólos salientes.

A reatância saturada $X_{d_{sat}}$ é o inverso da relação de curto-circuito em vazio da máquina.

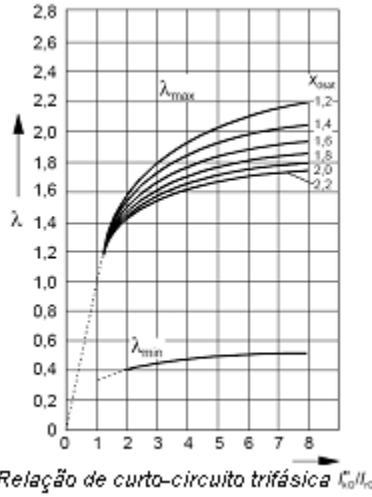
A “IEC-60909” considera para o calculo das correntes de regime dois modelos de excitação:

A Serie-1 considera um modelo de excitação estática cujo suprimento de potência é feito por meio de transformador de potencial ligado aos terminais do gerador, conforme pode ser visto no Anexo-6

O segundo modelo, Serie-2, considera a representação matemática do sistema de excitação estático com alimentação composta, ou seja, com suprimento de potência feito por meio de correntes e tensões do gerador, conforme pode ser visto no Anexo-6.

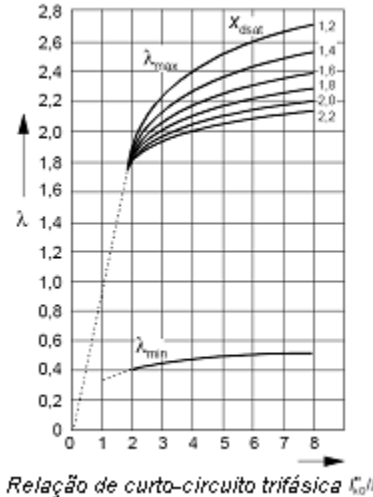
As curvas de λ_{max} do regulador *Série 1* são baseadas na maior tensão de excitação possível com 1,3 vezes a excitação nominal para potência aparente e fator de potência nominais em máquinas de rotor cilíndrico (Figura 4.19a) ou 1,6 vezes a tensão de excitação nominal em máquinas de rotor de pólos salientes (Figura 4.10a)

As curvas de λ_{max} do regulador *Série 2* são baseadas na maior tensão de excitação possível com 1,6 vezes a excitação nominal para potência aparente e fator de potência nominais em máquinas de rotor cilíndrico (Figura 4.9b) ou 2,0 vezes a tensão de excitação nominal em máquinas de rotor de pólos salientes (Figura 4.10b)



Relação de curto-circuito trifásica I_{sc}/I_n

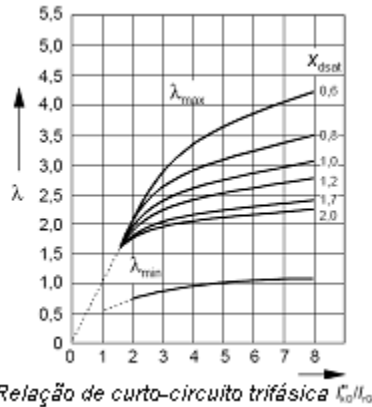
Figura 4.9a Coeficientes λ_{max} e λ_{min} para reguladores serie-1



Relação de curto-circuito trifásica I_{sc}/I_n

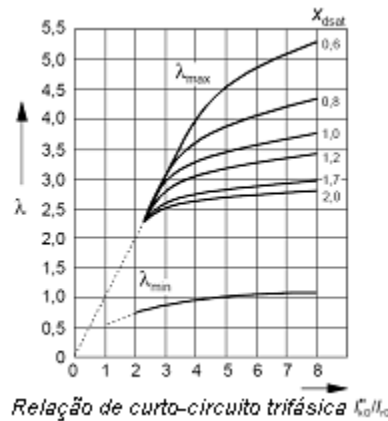
Figura 4.9b Coeficientes λ_{max} e λ_{min} para reguladores serie-2

Figura 4.9 - Coeficientes λ_{max} e λ_{min} para geradores com rotor cilíndrico



Relação de curto-circuito trifásica I_{sc}/I_n

Figura 4.10a Coeficientes λ_{max} e λ_{min} para reguladores serie-1



Relação de curto-circuito trifásica I_{sc}/I_n

Figura 4.10b Coeficientes λ_{max} e λ_{min} para reguladores serie-2

Figura 4.10 - Coeficientes λ_{max} e λ_{min} para geradores com rotor de pólos salientes

A Tabela 4.7 apresenta o resumo dos limites de excitação dos reguladores *Série-1* e *Série-2* para máquinas com rotores de pólos lisos e de pólos salientes no cálculo de correntes de curto-circuito de regime máximas.

Tabela 4.7 - Tipos de excitação e limites para cálculos de contribuição de regime de máquinas síncronas

Excitatriz Tipo	Limite de excitação	
	Turbo gerador	Gerador de pólos salientes
Série 1 "Series One"	1.3	1.6
Série 2 "Series Two"	1.6	2.0

Corrente de curto-circuito de regime mínima

Para a corrente de curto-circuito de regime mínima, assume-se operação do gerador com excitação constante a vazio, ou seja, o regulador de tensão não está efetivo, de acordo com a expressão 4.26.

$$I_{kmin} = \lambda_{min} I_{rG} \quad (4.26)$$

Onde:

I_{kmin} - Corrente de regime mínima;

I_{rG} - Corrente nominal do gerador;

λ_{min} - Coeficiente de escala de corrente de regime mínima:

O coeficiente λ_{min} pode ser obtido das figuras 4.9 e 4.10, extraídas de "IEC-60909", e, no caso de corrente de curto-circuito de regime mínima, introduz-se o fator $c = c_{min}$, conforme Tabela 4.1.

A título de ilustração da contribuição de geradores para correntes de curto-circuito, a Figura 4.11, extraída de [SKM, PTW IEC_Fault Reference Manual], apresenta o diagrama unifilar de um sistema elétrico composto, para fins didáticos, de uma concessionária U, com potência de curto-circuito de 100 MVA e dois geradores de 100 MVA, com fatores de potência diferentes.

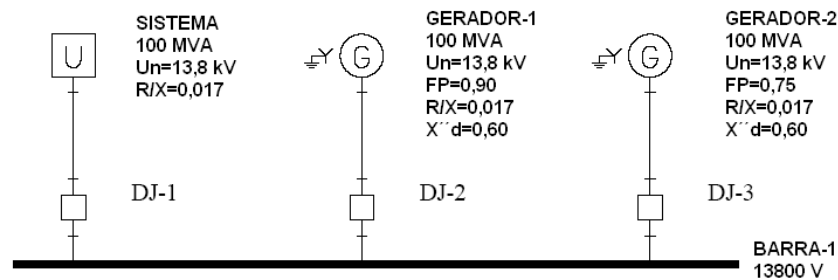


Figura 4.11 - Diagrama unifilar do sistema exemplo

O Quadro 4.1 apresenta as listagens das correntes de curto-circuito conforme “IEC-60909-2001”, [SKM, PTW Short-circuit IEC_Fault].

Iniciando-se pelo sistema da concessionária U, os valores apresentados na listagem do Quadro 4.1 podem ser verificados a partir da equação (4.4), reescrita em função de S''_{kQ} .

$$Z_Q = \frac{U_{nQ}^2}{S''_{kQ}} \times c \quad Z_Q = \frac{13,8^2}{100} \times 1,1 = 2,09484 \text{ Ohms}$$

A corrente de curto circuito inicial I''_k da concessionária será, a partir da equação (4.4):

$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_Q} = \frac{1,1 \times 13,8}{\sqrt{3} \times 2,09484} = 4,1836 \text{ kA}$$

Como o sistema da concessionária é considerado *longe da geração*, “far from generator”, tem-se que $I''_k = I_b = I_k$, ou seja, a corrente simétrica inicial I''_k é igual a corrente simétrica de interrupção I_b que é igual a corrente de regime permanente I_k , uma vez que não há decremento “ac”.

Portanto, a corrente de curto-circuito inicial I''_k é de 4,1836 kA.

A corrente de pico, aplicando a equação (2.11) com $X/R = 58,82$ será:

$$I_{pico} = 11,545 \text{ kA}$$

A “**componente dc**” é calculada a partir da equação (4.27), [IEC 60909-0, 2001-07].

$$i_{dc} = \sqrt{2} I_k'' e^{-2\pi f t R / X} \quad (4.27)$$

Onde:

- f** - frequência;
- t** - tempo, em segundos.

Adotando $t=0,02s$, tem-se:

$$i_{dc} = 4,1836 \sqrt{2} e^{-2\pi \cdot 60 \cdot 0,02 \cdot X / 0,017}$$

$$i_{dc} = 5,218 \text{ kA}$$

$$I_b = 4,1836 \text{ kA} = I_k''$$

A corrente de interrupção assimétrica pode ser determinada com base na equação (2.16). Assim, $I_{b\text{Assimétrico}} = \sqrt{I_b^2 + I_{dc}^2} = 6,688 \text{ kA}$.

Quadro 4.1 - Listagem das correntes de curto-circuito conforme “IEC-60909”, [SKM, PTW Short-circuit IEC_Fault]

THREE PHASE IEC 60909 FAULT REPORT					
System Frequency(Hz): 60		Tmin: 0.02 sec.			
Calculate Maximum Short-Circuit Current					

*FAULT BUS: BARRA-1 Voltage: 13.800 kV Eq. Volt. Source: 1.10 p.u.					
Sk": 543005 kVA		Sk: 442857 kVA		Ib asym: 36.155 kA	

	Ik" (kA)	iDC (kA)	ip (kA)	Ib (kA)	Ik (kA)

Total Fault Current	22.718	28.334	62.720	22.458	18.528
GROUP CONTRIBUTIONS ----- referred to 13.800 kV					
INDIVIDUAL CONTRIBUTIONS:					
SISTEMA	4.184	5.218	11.550	4.184	4.184
GERADOR-1	8.795	10.970	24.282	8.712	7.872
GERADOR-2	9.739	12.146	26.887	9.563	8.100

DETAIL SOURCE INFORMATION -----					
INDIVIDUAL CONTRIBUTIONS:					
SISTEMA	NETWORK FEEDER		Status: NON-MESHED, FAR		
Equivalent Z(Ω):	0.035 + j 2.095		or 2.095/89.0°		
R/X:	0.017		Peak factor x(b): 1.952		
GERADOR-1	SYNCH GENERATOR		Status: NON-MESHED, NEAR		
Equivalent Z(Ω):	0.017 + j 0.996		or 0.996/89.0°		
R/X:	0.017		Peak factor x(b): 1.952		
Lambda:	1.882	μ:	0.991		
Ir(rated kA):	4.184	Ik"/Ir:	2.102		
Machine Type:	SALIENT-POLE		Lambda Curve: Series One		
GERADOR-2	SYNCH GENERATOR		Status: NON-MESHED, NEAR		
Equivalent Z(Ω):	0.015 + j 0.900		or 0.900/89.0°		
R/X:	0.017		Peak factor x(b): 1.952		
Lambda:	1.936	μ:	0.982		
Ir(rated kA):	4.184	Ik"/Ir:	2.328		
Machine Type:	SALIENT-POLE		Lambda Curve: Series One		

A partir da equação (4.18), calcula-se K_G para o Gerador-1.

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{C_{max}}{1 + X_d'' \text{sen}(\text{arcos}(pf_R))} = K_G = \frac{13,8}{13,8} \cdot \frac{1,1}{1 + 0,60 \text{sen}(\text{arcos}(0,9))}$$

$$K_G = 0,87195$$

Com base na equação (4.28), calcula-se I_k'' .

$$I_k'' = \frac{cU_n}{K_G X_d''} = \frac{1,1 \times 1,0}{0,87195 \times 0,60} = 2,102556 \text{ pu} \quad (4.28)$$

Portanto, como $r = I_k''/I_r$ é maior que 2, (2,1026), considera-se que a contribuição é “próxima ao gerador”, “*near to generator*”.

A corrente de base neste exemplo é

$$= \frac{100.000 \text{ kVA}}{13,8 \text{ kV} \sqrt{3}} = 4.183,69 \text{ A, ou seja, } I_k'' = 2,10255 \times 4.183,69 = 8,795 \text{ kA}$$

Para a determinação da corrente de interrupção simétrica I_b aplicam-se as equações (4.23) e (4.24).

Considerando-se $t=0,02$ e $r=2,102556$ que resulta em $\mu=0,9905$.

Portanto, $I_b = 0,9905 \times 8,795 = 8,7117 \text{ kA}$

A componente contínua é calculada aplicando-se a equação (4.27).

$$i_{d.c.} = \sqrt{2} \cdot 8,795 \cdot e^{-2\pi \cdot 60 \cdot 0,02 \cdot 0,017} = 10,969 \text{ kA}$$

$$\text{Assim, } I_{b\text{Assimétrico}} = \sqrt{I_b^2 + I_{dc}^2} = 14,007 \text{ kA}$$

Para determinação da corrente de regime máxima I_{kmax} tem-se:

$$I_{kmax} = \lambda_{max} I_{rG} \quad (4.25)$$

considerando-se $X_{dsat}=1,60pu$, tem-se λ_{max} da Figura 4.10a aproximadamente igual a 1,90.

$$\text{Logo, tem-se } I_{kmax} = 4,184 \times 1,90 = 7,949 \text{ kA}$$

Utilizando-se o mesmo procedimento já descrito, calcula-se K_G para o Gerador-2.

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{C_{max}}{1 + X_d'' \text{sen}(\text{arcos}(pf_R))} = K_G = \frac{13,8}{13,8} \cdot \frac{1,1}{1 + 0,60 \text{sen}(\text{arcos}(0,75))}$$

$$K_G = 0,78748$$

Da equação (4.28)

$$I_k'' = \frac{cU_n}{K_G X_d''} = \frac{1,1 \times 1,0}{0,78748 \times 0,60} = 2,3281 \text{ pu, que corresponde a}$$

$$I_k'' = 9,740 \text{ kA}$$

Para a determinação da corrente de interrupção simétrica I_b aplica-se a equação (4.24) considerando $t=0,02$ e $r=2,3281$ que resulta em $\mu=0,982$

$$\text{Logo, } I_b = 0,982 \times 9,740 = 9,564 \text{ kA.}$$

A componente contínua é determinada conforme procedimento aplicado anteriormente.

$$i_{dc} = i_{d.c.} = \sqrt{2} \cdot 9,740 \cdot e^{-2\pi \cdot 60 \cdot 0,02 \cdot 0,017} = 12,146 \text{ kA}$$

$$\text{Logo, } I_{b\text{Assimétrico}} = \sqrt{I_b^2 + I_{dc}^2} = 15,459 \text{ kA}$$

Note-se que como as contribuições estão em fase, dado que a relação R/X é a mesma para todas as fontes.

Portanto, $I_{bTOTAL} = I_{bGERADOR1} + I_{bGERADOR2} = 4,1836 + 8,7117 + 9,564 = 22,459 \text{ kA}$

Finalmente, para determinação da corrente de regime máxima de I_{kmax} do Gerador-2 aplica-se novamente a equação (4.25), utilizando λ_{max} obtido da Figura 4.10a, para X_{dsat} de 1,60 pu, igual a 1,95 tem-se, $I_{kmax} = 4,184 \times 1,95 = 8,159 \text{ kA}$.

4.4.4.5- Motores e Compensadores síncronos

No cálculo da corrente de curto-circuito inicial simétrica, I''_k , da corrente de curto-circuito de pico i_p , da corrente de interrupção simétrica e da corrente de regime I_k , a “IEC” prescreve que, compensadores síncronos sejam tratados como geradores síncronos.

Motores síncronos que possuam regulador de tensão também, de acordo com a “IEC”, deverão ser tratados como geradores síncronos, conforme a equação (4.29). Contudo, o fator K_S é igual a 1,0, uma vez que motores possuem um campo fixo, a potência ativa flui para a máquina e a potencia reativa flui da máquina para o sistema.

$$Z_{SK} = K_S(Z_S), K_S = 1,0 \quad (4.29)$$

Quando os dados do motor não são disponíveis e, considerando-se que a “IEC” não apresenta valores de referência, recomenda-se adotar os valores de reatância e kVA apresentados nas Tabelas 4.8 e 4.9, extraídas de [IEEE Std C37.010, 2005].

Tabela 4.8 - Impedâncias típicas para motores síncronos

Numero de pólos	RPM em 60 Hz	RPM em 50 Hz	Reatância X''dv	μ para 0,05 s
> 16	< 450	< 375	28 %	0,885
8 - 14	514 - 900	428,6 - 759	20 %	0,824
2 - 6	≥ 1200	≥ 1000	15 %	0,779

Tabela 4.9 - kVA/Hp ou kVA/kW típicos para motores síncronos

Fator de potência nominal	kVA aproximado
80% adiantado	1,0 kVA / Hp ou 1,33 kVA / kW
90% adiantado	0,9 kVA / Hp ou 1,18 kVA / kW
100%	0,8 kVA / Hp ou 1,06 kVA / kW

4.4.4.6- Gerador e transformador unitário com “OLTC” (comutador de taps sob carga)

No cálculo de correntes de curto-circuito para faltas no lado da Alta tensão do transformador unitário em subestações geradoras (S) com “OLTC”, conforme mostra a Figura 4.12, a equação (4.30) utiliza a impedância de toda a estação.

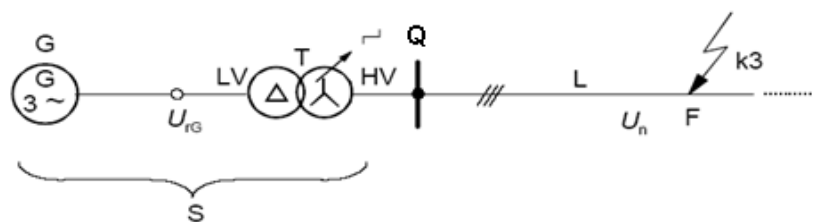


Figura 4.12 - Estação geradora (S) – Transformador unitário com “OLTC”

$$Z_S = K_S (t_r^2 Z_G + Z_{THV}) \quad (4.30)$$

O fator de correção é determinado pela expressão 4.31

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \cdot \frac{C_{\max}}{(1 + [X_d'' - X_T] \sin \varphi_{rG})} \quad (4.31)$$

Onde:

- Z_S - é a impedância corrigida da estação geradora com “*OLTC*” referida ao lado da alta tensão;
- Z_G - é a impedância subtransitória do gerador $Z_G = R_G + jX''_d$ sem o fator de correção K_G ;
- Z_{THV} - é a impedância do transformador unitário referida ao lado da Alta tensão, sem o fator de correção K_T ;
- U_{nQ} - é a tensão nominal do sistema no ponto de conexão Q da estação de geração;
- U_{rG} - é a tensão nominal do gerador;
- φ_G - é o ângulo de fase entre I_{rG} e $U_{rG}/\sqrt{3}$;
- x''_d - é a reatância subtransitória relativa com relação à impedância nominal ($x''_d = X''_d/Z_{rG}$ onde $Z_{rG} = U_{rG}^2/S_{rG}$);
- x_T - é a reatância relativa do transformador unitário na posição principal (central) do “*OLTC*”: $x_T = X_T/(U_{rT}^2/S_{rT})$;
- t_r - é a relação de transformação nominal do transformador unitário $t_r = U_{rTHV}/U_{rTLV}$.
- U^b - é a tensão de operação mais alta antes do curto-circuito

Se a mínima tensão de operação do lado da Alta tensão do transformador unitário, $U^b_{Qmin} \geq U_{nQ}$, é bem conhecida (devido ao longo histórico de operação do sistema), então se pode utilizar o produto $U_{nQ} \cdot U^b_{Qmin}$ ao invés de U^2_{nQ} da equação (4.31).

Por outro lado, quando se busca a mais elevada corrente parcial de curto-circuito, então, U_{nQ} deve ser utilizado ao invés de U^b_{Qmin} , ou seja, a equação do K_S original deve ser utilizada.

Assumiu-se que a tensão de operação nos terminais do gerador é igual a U_{rG} . Se a tensão U_G é permanentemente mais alta do que U_{rG} , então

$U_{Gmax} = U_{rG}(1 + p_G)$ deve ser introduzida ao invés de U_{rG} com, por exemplo, $p_G=0,05$.

4.4.4.7- Gerador e transformador unitário sem “OLTC” (comutador de taps sob carga)

No cálculo de correntes de curto-circuito em subestações geradoras (SO) sem “OLTC”, conforme Figura 4.12 a equação (4.32), com a impedância de toda a estação é utilizada para faltas no lado da Alta tensão do transformador.

$$Z_{SO} = K_{SO}(t_r^2 Z_G + Z_{THV}) \quad (4.32)$$

O fator de correção indicado na equação (4.33) também deve ser utilizado.

$$K_{SO} = \frac{U_{nQ}}{U_{rG}(1 + p_G)} \cdot \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \cdot (1 \pm p_T) \cdot \frac{C_{max}}{1 + x''_d \text{sen } \varphi_{rG}} \quad (4.33)$$

onde

Z_{SO} - é a impedância corrigida da estação geradora sem “OLTC”, ou seja, relação de transformação t_r constante, referida ao lado da alta tensão;

Z_G - é a impedância subtransitória do gerador $Z_G = R_G + jX''_d$ sem o fator de correção K_G ;

Z_{THV} - é a impedância do transformador unitário referida ao lado da Alta tensão, sem o fator de correção K_T ;

U_{nQ} - é a tensão nominal do sistema no ponto de conexão Q da estação de geração;

U_{rG} - é a tensão nominal do gerador; $U_{Gmax} = U_{rG}(1 + p_G)$. Com, por ex. p_G variando de 0,05 a 0,10;

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

x''_d - é a reatância subtransitória relativa do gerador com relação à impedância nominal ($x''_d = X''_d/Z_{rG}$ onde $Z_{rG} = U_{rG}^2/S_{rG}$);

t_r - é a relação de transformação nominal do transformador unitário $t_r = U_{rTHV}/U_{rTLV}$.

$1 \pm p_T$ deve ser introduzido se o transformador unitário possui apenas comutador de taps sem carga e algum tap é utilizado; se não $1 \pm p_T = 1$.

Quando se procura a maior corrente de curto-circuito parcial da estação na alta tensão do transformador sem “OLTC” deve-se escolher $1 - p_T$.

4.4.4.8 Motores assíncronos

Motores de média e baixa tensão contribuem para a corrente de curto-circuito inicial I''_k , para a corrente de curto-circuito de pico i_p e para a corrente de curto-circuito simétrica de interrupção I_b .

As contribuições de motores de média tensão devem ser consideradas nos cálculos da máxima corrente de curto-circuito quando nos CCM's (Centro de Controle de Motores) dos circuitos auxiliares de subestações geradoras, assim como em sistemas industriais e similares (indústrias químicas e petroquímicas aciarias estações de bombeamento, etc.). Para motores assíncronos de baixa tensão, suas contribuições às correntes de curto-circuito iniciais, I''_k , devem ser desprezadas se forem inferiores a 5% da corrente de curto-circuito inicial I''_{kM} , calculada sem motores.

As impedâncias de rotor bloqueado, $Z_M = R_M + jX_M$, de sequência positiva e negativa de motores assíncronos podem ser determinadas pela equação (4.34).

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (4.34)$$

onde

U_{rM} - é a tensão nominal do motor;

I_{rM} - é a corrente nominal do motor;

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

I_{LR}/I_{rM} - é a relação entre a corrente de rotor bloqueado e a corrente nominal do motor;

Se R_M/X_M é conhecida, então X_M pode ser calculada pela expressão 4.35.

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + (R_M / X_M)^2}} \quad (4.35)$$

A “IEC” define, de acordo com a potência do motor, os valores de reatância e relação R/X apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Reatâncias e X/R para motores assíncronos conforme “IEC”

Tipo	X/R	R/X (IEC)	Reatância (1)
≥ 1000 kW/par de pólos (670 HP/par de pólos)	10,0	0,10	$X_M=0,995Z_M$
< 1000 kW/par de pólos (670 HP/par de pólos)	6,67	0,15	$X_M=0,989Z_M$
Grupo de motores de baixa tensão com cabos	2,38	0,42	$X_M=0,922Z_M$

(1) Com $Z_M = 100 \times I_{rM}/I_{LR}$

A “IEC-60909” não propõe nenhum valor típico de $Z_M\%$ quando I_{LR} , e I_{rM} não estão disponíveis. Alguns autores, entre eles [St Pierre C., 2001], sugerem a utilização dos valores contidos na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Valores típicos de I_{LR}/I_{rM} para motores assíncronos

Tipo	Reatância X'' %	I_{LR}/I_{rM}	μ para 0,05 s (1)
Eficiência normal	16,7	6,00	0,795
Alta Eficiência	13,3	7,50	0,763
Grupo de motores de baixa tensão com cabos	20,0 (2)	5,0 (2)	0,824

(1) 0,05 s é o tempo típico de separação de contatos de disjuntores de alta tensão.

(2) Valor sugerido pela “IEC”.

4.4.4.8.1 Contribuições de motores assíncronos para correntes de curto-circuito

Os motores de média e baixa tensão, quando conectados ao sistema onde ocorre a falta “através de transformadores de dois enrolamentos”, **podem** ser desprezados no cálculo das correntes de curto-circuito no ponto Q, ver Figura-4.13, se a condição estabelecida na equação (4.36) for satisfeita.

$$\frac{\sum P_{rM}}{\sum S_{rT}} \leq \frac{0,8}{\left| \frac{c100 \sum S_{rT}}{\sqrt{3}U_{nQ}I''_{kQ}} - 0,3 \right|} \quad (4.36)$$

Onde:

$\sum P_{rM}$ - é a soma das potências ativas nominais dos motores de média e baixa tensão que devem ser considerados;

$\sum S_{rT}$ - é a soma das potências aparentes de todos os transformadores pelos quais os motores são alimentados;

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

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

c - é o fator de correção da tensão da Tabela 4.1.

Os motores de baixa tensão são normalmente conectados ao barramento por meio de cabos de diferentes bitolas e comprimentos. Buscando a simplificação dos cálculos, a “IEC” permite que grupos de motores, incluindo seus cabos, constituam um único motor equivalente conforme Figura 4.13.

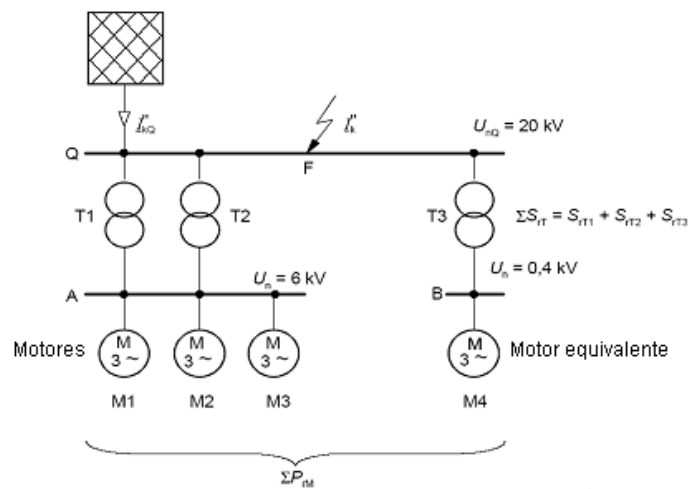


Figura 4.13 - Exemplo (extraído da “IEC”) para estimativa da contribuição de motores assíncronos em relação à corrente de curto-circuito total.

Para esses motores assíncronos equivalentes, incluindo seus cabos, se pode utilizar:

Z_M - é a impedância conforme equação (4.26);

I_{rM} - é a soma das correntes nominais de todos os motores do grupo (motor equivalente);

$I_{LR}/I_{rM} = 5$, conforme Tabela 4.11;

$R_M/X_M = 0,42$, conforme Tabela 4.10;

$P_{rM}/p = 0,05$ MW se não há informação, onde p é o número de pares de pólos.

No caso de uma “falta” na barra “B” da Figura 4.13, a corrente parcial de curto-circuito do grupo de motores de baixa tensão “M4” pode ser desprezada, se a condição $I_{rM4} \leq 0,01 I'_{kT3}$ é satisfeita. Onde I_{rM4} é a corrente nominal do motor equivalente M4. I'_{kT3} é a corrente de curto-circuito inicial simétrica na baixa tensão do transformador T3 para um curto-circuito em B, sem a contribuição do motor equivalente M4.

Num curto-circuito no lado da média tensão (em Q ou A da Figura 4.13), é possível, para simplificação do cálculo de Z_M , de acordo com a equação (4.34), utilizar-se, por exemplo, a corrente nominal do

transformador T3, $I_{T3 LV}$ da Figura 4.13, ao invés da corrente nominal do motor equivalente M4.

Estimativas, conforme a equação (4.36) não são válidas para transformadores de três enrolamentos.

Para determinação das correntes de interrupção, os fatores μ e q são aplicados às correntes de contribuição simétricas de curto-circuito de primeiro ciclo calculadas dos motores de indução, conforme equação (4.37). Tais fatores dependem do tempo de separação dos contatos do disjuntor e do tipo do motor. O fator μ é o mesmo aplicado aos geradores e o fator q é apresentado pelo conjunto de equações (4.38), extraídas da “IEC-60909”.

$$I_{bM} = \mu \cdot q \cdot I'_{kM} \quad (4.37)$$

$$\begin{aligned} q &= 1,03 + 0,12 \ln(P_{rM}/p) \text{ para } t_{\min} = 0,02 \text{ s} \\ q &= 0,79 + 0,12 \ln(P_{rM}/p) \text{ para } t_{\min} = 0,05 \text{ s} \\ q &= 0,57 + 0,12 \ln(P_{rM}/p) \text{ para } t_{\min} = 0,10 \text{ s} \\ q &= 0,26 + 0,12 \ln(P_{rM}/p) \text{ para } t_{\min} \geq 0,25 \text{ s} \end{aligned} \quad (4.38)$$

Onde:

P_{rM} - Potência ativa nominal em MW

p - Número de pares de pólos do motor

A “IEC” orienta que se o cálculo pela equação (4.38) fornecer resultados maiores que 1,0, o valor $q = 1,0$ deve ser adotado.

O fator q também é apresentado na “IEC-60909” sob a forma das curvas apresentadas na Figura 4.14 para diversos valores de t_{\min} .

Quando a rotação do motor não é conhecida as referências recomendam $m = 25 \text{ kW/polo}$. O q resultante para $t_{\min} = 0,05 \text{ s}$ é 0,43.

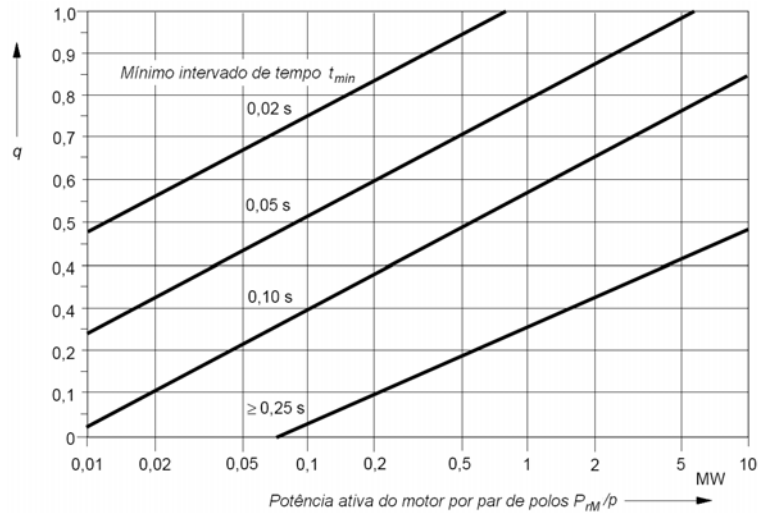


Figura 4.14 - Curvas do fator p para cálculo da corrente de curto-circuito de interrupção simétrica de motores assíncronos (“IEC-60909”)

A Tabela 4.12, abaixo apresenta o resumo das correntes de curto-circuito nos terminais de motores assíncronos.

Tabela 4.12 - Correntes de curto-circuito nos terminais de motores assíncronos

Tipo de Cálculo	Curto trifásico
Corrente simétrica inicial	$I_{k3M}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_M}$
Máxima corrente assimétrica	$i_{p3M} = \kappa_M \sqrt{2} \cdot I_{k3M}''$
Corrente de interrupção simétrica	$I_{b3M} = \mu \cdot q I_{k3M}''$
Corrente de regime	$I_{k3M} \approx 0$

4.4.4.9 Capacitores

A norma “IEC-60909”, [IEC 60909-0, 2001-07] estabelece que as contribuições de bancos de capacitores para as correntes de curto-circuito em sistemas de corrente alternada devem ser desprezadas.

4.4.4.10 Conversores estáticos

Drivers, com conversores estáticos regenerativos, são considerados apenas para cálculos de curto-circuitos *trifásicos* se as massas rotacionais dos motores e o equipamento estático provêm transferência reversa de energia, para desaceleração no momento da falta. A contribuição se apresenta apenas nas correntes de curto-circuito inicial I''_k e de pico I_p . Portanto, não há contribuição para correntes de interrupção e de regime.

Como resultado, conversores estáticos que operam em modo regenerativo são tratados para correntes de curto-circuito como motores assíncronos, sendo então aplicáveis:

Z_M - é a impedância conforme equação (4.34)

U_{rM} - é a tensão nominal do transformador do conversor estático do lado do sistema ou a tensão nominal do conversor estático na inexistência de transformador

I_{rM} - é a corrente nominal do transformador do conversor estático do lado do sistema ou a corrente nominal do conversor estático na inexistência de transformador

$$I_{LR}/I_{rM} = 3,0$$

$$R_M/X_M = 0,10 \text{ com } X_M = 0,095 Z_M$$

Todos os outros conversores estáticos são desconsiderados para cálculos de correntes de curto-circuito

4.5- Cálculo das correntes de curto-circuito

Neste tópico serão apresentados os métodos para o cálculo das correntes de curto-circuito conforme a norma "IEC", partindo-se da "corrente inicial simétrica" para sistemas radiais e em malha e, obtendo-se posteriormente, as correntes de curto-circuito "de pico", em seguida, as

correntes de interrupção e suas particularidades, concluindo com as correntes de curto-circuito de regime.

4.5.1- Cálculo da corrente de curto-circuito inicial simétrica

4.5.1.1- Corrente de curto-circuito inicial simétrica I''_k em sistemas radiais.

Nos casos em que $Z_{(0)}$ é maior do que $Z_{(1)} = Z_{(2)}$, a maior corrente de curto circuito inicial ocorre para faltas trifásicas, as quais são o objetivo principal deste trabalho.

Em geral, a corrente de curto circuito inicial simétrica I''_k deve ser calculada por meio da equação (4.39), com uma fonte de tensão equivalente de $cU_n / \sqrt{3}$ no ponto da falta e impedância $Z_k = R_k + iX_k$.

$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (4.39)$$

A fonte de tensão equivalente $cU_n / \sqrt{3}$ deve ser introduzida no ponto da falta e o fator c adotado conforme Tabela 4.1

Na existência de várias fontes de contribuição para a corrente de falta no ponto F, conforme a Figura 4.15, a corrente de curto-circuito inicial simétrica, I''_k , no ponto, é a soma das correntes individuais de cada ramo. A corrente de curto-circuito de cada ramo é calculada utilizando-se uma fonte independente para por meio da equação (4.39) e, as correções das impedâncias correspondem àquelas apresentadas em 4.4.4.

A corrente simétrica inicial num ponto de falta F é a soma vetorial das correntes simétricas iniciais individuais parciais, conforme a equação (4.40).

$$I''_k = \sum_i I''_{ki} \tag{4.40}$$

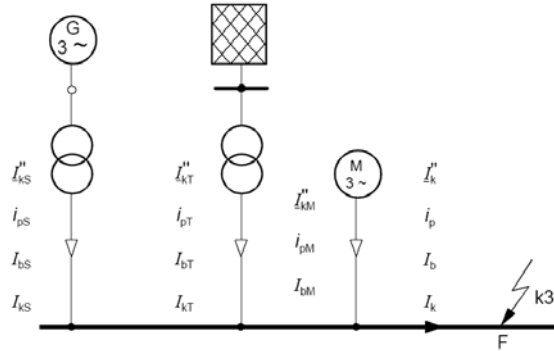


Figura 4.15 - Sistema radial com várias contribuições para falta em F

4.5.1.2- Corrente de curto-circuito inicial simétrica I''_k em sistemas em malha.

Num sistema em malha, como representado na Figura 4.16 faz-se necessária a determinação da impedância $Z_k = Z_{(1)}$ através de algum método de redução de impedâncias (conexões série, paralelo ou transformações estrela-delta), utilizando-se as impedâncias de curto circuito de sequência positiva com as correções apresentadas em 4.4.4.

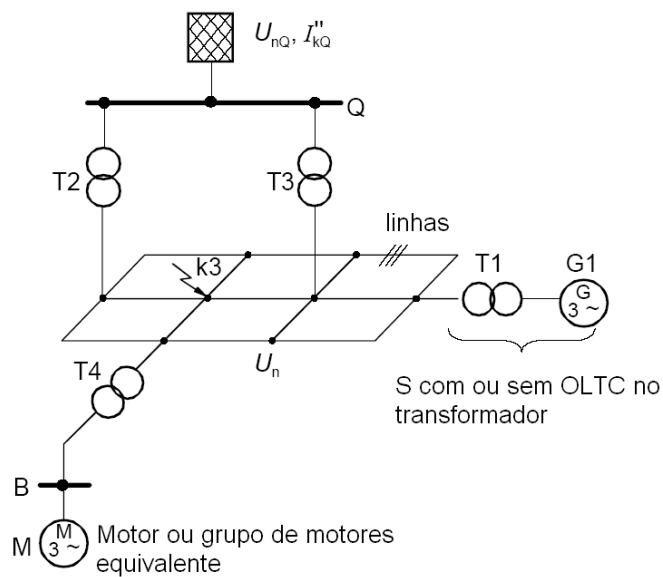


Figura 4.16 - Sistema em malha

A corrente de curto-circuito inicial simétrica, também neste caso, deve ser calculada por meio da equação (4.37), considerando-se a fonte de tensão equivalente $cU_n / \sqrt{3}$ aplicada ao ponto da falta.

4.5.2- Cálculo das correntes de curto-circuito de pico

4.5.2.1- Correntes de curto-circuito de pico em sistemas radiais

A corrente de curto-circuito inicial é calculada na condição de corrente “*longe da geração*” sendo que os fatores de correção para geradores e subestações geradoras unitárias devem ser considerados. Correntes de pico também devem ser calculadas como para curto-circuito “*longe da geração*”.

As particularidades apresentadas se o caminho da falta é em malha ou radial, também são aplicadas neste caso. A impedância do gerador, assim como da subestação gerador-transformador elevador deve considerar os fatores de correção apropriados, como para correntes de curto-circuito inicial.

A recomendação da “IEC” para o cálculo da corrente de pico é a aplicação do fator de crista ou fator de pico “ k ” à corrente simétrica inicial I''_k , conforme equações (4.41) e (4.42)

$$i_p = k \sqrt{2} I''_k \quad (4.41)$$

$$k = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3}{X/R}} \quad (4.42)$$

Para sistemas radiais a relação X/R é a do ramo que alimenta a falta.

A corrente de pico i_p em um ponto de falta F, alimentado por várias fontes que não constituem uma malha é a soma das correntes de pico parciais, conforme equação (4.43).

$$i_p = \sum_i i_{pi} \quad (4.43)$$

4.5.2.2- Correntes de curto-circuito de pico para sistemas em MALHA “Meshed”

A “IEC” prescreve, para sistemas **em malha**, três técnicas que podem ser utilizadas no cálculo da corrente de curto-circuito de pico e, neste trabalho, será apresentada uma quarta técnica, não discutida na norma.

a) Técnica do X/R dominante

Na técnica do X/R dominante, utiliza-se a equação (4.41) para a obtenção do valor de pico. O valor de R/X a ser utilizado é o menor (ou o maior X/R) de todos os ramos no sistema. Os ramos a serem considerados são aqueles que conduzem juntos, pelo menos, 80% da corrente de falta.

O método mais utilizado para determinação dos ramos consiste em agrupá-los em ordem decrescente de corrente de contribuição para a falta.

Iniciando com o ramo de maior contribuição, adicionam-se os outros ramos até a obtenção dos 80% da corrente de falta. Um ramo pode ser constituído por dois ou mais elementos em série. O fator de crista é limitado a 1,8 para sistemas de baixa tensão.

b) Técnica do X/R equivalente

Na técnica do X/R equivalente calcula-se o fator de crista, conforme a expressão (4.44).

$$k_{(b)} = 1,15k \quad (4.44)$$

O fator k é multiplicado por 1,15 para compensar as imprecisões devidas à utilização da relação R_k/X_k de uma redução de impedâncias complexas, o que resulta nas equações (4.45) e (4.46).

$$i_{p(b)} = k_b \sqrt{2} I''_k \quad (4.45)$$

$$i_{p(b)} = 1,15 k \sqrt{2} I''_k \quad (4.46)$$

A “IEC” prescreve que, uma vez que R/X permaneça menor do que 0,30 em todos os ramos, não há necessidade da utilização do fator 1,15. A “IEC” também limita o fator k_b em 1,8 para sistemas em baixa tensão e 2,0 para sistemas em alta tensão.

c) Técnica da frequência equivalente

No método da frequência equivalente, o fator de crista $k_c = k_a$ com a impedância equivalente do sistema “ Z_c ” vista do ponto de falta, calculada assumindo-se a frequência $f_c = 20$ Hz para frequência nominal do sistema de 50 Hz ou $f_c = 24$ Hz para frequência nominal do sistema de 60 Hz. A relação R/X ou X/R é então determinada pelas equações (4.47).

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c f_c}{X_c f} \quad (4.47)$$

$$\frac{X}{R} = \frac{X_c f}{R_c f_c}$$

Onde:

Z_c - $R_c + jX_c$ é a impedância equivalente do sistema como se vista do ponto de curto-circuito para a frequência f_c , impedância vista do ponto de falta quando a frequência da única fonte que excita o sistema é f_c ;

R_c - é o termo real de Z_c ;

X_c - é o termo imaginário de Z_c ;

f_c - é 20 Hz para sistemas de 50 Hz, ou 24 Hz para sistemas de 60 Hz.

A “IEC” faz referência a que, quando se trabalha num sistema em malha, com transformadores, geradores e subestações geradoras elevadoras, os fatores de correção de impedâncias K_T , K_G , e K_S ,

respectivamente, devem ser introduzidos com os mesmos valores que para 50 ou 60 Hz.

A norma “IEC” não apresenta exemplos de cálculo de X/R para correntes de interrupção utilizando os métodos a), b) ou c). Entretanto, alguns autores, sugerem a utilização de um **método único** na determinação de X/R a ser empregado nos cálculos de corrente de pico e de correntes de interrupção.

d) Técnica CCM – *Characteristic Current Method*

A “IEC” não define um método de cálculo para curto-circuitos considerados próximos da geração. Alguns autores, [St Pierre C., 2001], [Parise Giuseppe, 1995] e [Parise,Massimiano,Halpin, 1995], definem o método CCM para cálculos de correntes de curto-circuito próximas da geração que, embora não esteja explicitamente definido na “IEC-60909”, acredita-se que foi o método utilizado nos exemplos 2 e 3 da norma, os quais serão apresentados posteriormente.

Esta técnica prevê a utilização das equações:

$$i_{p(CCM)} = k_{CCM} \sqrt{2} I'_k \quad (4.48)$$

$$k_{CCM} = 1,0 k \quad (4.49)$$

Neste método, calcula-se a relação X/R da corrente de curto-circuito de contribuição de cada ramo e a respectiva corrente de pico ao ponto da falta e, a corrente total é a soma da corrente de contribuição de todos os ramos. Duas das referências supracitadas apresentam exemplos calculados através da técnica CCM que validam o método e justificam sua utilização.

4.5.3- Cálculo da “componente dc” da corrente de curto-circuito

A “componente dc” máxima de uma corrente de curto-circuito, como a das figuras 4.1 e 4.2, é calculada pela equação (4.50).

$$i_{dc} = \sqrt{2} \cdot I_k'' e^{-2\pi f t R / X} \quad (4.50)$$

Onde:

I_k'' - Corrente de curto-circuito inicial simétrica;

f - Frequência nominal;

t - Tempo, em segundos;

R/X - Relação R/X de acordo com 4.5.2.1 para sistemas radiais ou, de acordo com os métodos “a” e “c” de 4.5.2.2.

Para geradores a resistência correta R_G da armadura deve ser utilizada ao invés de R_{Gf} da Tabela 4.6 e Nota-4.2.

Nos sistemas em malha, a relação R/X ou X/R deve ser determinada pelo método “c”, conforme 4.5.2.2 e, dependendo do produto $f \cdot t$, onde f é a frequência, em Hz, e t o tempo, em segundos, a frequência equivalente a ser utilizada será a da Tabela 4.13:

Tabela 4.13 - Frequência equivalente para o cálculo da “componente dc” (extraída da “IEC-60909”)

$f \cdot t$	< 1	< 2,5	< 5	< 12,5
f_c/f	0,27	0,15	0,092	0,055

4.5.4- Cálculo das correntes de curto-circuito de interrupção

A corrente de curto-circuito de interrupção consiste de uma corrente simétrica de interrupção I_b , e uma “**componente dc**” para um tempo t_{\min} , conforme a equação (4.50).

4.5.4.1- Correntes de curto-circuito de interrupção em pontos “longe da geração”

Para curto-circuitos em pontos localizados longe da geração, “*far-from-generator*”, as correntes de interrupção são iguais as correntes de curto-circuito iniciais, conforme (4.51).

$$I_b = I_k'' \quad (4.51)$$

4.5.4.2- Correntes de curto-circuito de interrupção em pontos “próximos à geração”

Para curto-circuitos em pontos localizados próximos da geração, “*near-to-generator*”, no caso de alimentação por um único gerador, ou para sistemas como o da Figura 4.15, (não em malha), o decréscimo da corrente simétrica de interrupção é determinado pela utilização do fator μ , conforme as equações (4.23) e (4.24) e Figura 4.8.

No caso de correntes de curto-circuito trifásicas em sistemas radiais, como o da Figura 4.15, a corrente de interrupção simétrica num ponto é calculada pelo somatório das correntes de interrupção individuais, conforme (4.52).

$$I_b = \sum_i I_{bi} \quad (4.52)$$

No exemplo da Figura 4.15 ter-se-á;

$$I_b = I_{bS} + I_{bT} + I_{bM} = \mu I''_{kS} + I''_{kT} + \mu q I''_{kM}$$

Onde I''_{kS} , I''_{kT} e I''_{kM} são as contribuições para I''_k no ponto da falta.

Com μ obtido das equações (4.23) e (4.24) para geradores síncronos e motores assíncronos, e q obtido das equações (4.38).

4.5.4.3- Correntes de curto-circuito de interrupção em sistemas em “malha”

A corrente de interrupção em sistemas em malha é calculada como por 4.53.

$$I_b = I''_k \quad (4.53)$$

Contudo, como as correntes calculadas conforme a equação (4.53) serão maiores do que as correntes simétricas de interrupção “reais”, a “IEC” dispõe de um conjunto de equações (4.54) a (4.56), as quais determinam valores mais precisos.

$$I_b = I''_k - \sum_i \frac{\Delta U''_{Gi}}{cU_n / \sqrt{3}} (1 - \mu_i) I''_{kGi} - \sum_j \frac{\Delta U''_{Mj}}{cU_n \sqrt{3}} (1 - \mu_j q_j) I''_{kMj} \quad (4.54)$$

$$\Delta U''_{Gi} = j_j X''_{diK} I''_{kGi} \quad (4.55)$$

$$\Delta U''_{Mj} = j_j X''_{Mj} I''_{kMj} \quad (4.56)$$

Onde:

μ_i, μ_j - São os valores obtidos da equação (4.24) para máquinas síncronas (i) e máquinas assíncronas (j);

q_j - é o valor obtido da equação (4.38) para motores assíncronos;

$cU_n / \sqrt{3}$ - é a fonte de tensão equivalente no ponto da falta;

I_k'' , I_b - são respectivamente a corrente de curto-circuito simétrica inicial e a corrente de curto-circuito simétrica de interrupção com a influência de todos os alimentadores, máquinas síncronas e motores assíncronos;

$\Delta U_{Gi}''$, $\Delta U_{Mj}''$ - são as quedas de tensão iniciais nos terminais das máquinas síncronas (i) e motores assíncronos (j);

X_{diK}'' - é a reatância subtransitória das máquinas síncronas (i) corrigidas;

X_{Mj}'' - é a reatância de motores assíncronos (j);

I_{kGi}'' , I_{kMj}'' - são as contribuições para a corrente de curto-circuito simétrica inicial das máquinas síncronas (i) e motores assíncronos (j) medidas nos terminais das máquinas.

Notar-se que os valores de I_k'' e $\Delta U''$, das equações (4.54) e (4.54) são medidos nos terminais da máquina e estão relacionados com a mesma tensão.

4.5.4.4- Correntes de curto-circuito de interrupção assimétricas

As correntes de interrupção assimétricas $I_{bAssimétrica}$ são calculadas com base na equação (2.16) que, transcrita conforme nomenclatura "IEC", resultará em (4.57).

$$I_{bAssimétrico} = \sqrt{I_b^2 + i_{dc}^2} \quad (4.57)$$

4.5.5- Cálculo das correntes de curto-circuito de regime

O cálculo das correntes de curto-circuito de regime I_k é menos preciso do que o das correntes iniciais I_k'' .

Para curto-circuito trifásico, próximo ao gerador, a corrente de curto-circuito de regime I_k dependerá do sistema de excitação, da ação do regulador de tensão e das influências da saturação.

Toda a metodologia utilizada no modelamento das correntes de regime máximas e mínimas já foi apresentada anteriormente, assim, nos próximos tópicos será apresentado o tratamento dessas correntes quando aplicadas a sistemas radiais e em malha.

4.5.5.1- Cálculo das correntes de curto-circuito de regime em sistemas radiais

Considerando-se novamente a Figura 4.15, uma corrente de curto-circuito trifásica de regime no ponto F pode ser calculada por meio do somatório das contribuições das correntes de curto-circuito de regime individuais, conforme (4.58).

$$I_k = \sum_i I_{ki} \quad (4.58)$$

No exemplo da Figura 4.15 tem-se:

$$I_k = I_{kS} + I_{kT} + I_{kM} = \lambda I_{rGt} + I''_{kT} \quad (4.59)$$

Onde λ (λ_{\max} ou λ_{\min}) é obtido das figuras 4.9 e 4.10, I_{rGt} é a corrente nominal do gerador referida ao lado da alta tensão do transformador unitário.

No caso da concessionária ou da concessionária/transformador em série a igualdade $I_k = I''_k$ é válida (curto-circuito longe da geração). Para motores assíncronos a corrente de regime é zero para curto-circuito em seus terminais.

Nos cálculos de $I_{k\max}$ ou $I_{k\min}$, os valores de c_{\max} e c_{\min} são obtidos da Tabela 4.1.

4.5.5.2- Cálculo das correntes de curto-circuito de regime em sistemas em malha

Sistemas em malha, com várias fontes, tem suas correntes de curto-circuito de regime calculadas por meio das equações (4.60) e (4.61).

$$I_{kmax} = I_{kmaxM} \quad (4.60)$$

$$I_{kmin} = I_{kmin} \quad (4.61)$$

Onde:

$I_{kmax} = I''_k$ é obtido conforme os itens **4.4.2** (Correntes de curto-circuito máximas) e **4.5.1.2** (Cálculo da corrente de curto-circuito inicial simétrica, I''_k , em sistemas em malha).

I_{kmin} é obtido conforme os itens **4.4.3** (Correntes de curto-circuito mínimas) e **4.5.1.2** (Cálculo da corrente de curto-circuito inicial simétrica I''_k em sistemas em malha).

Note-se que as equações (4.60) e (4.61) são válidas tanto para o caso de correntes de curto-circuito “*longe da geração*” quanto para correntes de curto-circuito “*próximas à geração*”.

4.6- Exemplos de Cálculo das correntes de curto-circuito.

4.6.1- Exemplo-1 Cálculo das correntes de curto-circuito para sistema em malha

Tendo-se em vista as particularidades inerentes ao cálculo das correntes de curto-circuito conforme “IEC”, apresenta-se um exemplo de sistema em malha simples. A Figura 4.17 extraída da “IEC-60909-4”, [IEC 60909-4, 2000-07], representa um sistema em 50 Hz, composto de entrada de energia e dois transformadores ligados em paralelo. O objetivo deste exemplo é a determinação das correntes “inicial simétrica” e “de pico” para um curto-circuito trifásico em F1.

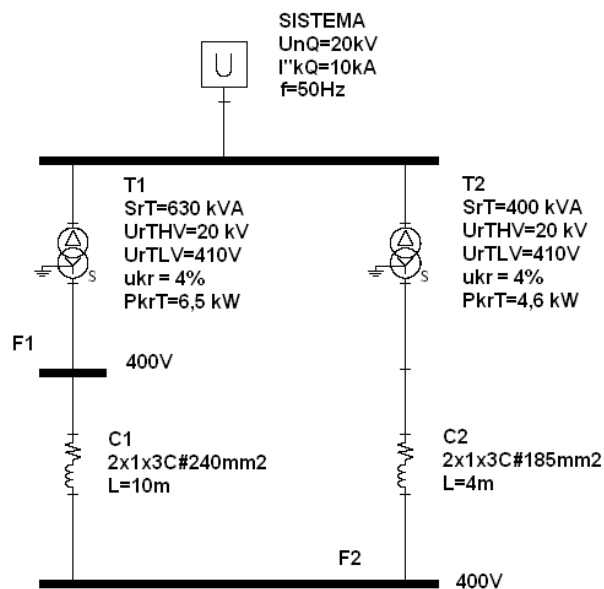


Figura 4.17 - Sistema em malha para cálculo das correntes I''_k e i_p

Cálculo das impedâncias:

Sistema:

O “fator de tensão c ” para 20 kV é $c_Q=c_{\max}=1,1$.

A impedância do sistema será obtida a partir da equação (4.8).

$$\text{Assim } Z_{Qt} = \frac{1,1 \times 20 \text{ kV}}{10 \text{ kA} \sqrt{3}} \times \frac{1}{20/0,41^2} = 0,534 \text{ m}\Omega$$

E, pela Tabela 4.2 ter-se-á $X/R=10$ $X_{Qt}=0,995 Z_{Qt}$ e $R_{Qt}=0,1X_{Qt}$

$$X_{Qt} = 0,531 \text{ m}\Omega$$

$$R_{Qt} = 0,053 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{Qt} = (0,053 + j 0,531) \text{ m}\Omega$$

Transformadores:

Aplicando-se as equações (4.9) a (4.11) para transformadores, obtém-se:

Transformador T1

$$Z_{T1} = \frac{4\%}{100\%} \cdot \frac{410 \text{ V}^2}{630 \text{ kVA}} = 10,673 \text{ m}\Omega$$

$$R_{T1} = \frac{6,5 \text{ kW}}{630 \text{ kVA}^2} \cdot \frac{410 \text{ V}^2}{630 \text{ kVA}^2} = 2,753 \text{ m}\Omega$$

$$X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2}$$

$$X_{T1} = 10,3118 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{T1} = (2,753 + j 10,3118) \text{ m}\Omega$$

$$u_{Rr} = \frac{P_{krT1}}{S_{rT1}} 100\% \quad u_{Rr} = \frac{6,5 \text{ kW}}{630 \text{ kVA}} 100\% = 1,0317 \%$$

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} \quad u_{Xr} = \sqrt{4,0^2 - 1,0317^2} = 3,8647 \%$$

O fator de correção para transformador de 2 enrolamentos, K_{T1} , é obtido da equação (4.13):

$$K_{T1} = 0,95 \frac{1,05}{1 + 0,6 \times 0,03865} = 0,9749$$

e, finalmente a impedância:

$$Z_{T1K} = Z_{T1} K_{T1} = (2,684 + j 10,0529) \text{ m}\Omega$$

Transformador T2

Repetindo-se os cálculos para T2:

$$Z_{T2} = 16,81 \text{ m}\Omega$$

$$R_{T2} = 4,8329 \text{ m}\Omega$$

$$u_{Xr} = 3,8311 \%$$

$$X_{T2} = 16,1003 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{T2} = (4,8329 + j 16,1003) \text{ m}\Omega$$

$$K_{T2} = 0,9751$$

$$Z_{T2K} = Z_{T2}K_{T2} = (4,725 + j 15,6994) \text{ m}\Omega$$

Cabos:

Cabo C1: dois cabos 240 mm² em paralelo

$$Z_{C1} = 0,5 (0,0770 + j 0,0790) \Omega/\text{km} \times 10 \text{ m} = (0,385 + j 0,395) \text{ m}\Omega$$

Cabo C2: dois cabos 185 mm² em paralelo

$$Z_{C2} = 0,5 (0,2080 + j 0,0680) \Omega/\text{km} \times 4,0 \text{ m} = (0,416 + j 0,136) \text{ m}\Omega$$

Cálculo das correntes de curto-circuito para falta em F1

A Figura 4.18 representa o sistema de seqüência positiva para o cálculo das correntes de falta no ponto F1.

Como se trata de uma falta em baixa tensão, pela Tabela 4.1 então $C_{\max} = 1,05$

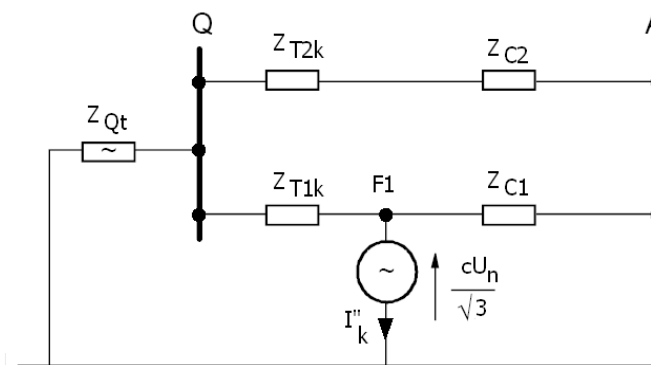


Figura 4.18 - Sistema de seqüência positiva cálculo das correntes I''_k e i_p no ponto F1.

A impedância no ponto da falta F1 vale:

$$Z_k = Z_{Qt} + [Z_{T1K} (Z_{T2K} + Z_{C1} + Z_{C2}) / (Z_{T1K} + Z_{T2K} + Z_{C1} + Z_{C2})]$$

$$Z_k = (1,859 + j 6,739) \text{ m}\Omega$$

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{1,05 \times 400}{\sqrt{3} \times 6,992} = 34,68 \text{ kA @ } -74,58^\circ$$

Para o cálculo de i_p , como o sistema é em malha, utilizou-se o “método b”. A relação R/X no ponto da falta é $R/X = R_k/X_k = 0,276$

$$k_{(b)} = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} = 1,448.$$

É conveniente observar que, como o valor da relação R/X do ramo $Z_{T2K} + Z_{C1} + Z_{C2}$ é igual a 0,34, portanto, maior do que 0,3 o fator 1,15 deve ser introduzido, resultando:

$$i_{p(b)} = 1,15 k_{(b)} \sqrt{2} I_k'' = 81,67 \text{ kA}$$

O “método c” ou da frequência equivalente também pode ser utilizado neste cálculo.

A impedância $Z_c = R_c + j X_c$ é calculada conforme o “método c” para uma frequência equivalente de 20 Hz, lembrando que a frequência utilizada neste exemplo é 50 Hz.

Neste cálculo as quantidades a serem utilizadas em 20 Hz são:

$$Z_{Qt_c} = (0,053 + j 0,2124) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{T1K_c} = (2,684 + j 4,0212) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{T2K_c} = (4,725 + j 6,279) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{C1_c} = (0,385 + j 0,158) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{C2_c} = (0,416 + j 0,054) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{k_c} = Z_{Qt_c} + [Z_{T1K_c} (Z_{T2K_c} + Z_{C1_c} + Z_{C2_c}) / (Z_{T1K_c} + Z_{T2K_c} + Z_{C1_c} + Z_{C2_c})]$$

$$Z_{kc} = (1,859 + j 2,6973) \text{ m}\Omega$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \times \frac{f_c}{f} = \frac{1,859 \text{ m}\Omega}{2,6973 \text{ m}\Omega} \times \frac{20 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 0,275$$

$$k_{(c)} = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} = 1,449$$

$$i_{p(c)} = k_{(c)} \sqrt{2} I''_k = 71,06 \text{ kA}$$

Para o mesmo cálculo utilizando-se o “*método a*”, primeiramente, devem ser identificados dois ramos para falta em F1. O Ramo 1, por T1, e o Ramo 2, por T2+C2+C1.

No Ramo 1

$$Z_{T1Ka} = (2,684 + j 10,0529) \text{ m}\Omega \quad \frac{R_{1a}}{X_{1a}} = 0,266$$

$$k_{(1a)} = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} = 1,46$$

No Ramo 2

$$Z_{T2Kc+C1c+C2c} = (5,526 + j 16,2304) \text{ m}\Omega \quad \frac{R_{2a}}{X_{2a}} = 0,341$$

$$k_{(2a)} = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} = 1,37$$

Tomando-se o Ramo 1 com o menor R/X , e o maior fator k , a corrente de pico será:

$$i_{p(a)} = k_{(1a)} \sqrt{2} I''_k = 71,60 \text{ kA}$$

Contudo, é conveniente lembrar que a “*IEC-60909*” recomenda o emprego deste método somente como uma “*primeira aproximação*” para a determinação da corrente de pico.

Finalmente, para mostrar a aplicação do “*método CCM*” deve-se calcular a corrente de contribuição (módulo e ângulo), de cada ramo para a

falta em F1. Para cada contribuição calcula-se o fator k e a corrente de pico respectiva.

A corrente de pico total em F1 é a soma vetorial das correntes de pico das contribuições de cada ramo.

A corrente da contribuição por T1 será, no divisor:

$$(T2+C1+C2)/(T1+T2+C1+C2) I''_k \quad (5,526 + j 16,2304)/(8,21 + j 26,2833) I''_k \\ 0,6226 @ -1,46^\circ \times 34,68 \text{ kA} @ -74,58 = 21,59 \text{ kA} @ -76,14^\circ \quad R/X=0,247$$

Logo:

$$I''_{kT1} = 21,591 \text{ kA} @ -76,14^\circ \quad R/X= 0,247 \\ k_{(1CCM)} = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} = 1,487 \\ i_{p1(CCM)} = k_{(1CCM)} \sqrt{2} I''_{kT1} = 45,40 \text{ kA} @ -76,14^\circ$$

A corrente da contribuição por T2 será, no divisor:

$$(T1)/(T1+T2+C1+C2) I''_k \quad (2,684 + j 10,0529)/(8,21 + j 26,2833) I''_k \\ 0,3778 @ 2,40^\circ \times 34,68 \text{ kA} @ -74,58 = 13,102 \text{ kA} @ -72,18^\circ \quad R/X=0,321$$

Logo:

$$I''_{kT2} = 13,102 \text{ kA} @ -72,18^\circ \quad R/X= 0,321 \\ k_{(2CCM)} = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} = 1,394 \\ i_{p2(CCM)} = k_{(2CCM)} \sqrt{2} I''_{kT2} = 25,83 \text{ kA} @ -72,18^\circ \\ i_{p(CCM)} = i_{p1(CCM)} + i_{p2(CCM)} = 71,19 \text{ kA} @ - 74,71^\circ$$

Apresenta-se, no Quadro 4.2, a listagem dos cálculos de curto-circuito conforme “IEC-60909-0-2001” para o mesmo “caso exemplo”, utilizando-se

um software comercial, [SKM, PTW Short-circuit IEC_Fault]. O exemplo foi processado utilizando-se o “método b” para os cálculos das correntes de pico.

A listagem apresenta os valores das correntes de curto-circuito para o sistema de 20 kV, aqui referenciada como BUS: 1, assim como na barra F1. Verifica-se que, devido à ausência da contribuição de geradores e motores, os valores das correntes I''_k , inicial simétrica, I_b , de interrupção, I_k , de regime são iguais.

Quadro 4.2 - Listagem das correntes de curto-circuito conforme “IEC-60909” para o caso da Figura 4.17, [SKM, PTW Short-circuit IEC_Fault]

```

THREE PHASE IEC 60909 FAULT REPORT
System Frequency(Hz): 50      Tmin: 0.02 sec.
Calculate Maximum Short-Circuit Current
=====
*FAULT BUS: 1      Voltage: 20.000 kV      Eq. Volt. Source: 1.10 p.u.
                   Sk": 346410 kVA      Sk: 346410 kVA      Ib asym: 12.527 kA

                   Ik" (kA)      iDC (kA)      ip (kA)      Ib (kA)      Ik (kA)
=====
Total Fault Current      10.000      7.545      24.692      10.000      10.000
GROUP CONTRIBUTIONS ----- referred to 20.000 kV
INDIVIDUAL CONTRIBUTIONS:
  SISTEMA      10.000      7.545      24.692      10.000      10.000

DETAIL SOURCE INFORMATION -----
INDIVIDUAL CONTRIBUTIONS:
  SISTEMA      NETWORK FEEDER      Status: NON-MESHED, FAR
  Equivalent Z(Ω):      0.126 + j 1.264      or      1.270/84.3°
  R/X:      0.100      Peak factor x(b):      1.746

*FAULT BUS: F1      Voltage: 0.400 kV      Eq. Volt. Source: 1.05 p.u.
                   Sk": 24018 kVA      Sk: 24018 kVA      Ib asym: 36.082 kA

                   Ik" (kA)      iDC (kA)      ip (kA)      Ib (kA)      Ik (kA)
=====
Total Fault Current      34.667      10.005      81.708      34.667      34.667
GROUP CONTRIBUTIONS ----- referred to 0.400 kV
INDIVIDUAL CONTRIBUTIONS:
  SISTEMA      34.667      10.005      81.708      34.667      34.667

DETAIL SOURCE INFORMATION -----
INDIVIDUAL CONTRIBUTIONS:
  SISTEMA      NETWORK FEEDER      Status: MESHED, FAR
  Equivalent Z(mΩ):      1.856 + j 6.744      or      6.995/74.6°
  R/X:      0.275      Peak factor x(b):      1.667

```

A Tabela 4.14 contém o resumo dos cálculos de i_p para os 4 métodos apresentados. A norma “IEC” apresenta uma “Nota” apenas sobre o método “a” o qual deve ser utilizado apenas como uma primeira aproximação de cálculo. Demonstra-se também, que o método “b” é o mais conservativo e, algumas referências afirmam que o método “c” é o mais preciso.

Tabela 4.14 Resumo das correntes de pico obtidas nos quatro métodos para falta em F1

Método de cálculo de i_p para falta em F1				
	"a"	"b"	"c"	"CCM"
Corrente i_p	71,60 kA	81,67 kA	71,06 kA	71,19 kA

4.6.2- Exemplo-2 Contribuição de motores de indução

Apresenta-se um exemplo extraído da "IEC-60909-4" para análise da contribuição de motores de indução nas correntes de curto-circuito. O objetivo é o cálculo manual das correntes para um curto-circuito trifásico em F1, na Barra-1, levando em conta contribuição dos motores de indução do sistema.

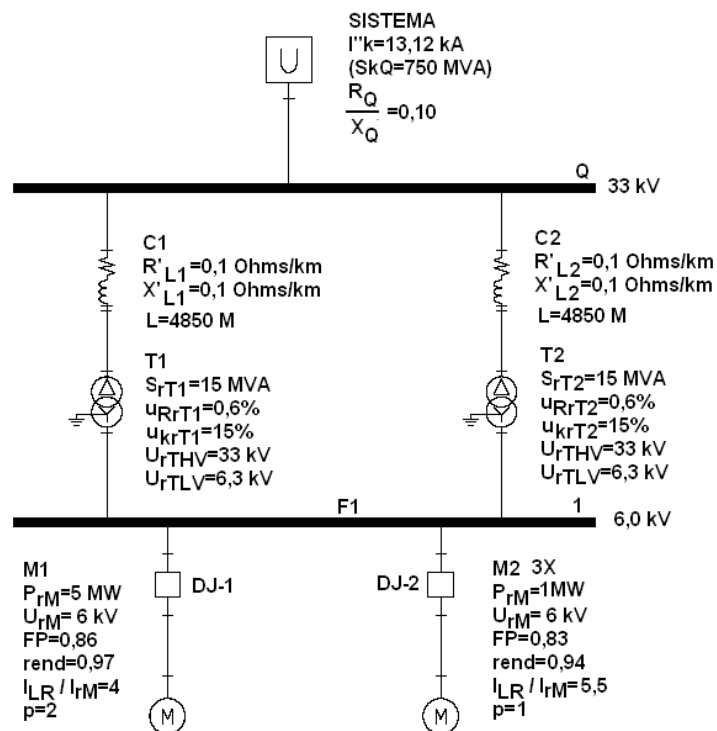


Figura 4.19 - Sistema exemplo com contribuição de motores

Cálculo das impedâncias:

Sistema:

O “fator de tensão c ” para 33 kV é $c_Q = c_{\max} = 1,1$.

A impedância do sistema será obtida a partir da equação (4.8), adotando-se o mesmo procedimento utilizado no Exemplo-1

$$\text{Assim, } Z_{Qt} = \frac{1,1 \times 33 \text{ kV}}{13,12 \text{ kA} \sqrt{3}} \times \frac{1}{(33 \text{ kV} / 6,3 \text{ kV})^2} = 0,0582 \Omega$$

E, pela Tabela 4.2, ter-se-á $X/R=10$ $X_{Qt}=0,995 Z_{Qt}$ e $R_{Qt}=0,1X_{Qt}$

$$X_{Qt} = 0,0579 \Omega$$

$$R_{Qt} = 0,0058 \Omega$$

$$Z_{Qt} = (0,0058 + j 0,0579) \Omega$$

Transformadores T1 e T2 (T1=T2):

Aplicando-se as equações (4.9) a (4.11) para os transformadores obtém-se:

$$Z_{T1} = \frac{15\%}{100\%} \cdot \frac{6,3 \text{ kV}^2}{15 \text{ MVA}} = 0,3969 \Omega$$

$$R_{T1} = \frac{0,6\%}{100\%} \cdot \frac{6,3 \text{ kV}^2}{15 \text{ MVA}} = 0,01588 \Omega$$

$$X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2} = 0,3966 \Omega, \text{ então,}$$

$$Z_{T1} = (0,01588 + j 0,3966) \Omega$$

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} \quad u_{Xr} = \sqrt{0,15^2 - 0,006^2} = 0,14988 \%$$

Com o fator de correção para transformador de 2 enrolamentos tem-se a equação (4.13):

$$K_{T1} = 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6X_T}$$

$$K_{T1} = 0,95 \frac{1,10}{1 + 0,6 \times 0,14988} = 0,9588$$

e, finalmente:

$$Z_{T1K} = Z_{T1} K_{T1} = (0,015225 + j 0,38025) \Omega$$

Cabos C1=C2:

$$R_{C1t} = R'_{L1} \times \frac{1}{t_r^2} \times L = 0,1 \Omega / km \cdot 4850 m \cdot \left(\frac{6,3 kV}{33 kV} \right)^2 = 0,01767 \Omega$$

$$X_{C1t} = X'_{L1} \times \frac{1}{t_r^2} \times L = 0,1 \Omega / km \cdot 4850 m \cdot \left(\frac{6,3 kV}{33 kV} \right)^2 = 0,01767 \Omega$$

$$Z_{C1} = (0,01767 + j 0,01767) \Omega$$

Motores:

Da equação (4.34) para motores, obtém-se:

Motor M1:

$$Z_{M1} = \frac{1}{I_{LR1} / I_{rM1}} \cdot \frac{U_{rM1}^2}{S_{rM1}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{6 kV^2}{6 MVA} = 1,500 \Omega$$

Motor M2 (3 motores de 1,0 MVA):

$$Z_{M2} = \frac{1}{I_{LR1} / I_{rM2}} \cdot \frac{U_{rM2}^2}{S_{rM2}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{5,5} \cdot \frac{6 kV^2}{1,28 MVA} = 1,7045 \Omega$$

Impedância no ponto da falta:

A série $Z_{T1} + Z_{C1}$ resulta em:

$$Z_{T1}+Z_{C1} = Z_{T2}+Z_{C2} = (0,03289 + j 0,3979) \Omega$$

O paralelo $Z_{T1}+Z_{C1} // Z_{T2}+Z_{C2}$

$$\frac{1}{2}(Z_{T1}+Z_{C1}) = (0,0165 + j 0,1990) \Omega$$

A impedância de curto-circuito sem a contribuição dos motores

$$Z_{k(T1,T2)} = Z_{Qt} + \frac{1}{2}(Z_{T1}+Z_{C1}) = (0,0223 + j 0,2569) \Omega$$

Cálculo da corrente de curto-circuito inicial I''_k para falta em F1 sem a contribuição dos motores de indução.

A impedância no ponto da falta F1 vale:

$$Z_{k(T1,T2)} = Z_{Qt} + \frac{1}{2}(Z_{T1}+Z_{C1}) = (0,0223 + j 0,2569) \Omega$$

$$I''_{kT1} + I''_{kT2} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{k(T1,T2)}} = \frac{1,10 \times 6kV}{\sqrt{3} \times (0,0223 + j 0,2569) \Omega}$$

$$I''_{k(T1,T2)} = |I''_{kT1} + I''_{kT2}| = (1,2779 - j 14,725) \text{ kA ou } 14,78 \text{ kA} @ -85,04^\circ$$

Cálculo das contribuições dos motores de indução para falta em F1

As correntes parciais de curto-circuito de contribuição dos motores são obtidas a partir de Z_{M1} e Z_{M2} calculados utilizando-se $R_M=0,1X_M$ e $X_M=0,995Z_M$ da Tabela 4.10 para motores com $P_{rM/p} \geq 1\text{MW}$, como os deste caso.

$$I''_{kM1} = \frac{cU_n}{Z_{M1}\sqrt{3}} = \frac{1,10 \times 6kV}{\sqrt{3} \times (0,1493 + j 1,493) \Omega} = (0,253 - j 2,526) \text{ kA}$$

ou 2,539 kA @ -84,28°

$$I''_{kM2} = \frac{cU_n}{Z_{M2}\sqrt{3}} = \frac{1,10 \times 6kV}{\sqrt{3} \times (0,1696 + j 1,6960) \Omega} = (0,2228 - j 2,224) \text{ kA}$$

ou 2,2356 kA @ -84,28°

Cálculo da corrente de curto-circuito inicial I''_k total para falta em F1

É a soma das correntes de curto-circuito parciais:

$$I''_k = I''_{k T1} + I''_{k T2} + I''_{k M1} + I''_{k M2}$$

$$(1,7537 - j 19,475) \text{ kA ou } 19,554 @ -84,85^\circ$$

Cálculo da corrente de curto-circuito de pico i_p para falta em F1

O cálculo de corrente de pico em F1 se processa como descrito no item 4.5.2.1, utilizando-se a técnica "CCM", e requer a equação (4.43), além das equações para corrente de pico (4.41) e (4.42).

$$i_p = i_{p(T1,T2)} + i_{pM1} + i_{pM2}$$

$$i_{p(T1,T2)} = k\sqrt{2} I''_k = 3,208 - j 36,97 \text{ kA (com } k = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \text{)}$$

$$i_{pM1} = 0,6246 - j 6,2360 \text{ kA}$$

$$i_{pM2} = 0,550 - j 5,530 \text{ kA}$$

$$i_p = 4,3826 - j 48,736 \text{ kA}$$

$$i_p = 48,93 \text{ kA}$$

Cálculo da corrente de curto-circuito de interrupção I_b para falta em F1

O cálculo de corrente de interrupção em F1 se processa como descrito no item 4.5.4.2 e requer, neste caso, a equação (4.52), além das equações para corrente de pico (4.23) e (4.37)

$$I_b = I_{b(T1,T2)} + I_{bM1} + I_{bM2} = I''_{k(T1,T2)} + \mu_{M1} q_{M1} I''_{k M1} + \mu_{M1} q_{M2} I''_{k M2}$$

Onde:

$$\mu_{M1} = 0,62 + 0,72e^{-0,32 I''_{k M1}/I_{rM1}} \text{ para } t_{\min}=0,1\text{s, adotado}$$

$$\mu_{M1} = 0,62 + 0,72e^{-0,32 \cdot 4,4} = 0,796$$

$$q_{M1} = 0,57 + 0,12 \ln P_{rM1}/p_1$$

Lembrando que P_{rM} é a potência ativa nominal, em MW, e p o número de pares de pólos do motor.

$$q_{M1} = 0,57 + 0,12 \ln 5(\text{MW}) / 2(\text{pares de pólos}) = 0,6799$$

$$I_{bM1} = 0,78 \times 0,68 \times 2,539 \text{ kA} = 1,35 \text{ kA}$$

Para M2

$$\mu_{M2} = 0,62 + 0,72e^{-0,32 \cdot 6,05} = 0,724$$

$$q_{M2} = 0,57 + 0,12 \ln 3 \times 1(\text{MW}) / 1(\text{par de pólos}) = 0,57$$

$$I_{bM2} = 0,724 \times 0,57 \times 2,2356 \text{ kA} = 0,917 \text{ kA}$$

$$I_b = 14,78 + 1,35 + 0,917 = 17,047 \text{ kA (soma escalar)}$$

Cálculo da componente aperiódica da corrente de curto-circuito i_{dc} para falta em F1

A componente aperiódica da corrente de curto-circuito é calculada com o emprego da equação (4.50) para cada contribuição e, a corrente total é o somatório das correntes das contribuições:

$$i_{dc} = i_{dc(T1,T2)} + i_{dcM1} + i_{dcM2} = 1,37 + 0,155 + 0,136 = 1,661 \text{ kA}$$

Cálculo da corrente de curto-circuito de interrupção assimétrica I_b assimétrico para falta em F1

A corrente de interrupção assimétrica é obtida da equação:

$$I_{b\text{Assimétrica}} = \sqrt{I_b^2 + i_{dc}^2} = \sqrt{17,047^2 + 1,661^2}$$

$$I_{b\text{Assimétrica}} = 17,13 \text{ kA}$$

Cálculo da corrente de curto-circuito de regime I_k para falta em F1

Sabe-se que, no cálculo das correntes de regime, não há contribuição de motores de indução, uma vez que os efeitos transitórios já cessaram.

Dessa forma, I_{kM1} e $I_{kM2} = 0$ e a corrente de regime é igual à corrente inicial simétrica, ou seja:

$$I_k = I_{k(T1,T2)} + I_{kM1} + I_{kM2} = I''_{k(T1,T2)} \quad 14,78 \text{ kA}$$

Listagem dos cálculos executados com software específico para a norma "IEC-60909"

Abaixo, no Quadro 4.3, destaca-se a listagem dos cálculos das correntes de curto-circuito executadas por software específico, [SKM, PTW Short-circuit IEC_Fault], para comparação com as correntes calculadas manualmente.

Quadro 4.3 - Listagem das correntes de curto-circuito conforme "IEC-60909" para o caso da Figura 4.19, [SKM, PTW Short-circuit IEC_Fault]

T H R E E P H A S E I E C 6 0 9 0 9 F A U L T R E P O R T						
System Frequency(Hz): 50 Tmin: 0.10 sec.						
Calculate Maximum Short-Circuit Current						
=====						
*FAULT BUS: 1 Voltage: 6.000 kV Eq. Volt. Source: 1.10 p.u.						
Sk": 203084 kVA Sk: 153679 kVA Ib asym: 17.218 kA						
		Ik" (kA)	iDC (kA)	ip (kA)	Ib (kA)	Ik (kA)
=====						
Total Fault Current		19.542	2.036	49.237	17.097	14.788
GROUP CONTRIBUTIONS ----- referred to 6.000 kV						
INDIVIDUAL CONTRIBUTIONS:						
SISTEMA		14.788	1.745	37.499	14.788	14.788
M1		2.527	0.154	6.240	1.377	0.000
M2		2.228	0.136	5.500	0.932	0.000
DETAIL SOURCE INFORMATION -----						
INDIVIDUAL CONTRIBUTIONS:						
SISTEMA	NETWORK FEEDER				Status: NON-MESHED, FAR	
	Equivalent Z(Ω):	0.020 + j 0.257	or	0.258/85.5°		
	R/X:	0.079	Peak factor x(b):			1.793
M1	INDUCTION MOTOR				Status: NON-MESHED, NEAR	
	Equivalent Z(Ω):	0.150 + j 1.500	or	1.508/84.3°		
	R/X:	0.100	Peak factor x(b):			1.746
	μ:	0.797	q:			0.684
	Ir(rated kA):	0.577	Ik"/Ir:			4.382
	MW/(pole pair):	2.577				
M2	INDUCTION MOTOR				Status: NON-MESHED, NEAR	
	Equivalent Z(Ω):	0.170 + j 1.702	or	1.711/84.3°		
	R/X:	0.100	Peak factor x(b):			1.746
	μ:	0.725	q:			0.577
	Ir(rated kA):	0.370	Ik"/Ir:			6.021
	MW/(pole pair):	1.064				

4.7 Aplicações das correntes de curto-circuito calculadas conforme a norma “IEC”.

Outro ponto de destaque deste capítulo é a aplicação dos resultados dos cálculos das correntes de curto-circuito na verificação e dimensionamento de disjuntores e fusíveis de alta, média e baixa tensão. Para tanto, serão apresentadas algumas definições relativas a tais equipamentos, com a finalidade de proporcionar subsídios para a correta utilização das correntes de interrupção e momentâneas até agora descritas.

4.7.1 Disjuntores de média e alta tensão

Definições e dados de placa

A correta aplicação dos cálculos de correntes de curto-circuito conforme a norma “IEC” depende do correto entendimento das informações fornecidas nos dados de placa dos equipamentos.

A Tabela 4.15, extraída de [EPC-1, 2002] representa a placa de dados de um disjuntor de média tensão, definido conforme “IEC”.

Tabela 4.15 - Dados de placa de disjuntor de média tensão conforme a norma “IEC”

DADOS DE PLACA DE DISJUNTOR			
Tipo	D-abc	Corrente de interrupção nominal (3)	25 kA
Tensão Nominal (1)	12 kV	Tempo de duração de corrente de curto-circuito	3 s
Corrente nominal (2)	1250 A	Corrente de curto circuito “dc” (4)	40%
Frequência nominal	60 Hz	Corrente de pico (5)	62,5 kA pico
Tensão suportável 1min	28 kV	Bobina de desligamento	110 Vdc
Tensão de Impulso	75 kV pico	Bobina de ligamento	110 Vdc
Peso	140 kg	Número de série	xxxxx
Sequência de operação	0 - 0,3 s - CO - 3min - CO	Data de fabricação	20/02/2000

O disjuntor em questão, conforme a “IEC”, apresenta as seguintes características:

- (1) Tensão nominal: É a máxima tensão na qual o disjuntor pode ser aplicado. Este conceito difere da “ANSI” que define Tensão nominal e máxima tensão nominal.
- (2) Corrente nominal: É o limite estabelecido de corrente, em rms, à frequência nominal, que pode ser conduzida continuamente.
- (3) Corrente de interrupção: A corrente de interrupção está relacionada com a energia através dos seus contatos quando estes começam a abrir. Isso ocorre em 1,5 a 4,0 ciclos (60Hz) após o início da falta, e inclui componentes “**ac**” e “**dc**” da corrente de curto-circuito.
- (4) Corrente de curto circuito “**dc**”: é o percentual de “**componente dc**” presente no momento da separação dos contatos “*contact parting time*”.
- (5) Corrente de pico: é a máxima corrente que o equipamento suporta. É um elemento de projeto e não há dependência com a tensão.

Componente “dc**” da corrente de interrupção**

Convém, neste ponto, realizar uma análise dessa grandeza, algumas vezes explicitada nos dados de placa de equipamentos, mas, na maioria dos casos, omitida.

Este percentual de “**componente dc**” é baseado no pico de uma onda de corrente simétrica. A Figura 4.20 apresenta a quantidade de corrente “**dc**” no momento da separação dos contatos, como especificado na “*IEC-60056*” [IEC 60056, 1987], mostrando também uma segunda forma de representação, em valores rms.

A curva foi determinada a partir da equação (4.62), que é uma variação da equação (4.50) onde $I_{ACrms} = I'_k$.

$$I_{DC} = \sqrt{2} I_{ACrms} e^{-2\pi f t (X/R)} \quad (4.62)$$

Para sua utilização em 60 Hz faz-se $X/R = 17$ o que equivale a uma constante de tempo de 45 ms.

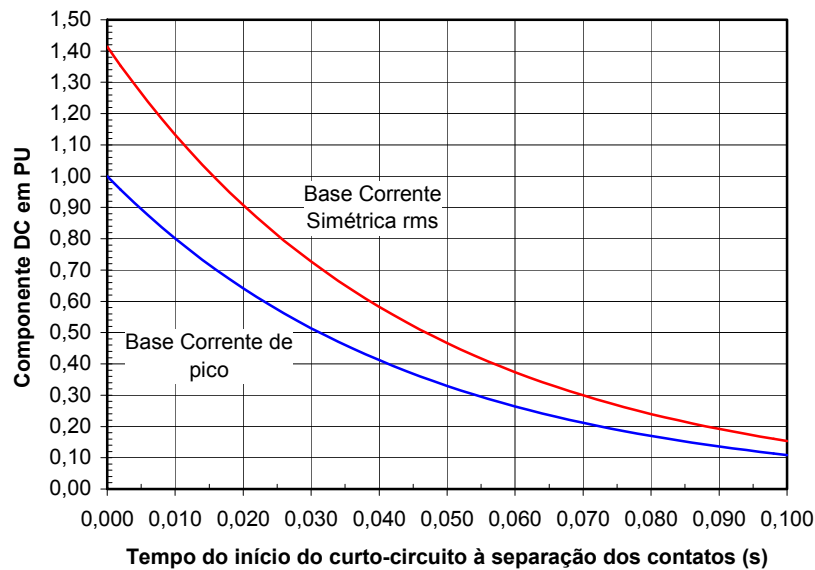


Figura 4.20 - Percentual de “**componente dc**” no momento da separação dos contatos de um disjuntor, conforme “*IEC*”

A constante de tempo dc da corrente nominal de curto-circuito está associada ao valor percentual (%dc) da componente contínua aperiódica no instante da separação dos contatos.

Para uma constante de tempo de 45 ms, definida como padrão, tanto pela norma “*ANSI*” como pela norma “*IEC*”, para sistemas de potência “*convencionais*”, o valor de relação X/R é 14, para sistemas de potência em 50 Hz e 17, para sistemas de potência em 60 Hz.

O comitê de estudos da “*IEC*”, ciente de que o valor de 45 ms não se aplica a todos os tipos de sistemas, sugere, na “*IEC 62271-100*”, [IEC 62271-100, 2008], a título de orientação e unificação, três outros “*valores especiais*” de X/R , os quais são apresentados na Tabela 4.16:

Tabela 4.16 - Constantes de tempo para disjuntores de média e alta tensão conforme “IEC”, [IEC 62271-100, 2008].

Sistema	Constante de tempo (ms)	X/R de teste
Convencional	45	17
$Un \leq 52 \text{ kV}$	120	45
$72,5 \text{ kV} \leq Un \leq 420 \text{ kV}$	60	23
$Un \geq 500 \text{ kV}$	75	28

Outra equação que relaciona o “**componente dc**” com as correntes simétrica e assimétrica é a (4.47), já apresentada anteriormente.

Cada tipo de equipamento é concebido e ensaiado conforme um critério normalizado. A Tabela 4.17 apresenta os critérios de teste para disjuntores de alta tensão com os respectivos fatores de multiplicação.

Tabela 4.17 - Valores típicos de X/R de teste em equipamentos de Alta tensão

Equipamento	X/R de teste	Corrente de cálculo	Multiplicador de teste	Norma
Disjuntor de Alta tensão Corrente momentânea	17	Assimétrica	2,60	IEC 62271-100 2008
Disjuntor de Alta tensão Corrente de interrupção	17	Assimétrica	(1)	IEC 62271-100 2008

Nota-1 Equações (4.57) e (4.62) em 60 Hz

As aplicações das normas e critérios estabelecidos até este momento resumem-se na introdução de fatores de correção quando o valor de X/R calculado, no ponto de utilização do equipamento, for **superior** ao estabelecido no ensaio proposto por norma.

Há também o interesse pela utilização da informação do “**componente dc**”, que será aplicado nos dois exemplos a seguir.

4.7.1.1- Exemplo-3

Como se obter a corrente de interrupção assimétrica do disjuntor cujos dados de placa são apresentados na Tabela 4.15?

Para corrente de interrupção assimétrica do disjuntor citado a partir da corrente de interrupção simétrica de 25 kA, “**componente dc**” de 40% ter-se-á:

Na determinação da corrente de interrupção assimétrica o valor do “**componente dc**” deve ser corrigido para uma base simétrica com $I_{DC} = 0,4 * \sqrt{2} = 0,566$.

A corrente de interrupção assimétrica total será então, conforme equação (1.13) :

$$I_{ASSIM} = 25(1 + 0,566^2)^{1/2} = 28,72 \text{ kA}$$

Outra informação que se obtém, a partir da curva da Figura-4.19 é que o tempo de separação dos contatos é de 0,04s, evidentemente o tempo de interrupção é superior a esse valor.

4.7.1.2- Exemplo-4

Na próxima aplicação, extraída de [EPC-2, 2002], as informações necessárias não se apresentam nos dados de placa, o que é caso comum quando se trata de equipamentos em operação e que demanda maior critério nas assunções a serem feitas:

Tenha-se o disjuntor cujos dados de placa apresentam-se na Tabela 4.18, aplicado num sistema hipotético, em 13,8 kV, cujos valores de corrente de curto-circuito são indicados abaixo:

Corrente de meio ciclo calculada: 26 kA@X/R=27, 13,8 kV

Corrente de interrupção 3 ciclos (0,05s): 23 kA_{sim.}@X/R=25, 13,8 kV

Tabela 4.18 - Características do disjuntor da aplicação do Exemplo-4

Característica	Valor
Tensão nominal	17,5 kV
Corrente nominal	1200 A
Corrente de interrupção	25 kA
Corrente momentânea	63 kA
Tempo de separação dos contatos	0,05s

Sabendo tratar-se de um equipamento de normatização “IEC”, tem-se que o X/R de teste é 17. Assim, para os dois valores de X/R calculados e superiores a 17, são necessárias correções para comparação com os valores de teste.

Corrente de pico

No caso da corrente de deve-se aplicar as equações (4.41) e (4.42).

Para $I_{ac}=26$ kA e $X/R=27$ ter-se-á:

$$I_{pico-SISTEMA} = \sqrt{2} \times 26 \text{ kA} \left(1,02 + 0,98e^{-\frac{3}{27}} \right) = 69,75 \text{ kA}$$

$$I_{picoDISJUNTOR} = 63 \text{ kA} < I_{pico-SISTEMA} = 69,75 \text{ kA}$$

Conclusão: O equipamento está subdimensionado para a corrente de pico disponível no sistema.

Corrente de interrupção

No caso da corrente de interrupção cabem dois pontos a salientar.

Primeiro, é conservativa a assunção de que a corrente de interrupção para 13,8 kV é 25 kA, uma vez que a tensão nominal é 17,5 kV e não há informações que definam ou justifiquem outros valores.

Segundo, como a variação da relação X/R do cálculo de meio ciclo para o cálculo de interrupção foi de $X/R=27$ para $X/R=25$ é conservativa a consideração do maior X/R .

Há dois métodos para a verificação dos valores calculados:

- Determinar a capacidade assimétrica do disjuntor para o X/R do ponto de falta e compará-la com o valor calculado;

- Aplicar fatores de correção às correntes simétricas calculadas e compara-las à capacidade do disjuntor.

Método-1

A aplicação deste método requer o emprego das equações (4.57) e (4.62).

Assim, ter-se-á:

No disjuntor:

Para $X/R = 17$ e $t = 0,05s$, implica em $I_{dc} = 0,4666$ e,

$$I_{Assim-DJ} = 1,1035 \times I_{Sim} \quad I_{Assim-DJ} = 27,59 \text{ kA (disjuntor)}$$

No sistema:

Com $X/R = 27$ e $t=0,05s$, resulta em $I_{dc} = 0,7036$ e,

$$I_{Assim-SIST} = 1,223 \times I_{Sim} \quad I_{Assim-SIST} = 28,13 \text{ kA (sistema)}$$

$$I_{Assim-DJ} = 27,59 \text{ kA (disjuntor)} < I_{Assim-SIST} = 28,13 \text{ kA (sistema)}$$

Conclusão o disjuntor está subdimensionado, sujeito a correntes 1,96% superiores à nominal.

Método 2

As correntes calculadas são corrigidas e comparadas à corrente do disjuntor:

$$\text{Multiplicador corrente de falta} = \frac{(\text{Multiplicado. Assim. X/R. calculado})}{(\text{Multiplicador. Assim. X/R. teste. disjuntor})}$$

Multiplicador da corrente de falta = $1,223/1,1035 = 1,109$.

A corrente calculada corrigida é $23 \text{ kA} \times 1,109 = 25,490 \text{ kA}$.

Conclusão o disjuntor está subdimensionado, sujeito a correntes 1,96% superiores à nominal.

Convém salientar que a norma brasileira para disjuntores de Alta Tensão em vigor, *NBR IEC 62271-100-2006*, “Equipamentos de Alta tensão – Parte 100: Disjuntores de Alta Tensão de Corrente Alternada” corresponde à tradução da norma europeia “*IEC 62271-100-2003*” “*High-voltage Switchgear and Controlgear – Part 100: Alternating-current circuit-breakers*”.

4.7.2 Fusíveis de alta tensão (>1000 V)

As normas “*IEC*” que regulamentam os ensaios em fusíveis de alta tensão são a “*IEC 60282-1*”, [IEC 60282-1, 2009], para fusíveis limitadores e “*IEC 60282-2*”, [IEC 60282-2, 2008], para fusíveis de expulsão. A Tabela 4.19 os valores de *X/R* de teste desses equipamentos.

Tabela 4.19 - Valores típicos de *X/R* de teste em fusíveis de alta tensão

Equipamento	<i>X/R</i> de teste	Corrente de Primeiro Ciclo	Multiplicador Assimétrico de teste	Norma
Fusíveis de potência - Limitadores	6,60 – 14,3	Assimétrica	2,31 – 2,56	IEC-60282-1-2009
Fusíveis de potência (3) – Pequenos transformadores	> 6,60 (1)	Assimétrica	2,31	IEC-60282-2-2008
Fusíveis de potência (3) – Distribuição	> 9,95 (2)	Assimétrica	2,46	IEC-60282-2-2008

Nota-1 A norma prescreve fator de potência < 0,15

Nota-2 A norma prescreve fator de potência < 0,10

Nota-3 Fusíveis de alta tensão de expulsão

4.7.2.1- Exemplo-5

Como dimensionar um fusível de média tensão para a Barra 3: MILL-1 cuja listagem é apresentada no Quadro 4.4, sabendo-se que o Fusível foi ensaiado com fator de potência de 15%?

Quadro 4.4 - Listagem das correntes de curto-circuito conforme "IEC-60909", [SKM, PTW Short-circuit IEC_Fault]

T H R E E P H A S E I E C 6 0 9 0 9 F A U L T R E P O R T				
System Frequency(Hz): 50		Tmin: 0.02 sec.		
Calculate Maximum Short-Circuit Current				
=====				
*FAULT BUS: 03:MILL-1	Voltage: 13.800 kV	Eq. Volt. Source: 1.10 p.u.		
R/X of Z(eq):	0.0911	Ik" (kA):		15.167
Ip (kA):	37.965	Ik (kA):		10.491
TIME (Cycles)	0.5	2.0	3.0	5.0
=====				
Ib (Asym. RMS) (kA)	21.914	15.509	13.768	12.592
Ib (Sym. RMS) (kA)	14.733	13.635	13.017	12.477
i (DC) (kA)	16.223	7.391	4.483	1.697
Ib (Asym) / Ib (Sym)	1.487	1.137	1.058	1.009

No quadro apresentado, sabe-se que o fator de multiplicação para corrente de pico na barra é $ip/I''_k = 37,965 / 15,167 = 2,503$.

Sabe-se que o fusível foi ensaiado com fator de potência de 15%, que corresponde a $X/R= 6,59$. Utilizando-se as equações (4.41) e (4.42) para cálculo da corrente de pico determina-se o fator de multiplicação para o X/R de ensaio que é 2,322.

O Multiplicador $_{pico}$ a ser utilizado deve ser obtido através da equação (4.63).

$$\text{Multiplicador}_{pico} = \frac{\text{Fator de multiplicação de pico com base no } X/R \text{ calculado}}{\text{Fator de multiplicação de pico com base no } X/R \text{ de teste}} \quad (4.63)$$

$$\text{Logo, Multiplicador}_{pico} = 2,503/2,322 = 1,078.$$

A corrente de interrupção nominal do fusível será $I''_k = 15,167 \text{ kA} \times 1,078 = 16,89 \text{ kA}$ e, considerando-se o fator de correção de tensão $c_{\max} = 1,10$ para 13,8 kV a corrente de interrupção do fusível deverá ser superior a 18,58 kA.

4.7.3 Disjuntores de baixa tensão

A norma “IEC 60947-2” - Low Voltage Switchgear and Controlgear Part2: Circuit Breakers, [IEC 60947-2, 2009], define os critérios de ensaios de disjuntores de baixa tensão e apresenta as correntes de teste e a relação X/R para disjuntores de baixa tensão no ponto da falta.

Como a relação X/R calculada nem sempre é igual àquela sob a qual equipamento foi ensaiado por norma, deve-se proceder às correções necessárias para se equalizar as informações. Dessa forma, se a relação X/R calculada for menor que a de ensaio, a corrente de curto-circuito calculada pode ser comparada diretamente com a capacidade nominal do equipamento. Contudo, se a relação X/R calculada for superior àquela sob a qual o equipamento foi ensaiado, deve ser feita uma correção sobre o valor calculado por meio da utilização de fatores de multiplicação adequados.

A Tabela 4.20 apresenta os critérios de ensaio para disjuntores de baixa tensão.

Tabela 4.20 - Valores típicos de X/R de teste em disjuntores de Baixa tensão

Equipamento	X/R de teste	Corrente de Primeiro Ciclo	Multiplicador de teste	Norma
Capacidade de interrupção $4,5 \leq I \leq 6,0 \text{ kA}$	1,02	Pico	1,5	IEC 60947-2
Capacidade de interrupção $6,0 < I \leq 10,0 \text{ kA}$	1,73	Pico	1,7	IEC 60947-2
Capacidade de interrupção $10,0 < I \leq 20,0 \text{ kA}$	3,18	Pico	2,0	IEC 60947-2
Capacidade de interrupção $20,0 < I \leq 50,0 \text{ kA}$	3,87	Pico	2,1	IEC 60947-2
Capacidade de interrupção $50,0 < I \text{ kA}$	4,89	Pico	2,2	IEC 60947-2

Da mesma maneira, disjuntores de baixa tensão são concebidos no critério de corrente de pico, assim os fatores de multiplicação devem ser obtidos da Tabela 4.20, para X/R de ensaio, e pelas equações (4.41) e

(4.63). O multiplicador a ser utilizado é obtido da equação (4.63) juntamente com o fator de correção de tensão c_{max} para baixa tensão.

Salienta-se que, a norma brasileira NBR IEC-60947-2 – Dispositivos de Manobra e Comando de Baixa Tensão – Parte-2 - Disjuntores, origina-se da homônima européia, assim, os critérios e as informações da Tabela 4.19 aplicam-se aos equipamentos fabricados sob a norma brasileira.

4.7.4 Fusíveis de baixa tensão

Os cálculos das correntes de curto-circuito são regidos pela norma “IEC 60269”, [IEC 60269-1, 2006], que não apresenta um valor especificado de X/R de teste para fusíveis de baixa tensão. Vários fabricantes utilizam fator de potência menor que 0,15, ou seja, X/R maior que 6,6.

Assim, recomenda-se que para aplicações de fusíveis de baixa tensão os fabricantes sejam consultados.

4.8 Considerações finais

No presente capítulo foi apresentada a metodologia “IEC” para cálculos de correntes de curto-circuito e, como ponto mais relevante, destaca-se a exposição sobre a aplicação dos valores obtidos nos mais difundidos softwares comerciais, assim como no dimensionamento de equipamentos de interrupção de alta, média e baixa tensão.

Aqui, também a atenção dispensada à grande quantidade de informações, equações, tabelas e gráficos condensados neste capítulo, se deu pelo fato de tais elementos se encontrarem disseminados em várias normas e publicações.

O próximo capítulo irá tratar semelhanças e diferenças entre as metodologias “ANSI”, americana, e “IEC”, européia, para os cálculos de curto-circuito.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE COMPARATIVA DAS CORRENTES DE CURTO CIRCUITO CALCULADAS CONFORME MÉTODO ABRANGENTE, NORMA ANSI E NORMA IEC

5.1 Introdução

Este capítulo apresentará um caso exemplo considerando três métodos de cálculos de curto-circuito; método Abrangente; método “ANSI” e método “IEC”.

O sistema utilizado como exemplo é o de uma indústria brasileira de grande porte. Saliencia-se que, para fins didáticos e, devido à extensão do sistema elétrico da unidade fabril, apenas dois terços do sistema foi apresentado neste trabalho.

As nomenclaturas e características nominais dos equipamentos são as mesmas utilizadas no sistema real.

Os parâmetros de cabos utilizados neste trabalho foram obtidos de catálogos de fabricantes nacionais da Pirelli, [Pirelli, Cabos de média tensão], e Nexans, [Nexans, Cabos de baixa tensão].

As relações X/R de transformadores, geradores e motores foram obtidas, respectivamente, da Figuras 4.5, 3.7 e 3.8.

O processamento dos cálculos foi feito por meio de softwares comerciais da SKM e foram utilizados programas específicos para aplicação do método Abrangente, [SKM, PTW Short-circuit Comprehensive], método “ANSI”, [SKM, PTW Short-circuit A-Fault] e, finalmente, método “IEC”, [SKM, PTW Short-circuit IEC_Fault].

O sistema elétrico utilizado é apresentado no diagrama unifilar do ANEXO-3 e as características elétricas de interesse de cada componente são mostradas nas tabelas 8.1 a 8.5 do ANEXO-4 e tabelas 8.6 e 8.8 do ANEXO-5.

Conforme já citado, foram processados três métodos de cálculos de correntes de curto-circuito trifásico:

- O método Abrangente, algébrico, sem vínculo com as normas “IEC” ou “ANSI”;
- O Método “ANSI”, conforme as normas americanas “ANSI-C37.010”, “ANSI-C37.5” e “ANSI-C37.13”;
- O método “IEC” conforme a norma “IEC-60909”.

Como aplicação da metodologia “ANSI”, foram executados cálculos considerando-se alguns aspectos sugeridos pela norma, como a utilização da “relação NACD” interpolada ou remota, assim como cálculos utilizando-se as opções sugeridas pela norma conforme “ANSI C37.010” e “ANSI C37.13” ou por meio do MÉTODO COMBINADO, alternativo.

Outrossim, já na metodologia “IEC”, foram executados cálculos considerando-se o fator “c” conforme prescrição da norma, pela tabela 4.1 e, com valor “forçado” de “c=1,0”. Ainda, com a finalidade do estudo do comportamento das correntes de regime “ I_k ” foram executadas várias simulações de sistema de excitação de geradores, aplicados ao sistema sob estudo.

Em sequência, foram procedidas análises comparativas entre as várias categorias de correntes de curto-circuito com a obtenção dos desvios entre as correntes “ANSI” e “IEC” e aquelas obtidas com a utilização do método Abrangente.

Para finalizar o capítulo, é apresentada uma aplicação de um caso de superação de disjuntores de média tensão.

5.2 Análise de caso segundo o método Abrangente

O método de cálculo Abrangente é uma solução puramente algébrica para o cálculo das correntes de curto-circuito onde geradores, motores síncronos e de indução não tem suas contribuições corrigidas, ou impedâncias modificadas para determinação de correntes de curto-circuito momentâneas ou de interrupção. A tensão de pré-falta é considerada igual a 1 pu em todas as barras.

A partir dos componentes do sistema, representados num diagrama unifilar, e de suas características alocadas em um banco de dados associado, é criada uma “*matriz admitância*”, quadrada, de dimensão igual ao número de barras. As características de simetria e esparsidade permitem sua inversão computacionalmente conveniente na “*matriz impedância*”, de onde, utilizando-se da Lei de Ohm, são obtidas as correntes de curto-circuito em cada barra do sistema, a partir da equação 5.1.

$$[I] = [Y].[E] \Leftrightarrow [E] = [Z].[I] \quad (5.1)$$

Com:

- E: Matriz das tensões nas barras, neste caso consideradas 1,0 pu;
- Z: Matriz das impedâncias do sistema;
- Y: Matriz admitância do sistema;
- I: Matriz das correntes nos nós;

A impedância Z em notação complexa é representada pela equação

5.2

$$Z = R + jX \quad (5.2)$$

A corrente de pico é, neste método, obtida da equação 2.10, e transcrita aqui como equação 5.3, utilizada para $t=0,5$ ciclos.

$$I_{pico} = \sqrt{2} I_{ac, rms} \left(1 + e^{-\frac{2\pi t}{X/R}} \right) \quad (5.3)$$

Notadamente, a corrente “rms” assimétrica apresentada neste método, é obtida da equação (2.17), transcrita como equação 5.4, quando resolvida para $t=0,5$ ciclos.

$$I_{assim\ rms} = I_{ac\ rms} \sqrt{1 + 2[e^{-2\pi.t/(X/R)}]^2} \quad (5.4)$$

As correntes de interrupção em 2, 3 e 5 ciclos, calculadas pelo método Abrangente, são também obtidas a partir da equação (5.4) para 2, 3 e 5 ciclos, respectivamente.

Já, as correntes de regime, são obtidas desconsiderando-se as contribuições dos motores síncronos e assíncronos.

A tabela 5.1 apresenta o resumo das correntes de curto-circuito, calculadas. Nela, são tabulados os valores de X/R , corrente inicial simétrica, corrente inicial “rms” assimétrica, corrente inicial de pico, correntes de interrupção em 2, 3 e 5 ciclos e correntes de regime.

Tabela 5.1 Correntes de curto-circuito pelo método Abrangente

SISTEMA		CORRENTE INICIAL				CORRENTE DE INTERRUPTÃO			REGIME
Barra	kV	X/R	linicial rms (kA)	Irms assim. (kA)	Ipico assim. (kA)	I_b Sim 2 ciclos (kA)	I_b Sim 3 ciclos (kA)	I_b Sim 5 ciclos (kA)	Iregime (kA)
01-138 KV	138	4,50	9,72	11,88	20,54	9,76	9,72	9,72	9,43
04-QDAT-C	13,8	16,40	9,23	14,19	23,83	11,05	10,11	9,43	8,43
06-700PMT005	13,8	16,60	8,50	13,08	21,96	10,20	9,34	8,69	8,47
20-700PMT003E	13,8	13,50	8,99	13,50	22,77	10,29	9,52	9,08	8,19
21-707PMT002	13,8	9,80	8,82	12,64	21,51	9,47	9,01	8,83	8,04
211-707PMT004	3,80	11,80	6,61	9,75	16,52	7,35	6,88	6,64	5,06
22-707PMT051	13,8	13,10	25,79	38,58	65,17	29,33	27,20	26,00	14,62
221-700CCMZ	3,8	8,00	4,77	6,60	11,29	4,97	4,81	4,77	3,48
222-700BT052	0,38	8,60	57,64	80,76	138,03	60,66	58,35	57,68	45,08
223-700CCMMH	0,38	8,60	58,00	81,27	138,87	61,04	58,72	58,04	45,42
23-703PMT601	13,8	8,10	8,69	12,04	20,62	9,07	8,77	8,69	7,92
231-703BT601	0,38	8,50	57,39	80,24	137,26	60,30	58,07	57,43	46,07
24-300PMT007	13,8	6,10	21,74	28,46	49,14	22,09	21,78	21,74	13,19
241-300BT007	0,38	7,50	52,47	71,66	122,91	54,28	52,81	52,48	44,40
242-300BT008	0,38	7,50	52,96	72,33	124,06	54,78	53,31	52,97	44,86
243-300BT009	0,38	7,50	52,61	71,85	123,23	54,42	52,95	52,62	44,53
25-300PMT010	13,8	7,50	24,36	33,27	57,16	25,20	24,52	24,37	14,14
251-300BT010	0,38	7,50	51,99	71,01	121,94	53,78	52,33	52,00	44,81
252-300BT011	0,38	7,50	52,42	71,59	122,94	54,23	52,76	52,43	45,21
253-300BT012	0,38	7,50	52,49	71,69	123,11	54,30	52,83	52,50	45,28
254-300BT006	0,38	6,20	32,16	42,25	72,91	32,71	32,23	32,16	28,27
26-300PMT001	13,8	12,60	25,09	37,34	63,11	28,30	26,32	25,26	14,32
261-CCM-MA-A	3,80	15,50	18,36	28,05	47,160	21,69	19,91	18,68	10,61
2611-CCMSIEMEN	3,80	8,50	17,97	25,13	42,99	18,88	18,18	17,98	10,47
2612-PILAO-1-2	3,80	3,80	16,28	19,14	33,11	16,30	16,28	16,28	9,83
2613-PILAO-3-4	3,80	3,80	16,56	19,47	33,58	16,58	16,56	16,56	9,83
262-CCM-MA-B	3,80	15,80	18,72	28,66	48,18	22,21	20,37	19,07	10,61
27-300PMT003	13,8	5,70	23,29	30,05	52,00	23,57	23,32	23,29	13,78
271-300BT003	0,38	7,40	51,67	70,39	120,88	53,37	51,99	51,68	44,51
272-300BT004	0,38	7,40	51,53	70,19	120,55	53,23	51,84	51,54	44,38
273-300BT005	0,38	7,40	52,16	71,05	122,03	53,88	52,48	52,17	44,97
28-305PMT001	13,8	2,90	20,57	22,81	38,31	20,57	20,57	20,57	12,90
281-305BT001	0,38	5,80	40,34	52,24	90,25	40,87	40,40	40,34	33,96
29-917PMT001	13,8	2,40	19,21	20,56	34,61	19,21	19,21	19,21	12,35
291-918BT067	0,38	7,20	58,14	78,77	135,61	59,89	58,45	58,15	45,54
292-918BT065	0,38	4,80	17,17	21,31	36,92	17,26	17,18	17,17	15,60
293-918BT066	0,38	5,80	32,00	41,44	71,59	32,42	32,05	32,00	26,03
30-781PMT001	13,8	8,90	8,60	12,12	20,73	9,10	8,72	8,61	7,85
301-718BT001	0,44	7,50	36,38	49,69	85,29	37,63	36,62	36,39	28,33
31-702PMT001	13,8	5,60	23,60	30,33	52,41	23,86	23,63	23,60	13,92
311-702QGBT002	0,38	4,70	16,20	20,01	34,67	16,28	16,21	16,20	15,99
32-707PMT001	13,8	6,60	24,47	32,57	56,03	25,01	24,55	24,47	14,20
321-707PMT003	3,80	7,20	6,05	8,20	14,08	6,23	6,08	6,05	5,09
40-700PMT003G	13,8	15,50	26,02	39,75	66,83	30,73	28,21	26,47	14,70
50-700PMT004E	13,8	16,20	26,17	40,18	67,48	31,23	28,61	26,71	14,77
51-509PMT001	13,8	3,80	22,41	26,35	45,63	22,44	22,41	22,41	13,53
511-509CCMME	0,38	7,90	61,72	85,14	145,91	64,23	62,24	61,74	48,87
512-509CCMMF	0,38	7,90	61,72	85,14	145,91	64,23	62,24	61,74	48,87
52-507PMT001	13,8	2,20	18,50	19,53	32,52	18,50	18,50	18,50	12,14
521-507CCMMC	0,38	6,40	60,75	80,35	138,40	61,94	60,92	60,75	50,51

Tabela 5.1 Correntes de curto-circuito pelo método Abrangente - continuação

SISTEMA		CORRENTE INICIAL				CORRENTE DE INTERRUPTÃO			REGIME
Barra	kV	X/R	linicial rms (kA)	Irms assim. (kA)	Ipico assim. (kA)	I_b Sim 2 ciclos (kA)	I_b Sim 3 ciclos (kA)	I_b Sim 5 ciclos (kA)	Iregime (kA)
53-722PMT001	13,8	4,10	22,15	26,51	45,85	22,20	22,15	22,15	13,39
531-722CCM01	0,38	7,30	61,67	83,78	139,91	63,61	62,02	61,68	48,82
532-722CCM02	0,38	7,30	61,67	83,78	143,91	63,61	62,02	61,68	48,82
533-722CCM03	0,38	7,30	61,67	83,78	143,91	63,61	62,02	61,68	48,82
54-709PMT001	13,8	2,00	17,60	18,34	30,24	17,60	17,60	17,60	11,72
541-709CCM502	0,38	7,20	57,90	78,45	134,82	59,64	58,21	57,91	45,34
542-709CCM503	0,38	7,10	57,89	78,22	134,56	59,55	58,18	57,90	45,33
543-709CCM504	0,38	7,10	57,89	78,22	134,56	59,55	58,18	57,90	45,33
55-510PMT001	13,8	9,00	23,59	33,32	56,86	24,99	23,95	23,61	13,87
551-510CCMMH	0,38	7,50	55,59	75,92	130,44	57,51	55,95	55,60	48,99
552-510CCMMI	0,38	7,50	52,38	71,54	122,93	54,18	52,72	52,39	46,02
554-511CCMML	0,38	7,30	54,56	74,12	127,43	56,28	54,87	54,57	46,02
555-511CCMMN	0,38	7,30	54,56	74,12	127,43	56,28	54,87	54,57	46,02
556-511CCMMO	0,38	8,30	56,85	79,14	135,49	59,54	57,45	56,88	46,02
557-511CCMMP	0,38	7,40	47,82	65,14	111,78	49,40	48,11	47,83	46,02
56-721PMT001	13,8	3,80	22,39	26,33	45,52	22,42	22,39	22,39	13,53
561-721PMT002	3,80	7,80	4,68	6,44	11,04	4,86	4,72	4,68	3,87
562-721PBT001	0,38	10,30	62,98	90,98	154,65	68,25	64,58	63,12	50,17
563-710PBT020	0,38	7,00	44,03	59,32	101,90	45,23	44,23	44,04	42,51
57-709PMT002	13,8	2,50	19,45	20,97	35,17	19,45	19,45	19,45	12,53
571-709PBT011	0,38	6,60	53,57	71,31	122,69	54,75	53,75	53,57	48,99
58-513PMT001	13,8	12,00	25,25	37,32	63,22	28,19	26,32	25,38	14,45
581-513CCMMR	0,40	11,50	68,85	101,14	171,51	76,20	71,40	69,14	55,74
582-513CCMMS	0,40	11,50	68,85	101,14	171,51	76,20	71,40	69,14	55,74
583-513CCMMT	0,40	11,50	68,85	101,14	171,51	76,20	71,40	69,14	55,74
584-513CCMML	0,40	6,70	36,48	48,71	83,77	37,33	36,61	36,48	35,43
585-513CCMMV	0,40	11,50	68,85	101,14	171,51	76,20	71,40	69,14	55,74
59-719PMT001	13,8	6,40	24,19	31,99	55,21	24,66	24,26	24,19	14,09
591-719QBT001	0,40	10,90	68,69	100,10	169,87	75,23	70,82	68,91	51,98
592-719CCM001	3,80	12,80	11,43	17,05	288,22	12,94	12,02	11,51	7,34
60-702PMT001	13,8	11,50	25,56	37,55	63,63	28,29	26,51	25,67	14,58
601-702PBT013A	0,38	6,30	39,74	52,39	90,42	40,47	39,84	39,74	34,25
602-702PBT013B	0,38	6,00	39,57	51,62	89,24	40,17	39,64	39,57	34,10
603-702PBT013C	0,38	6,30	39,57	52,16	90,05	40,30	39,67	39,57	34,10
70-700PMT004G	13,8	16,20	26,17	40,18	67,49	31,23	28,61	26,71	14,77

5.3 Análise de caso segundo a metodologia de cálculo “ANSI/IEEE”

A partir da modelagem dos componentes do sistema elétrico já apresentado foi utilizado um software de metodologia “ANSI”, SKM, A_Fault, [SKM, PTW Short-circuit A-Fault], para cálculo das correntes de curto-circuito, com as seguintes premissas:

- Tensão pré-falta 1,0 pu;
- Reatâncias conforme Tabela 3.1 Colunas 2 e 3;
- Solução pelo método E/Z;

À luz das condições acima, foram executadas, inicialmente, duas simulações considerando-se as opções apresentadas pela “ANSI” para:

- Comparação das correntes de interrupção de disjuntores de média tensão conforme “ANSI” para fatores de correção “*interpolados*” e “*remotos*”;
- Comparação das correntes de curto-circuito calculadas conforme “ANSI C37.010” e “ANSI C37.13” (Tabela 3.1 colunas 2 e 3) e as calculadas conforme MÉTODO COMBINADO (Tabela 3.1 coluna 4)

5.3.1 Correntes de interrupção para fatores de correção interpolados e remotos

A primeira análise tem como base, as opções sugeridas pela “IEEE-551” [IEEE Std 551, 2006] para utilização da “*relação NACD*” no cálculo das correntes de interrupção de disjuntores de média e alta tensão. Contudo, neste trabalho foram consideradas duas, das três opções para utilização da “*relação NACD*”:

Interpolada: Considera os percentuais locais e remotos, conforme recomendado pela “ANSI”;

Remota: todos os cálculos são efetuados considerando-se as contribuições “Remotas” para obtenção de valores conservativos;

Quanto à opção “Predominante”, esta não foi apresentada devido às características do sistema elétrico sob estudo onde as contribuições “Predominantes” serão sempre “Remotas”, o que praticamente repetiria os resultados com a opção remota.

Neste caso, todas as contribuições de motores síncronos, assíncronos maiores que 50 HP e geradores foram incluídas. As correntes de interrupção apresentadas foram calculadas para tempos de separação dos contatos de 2, 3 e 5 ciclos.

A tabela 5.2 apresenta as correntes de curto-circuito de interrupção calculadas conforme fatores de correção interpolados e remotos.

Tabela 5.2 Correntes de interrupção conforme “ANSI” para fatores de correção interpolados e remotos

SISTEMA		CONTRIBUIÇÕES INTERPLOADAS						CONTRIBUIÇÕES REMOTAS					
Barra	kV	E/Z (kA)	X/R	NACD	2 ciclos	3 ciclos	5 ciclos	E/Z	X/R	NACD	2 ciclos	3 ciclos	5 ciclos
01-138 KV	138	9,56	5,13	0,95	9,56	9,56	9,56	9,56	5,13	1,00	9,56	9,56	9,56
04-QDAT-C	13,8	8,75	17,25	0,95	8,75	8,92	8,93	8,75	17,25	1,00	8,75	8,93	8,94
06-700PMT005	13,8	8,48	17,27	0,98	8,48	8,65	8,67	8,48	17,27	1,00	8,48	8,66	8,67
20-700PMT003E	13,8	8,51	13,88	0,95	8,51	8,51	8,51	8,51	13,88	1,00	8,51	8,51	8,51
21-707PMT002	13,8	8,35	10,19	0,95	8,35	8,35	8,35	8,35	10,19	1,00	8,35	8,35	8,35
211-707PMT004	3,80	6,07	12,49	0,81	6,07	6,07	6,07	6,07	12,49	1,00	6,07	6,07	6,07
22-707PMT051	13,8	18,14	22,27	0,44	18,39	18,83	18,69	18,14	22,27	1,00	18,59	19,59	19,38
221-700CCMZ	3,8	3,92	8,06	0,74	3,92	3,92	3,92	3,92	8,06	1,00	3,92	3,92	3,92
23-703PMT601	13,8	8,22	8,23	0,95	8,22	8,22	8,22	8,22	8,23	1,00	8,22	8,22	8,22
24-300PMT007	13,8	16,02	8,79	0,44	16,02	16,02	16,02	16,02	8,79	1,00	16,02	16,02	16,02
25-300PMT010	13,8	17,42	11,46	0,44	17,42	17,42	17,42	17,42	11,46	1,00	17,42	17,42	17,42
26-300PMT001	13,8	17,79	20,82	0,44	17,86	18,30	18,22	17,79	20,82	1,00	17,95	18,95	18,77
261-CCM-MA-A	3,80	14,57	16,64	0,64	14,57	14,68	14,72	14,57	16,64	1,00	14,57	14,74	14,80
2611-CCMSIEMEN	3,80	14,32	9,61	0,64	14,32	14,32	14,32	14,32	9,61	1,00	14,32	14,32	14,32
2612-PILAO-1-2	3,80	13,17	4,66	0,64	13,17	13,17	13,17	13,17	4,66	1,00	13,17	13,17	13,17
2613-PILAO-3-4	3,80	13,79	4,51	0,61	13,79	13,79	13,79	13,79	4,51	1,00	13,79	13,79	13,79
262-CCM-MA-B	3,80	15,35	17,11	0,61	15,35	15,52	15,54	15,35	17,11	1,00	15,35	15,63	15,66
27-300PMT003	13,8	16,88	8,42	0,44	16,88	16,88	16,88	16,88	8,42	1,00	16,88	16,88	16,88
28-305PMT001	13,8	15,51	4,00	0,44	15,51	15,51	15,51	15,51	4,00	1,00	15,51	15,51	15,51
29-917PMT001	13,8	14,69	3,24	0,44	14,69	14,69	14,69	14,69	3,24	1,00	14,69	14,69	14,69
30-781PMT001	13,8	8,16	9,20	0,95	8,16	8,16	8,16	8,16	9,20	1,00	8,16	8,16	8,16
31-702PMT001	13,8	17,06	8,35	0,44	17,06	17,06	17,06	17,06	8,35	1,00	17,06	17,06	17,06
32-707PMT001	13,8	17,50	10,05	0,44	17,50	17,50	17,50	17,50	10,05	1,00	17,50	17,50	17,50
321-707PMT003	3,80	5,68	8,18	0,75	5,68	5,68	5,68	5,68	8,18	1,00	5,68	5,68	5,68
40-700PMT003G	13,8	18,26	27,67	0,44	19,30	19,80	19,38	18,26	27,67	1,00	19,67	20,64	20,36
50-700PMT004E	13,8	18,35	30,18	0,44	19,72	20,25	19,83	18,35	30,18	1,00	20,15	21,12	20,85
51-509PMT001	13,8	16,43	5,35	0,44	16,43	16,43	16,43	16,43	5,35	1,00	16,43	16,43	16,43
52-507PMT001	13,8	14,36	2,98	0,44	14,36	14,36	14,36	14,36	2,98	1,00	14,36	14,36	14,36
53-722PMT001	13,8	16,29	5,76	0,44	16,29	16,29	16,29	16,29	5,76	1,00	16,29	16,29	16,29
54-709PMT001	13,8	13,74	2,64	0,44	13,74	13,74	13,74	13,74	2,64	1,00	13,74	13,74	13,74
55-510PMT001	13,8	16,98	13,69	0,44	16,98	16,98	16,98	16,98	13,69	1,00	16,98	16,98	16,98
56-721PMT001	13,8	16,45	5,44	0,44	16,45	16,45	16,45	16,45	5,44	1,00	16,45	16,45	16,45
561-721PMT002	3,80	4,15	8,01	0,77	4,15	4,15	4,15	4,15	8,01	1,00	4,15	4,15	4,15
57-709PMT002	13,8	14,93	3,39	0,44	14,93	14,93	14,93	14,93	3,39	1,00	14,93	14,93	14,93
58-513PMT001	13,8	17,85	19,75	0,44	17,85	18,27	18,21	17,85	19,75	1,00	17,85	18,80	18,66
59-719PMT001	13,8	17,34	9,73	0,44	17,34	17,34	17,34	17,34	9,73	1,00	17,34	17,34	17,34
592-719CCM001	3,80	9,42	13,57	0,67	9,42	9,42	9,42	9,42	13,57	1,00	9,42	9,42	9,42
60-702PMT001	13,8	18,04	19,27	0,44	18,04	18,42	18,37	18,04	19,27	1,00	18,04	18,89	18,78
70-700PMT004G	13,8	18,35	30,21	0,44	19,72	20,25	19,84	18,35	30,21	1,00	20,15	21,12	20,85

Apresentam-se na tabela 5.3, os desvios obtidos entre os métodos interpolado e remoto para as correntes de interrupção calculadas nas barras de média e alta tensão do sistema.

Tabela 5.3 - Desvios entre o método interpolado e o remoto

SISTEMA		CARACTERÍSTICAS			DESVIOS %		
Barra	kV	E/Z (kA)	X/R	NACD	2 ciclos	3 ciclos	5 ciclos
01-138 KV	138	9,56	5,13	0,95	0,00	0,00	0,00
04-QDAT-C	13,8	8,75	17,25	0,95	0,00	0,11	0,11
06-700PMT005	13,8	8,48	17,27	0,98	0,00	0,12	0,00
20-700PMT003E	13,8	8,51	13,88	0,95	0,00	0,00	0,00
21-707PMT002	13,8	8,35	10,19	0,95	0,00	0,00	0,00
211-707PMT004	3,80	6,07	12,49	0,81	0,00	0,00	0,00
22-707PMT051	13,8	18,14	22,27	0,44	1,09	4,04	3,69
221-700CCMZ	3,8	3,92	8,06	0,74	0,00	0,00	0,00
23-703PMT601	13,8	8,22	8,23	0,95	0,00	0,00	0,00
24-300PMT007	13,8	16,02	8,79	0,44	0,00	0,00	0,00
25-300PMT010	13,8	17,42	11,46	0,44	0,00	0,00	0,00
26-300PMT001	13,8	17,79	20,82	0,44	0,50	3,55	3,02
261-CCM-MA-A	3,80	14,57	16,64	0,64	0,00	0,41	0,54
2611-CCMSIEMEN	3,80	14,32	9,61	0,64	0,00	0,00	0,00
2612-PILAO-1-2	3,80	13,17	4,66	0,64	0,00	0,00	0,00
2613-PILAO-3-4	3,80	13,79	4,51	0,61	0,00	0,00	0,00
262-CCM-MA-B	3,80	15,35	17,11	0,61	0,00	0,71	0,77
27-300PMT003	13,8	16,88	8,42	0,44	0,00	0,00	0,00
28-305PMT001	13,8	15,51	4,00	0,44	0,00	0,00	0,00
29-917PMT001	13,8	14,69	3,24	0,44	0,00	0,00	0,00
30-781PMT001	13,8	8,16	9,20	0,95	0,00	0,00	0,00
31-702PMT001	13,8	17,06	8,35	0,44	0,00	0,00	0,00
32-707PMT001	13,8	17,50	10,05	0,44	0,00	0,00	0,00
321-707PMT003	3,80	5,68	8,18	0,75	0,00	0,00	0,00
40-700PMT003G	13,8	18,26	27,67	0,44	1,92	4,24	5,06
50-700PMT004E	13,8	18,35	30,18	0,44	2,18	4,30	5,14
51-509PMT001	13,8	16,43	5,35	0,44	0,00	0,00	0,00
52-507PMT001	13,8	14,36	2,98	0,44	0,00	0,00	0,00
53-722PMT001	13,8	16,29	5,76	0,44	0,00	0,00	0,00
54-709PMT001	13,8	13,74	2,64	0,44	0,00	0,00	0,00
55-510PMT001	13,8	16,98	13,69	0,44	0,00	0,00	0,00
56-721PMT001	13,8	16,45	5,44	0,44	0,00	0,00	0,00
561-721PMT002	3,80	4,15	8,01	0,77	0,00	0,00	0,00
57-709PMT002	13,8	14,93	3,39	0,44	0,00	0,00	0,00
58-513PMT001	13,8	17,85	19,75	0,44	0,00	2,90	2,47
59-719PMT001	13,8	17,34	9,73	0,44	0,00	0,00	0,00
592-719CCM001	3,80	9,42	13,57	0,67	0,00	0,00	0,00
60-702PMT001	13,8	18,04	19,27	0,44	0,00	2,55	2,23
70-700PMT004G	13,8	18,35	30,21	0,44	2,18	4,30	5,09

Valores positivos = conservativos

Da tabela 5.3, de plano, denota-se que os desvios dependem de duas grandezas: relação NACD e relação X/R de forma que, quanto *menor* a relação NACD em relação à unidade, maior o desvio para relações X/R superiores a 17. O gráfico da figura 5.1 permite uma melhor visualização do comportamento dos desvios obtidos.

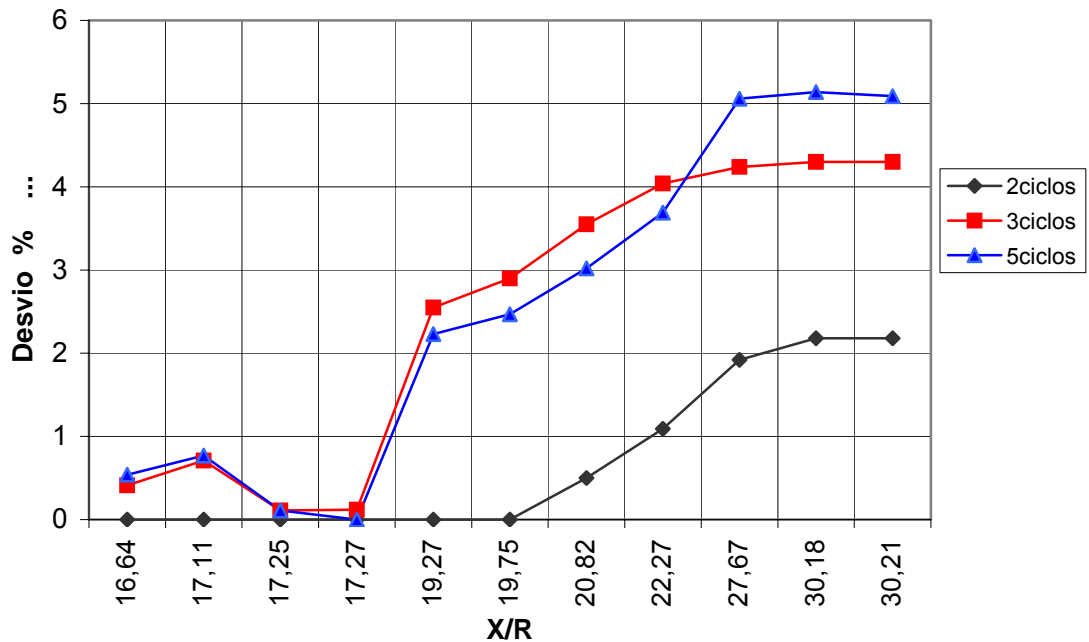


Figura-5.1 Gráfico dos desvios entre os métodos Interpolado e remoto em função da relação X/R para cálculos em 2, 3 e 5 ciclos.

Uma análise do gráfico apresentado revela alguns pontos de interesse:

- Os desvios são evidentes para relações X/R superiores a 16,64;
- Os desvios obtidos para 2 ciclos representam os valores inferiores dos três cálculos, da ordem de 2,2%, no máximo, e são evidenciados a partir da relação X/R de 20,82;
- Os maiores desvios verificados representam os cálculos de 3 e 5 ciclos;
- Os pontos $X/R=17,25$ e $X/R=17,27$ representam dois pontos onde NACD é próximo da unidade, onde as contribuições remotas e interpoladas são as mesmas;
- Os desvios máximos obtidos para os cálculos de 3 e 5 ciclos são da ordem de 4,3 a 5,1%;
- As barras 70-700PMT004G/004E são as que apresentam os maiores desvios devido à presença do turbo gerador TG-2, que produz maior contribuição local, além de aumentar a relação X/R .

5.3.2 Correntes de curto-circuito calculadas conforme “ANSI C37.010” e “ANSI C37.13” (Tabela 2.1 colunas 2 e 3) e calculadas conforme MÉTODO COMBINADO (Tabela 2.1 coluna 4)

Esta análise fundamenta-se nos métodos de cálculo das correntes momentâneas e de interrupção apresentados na Tabela 3.1, extraída da “IEEE Std 551-2006”, [IEEE Std 551, 2006].

O primeiro método trata de um cálculo das correntes de primeiro ciclo, ou momentâneas e das correntes de interrupção para disjuntores de alta e média tensão conforme preceitos da “ANSI C37.010”, [IEEE Std C37.010, 2005] e um segundo cálculo das correntes de interrupção para disjuntores de baixa tensão conforme preceitos da “ANSI C37.13”, [IEEE Std C37.13, 2008].

O segundo método ou “*método combinado*” trata dos cálculos para alta, média e baixa tensão utilizando-se apenas “*um procedimento*”, aplicando-se fatores de correção combinados das reatâncias de motores e geradores síncronos e motores de indução introduzidos pela Tabela 3.1 coluna 4. Salienta-se que, conforme apresentado da tabela 3.1, não há diferenças no cálculo das correntes de interrupção em média e alta tensão.

A figura 3.6, no quadro “*Motor Reactance X^d Multipliers*”, apresenta as duas opções acima descritas, também visualizadas na Tabela 3.1.

As tabelas 5.4 e 5.5 apresentam os resultados obtidos nos dois cálculos:

Tabela 5.4 - Comparação entre os métodos de cálculos de interrupção em baixa tensão

SISTEMA		MÉTODO ANSI C37.010 e ANSI C37.13 A				MÉTODO COMBINADO B				DESVIO 100x(B-A)/A (%)		
Barra	kV	kA	X/R	LVPCB	MCCB >20 kA	kA	X/R	LVPCB	MCCB >20 kA	X/R	kA	LVPCB
222-700BT052	0,38	57,64	10,56	61,97	65,97	53,07	9,52	56,28	59,75	-9,85	-7,94	-9,18
223-700CCMMH	0,38	58,00	10,54	62,35	66,20	53,43	9,51	56,65	60,15	-9,77	-7,89	-9,14
231-703BT601	0,38	57,39	10,48	61,64	65,45	53,01	9,40	56,11	59,58	-10,31	-7,64	-8,97
241-300BT007	0,38	52,47	7,60	53,78	57,10	51,19	7,57	52,44	55,67	-0,39	-2,44	-2,49
242-300BT008	0,38	52,96	7,59	54,28	57,63	51,68	7,57	52,93	56,20	-0,26	-2,43	-2,49
243-300BT009	0,38	52,61	7,59	53,92	57,25	51,33	7,57	52,58	55,82	-0,26	-2,44	-2,49
251-300BT010	0,38	51,99	7,64	53,33	56,63	50,86	7,62	52,16	55,37	-0,26	-2,18	-2,19
252-300BT011	0,38	52,42	7,64	53,77	57,09	51,29	7,62	52,59	55,84	-0,26	-2,17	-2,19
253-300BT012	0,38	52,49	7,64	53,85	57,17	51,36	7,62	52,67	55,92	-0,26	-2,17	-2,19
254-300BT006	0,38	32,16	7,27	32,72	34,74	30,78	6,73	30,89	32,80	-7,43	-4,29	-5,59
271-300BT003	0,38	51,67	7,53	52,88	56,14	50,54	7,51	51,70	54,90	-0,27	-2,19	-2,23
272-300BT004	0,38	51,53	7,53	52,74	55,99	50,40	7,51	51,56	54,75	-0,27	-2,19	-2,24
273-300BT005	0,38	52,61	7,53	53,38	56,68	51,03	7,51	52,20	55,43	-0,27	-3,01	-2,21
281-305BT001	0,38	40,34	6,03	40,34	42,12	39,32	5,97	39,32	40,97	-1,00	-2,54	-2,53
291-918BT067	0,38	58,14	8,17	60,29	64,01	53,56	7,61	54,91	58,30	-6,85	-7,87	-8,92
292-918BT065	0,38	17,17	5,04	17,17	17,28	16,92	4,98	16,92	16,98	-1,19	-1,47	-1,46
293-918BT066	0,38	32,00	5,99	32,00	33,37	29,76	5,81	29,76	30,85	-3,01	-7,01	-7,00
301-718BT001	0,44	36,38	8,03	37,62	39,94	35,04	7,86	36,11	38,34	-2,12	-3,68	-4,01
311-702QGBT002	0,38	16,20	4,72	16,20	16,20	16,18	4,72	16,18	16,18	0,00	-0,16	-0,12
511-509CCMME	0,38	61,72	9,90	65,81	69,87	57,11	8,89	59,98	63,68	-10,20	-7,47	-8,86
512-509CCMMF	0,38	61,72	9,90	65,81	69,87	57,11	8,89	59,98	63,68	-10,20	-7,47	-8,86
521-507CCMMC	0,38	60,75	8,19	63,02	66,02	57,22	7,33	58,29	61,89	-10,50	-5,81	-7,51
531-722CCM01	0,38	61,67	7,46	63,01	66,90	59,60	7,42	60,84	64,60	-0,54	-3,35	-3,44
532-722CCM02	0,38	61,67	7,46	63,01	66,90	59,60	7,42	60,84	64,60	-0,54	-3,35	-3,44
533-722CCM03	0,38	61,67	7,46	63,01	66,90	59,60	7,42	60,84	64,60	-0,54	-3,35	-3,44
541-709CCM502	0,38	57,90	9,56	61,44	65,23	53,32	8,42	55,55	58,98	-11,92	-7,90	-9,59
542-709CCM503	0,38	57,89	9,00	60,90	64,66	53,31	8,06	55,16	58,57	-10,44	-7,90	-9,43
543-709CCM504	0,38	57,89	9,00	60,90	64,66	53,31	8,06	55,16	58,57	-10,44	-7,90	-9,43
551-510CCMMH	0,38	52,59	7,65	57,04	60,56	54,57	7,64	55,99	59,44	-0,13	3,75	-1,84
552-510CCMMI	0,38	52,39	7,65	53,76	57,07	51,39	7,65	52,73	55,98	0,00	-1,90	-1,92
554-511CCMML	0,38	54,56	7,39	55,66	59,10	51,62	7,43	52,71	55,97	0,54	-5,38	-5,30
555-511CCMMN	0,38	54,56	7,39	55,66	59,10	51,62	7,43	52,71	55,97	0,54	-5,38	-5,30
556-511CCMMO	0,38	56,85	10,21	60,86	64,62	52,99	9,24	55,96	59,42	-9,50	-6,79	-8,05
557-511CCMMP	0,38	47,82	7,43	48,83	51,84	47,59	7,46	48,62	52,63	0,40	-0,49	-0,43
562-721PBT001	0,38	62,98	11,28	68,27	72,48	59,22	10,73	63,80	67,74	-4,88	-5,96	-6,55
563-710PBT020	0,38	44,03	7,03	44,54	47,29	43,84	7,05	44,36	47,10	0,28	-0,44	-0,40
571-709PBT011	0,38	53,57	6,69	53,72	57,03	52,88	6,69	53,02	56,29	0,00	-1,28	-1,30
581-513CCMMR	0,40	68,85	12,68	75,63	80,30	64,34	12,02	70,26	74,60	-5,21	-6,55	-7,10
582-513CCMMS	0,40	68,85	12,68	75,63	80,30	64,34	12,02	70,26	74,60	-5,21	-6,55	-7,10
583-513CCMMT	0,40	68,85	12,68	75,63	80,30	64,34	12,02	70,26	74,60	-5,21	-6,55	-7,10
584-513CCMML	0,40	36,48	6,70	36,59	38,84	36,34	6,72	36,47	38,72	0,30	-0,37	-0,33
585-513CCMMV	0,40	68,85	12,68	75,63	80,30	64,34	12,02	70,26	74,60	-5,21	-6,55	-7,10
591-719QBT001	0,40	68,69	11,31	74,48	79,08	62,64	10,97	67,67	71,85	-3,01	-8,81	-9,14
601-702PBT013A	0,38	39,74	7,37	40,53	43,03	37,80	6,83	38,04	40,39	-7,33	-4,87	-6,14
602-702PBT013B	0,38	39,57	6,16	39,57	41,48	37,64	6,06	37,64	39,34	-1,62	-4,88	-4,88
603-702PBT013C	0,38	39,57	7,38	40,37	42,86	37,64	6,83	37,88	40,22	-7,45	-4,88	-6,17

Valores negativos = Método A conservativo

Valores de corrente para as colunas LVPCB, MCCB>20kA obtidos através do software de cálculo, [SKM, PTW Short-circuit A_Fault], da Tabela 3.14 e da Equação 3.17.

Tabela 5.5 - Comparação entre os métodos de cálculos momentâneos em média e alta tensão

SISTEMA		MÉTODO ANSI C37.010 e ANSI C37.13						MÉTODO COMBINADO					
		E/Z		Momentâneo rms kA		Momentâneo Pico kA		E/Z		Momentâneo rms kA		Momentâneo Pico kA	
Barra	kV	(kA)	X/R	x 1,6	Base X/R	x 2,7	Base X/R	(kA)	X/R	x 1,6	Base X/R	x 2,7	Base X/R
01-138 KV	138	9,62	5,14	15,40	12,13	25,98	20,99	9,68	5,16	15,49	12,22	26,14	21,14
04-QDAT-C	13,8	8,95	17,15	14,32	13,82	24,16	23,19	9,11	17,18	14,58	14,08	24,60	23,61
06-700PMT005	13,8	8,49	17,29	13,58	13,13	22,92	22,02	8,49	17,33	13,59	13,14	22,93	22,03
20-700PMT003E	13,8	8,70	13,86	13,93	13,12	23,50	22,12	8,70	13,96	14,19	13,38	23,94	22,55
21-707PMT002	13,8	8,55	10,20	13,67	12,33	23,07	20,97	8,70	10,20	13,92	12,55	23,50	21,35
211-707PMT004	3,80	6,58	13,30	10,53	9,87	17,78	16,66	6,60	13,29	10,56	9,89	17,82	16,70
22-707PMT051	13,8	20,59	20,47	32,94	32,37	55,59	54,09	23,57	19,12	37,70	36,81	63,63	61,60
221-700CCMZ	3,8	4,54	9,49	7,26	6,46	12,24	11,02	4,56	9,45	7,29	6,49	12,30	11,07
23-703PMT601	13,8	8,41	8,15	13,45	11,66	22,70	19,97	8,57	8,35	13,71	11,94	23,14	20,44
24-300PMT007	13,8	17,95	8,06	28,72	24,85	48,46	42,57	20,14	7,31	32,22	27,37	54,37	47,01
25-300PMT010	13,8	19,68	10,43	31,48	28,48	53,13	48,42	22,37	9,47	35,79	31,87	60,39	54,33
26-300PMT001	13,8	20,18	19,32	32,28	31,55	54,47	52,78	22,99	17,87	36,79	35,67	62,08	59,79
261-CCM-MA-A	3,80	17,51	17,19	28,02	27,06	47,28	45,39	17,75	17,01	28,40	27,40	47,92	45,97
2611-CCMSIEMEN	3,80	17,16	9,43	27,46	24,43	46,32	41,66	17,39	9,32	27,82	24,71	46,95	42,15
2612-PILAO-1-2	3,80	15,59	8,45	24,95	19,40	42,10	33,60	15,78	8,40	25,24	19,58	42,59	33,90
2613-PILAO-3-4	3,80	16,08	4,75	25,73	19,90	43,73	34,47	16,26	4,69	26,02	20,07	43,90	34,77
262-CCM-MA-B	3,80	18,15	17,68	29,03	28,12	48,99	47,14	18,39	17,50	29,42	28,46	49,64	47,73
27-300PMT003	13,8	19,00	7,67	30,40	26,06	51,29	44,71	21,47	6,91	34,36	28,86	57,98	49,65
28-305PMT001	13,8	17,23	3,63	27,56	20,04	46,52	34,61	19,19	3,26	30,70	21,80	51,80	37,47
29-917PMT001	13,8	16,18	2,93	25,89	17,98	43,70	30,72	17,97	2,78	28,76	19,75	48,53	33,61
30-781PMT001	13,8	8,34	9,19	13,35	11,83	22,53	20,18	8,49	9,17	13,59	12,04	22,93	20,54
31-702PMT001	13,8	19,20	7,51	30,72	26,23	51,83	45,02	21,74	6,76	34,78	29,08	58,70	50,06
32-707PMT001	13,8	19,76	9,08	31,62	27,96	53,36	47,72	22,47	8,18	35,96	31,20	60,68	53,42
321-707PMT003	3,80	5,97	8,74	9,56	8,40	16,13	14,35	6,02	8,68	9,63	8,45	16,26	14,44
40-700PMT003G	13,8	20,74	25,65	33,19	33,22	56,01	55,29	23,76	24,22	38,02	37,89	64,16	63,12
50-700PMT004E	13,8	20,84	27,93	33,34	33,58	56,27	55,81	23,89	26,52	38,22	38,36	64,70	63,79
51-509PMT001	13,8	18,36	4,80	29,37	22,78	49,57	39,46	20,72	4,57	33,15	25,43	55,94	44,04
52-507PMT001	13,8	15,75	2,69	25,20	17,21	42,53	29,21	17,38	2,55	27,82	18,81	46,94	31,77
53-722PMT001	13,8	18,27	5,33	29,24	23,22	49,34	40,17	20,51	4,78	32,82	25,44	55,39	44,06
54-709PMT001	13,8	14,99	2,39	23,99	16,04	40,48	26,91	16,55	2,46	26,48	17,80	44,69	29,95
55-510PMT001	13,8	19,11	12,46	30,57	28,39	51,59	48,02	21,69	11,50	34,71	31,87	58,57	54,03
56-721PMT001	13,8	18,41	4,97	29,45	23,03	49,70	39,87	20,72	4,55	33,15	25,39	55,49	43,98
561-721PMT002	3,80	4,52	9,11	7,23	6,40	12,21	10,92	4,55	9,07	7,28	6,43	12,28	10,98
57-709PMT002	13,8	16,47	3,08	26,36	18,49	44,47	31,69	18,23	2,77	29,17	20,03	49,22	34,08
58-513PMT001	13,8	20,19	18,00	32,31	31,35	54,52	52,54	23,10	17,05	36,96	35,66	62,37	59,84
59-719PMT001	13,8	19,56	8,89	31,29	27,57	52,81	47,09	22,23	8,12	35,56	30,82	60,01	52,79
592-719CCM001	3,80	10,99	14,48	17,59	16,66	29,68	28,06	11,10	13,39	17,76	16,81	29,97	28,32
60-702PMT001	13,8	20,44	17,54	32,71	31,65	55,19	53,08	23,38	16,22	37,40	35,89	63,12	60,30
70-700PMT004G	13,8	20,84	27,95	33,34	33,59	56,27	55,81	23,89	26,54	38,22	38,36	64,50	63,80

A tabela 5.6 apresenta os erros obtidos quando se compara os valores de corrente momentâneas.

Tabela 5.6 - Desvios entre os métodos de cálculo momentâneos em média e alta tensão

SISTEMA		DESVIOS $100*(B-A)/A$ (%)					
		E/Z		Momentâneo rms kA		Momentâneo Pico kA	
Barra	kV	(kA)	X/R	x 1,6	Base X/R	x 2,7	Base X/R
01-138 KV	138	0,62	0,39	0,58	0,74	0,62	0,71
04-QDAT-C	13,8	1,79	0,17	1,82	1,88	1,82	1,81
06-700PMT005	13,8	0,00	0,23	0,07	0,08	0,04	0,05
20-700PMT003E	13,8	0,00	0,72	1,87	1,98	1,87	1,94
21-707PMT002	13,8	1,75	0,00	1,83	1,78	1,86	1,81
211-707PMT004	3,80	0,30	-0,08	0,28	0,20	0,22	0,24
22-707PMT051	13,8	14,47	-6,60	14,45	13,72	14,46	13,88
221-700CCMZ	3,8	0,44	-0,42	0,41	0,46	0,49	0,45
23-703PMT601	13,8	1,90	2,45	1,93	2,40	1,94	2,35
24-300PMT007	13,8	12,20	-9,31	12,19	10,14	12,20	10,43
25-300PMT010	13,8	13,67	-9,20	13,69	11,90	13,66	12,21
26-300PMT001	13,8	13,92	-7,51	13,97	13,06	13,97	13,28
261-CCM-MA-A	3,80	1,37	-1,05	1,36	1,26	1,35	1,28
2611-CCMSIEMEN	3,80	1,34	-1,17	1,31	1,15	1,36	1,18
2612-PILAO-1-2	3,80	1,22	-0,59	1,16	0,93	1,16	0,89
2613-PILAO-3-4	3,80	1,12	-1,26	1,13	0,85	0,39	0,87
262-CCM-MA-B	3,80	1,32	-1,02	1,34	1,21	1,33	1,25
27-300PMT003	13,8	13,00	-9,91	13,03	10,74	13,04	11,05
28-305PMT001	13,8	11,38	-10,19	11,39	8,78	11,35	8,26
29-917PMT001	13,8	11,06	-5,12	11,09	9,84	11,05	9,41
30-781PMT001	13,8	1,80	-0,22	1,80	1,78	1,78	1,78
31-702PMT001	13,8	13,23	-9,99	13,22	10,87	13,25	11,20
32-707PMT001	13,8	13,71	-9,91	13,73	11,59	13,72	11,94
321-707PMT003	3,80	0,84	-0,69	0,73	0,60	0,81	0,63
40-700PMT003G	13,8	14,56	-5,58	14,55	14,06	14,55	14,16
50-700PMT004E	13,8	14,64	-5,05	14,64	14,23	14,98	14,30
51-509PMT001	13,8	12,85	-4,79	12,87	11,63	12,85	11,61
52-507PMT001	13,8	10,35	-5,20	10,40	9,30	10,37	8,76
53-722PMT001	13,8	12,26	-10,32	12,24	9,56	12,26	9,68
54-709PMT001	13,8	10,41	2,93	10,38	10,97	10,40	11,30
55-510PMT001	13,8	13,50	-7,70	13,54	12,26	13,53	12,52
56-721PMT001	13,8	12,55	-8,45	12,56	10,25	11,65	10,31
561-721PMT002	3,80	0,66	-0,44	0,69	0,47	0,57	0,55
57-709PMT002	13,8	10,69	-10,06	10,66	8,33	10,68	7,54
58-513PMT001	13,8	14,41	-5,28	14,39	13,75	14,40	13,89
59-719PMT001	13,8	13,65	-8,66	13,65	11,79	13,63	12,10
592-719CCM001	3,80	1,00	-7,53	0,97	0,90	0,98	0,93
60-702PMT001	13,8	14,38	-7,53	14,34	13,40	14,37	13,60
70-700PMT004G	13,8	14,64	-5,04	14,64	14,20	14,63	14,32

Valores positivos = Método B conservativo

Os valores dos desvios obtidos, apresentados na Tabela 5.4 destacam alguns aspectos importantes:

Primeiramente, nota-se, no cálculo para baixa tensão, que os valores de X/R obtidos no método definido pela “ANSI C37.13” são “conservativos” enquanto que os valores determinados pelo “Método Combinado” apresentam valores da ordem de até 12% inferiores.

Da mesma forma, considerando-se as correntes de interrupção em baixa tensão, (Tabela 5.4), os resultados obtidos no método proposto pela “ANSI C37.13” são “conservativos”, enquanto que os valores determinados pelo “Método Combinado” apresentam valores da ordem de até 8% inferiores.

Quando se consideram as correntes de interrupção para disjuntores de potência em baixa tensão, LVPCB, “*Low Voltage Power Circuit Breakers*” é notório que os valores obtidos pelo método da “ANSI C37.13” são conservativos enquanto que os valores determinados pelo “Método Combinado” apresentam valores da ordem de até 9,6% inferiores.

Já, para os cálculos relativos à média e alta tensão apresentados nas tabelas 5.5 e 5.6, as observações de destaque são:

Os valores obtidos por meio do “Método Combinado” na determinação das correntes momentâneas simétricas em média e alta tensão apresentam-se “conservativos” em relação ao outro método, com valores da ordem de até 14,6 % superiores.

Para valores assimétricos “rms” e “de pico”, novamente, o “Método Combinado” apresenta valores “conservativos” superiores em até cerca de 15%.

5.4 Análise de caso segundo metodologia de cálculo “IEC”

O terceiro caso apresentado foi gerado segundo as prescrições da norma “IEC-60909” sob as seguintes configurações do software SKM, IEC_Fault, [SKM, PTW Short-circuit IEC_Fault]:

- Cálculo de curto-circuito trifásico;
- Tensão pré-falta conforme tabela 5.7;
- I_b calculado através da equação 4.54;
- I_p calculado pelo método “b”;
- Os geradores modelados como turbo geradores;
- Excitação “Series-1”;
- Limite excitação de 1,3;
- X_{dsat} 1,60.

5.4.1 Características dos componentes segundo critérios “IEC”

O sistema utilizado na simulação é apresentado no diagrama unifilar, ANEXO-3. As características da concessionária, cabos, e transformadores são as das tabelas 8.1, 8.3 e 8.4 do ANEXO-4 e, as características específicas para os cálculos segundo prescrição da “IEC” são apresentadas no ANEXO-5, tabela 8.6, para geradores, e tabela 8,7 para motores.

5.4.2 Contribuições para as correntes de curto-circuito

Neste caso, todas as contribuições de motores de síncronos, assíncronos e geradores foram incluídas. As correntes de interrupção apresentadas foram calculadas para tempo de separação dos contatos de 2, 3 e 5 ciclos.

A tabela 5.8 apresenta o resumo das correntes de curto circuito obtidas conforme preceitos “IEC”, em todas as barras do sistema analisado.

Tabela 5.7 - Fatores de correção de tensão conforme “IEC-60609”

Tensão (V)	C_{max}	C_{min}
230	1,05	0,95
400	1,05	0,95
0 -1000	1,05	1,00
1000 - 35000	1,10	1,00
35000 - 230000	1,10	1,00
230000 - 765000	1,10	1,00

Tabela 5.8 - Resumo das correntes de curto-circuito conforme "IEC"

SISTEMA		CORRENTE INICIAL				CORRENTE DE INTERRUPTÃO						REGIME
Barra	kV	X/R	R/X	I_k'' (kA)	i_p (kA)	I_b Sim 2 ciclos (kA)	I_b Sim 3 ciclos (kA)	I_b Sim 5 ciclos (kA)	I_b Assim 2 ciclos (kA)	I_b Assim 3 ciclos (kA)	I_b Assim 5 ciclos (kA)	I_k (kA)
01-138 KV	138	4,42	0,226	9,88	21,05	9,74	9,73	9,71	9,79	9,73	9,71	9,52
04-QDAT-C	13,8	14,08	0,071	10,10	25,92	9,95	9,89	9,84	11,70	10,72	10,02	9,56
06-700PMT005	13,8	16,13	0,062	9,34	24,24	9,34	9,34	9,34	11,15	10,21	9,53	9,32
20-700PMT003E	13,8	12,20	0,082	9,94	24,94	9,64	9,56	9,49	11,03	10,14	9,59	9,29
21-707PMT002	13,8	9,71	0,103	9,66	23,75	9,51	9,45	9,40	10,22	9,65	9,41	9,13
211-707PMT004	3,80	10,99	0,091	7,21	18,02	6,98	6,98	6,82	7,72	7,14	6,85	6,64
22-707PMT051	13,8	7,75	0,129	28,01	66,82	24,10	22,66	21,34	25,42	22,96	21,35	15,02
221-700CCMZ	3,8	6,58	0,152	5,22	12,11	4,69	4,49	4,31	4,82	4,51	4,31	3,81
222-700BT052	0,38	5,59	0,179	60,20	137,30	57,39	55,88	54,45	58,84	56,15	54,46	49,26
223-700CCMMH	0,38	5,59	0,179	60,58	138,19	57,76	56,25	54,81	59,22	56,50	54,82	49,62
23-703PMT601	13,8	8,33	0,120	9,52	22,99	9,36	9,29	9,22	9,87	9,41	9,23	9,00
231-703BT601	0,38	5,65	0,177	59,61	136,36	56,98	55,56	54,21	58,53	55,85	54,22	50,13
24-300PMT007	13,8	5,38	0,186	23,67	52,92	21,09	20,14	19,24	21,35	20,16	19,24	13,90
241-300BT007	0,38	7,41	0,135	56,89	134,62	53,54	52,52	51,48	55,57	52,92	51,50	48,52
242-300BT008	0,38	7,35	0,136	57,41	135,84	54,05	53,03	51,99	56,10	53,44	52,01	49,00
243-300BT009	0,38	7,41	0,135	57,03	134,97	53,68	52,67	51,63	55,72	53,07	51,64	48,65
25-300PMT010	13,8	5,92	0,169	26,47	60,27	23,09	21,85	20,70	23,53	21,91	20,70	14,66
251-300BT010	0,38	7,41	0,135	56,40	133,53	53,40	52,51	51,60	55,41	52,91	51,62	48,97
252-300BT011	0,38	7,41	0,135	56,85	134,60	53,84	52,96	52,05	55,87	53,36	52,06	49,39
253-300BT012	0,38	7,41	0,135	56,93	134,78	53,92	53,03	52,12	55,95	53,43	52,14	49,46
254-300BT006	0,38	4,85	0,206	36,00	79,45	34,27	33,55	32,86	34,63	33,59	32,86	30,69
26-300PMT001	13,8	7,69	0,130	27,26	64,91	23,62	22,28	21,05	24,79	22,53	21,06	14,80
261-CCM-MA-A	3,80	9,26	0,108	20,12	49,31	16,82	15,70	14,64	18,62	16,31	14,72	11,76
2611-CCMSIEMEN	3,80	6,71	0,149	19,71	45,92	16,61	15,56	14,58	17,16	16,65	14,58	11,61
2612-PILAO-1-2	3,80	3,86	0,259	17,98	37,44	15,45	14,58	13,77	15,48	14,58	13,77	10,95
2613-PILAO-3-4	3,80	3,80	0,263	18,29	37,95	15,67	14,77	13,92	15,71	14,77	13,92	10,95
262-CCM-MA-B	3,80	9,17	0,109	20,53	50,26	17,07	15,87	14,76	18,88	16,49	14,83	11,76
27-300PMT003	13,8	5,03	0,199	25,33	55,89	22,23	21,23	20,21	22,53	21,25	20,21	14,39
271-300BT003	0,38	7,30	0,137	56,06	132,49	53,06	52,17	51,27	54,99	52,55	51,28	48,65
272-300BT004	0,38	7,30	0,137	55,86	132,02	52,89	52,01	51,11	54,82	52,38	51,13	48,51
273-300BT005	0,38	7,30	0,137	56,58	133,70	53,57	52,69	51,78	55,52	53,06	51,79	49,13
28-305PMT001	13,8	3,03	0,330	22,62	44,29	20,49	19,70	18,97	20,49	19,70	18,97	13,73
281-305BT001	0,38	5,62	0,178	43,34	97,75	40,19	39,35	38,55	40,73	39,41	38,55	36,70
29-917PMT001	13,8	2,63	0,380	21,28	40,15	19,42	18,74	18,10	19,42	18,74	18,10	13,31
291-918BT067	0,38	5,18	0,193	60,74	136,26	56,57	55,13	53,76	57,56	55,28	53,76	49,73
292-918BT065	0,38	4,83	0,207	18,52	40,56	17,96	17,74	17,53	18,06	17,76	17,35	16,89
293-918BT066	0,38	4,65	0,215	33,55	73,36	30,96	30,30	29,65	31,24	30,24	29,65	28,32
30-781PMT001	13,8	9,09	0,110	9,43	22,99	9,26	9,20	9,14	9,49	9,35	9,15	8,92
301-718BT001	0,44	6,76	0,148	39,26	91,50	35,32	34,15	33,05	36,35	34,32	33,06	30,91
31-702PMT001	13,8	4,90	0,204	25,66	56,33	22,62	21,50	20,47	22,79	21,51	20,46	14,50
311-702QGBT002	0,38	4,69	0,213	17,50	38,06	17,48	17,46	17,45	17,56	17,47	17,45	17,30
32-707PMT001	13,8	5,41	0,185	26,58	59,48	23,24	22,01	20,88	23,53	22,04	20,88	14,71
321-707PMT003	3,80	6,94	0,144	6,53	15,31	6,39	6,34	6,29	6,60	6,38	6,29	6,07
40-700PMT003G	13,8	8,26	0,121	28,27	68,19	24,29	22,84	21,50	26,03	23,30	21,53	15,08
50-700PMT004E	13,8	8,40	0,119	28,43	68,94	24,41	22,93	21,58	26,58	23,62	21,65	15,14
51-509PMT001	13,8	3,73	0,268	24,48	50,52	21,81	20,80	19,88	21,84	20,80	19,88	14,22
511-509CCMME	0,38	5,43	0,184	64,48	146,09	61,63	60,10	58,65	62,91	60,31	58,66	53,25
512-509CCMMF	0,38	5,43	0,184	64,48	146,09	61,63	60,10	58,65	62,91	60,31	58,66	53,25
52-507PMT001	13,8	2,46	0,407	20,59	38,11	18,97	18,36	17,79	18,97	18,36	17,79	13,15
521-507CCMMC	0,38	5,05	0,198	63,62	141,35	61,18	60,02	58,89	61,88	60,10	58,90	54,60

Tabela 5.8 – Resumo das correntes de curto-circuito conforme “IEC” - continuação

SISTEMA		CORRENTE INICIAL				CORRENTE DE INTERRUPTÃO						REGIME
Barra	kV	X/R	R/X	I_k'' (kA)	i_p (kA)	I_b Sim 2 ciclos (kA)	I_b Sim 3 ciclos (kA)	I_b Sim 5 ciclos (kA)	I_b Assim 2 ciclos (kA)	I_b Assim 3 ciclos (kA)	I_b Assim 5 ciclos (kA)	I_k (kA)
53-722PMT001	13,8	3,97	0,252	24,18	50,66	21,46	20,47	19,56	21,51	20,48	18,72	14,10
531-722CCM01	0,38	6,85	0,146	66,58	155,65	60,26	58,57	56,97	62,12	58,88	56,97	53,19
532-722CCM02	0,38	6,85	0,146	66,58	155,65	60,26	58,57	56,97	62,12	58,88	56,97	53,19
533-722CCM03	0,38	6,85	0,146	66,58	155,65	60,26	58,57	56,97	62,12	58,88	56,97	53,19
54-709PMT001	13,8	2,27	0,440	19,71	35,74	18,26	17,70	17,18	18,26	17,70	17,18	12,82
541-709CCM502	0,38	5,08	0,197	60,51	135,04	57,69	56,18	54,73	58,54	56,29	54,74	49,51
542-709CCM503	0,38	5,05	0,198	60,50	134,23	57,38	56,07	54,82	57,97	56,13	54,82	49,50
543-709CCM504	0,38	5,05	0,198	60,50	134,23	57,38	56,07	54,82	57,97	56,13	54,82	49,50
55-510PMT001	13,8	6,58	0,152	25,63	59,59	22,44	21,27	20,18	23,13	21,38	20,18	14,44
551-510CCMMH	0,38	7,41	0,135	60,16	142,41	57,47	56,70	55,91	59,59	57,11	55,92	53,38
552-510CCMMI	0,38	7,41	0,135	56,80	134,49	54,15	53,39	52,61	56,16	53,78	52,63	50,24
554-511CCMML	0,38	6,06	0,165	57,77	133,21	54,24	53,36	52,50	55,79	53,64	52,51	50,24
555-511CCMMN	0,38	6,06	0,165	57,77	133,21	54,24	53,36	52,50	55,79	53,64	52,51	50,24
556-511CCMMO	0,38	5,78	0,173	59,70	136,76	57,16	55,90	54,69	58,63	56,16	54,69	50,24
557-511CCMMP	0,38	7,25	0,138	51,98	122,61	51,38	51,63	51,51	53,34	51,92	51,52	50,24
56-721PMT001	13,8	3,73	0,268	24,46	50,47	21,81	20,82	19,92	21,84	20,83	19,92	14,22
561-721PMT002	3,80	6,90	0,145	5,14	12,04	4,87	4,75	4,63	5,01	4,77	4,63	4,26
562-721PBT001	0,38	7,30	0,137	66,85	159,45	62,86	61,31	59,83	66,66	62,30	59,90	55,02
563-710PBT020	0,38	6,94	0,144	48,02	112,43	47,82	47,73	47,63	49,08	47,94	47,63	46,54
57-709PMT002	13,8	2,68	0,373	21,52	40,80	19,69	19,02	18,39	19,70	19,02	18,39	13,45
571-709PBT011	0,38	6,49	0,154	58,02	134,42	56,38	55,88	55,40	57,62	56,07	55,41	53,37
58-513PMT001	13,8	7,46	0,134	27,42	65,21	23,67	22,26	20,97	24,95	22,56	20,98	14,89
581-513CCMMR	0,40	7,35	0,136	72,22	173,16	69,41	67,92	66,50	74,21	69,38	66,62	60,81
582-513CCMMS	0,40	7,35	0,136	72,22	173,16	69,41	67,92	66,50	74,21	69,38	66,62	60,81
583-513CCMMT	0,40	7,35	0,136	72,22	173,16	69,41	67,92	66,50	74,21	69,38	66,62	60,81
584-513CCMML	0,40	6,58	0,152	39,68	92,08	39,54	39,48	39,41	40,40	39,61	39,41	38,66
585-513CCMMV	0,40	7,35	0,136	72,22	173,16	69,41	67,92	66,50	74,21	69,38	66,62	60,81
59-719PMT001	13,8	5,35	0,187	26,29	58,73	22,99	21,78	20,66	23,28	21,81	20,66	14,63
591-719QBT001	0,40	6,49	0,154	71,30	168,02	65,78	63,91	62,11	69,83	65,08	62,21	56,83
592-719CCM001	3,80	8,85	0,113	12,55	30,54	11,13	10,50	9,91	12,01	10,76	9,93	8,12
60-702PMT001	13,8	7,30	0,137	27,76	65,59	23,96	22,57	21,28	25,01	22,78	21,29	14,99
601-702PBT013A	0,38	5,10	0,196	41,82	93,08	40,26	39,64	309,04	40,71	39,69	39,04	37,01
602-702PBT013B	0,38	5,10	0,196	41,65	92,69	39,44	38,85	38,29	39,90	38,91	38,29	36,85
603-702PBT013C	0,38	5,10	0,196	41,65	92,69	40,09	39,47	38,87	40,54	39,52	38,87	36,85
70-700PMT004G	13,8	8,40	0,119	28,43	69,40	24,42	22,96	21,61	28,13	25,16	22,73	15,13

5.4.3 Análise do efeito do fator “c” sobre as correntes de curto-circuito conforme “IEC”

Para análise do efeito do fator c_{max} sobre o resultado final das correntes de curto-circuito conforme “IEC”, apresenta-se a Tabela 5.9, onde os cálculos foram executados forçando-se “ $c_{max}=1,0$ ” em todos os níveis de tensão do sistema.

Tabela 5.9 - Resumo das correntes de curto-circuito conforme "IEC" para $C_{max}=1,0$

SISTEMA		CORRENTE INICIAL				CORRENTE DE INTERRUPTÃO						REGIME
Barra	kV	X/R	R/X	I_k'' (kA)	i_p (kA)	I_b Sim 2 ciclos (kA)	I_b Sim 3 ciclos (kA)	I_b Sim 5 ciclos (kA)	I_b Assim 2 ciclos (kA)	I_b Assim 3 ciclos (kA)	I_b Assim 5 ciclos (kA)	I_k (kA)
01-138 KV	138	4,42	0,226	9,77	21,01	9,73	9,71	9,69	9,78	9,72	9,69	9,52
04-QDAT-C	13,8	14,08	0,071	10,06	25,84	9,92	9,87	9,82	11,68	10,70	10,00	9,56
06-700PMT005	13,8	16,13	0,062	9,34	24,23	9,34	9,34	9,34	11,14	10,21	9,53	9,32
20-700PMT003E	13,8	12,20	0,082	9,77	24,75	9,59	9,52	9,46	10,94	10,08	9,54	9,27
21-707PMT002	13,8	9,43	0,106	9,58	23,49	9,44	9,39	9,34	10,11	9,57	9,35	9,09
211-707PMT004	3,80	10,99	0,091	7,21	17,99	6,97	6,88	6,81	7,70	7,13	6,84	6,64
22-707PMT051	13,8	7,87	0,127	27,08	64,75	23,45	22,09	20,84	27,77	22,40	20,85	14,98
221-700CCMZ	3,8	6,62	0,151	5,09	11,83	4,62	4,44	4,27	4,75	4,46	4,27	3,81
222-700BT052	0,38	5,65	0,177	59,79	136,58	57,16	55,73	54,36	58,62	56,00	54,37	49,43
223-700CCMMH	0,38	5,65	0,177	60,17	137,48	57,53	56,10	54,73	59,01	56,37	54,74	49,79
23-703PMT601	13,8	8,06	0,124	9,43	22,65	9,28	9,21	9,16	9,73	9,32	9,16	9,43
231-703BT601	0,38	5,71	0,175	59,47	136,13	57,01	55,66	54,38	58,54	55,95	54,39	50,45
24-300PMT007	13,8	5,32	0,188	22,65	50,57	20,33	19,45	18,63	20,56	19,48	18,63	13,76
241-300BT007	0,38	7,35	0,136	56,58	133,84	53,41	52,44	51,45	55,41	52,84	51,46	48,66
242-300BT008	0,38	7,35	0,136	57,09	135,05	53,92	52,96	51,96	55,94	53,35	51,97	49,15
243-300BT009	0,38	7,35	0,136	56,72	134,18	53,56	52,59	51,59	55,56	52,98	51,61	48,80
25-300PMT010	13,8	5,88	0,170	25,50	58,02	22,33	21,23	20,16	22,80	21,29	20,16	14,59
251-300BT010	0,38	7,41	0,135	56,15	132,91	53,31	52,47	51,60	55,30	53,86	51,62	49,14
252-300BT011	0,38	7,41	0,135	56,60	133,98	53,76	52,92	52,05	55,76	53,31	52,06	49,56
253-300BT012	0,38	7,41	0,135	56,68	134,16	53,83	52,99	52,12	55,84	53,38	52,14	49,63
254-300BT006	0,38	4,90	0,204	35,78	79,06	34,16	33,47	32,82	34,50	33,52	32,82	30,75
26-300PMT001	13,8	7,81	0,128	26,30	62,77	22,93	21,68	20,51	24,11	21,93	20,52	14,73
261-CCM-MA-A	3,80	9,43	0,106	19,38	47,58	16,42	15,39	14,43	18,18	16,00	14,50	11,75
2611-CCMSIEMEN	3,80	6,67	0,150	18,96	44,11	16,19	15,23	14,33	16,69	15,32	14,34	11,58
2612-PILAO-1-2	3,80	3,75	0,267	17,19	35,52	14,95	14,18	13,44	14,98	17,18	13,44	10,59
2613-PILAO-3-4	3,80	3,69	0,271	17,46	35,98	15,15	14,34	13,58	15,18	14,35	13,58	10,86
262-CCM-MA-B	3,80	9,35	0,107	19,75	48,44	16,65	15,56	14,54	18,42	16,17	14,61	11,75
27-300PMT003	13,8	4,98	0,201	24,34	53,57	21,60	20,58	19,27	21,78	20,60	19,63	14,29
271-300BT003	0,38	7,30	0,137	55,80	131,84	52,96	52,12	51,26	54,87	52,49	51,27	48,81
272-300BT004	0,38	7,30	0,137	55,61	131,38	52,80	51,96	51,11	54,70	52,33	51,12	48,67
273-300BT005	0,38	7,30	0,137	56,32	133,05	53,48	52,64	51,77	55,40	53,01	51,78	49,30
28-305PMT001	13,8	2,95	0,339	21,59	41,98	19,68	18,97	18,30	19,69	18,97	18,30	13,57
281-305BT001	0,38	5,59	0,179	43,07	97,08	40,08	39,28	38,52	40,61	39,34	38,52	36,78
29-917PMT001	13,8	2,56	0,391	20,24	37,88	18,60	17,98	17,40	18,60	17,98	17,40	13,11
291-918BT067	0,38	5,21	0,192	60,29	135,33	56,35	54,99	53,77	57,33	55,14	53,68	49,78
292-918BT065	0,38	4,81	0,208	18,45	40,38	17,92	17,72	17,52	18,05	17,73	17,52	16,91
293-918BT066	0,38	4,67	0,214	33,33	72,91	30,88	30,24	29,62	31,15	30,27	26,62	28,37
30-781PMT001	13,8	8,85	0,113	9,33	22,67	9,18	9,12	9,06	9,71	9,25	9,07	8,86
301-718BT001	0,44	6,71	0,149	39,00	90,85	35,27	34,16	33,11	36,28	34,32	33,11	31,05
31-702PMT001	13,8	4,85	0,206	24,68	54,03	21,90	20,86	19,89	22,05	20,87	19,89	14,41
311-702QGBT002	0,38	4,69	0,213	17,50	38,06	17,48	17,47	17,46	17,56	17,47	17,46	17,32
32-707PMT001	13,8	5,35	0,187	25,62	57,23	22,54	21,39	20,33	22,81	21,42	20,33	14,64
321-707PMT003	3,80	6,94	0,144	6,52	15,28	6,38	6,32	6,28	6,58	6,37	6,28	6,07
40-700PMT003G	13,8	8,47	0,118	27,34	66,17	23,64	22,27	21,00	25,42	22,76	21,03	15,04
50-700PMT004E	13,8	8,62	0,116	27,51	66,94	23,76	22,37	21,09	25,96	23,08	21,16	15,11
51-509PMT001	13,8	3,65	0,274	23,47	48,16	21,05	20,13	19,27	21,08	20,13	19,27	14,10
511-509CCMME	0,38	5,49	0,182	64,06	145,27	61,39	59,94	58,56	62,66	60,15	58,56	53,74
512-509CCMMF	0,38	5,49	0,182	64,06	145,27	61,39	59,94	58,56	62,66	60,15	58,56	53,74
52-507PMT001	13,8	2,39	0,419	19,55	35,90	18,13	17,59	17,08	18,13	17,59	17,08	12,94
521-507CCMMC	0,38	5,05	0,198	63,28	140,58	60,99	59,88	58,81	67,67	59,96	58,81	54,77

Tabela 5.9 - Resumo das correntes de curto-circuito conforme “IEC” para $c_{max}=1,0$ – continuação.

SISTEMA		CORRENTE INICIAL				CORRENTE DE INTERRUPTÃO						REGIME
Barra	kV	X/R	R/X	I_k'' (kA)	i_p (kA)	I_b Sim 2 ciclos (kA)	I_b Sim 3 ciclos (kA)	I_b Sim 5 ciclos (kA)	I_b Assim 2 ciclos (kA)	I_b Assim 3 ciclos (kA)	I_b Assim 5 ciclos (kA)	I_k (kA)
53-722PMT001	13,8	3,89	0,257	23,16	48,29	20,70	19,80	18,95	20,75	19,80	18,95	13,97
531-722CCM01	0,38	6,85	0,146	66,05	154,37	60,07	58,46	56,92	67,90	58,76	56,93	53,37
532-722CCM02	0,38	6,85	0,146	66,05	154,37	60,07	58,46	56,92	67,90	58,76	56,93	53,37
533-722CCM03	0,38	6,85	0,146	66,05	154,37	60,07	58,46	56,92	67,90	58,76	56,93	53,37
54-709PMT001	13,8	2,21	0,453	18,66	33,57	17,40	16,91	16,44	17,40	16,91	16,44	12,57
541-709CCM502	0,38	5,08	0,197	60,05	134,06	57,41	55,97	54,60	58,24	56,09	54,60	49,64
542-709CCM503	0,38	5,08	0,197	60,04	133,28	57,10	55,86	54,67	57,69	55,92	54,67	49,63
543-709CCM504	0,38	5,08	0,197	60,04	133,28	57,10	55,86	54,67	57,69	55,92	54,67	49,63
55-510PMT001	13,8	6,62	0,151	24,65	57,33	21,73	20,64	19,62	22,39	20,75	19,62	14,35
551-510CCMMH	0,38	7,41	0,135	59,95	141,91	57,41	56,68	55,92	59,51	57,09	55,94	53,57
552-510CCMMI	0,38	7,41	0,135	56,59	133,99	54,08	53,36	52,62	56,08	53,75	52,63	50,41
554-511CCMML	0,38	6,10	0,164	57,51	132,76	54,17	53,33	52,51	55,72	53,61	52,52	50,41
555-511CCMMN	0,38	6,10	0,164	57,51	132,76	54,17	53,33	52,51	55,72	53,61	52,52	50,41
556-511CCMMO	0,38	5,81	0,172	59,35	136,14	56,97	55,77	54,62	58,45	56,04	54,63	50,41
557-511CCMMP	0,38	7,25	0,138	52,00	122,66	51,77	51,67	51,56	53,37	51,96	51,57	50,41
56-721PMT001	13,8	3,65	0,274	23,45	48,12	21,05	20,15	19,31	21,07	20,15	19,31	14,10
561-721PMT002	3,80	6,90	0,145	5,06	11,85	4,82	4,71	4,60	4,96	4,73	4,60	4,26
562-721PBT001	0,38	7,35	0,136	66,40	158,50	66,65	61,18	59,77	66,33	62,16	59,83	55,22
563-710PBT020	0,38	6,90	0,145	48,04	112,43	47,84	47,76	47,66	49,09	47,96	47,67	46,68
57-709PMT002	13,8	2,61	0,383	20,48	38,54	18,87	18,26	17,70	18,87	18,26	17,70	13,26
571-709PBT011	0,38	6,49	0,154	57,89	134,00	56,03	55,86	55,40	57,55	56,04	55,41	53,54
58-513PMT001	13,8	7,58	0,132	26,48	63,08	23,01	21,69	20,47	24,28	21,99	20,48	10,84
581-513CCMMR	0,40	7,46	0,134	71,86	172,55	69,22	7,81	66,45	74,05	69,28	66,58	61,09
582-513CCMMS	0,40	7,46	0,134	71,86	172,55	69,22	7,81	66,45	74,05	69,28	66,58	61,09
583-513CCMMT	0,40	7,46	0,134	71,86	172,55	69,22	7,81	66,45	74,05	69,28	66,58	61,09
584-513CCMML	0,40	6,58	0,152	39,70	92,13	39,56	39,51	39,44	40,43	39,63	39,44	38,77
585-513CCMMV	0,40	7,46	0,134	71,86	172,55	69,22	7,81	66,45	74,05	69,28	66,58	61,09
59-719PMT001	13,8	5,29	0,189	25,32	56,45	22,29	21,16	20,11	22,57	21,18	20,11	14,55
591-719QBT001	0,40	6,58	0,152	70,75	167,04	65,55	63,77	62,05	69,61	64,95	62,15	57,07
592-719CCM001	3,80	8,93	0,112	12,15	29,61	10,89	10,32	9,78	11,75	10,57	9,80	8,11
60-702PMT001	13,8	7,35	0,136	26,82	63,50	23,30	21,99	20,78	24,35	22,20	20,79	14,95
601-702PBT013A	0,38	5,13	0,195	41,65	92,79	40,18	39,59	39,02	40,46	39,64	39,02	37,02
602-702PBT013B	0,38	5,13	0,195	41,48	92,40	39,39	38,83	38,29	39,85	38,89	38,29	36,94
603-702PBT013C	0,38	5,13	0,195	41,48	92,40	39,39	38,83	38,29	39,85	38,89	38,29	36,94
70-700PMT004G	13,8	8,62	0,116	27,51	67,39	23,78	22,40	21,12	27,51	24,64	22,25	15,10

5.4.3.1 Comparação entre os cálculos para c_{max} conforme Tabela 5.7 e com $c_{max} = 1,0$

A tabela 5.10 apresenta os desvios obtidos entre os dois métodos de cálculo aplicados.

Tabela 5.10 - Resumo comparativo e desvios entre X/R, correntes de curto-circuito inicial de pico com c_{max} conforme tabela 5.7 e $c_{max}=1,0$.

SISTEMA		CORRENTE INICIAL (c_{max} Conforme Tabela 5.7)				CORRENTE INICIAL ($c_{max} = 1,0$)				DESVIO		
Barra	kV	X/R	R/X	I_k'' (kA)	i_p (kA)	X/R	R/X	I_k'' (kA)	i_p (kA)	X/R (%)	I_k'' (%)	i_p (%)
01-138 KV	138	4,42	0,226	9,88	21,05	4,42	0,226	9,77	21,01	0,00	-1,13	-0,19
04-QDAT-C	13,8	14,08	0,071	10,10	25,92	14,08	0,071	10,06	25,84	0,00	-0,40	-0,31
06-700PMT005	13,8	16,13	0,062	9,34	24,24	16,13	0,062	9,34	24,23	0,00	0,00	-0,04
20-700PMT003E	13,8	12,20	0,082	9,94	24,94	12,20	0,082	9,77	24,75	0,00	-1,74	-0,77
21-707PMT002	13,8	9,71	0,103	9,66	23,75	9,43	0,106	9,58	23,49	-2,83	-0,84	-1,11
211-707PMT004	3,80	10,99	0,091	7,21	18,02	10,99	0,091	7,21	17,99	0,00	0,00	-0,17
22-707PMT051	13,8	7,75	0,129	28,01	66,82	7,87	0,127	27,08	64,75	1,57	-3,43	-3,20
221-700CCMZ	3,8	6,58	0,152	5,22	12,11	6,62	0,151	5,09	11,83	0,66	-2,55	-2,37
222-700BT052	0,38	5,59	0,179	60,20	137,30	5,65	0,177	59,79	136,58	1,13	-0,69	-0,53
223-700CCMMH	0,38	5,59	0,179	60,58	138,19	5,65	0,177	60,17	137,48	1,13	-0,68	-0,52
23-703PMT601	13,8	8,33	0,120	9,52	22,99	8,06	0,124	9,43	22,65	-3,23	-0,95	-1,50
231-703BT601	0,38	5,65	0,177	59,61	136,36	5,71	0,175	59,47	136,13	1,14	-0,24	-0,17
24-300PMT007	13,8	5,38	0,186	23,67	52,92	5,32	0,188	22,65	50,57	-1,06	-4,50	-4,65
241-300BT007	0,38	7,41	0,135	56,89	134,62	7,35	0,136	56,58	133,84	-0,74	-0,55	-0,58
242-300BT008	0,38	7,35	0,136	57,41	135,84	7,35	0,136	57,09	135,05	0,00	-0,56	-0,58
243-300BT009	0,38	7,41	0,135	57,03	134,97	7,35	0,136	56,72	134,18	-0,74	-0,55	-0,59
25-300PMT010	13,8	5,92	0,169	26,47	60,27	5,88	0,170	25,50	58,02	-0,59	-3,80	-3,88
251-300BT010	0,38	7,41	0,135	56,40	133,53	7,41	0,135	56,15	132,91	0,00	-0,45	-0,47
252-300BT011	0,38	7,41	0,135	56,85	134,60	7,41	0,135	56,60	133,98	0,00	-0,44	-0,46
253-300BT012	0,38	7,41	0,135	56,93	134,78	7,41	0,135	56,68	134,16	0,00	-0,44	-0,46
254-300BT006	0,38	4,85	0,206	36,00	79,45	4,90	0,204	35,78	79,06	0,98	-0,61	-0,49
26-300PMT001	13,8	7,69	0,130	27,26	64,91	7,81	0,128	26,30	62,77	1,56	-3,65	-3,41
261-CCM-MA-A	3,80	9,26	0,108	20,12	49,31	9,43	0,106	19,38	47,58	1,89	-3,82	-3,64
2611-CCMSIEMEN	3,80	6,71	0,149	19,71	45,92	6,67	0,150	18,96	44,11	-0,67	-3,96	-4,10
2612-PILAO-1-2	3,80	3,86	0,259	17,98	37,44	3,75	0,267	17,19	35,52	-3,00	-4,60	-5,41
2613-PILAO-3-4	3,80	3,80	0,263	18,29	37,95	3,69	0,271	17,46	35,98	-2,95	-4,75	-5,48
262-CCM-MA-B	3,80	9,17	0,109	20,53	50,26	9,35	0,107	19,75	48,44	1,87	-3,95	-3,76
27-300PMT003	13,8	5,03	0,199	25,33	55,89	4,98	0,201	24,34	53,57	-1,00	-4,07	-4,33
271-300BT003	0,38	7,30	0,137	56,06	132,49	7,30	0,137	55,80	131,84	0,00	-0,47	-0,49
272-300BT004	0,38	7,30	0,137	55,86	132,02	7,30	0,137	55,61	131,38	0,00	-0,45	-0,49
273-300BT005	0,38	7,30	0,137	56,58	133,70	7,30	0,137	56,32	133,05	0,00	-0,46	-0,49
28-305PMT001	13,8	3,03	0,330	22,62	44,29	2,95	0,339	21,59	41,98	-2,65	-4,77	-5,50
281-305BT001	0,38	5,62	0,178	43,34	97,75	5,59	0,179	43,07	97,08	-0,56	-0,63	-0,69
29-917PMT001	13,8	2,63	0,380	21,28	40,15	2,56	0,391	20,24	37,88	-2,81	-5,14	-5,99
291-918BT067	0,38	5,18	0,193	60,74	136,26	5,21	0,192	60,29	135,33	0,52	-0,75	-0,69
292-918BT065	0,38	4,83	0,207	18,52	40,56	4,81	0,208	18,45	40,38	-0,48	-0,38	-0,45
293-918BT066	0,38	4,65	0,215	33,55	73,36	4,67	0,214	33,33	72,91	0,47	-0,66	-0,62
30-781PMT001	13,8	9,09	0,110	9,43	22,99	8,85	0,113	9,33	22,67	-2,65	-1,07	-1,41
301-718BT001	0,44	6,76	0,148	39,26	91,50	6,71	0,149	39,00	90,85	-0,67	-0,67	-0,72
31-702PMT001	13,8	4,90	0,204	25,66	56,33	4,85	0,206	24,68	54,03	-0,97	-3,97	-4,26
311-702QGBT002	0,38	4,69	0,213	17,50	38,06	4,69	0,213	17,50	38,06	0,00	0,00	0,00
32-707PMT001	13,8	5,41	0,185	26,58	59,48	5,35	0,187	25,62	57,23	-1,07	-3,75	-3,93
321-707PMT003	3,80	6,94	0,144	6,53	15,31	6,94	0,144	6,52	15,28	0,00	-0,15	-0,20
40-700PMT003G	13,8	8,26	0,121	28,27	68,19	8,47	0,118	27,34	66,17	2,54	-3,40	-3,05
50-700PMT004E	13,8	8,40	0,119	28,43	68,94	8,62	0,116	27,51	66,94	2,59	-3,34	-2,99
51-509PMT001	13,8	3,73	0,268	24,48	50,52	3,65	0,274	23,47	48,16	-2,19	-4,30	-4,90
511-509CCMME	0,38	5,43	0,184	64,48	146,09	5,49	0,182	64,06	145,27	1,10	-0,66	-0,56
512-509CCMMF	0,38	5,43	0,184	64,48	146,09	5,49	0,182	64,06	145,27	1,10	-0,66	-0,56
52-507PMT001	13,8	2,46	0,407	20,59	38,11	2,39	0,419	19,55	35,90	-2,86	-5,32	-6,16
521-507CCMMC	0,38	5,05	0,198	63,62	141,35	5,05	0,198	63,28	140,58	0,00	-0,54	-0,55

Tabela 5.10 Resumo comparativo e desvios entre X/R, correntes de curto-circuito inicial de pico com c_{max} conforme Tabela 5.7 e $c_{max}=1,0$ - continuação.

SISTEMA		CORRENTE INICIAL (c_{max} Conforme Tabela 5.7)				CORRENTE INICIAL ($c_{max} = 1,0$)				DESVIO		
Barra	kV	X/R	R/X	I_k'' (kA)	i_p (kA)	X/R	R/X	I_k'' (kA)	i_p (kA)	X/R (%)	I_k'' (%)	i_p (%)
53-722PMT001	13,8	3,97	0,252	24,18	50,66	3,89	0,257	23,16	48,29	-1,95	-4,40	-4,91
531-722CCM01	0,38	6,85	0,146	66,58	155,65	6,85	0,146	66,05	154,37	0,00	-0,80	-0,83
532-722CCM02	0,38	6,85	0,146	66,58	155,65	6,85	0,146	66,05	154,37	0,00	-0,80	-0,83
533-722CCM03	0,38	6,85	0,146	66,58	155,65	6,85	0,146	66,05	154,37	0,00	-0,80	-0,83
54-709PMT001	13,8	2,27	0,440	19,71	35,74	2,21	0,453	18,66	33,57	-2,87	-5,63	-6,46
541-709CCM502	0,38	5,08	0,197	60,51	135,04	5,08	0,197	60,05	134,06	0,00	-0,77	-0,73
542-709CCM503	0,38	5,05	0,198	60,50	134,23	5,08	0,197	60,04	133,28	0,51	-0,77	-0,71
543-709CCM504	0,38	5,05	0,198	60,50	134,23	5,08	0,197	60,04	133,28	0,51	-0,77	-0,71
55-510PMT001	13,8	6,58	0,152	25,63	59,59	6,62	0,151	24,65	57,33	0,66	-3,98	-3,94
551-510CCMMH	0,38	7,41	0,135	60,16	142,41	7,41	0,135	59,95	141,91	0,00	-0,35	-0,35
552-510CCMMI	0,38	7,41	0,135	56,80	134,49	7,41	0,135	56,59	133,99	0,00	-0,37	-0,37
554-511CCMML	0,38	6,06	0,165	57,77	133,21	6,10	0,164	57,51	132,76	0,61	-0,45	-0,34
555-511CCMMN	0,38	6,06	0,165	57,77	133,21	6,10	0,164	57,51	132,76	0,61	-0,45	-0,34
556-511CCMMO	0,38	5,78	0,173	59,70	136,76	5,81	0,172	59,35	136,14	0,58	-0,59	-0,46
557-511CCMMP	0,38	7,25	0,138	51,98	122,61	7,25	0,138	52,00	122,66	0,00	0,04	0,04
56-721PMT001	13,8	3,73	0,268	24,46	50,47	3,65	0,274	23,45	48,12	-2,19	-4,31	-4,88
561-721PMT002	3,80	6,90	0,145	5,14	12,04	6,90	0,145	5,06	11,85	0,00	-1,58	-1,60
562-721PBT001	0,38	7,30	0,137	66,85	159,45	7,35	0,136	66,40	158,50	0,74	-0,68	-0,60
563-710PBT020	0,38	6,94	0,144	48,02	112,43	6,90	0,145	48,04	112,43	-0,69	0,04	0,00
57-709PMT002	13,8	2,68	0,373	21,52	40,80	2,61	0,383	20,48	38,54	-2,61	-5,08	-5,86
571-709PBT011	0,38	6,49	0,154	58,02	134,42	6,49	0,154	57,89	134,00	0,00	-0,22	-0,31
58-513PMT001	13,8	7,46	0,134	27,42	65,21	7,58	0,132	26,48	63,08	1,52	-3,55	-3,38
581-513CCMMR	0,40	7,35	0,136	72,22	173,16	7,46	0,134	71,86	172,55	1,49	-0,50	-0,35
582-513CCMMS	0,40	7,35	0,136	72,22	173,16	7,46	0,134	71,86	172,55	1,49	-0,50	-0,35
583-513CCMMT	0,40	7,35	0,136	72,22	173,16	7,46	0,134	71,86	172,55	1,49	-0,50	-0,35
584-513CCMML	0,40	6,58	0,152	39,68	92,08	6,58	0,152	39,70	92,13	0,00	0,05	0,05
585-513CCMMV	0,40	7,35	0,136	72,22	173,16	7,46	0,134	71,86	172,55	1,49	-0,50	-0,35
59-719PMT001	13,8	5,35	0,187	26,29	58,73	5,29	0,189	25,32	56,45	-1,06	-3,83	-4,04
591-719QBT001	0,40	6,49	0,154	71,30	168,02	6,58	0,152	70,75	167,04	1,32	-0,78	-0,59
592-719CCM001	3,80	8,85	0,113	12,55	30,54	8,93	0,112	12,15	29,61	0,89	-3,29	-3,14
60-702PMT001	13,8	7,30	0,137	27,76	65,59	7,35	0,136	26,82	63,50	0,74	-3,50	-3,29
601-702PBT013A	0,38	5,10	0,196	41,82	93,08	5,13	0,195	41,65	92,79	0,51	-0,41	-0,31
602-702PBT013B	0,38	5,10	0,196	41,65	92,69	5,13	0,195	41,48	92,40	0,51	-0,41	-0,31
603-702PBT013C	0,38	5,10	0,196	41,65	92,69	5,13	0,195	41,48	92,40	0,51	-0,41	-0,31
70-700PMT004G	13,8	8,40	0,119	28,43	69,40	8,62	0,116	27,51	67,39	2,59	-3,34	-2,98

A análise dos desvios obtidos possibilita as seguintes observações:

- No que se refere à relação X/R, os desvios verificados entre as duas simulações apresentam variações máximas da ordem de 3,0%, nas barras de média tensão.
- Já nas barras de baixa tensão, a relação X/R sofre variações de até 1,5% superiores aos valores de c_{max} normalizados.

- Quando se compara a corrente inicial nas barras de média e alta tensão (onde $c_{max}=1,10$) com $c_{max}=1,0$, a redução verificada é de, no máximo, 5,63%. Já, para correntes de pico, a máxima redução verificada é de 6,46% e ocorre na mesma barra.

- Para as barras de baixa tensão as reduções verificadas são de 0,80 e 0,83% para as correntes iniciais e de pico respectivamente.

As investigações também foram estendidas às correntes de interrupção de 2, 3 e 5 ciclos, cujos resultados comparativos são apresentados na Tabela 5.11.

Da análise observa-se que, na média e alta tensão as reduções máximas foram de 4,61% e ocorrem para o cálculo de 2 ciclos. Observa-se também que, numa mesma barra, as reduções para 3 e 5 ciclos são inferiores à de 2 ciclos.

Na baixa tensão, observa-se que as reduções máximas obtidas com $c_{max}=1,0$ foram de 0,49% também para correntes calculadas em 2 ciclos.

Tabela 5.11 - Resumo comparativo e desvios entre correntes de curto-circuito de interrupção com c_{max} conforme tabela 5.7 e $c_{max}=1,0$

SISTEMA		CORRENTES DE INTERRUPTÃO (Conforme Tabela 5.7)				CORRENTES DE INTERRUPTÃO ($c_{max} = 1,0$)				DESVIO		
Barra	kV	X/R	I_b Sim 2 ciclos (kA)	I_b Sim 3 ciclos (kA)	I_b Sim 5 ciclos (kA)	X/R	I_b Sim 2 ciclos (kA)	I_b Sim 3 ciclos (kA)	I_b Sim 5 ciclos (kA)	I_b Sim 2 ciclos (%)	I_b Sim 3 ciclos (%)	I_b Sim 5 ciclos (%)
01-138 KV	138	4,42	9,74	9,73	9,71	4,42	9,73	9,71	9,69	-0,10	-0,21	-0,21
04-QDAT-C	13,8	14,08	9,95	9,89	9,84	14,08	9,92	9,87	9,82	-0,30	-0,20	-0,20
06-700PMT005	13,8	16,13	9,34	9,34	9,34	16,13	9,34	9,34	9,34	0,00	0,00	0,00
20-700PMT003E	13,8	12,20	9,64	9,56	9,49	12,20	9,59	9,52	9,46	-0,52	-0,42	-0,32
21-707PMT002	13,8	9,71	9,51	9,45	9,40	9,43	9,44	9,39	9,34	-0,74	-0,64	-0,64
211-707PMT004	3,80	10,99	6,98	6,89	6,82	10,99	6,97	6,88	6,81	-0,14	-0,15	-0,15
22-707PMT051	13,8	7,75	24,10	22,66	21,34	7,87	23,45	22,09	20,84	-2,77	-2,58	-2,40
221-700CCMZ	3,8	6,58	4,69	4,49	4,31	6,62	4,62	4,44	4,27	-1,52	-1,13	-0,94
222-700BT052	0,38	5,59	57,39	55,88	54,45	5,65	57,16	55,73	54,36	-0,40	-0,27	-0,17
223-700CCMMH	0,38	5,59	57,76	56,25	54,81	5,65	57,53	56,10	54,73	-0,40	-0,27	-0,15
23-703PMT601	13,8	8,33	9,36	9,29	9,22	8,06	9,28	9,21	9,16	-0,86	-0,87	-0,66
231-703BT601	0,38	5,65	56,98	55,56	54,21	5,71	57,01	55,66	54,38	0,05	0,18	0,31
24-300PMT007	13,8	5,38	21,09	20,14	19,24	5,32	20,33	19,45	18,63	-3,74	-3,55	-3,27
241-300BT007	0,38	7,41	53,54	52,52	51,48	7,35	53,41	52,44	51,45	-0,24	-0,15	-0,06
242-300BT008	0,38	7,35	54,05	53,03	51,99	7,35	53,92	52,96	51,96	-0,24	-0,13	-0,06
243-300BT009	0,38	7,41	53,68	52,67	51,63	7,35	53,56	52,59	51,59	-0,22	-0,15	-0,08
25-300PMT010	13,8	5,92	23,09	21,85	20,70	5,88	22,33	21,23	20,16	-3,40	-2,92	-2,68
251-300BT010	0,38	7,41	53,40	52,51	51,60	7,41	53,31	52,47	51,60	-0,17	-0,08	0,00
252-300BT011	0,38	7,41	53,84	52,96	52,05	7,41	53,76	52,92	52,05	-0,15	-0,08	0,00
253-300BT012	0,38	7,41	53,92	53,03	52,12	7,41	53,83	52,99	52,12	-0,17	-0,08	0,00
254-300BT006	0,38	4,85	34,27	33,55	32,86	4,90	34,16	33,47	32,82	-0,32	-0,24	-0,12
26-300PMT001	13,8	7,69	23,62	22,28	21,05	7,81	22,93	21,68	20,51	-3,01	-2,77	-2,63
261-CCM-MA-A	3,80	9,26	16,82	15,70	14,64	9,43	16,42	15,39	14,43	-2,44	-2,01	-1,46
2611-CCMSIEMEN	3,80	6,71	16,61	15,56	14,58	6,67	16,19	15,23	14,33	-2,59	-2,17	-1,74
2612-PILAO-1-2	3,80	3,86	15,45	14,58	13,77	3,75	14,95	14,18	13,44	-3,34	-2,82	-2,46
2613-PILAO-3-4	3,80	3,80	15,67	14,77	13,92	3,69	15,15	14,34	13,58	-3,43	-3,00	-2,50
262-CCM-MA-B	3,80	9,17	17,07	15,87	14,76	9,35	16,65	15,56	14,54	-2,52	-1,99	-1,51
27-300PMT003	13,8	5,03	22,23	21,23	20,21	4,98	21,60	20,58	19,27	-2,92	-3,16	-4,88
271-300BT003	0,38	7,30	53,06	52,17	51,27	7,30	52,96	52,12	51,26	-0,19	-0,10	-0,02
272-300BT004	0,38	7,30	52,89	52,01	51,11	7,30	52,80	51,96	51,11	-0,17	-0,10	0,00
273-300BT005	0,38	7,30	53,57	52,69	51,78	7,30	53,48	52,64	51,77	-0,17	-0,09	-0,02
28-305PMT001	13,8	3,03	20,49	19,70	18,97	2,95	19,68	18,97	18,30	-4,12	-3,85	-3,66
281-305BT001	0,38	5,62	40,19	39,35	38,55	5,59	40,08	39,28	38,52	-0,27	-0,18	-0,08
29-917PMT001	13,8	2,63	19,42	18,74	18,10	2,56	18,60	17,98	17,40	-4,41	-4,23	-4,02
291-918BT067	0,38	5,18	56,57	55,13	53,76	5,21	56,35	54,99	53,77	-0,39	-0,25	0,02
292-918BT065	0,38	4,83	17,96	17,74	17,53	4,81	17,92	17,72	17,52	-0,22	-0,11	-0,06
293-918BT066	0,38	4,65	30,96	30,30	29,65	4,67	30,88	30,24	29,62	-0,26	-0,20	-0,10
30-781PMT001	13,8	9,09	9,26	9,20	9,14	8,85	9,18	9,12	9,06	-0,87	-0,88	-0,88
301-718BT001	0,44	6,76	35,32	34,15	33,05	6,71	35,27	34,16	33,11	-0,14	0,03	0,18
31-702PMT001	13,8	4,90	22,62	21,50	20,47	4,85	21,90	20,86	19,89	-3,29	-3,07	-2,92
311-702QGBT002	0,38	4,69	17,48	17,46	17,45	4,69	17,48	17,47	17,46	0,00	0,06	0,06
32-707PMT001	13,8	5,41	23,24	22,01	20,88	5,35	22,54	21,39	20,33	-3,11	-2,90	-2,71
321-707PMT003	3,80	6,94	6,39	6,34	6,29	6,94	6,38	6,32	6,28	-0,16	-0,32	-0,16
40-700PMT003G	13,8	8,26	24,29	22,84	21,50	8,47	23,64	22,27	21,00	-2,75	-2,56	-2,38
50-700PMT004E	13,8	8,40	24,41	22,93	21,58	8,62	23,76	22,37	21,09	-2,74	-2,50	-2,32
51-509PMT001	13,8	3,73	21,81	20,80	19,88	3,65	21,05	20,13	19,27	-3,61	-3,33	-3,17
511-509CCMME	0,38	5,43	61,63	60,10	58,65	5,49	61,39	59,94	58,56	-0,39	-0,27	-0,15
512-509CCMMF	0,38	5,43	61,63	60,10	58,65	5,49	61,39	59,94	58,56	-0,39	-0,27	-0,15
52-507PMT001	13,8	2,46	18,97	18,36	17,79	2,39	18,13	17,59	17,08	-4,63	-4,38	-4,16
521-507CCMMC	0,38	5,05	61,18	60,02	58,89	5,05	60,99	59,88	58,81	-0,31	-0,23	-0,14

Tabela 5.11 - Resumo comparativo e desvios entre correntes de curto-circuito de interrupção com c_{max} conforme tabela 5.7 e $c_{max}=1,0$ - continuação

SISTEMA		CORRENTES DE INTERRUPTÃO (Conforme Tabela 5.7)			CORRENTES DE INTERRUPTÃO ($c_{max} = 1,0$)			DESVIO				
Barra	kV	X/R	I_b Sim 2 ciclos (kA)	I_b Sim 3 ciclos (kA)	I_b Sim 5 ciclos (kA)	X/R	I_b Sim 2 ciclos (kA)	I_b Sim 3 ciclos (kA)	I_b Sim 5 ciclos (kA)	I_b Sim 2 ciclos (%)	I_b Sim 3 ciclos (%)	I_b Sim 5 ciclos (%)
53-722PMT001	13,8	3,89	21,46	20,47	19,56	3,89	20,70	19,80	18,95	-3,67	-3,38	-3,22
531-722CCM01	0,38	6,85	60,26	58,57	56,97	6,85	60,07	58,46	56,92	-0,32	-0,19	-0,09
532-722CCM02	0,38	6,85	60,26	58,57	56,97	6,85	60,07	58,46	56,92	-0,32	-0,19	-0,09
533-722CCM03	0,38	6,85	60,26	58,57	56,97	6,85	60,07	58,46	56,92	-0,32	-0,19	-0,09
54-709PMT001	13,8	2,21	18,26	17,70	17,18	2,21	17,40	16,91	16,44	-4,94	-4,67	-4,50
541-709CCM502	0,38	5,08	57,69	56,18	54,73	5,08	57,41	55,97	54,60	-0,49	-0,38	-0,24
542-709CCM503	0,38	5,08	57,38	56,07	54,82	5,08	57,10	55,86	54,67	-0,49	-0,38	-0,27
543-709CCM504	0,38	5,08	57,38	56,07	54,82	5,08	57,10	55,86	54,67	-0,49	-0,38	-0,27
55-510PMT001	13,8	6,62	22,44	21,27	20,18	6,62	21,73	20,64	19,62	-3,27	-3,05	-2,85
551-510CCMMH	0,38	7,41	57,47	56,70	55,91	7,41	57,41	56,68	55,92	-0,10	-0,04	0,02
552-510CCMMI	0,38	7,41	54,15	53,39	52,61	7,41	54,08	53,36	52,62	-0,13	-0,06	0,02
554-511CCMML	0,38	6,10	54,24	53,36	52,50	6,10	54,17	53,33	52,51	-0,13	-0,06	0,02
555-511CCMMN	0,38	6,10	54,24	53,36	52,50	6,10	54,17	53,33	52,51	-0,13	-0,06	0,02
556-511CCMMO	0,38	5,81	57,16	55,90	54,69	5,81	56,97	55,77	54,62	-0,33	-0,23	-0,13
557-511CCMMP	0,38	7,25	51,74	51,63	51,51	7,25	51,77	51,67	51,56	0,06	0,08	0,10
56-721PMT001	13,8	3,65	21,81	20,82	19,92	3,65	21,05	20,15	19,31	-3,61	-3,33	-3,16
561-721PMT002	3,80	6,90	4,87	4,75	4,63	6,90	4,82	4,71	4,60	-1,04	-0,85	-0,65
562-721PBT001	0,38	7,35	62,86	61,31	59,83	7,35	62,65	61,18	59,77	-0,34	-0,21	-0,10
563-710PBT020	0,38	6,90	47,82	47,73	47,63	6,90	47,84	47,76	47,66	0,04	0,06	0,06
57-709PMT002	13,8	2,61	19,69	19,02	18,39	2,61	18,87	18,26	17,70	-4,35	-4,16	-3,90
571-709PBT011	0,38	6,49	56,38	55,88	55,40	6,49	56,33	55,86	55,40	-0,09	-0,04	0,00
58-513PMT001	13,8	7,58	23,67	22,26	20,97	7,58	23,01	21,69	20,47	-2,87	-2,63	-2,44
581-513CCMMR	0,40	7,46	69,41	67,92	66,50	7,46	69,22	67,81	66,45	-0,27	-0,16	-0,08
582-513CCMMS	0,40	7,46	69,41	67,92	66,50	7,46	69,22	67,81	66,45	-0,27	-0,16	-0,08
583-513CCMMT	0,40	7,46	69,41	67,92	66,50	7,46	69,22	67,81	66,45	-0,27	-0,16	-0,08
584-513CCMML	0,40	6,58	39,54	39,48	39,41	6,58	39,56	39,51	39,44	0,05	0,08	0,08
585-513CCMMV	0,40	7,46	69,41	67,92	66,50	7,46	69,22	67,81	66,45	-0,27	-0,16	-0,08
59-719PMT001	13,8	5,29	22,99	21,78	20,66	5,29	22,29	21,16	20,11	-3,14	-2,93	-2,73
591-719QBT001	0,40	6,58	65,78	63,91	62,11	6,58	65,55	63,77	62,05	-0,35	-0,22	-0,10
592-719CCM001	3,80	8,93	11,13	10,50	9,91	8,93	10,89	10,32	9,78	-2,20	-1,74	-1,33
60-702PMT001	13,8	7,35	23,96	22,57	21,28	7,35	23,30	21,99	20,78	-2,83	-2,64	-2,41
601-702PBT013A	0,38	5,13	40,26	39,64	309,04	5,13	40,18	39,59	39,02	-0,20	-0,13	-692,00
602-702PBT013B	0,38	5,13	39,44	38,85	38,29	5,13	39,39	38,83	38,29	-0,13	-0,05	0,00
603-702PBT013C	0,38	5,13	40,09	39,47	38,87	5,13	39,39	38,83	38,29	-1,78	-1,65	-1,51
70-700PMT004G	13,8	8,62	24,42	22,96	21,61	8,62	23,78	22,40	21,12	-2,69	-2,50	-2,32

5.4.4 Análise das correntes de regime sob várias configurações de sistema de excitação.

A análise subsequente irá permitir a verificação do comportamento das correntes de curto-circuito de regime " I_k " sob os vários aspectos de operação da excitação do gerador síncrono de 46,10 MVA do sistema.

De acordo com a apresentação descrita no capítulo-4, a norma “IEC-60909” modela a excitação dos geradores síncronos fazendo distinção entre máquinas de rotor cilíndrico e máquinas de rotor de pólos salientes. Não obstante, são incluídos modelamentos para sistemas de excitação “Series-1” e “Series-2”.

Em complemento, são apresentados métodos de modelagem para todos os casos citados, considerando-se o parâmetro λ_{\min} , que, aliado ao fator c_{\min} da Tabela 5.7, e à correção da resistência dos cabos elétricos com a elevação da temperatura devido à permanência da corrente de curto-circuito no sistema.

Todas essas considerações têm como finalidade a determinação das correntes de curto-circuito de regime máximas e mínimas. Assim, para análise do comportamento do sistema em várias condições de modelagem, foram processados quatro casos de corrente de regime:

- No primeiro cálculo, já apresentado, cujos valores de I_k encontram-se representados na tabela 5.8, os “efeitos IEC” do regulador de tensão da máquina não foram considerados e a corrente de regime é dada pela componente $X_d' = 29\%$ do gerador.

- O segundo cálculo, já considerando o “efeito IEC” do regulador de tensão do gerador, λ_{\max} , obtido a partir de uma máquina de rotor cilíndrico, regulador “Series-1” e $X_{dsat} = 1,60$ (λ_{\max} , conforme figura-4.9a ou figura-18a da “IEC-60909”).

- O terceiro caso utilizou λ_{\max} , para uma máquina de rotor cilíndrico, regulador “Series-2” e $X_{dsat} = 1,60$. (λ_{\max} , conforme figura-4.9b).

- No quarto caso, apresenta-se o cálculo da corrente de regime mínima, com a utilização do fator λ_{\min} , obtido também das figuras 4.9a e 4.9b. A norma, neste caso, prescreve a utilização do fator c_{\min} apresentado na tabela 4.1. Salienta-se que a correção das resistências dos cabos de força pela equação (4.1), recomendada na norma, não foi aplicada devido a limitações do software utilizado.

A tabela 5.12, apresenta os resultados obtidos dos quatro casos simulados.

Tabela 5.12 - Resumo das correntes de curto-circuito de regime conforme “IEC”

SISTEMA			CASO-1	CASO-2	CASO-3	CASO-4
Barra	kV	X/R	I_k (kA)	I_k (kA)	I_k (kA)	I_k (kA)
01-138 KV	138	4,42	9,52	9,31	9,37	9,13
04-QDAT-C	13,8	14,08	9,56	9,15	9,20	9,13
06-700PMT005	13,8	16,13	9,32	9,10	9,13	9,14
20-700PMT003E	13,8	12,20	9,29	8,90	8,95	8,85
21-707PMT002	13,8	9,71	9,13	8,75	8,78	8,68
211-707PMT004	3,80	10,99	6,64	5,75	5,85	5,52
22-707PMT051	13,8	7,75	15,02	11,46	12,14	9,45
221-700CCMZ	3,8	6,58	3,81	3,21	3,37	3,38
222-700BT052	0,38	5,59	49,26	41,31	43,45	43,62
223-700CCMMH	0,38	5,59	49,62	41,61	43,77	43,93
23-703PMT601	13,8	8,33	9,00	8,63	8,68	8,54
231-703BT601	0,38	5,65	50,13	48,38	48,55	48,49
24-300PMT007	13,8	5,38	13,90	10,63	11,32	8,53
241-300BT007	0,38	7,41	48,52	40,72	42,83	42,97
242-300BT008	0,38	7,35	49,00	41,12	43,26	43,40
243-300BT009	0,38	7,41	48,65	40,83	42,96	43,09
25-300PMT010	13,8	5,92	14,66	11,21	11,90	9,15
251-300BT010	0,38	7,41	48,97	41,09	43,22	43,38
252-300BT011	0,38	7,41	49,39	41,44	43,60	43,75
253-300BT012	0,38	7,41	49,46	41,50	43,66	43,81
254-300BT006	0,38	4,85	30,69	25,93	27,28	27,37
26-300PMT001	13,8	7,69	14,80	11,28	11,96	9,25
261-CCM-MA-A	3,80	9,26	11,76	10,68	10,68	8,23
2611-CCMSIEMEN	3,80	6,71	11,61	10,60	10,60	8,19
2612-PILAO-1-2	3,80	3,86	10,95	10,15	10,15	7,92
2613-PILAO-3-4	3,80	3,80	10,95	10,15	10,15	7,92
262-CCM-MA-B	3,80	9,17	11,76	10,68	10,68	8,23
27-300PMT003	13,8	5,03	14,39	11,03	11,72	8,93
271-300BT003	0,38	7,30	48,65	40,83	42,95	43,10
272-300BT004	0,38	7,30	48,51	40,72	42,83	42,98
273-300BT005	0,38	7,30	49,13	41,23	43,38	43,53
28-305PMT001	13,8	3,03	13,73	10,65	11,36	8,40
281-305BT001	0,38	5,62	36,70	31,04	32,66	32,77
29-917PMT001	13,8	2,63	13,31	10,38	11,09	8,06
291-918BT067	0,38	5,18	49,73	41,84	44,02	44,16
292-918BT065	0,38	4,83	16,89	14,38	15,13	15,18
293-918BT066	0,38	4,65	28,32	23,97	25,22	25,30
30-781PMT001	13,8	9,09	8,92	8,54	8,59	8,45
301-718BT001	0,44	6,76	30,91	29,72	29,90	30,08
31-702PMT001	13,8	4,90	14,50	11,12	11,81	9,02
311-702QGBT002	0,38	4,69	17,30	14,72	15,49	15,54
32-707PMT001	13,8	5,41	14,71	11,28	11,97	9,20
321-707PMT003	3,80	6,94	6,07	4,88	5,18	4,95
40-700PMT003G	13,8	8,26	15,08	11,50	12,18	9,50
50-700PMT004E	13,8	8,40	15,14	11,55	12,23	9,55
51-509PMT001	13,8	3,73	14,22	10,96	11,66	8,79
511-509CCMME	0,38	5,43	53,25	44,73	47,06	47,22
512-509CCMMF	0,38	5,43	53,25	44,73	47,06	47,22
52-507PMT001	13,8	2,46	13,15	10,28	11,00	7,93
521-507CCMMC	0,38	5,05	54,60	46,08	48,49	48,62

Tabela 5.12 - Resumo das correntes de curto-circuito de regime conforme “IEC” - continuação

SISTEMA			CASO-1	CASO-2	CASO-3	CASO-4
Barra	kV	X/R	I_k (kA)	I_k (kA)	I_k (kA)	I_k (kA)
53-722PMT001	13,8	3,97	14,10	10,86	11,55	8,69
531-722CCM01	0,38	6,85	53,19	44,68	47,00	47,16
532-722CCM02	0,38	6,85	53,19	44,68	47,00	47,16
533-722CCM03	0,38	6,85	53,19	44,68	47,00	47,16
54-709PMT001	13,8	2,27	12,82	10,06	10,78	7,66
541-709CCM502	0,38	5,08	49,51	41,69	43,86	43,99
542-709CCM503	0,38	5,05	49,50	41,69	43,86	46,99
543-709CCM504	0,38	5,05	49,50	41,69	43,86	46,99
55-510PMT001	13,8	6,58	14,44	11,01	11,69	8,96
551-510CCMMH	0,38	7,41	53,38	44,77	47,10	47,26
552-510CCMMI	0,38	7,41	50,24	42,15	44,34	44,49
554-511CCMML	0,38	6,06	50,24	42,15	44,34	44,49
555-511CCMMN	0,38	6,06	50,24	42,15	44,34	44,49
556-511CCMMO	0,38	5,78	50,24	42,15	44,34	44,49
557-511CCMMP	0,38	7,25	50,24	42,15	44,34	44,49
56-721PMT001	13,8	3,73	14,22	10,96	11,66	8,79
561-721PMT002	3,80	6,90	4,26	3,58	3,77	3,77
562-721PBT001	0,38	7,30	55,02	45,87	48,25	48,31
563-710PBT020	0,38	6,94	46,54	39,09	41,13	41,27
57-709PMT002	13,8	2,68	13,45	10,47	11,19	8,17
571-709PBT011	0,38	6,49	53,37	44,90	47,23	47,38
58-513PMT001	13,8	7,46	14,89	11,36	12,04	9,33
581-513CCMMR	0,40	7,35	60,81	50,60	53,23	53,11
582-513CCMMS	0,40	7,35	60,81	50,60	53,23	53,11
583-513CCMMT	0,40	7,35	60,81	50,60	53,23	53,11
584-513CCMML	0,40	6,58	38,66	32,53	34,22	34,34
585-513CCMMV	0,40	7,35	60,81	50,60	53,23	53,11
59-719PMT001	13,8	5,35	14,63	11,21	11,90	9,13
591-719QBT001	0,40	6,49	56,83	47,33	49,79	49,70
592-719CCM001	3,80	8,85	8,12	7,36	7,36	6,37
60-702PMT001	13,8	7,30	14,99	11,46	12,13	9,43
601-702PBT013A	0,38	5,10	37,01	31,26	32,89	33,01
602-702PBT013B	0,38	5,10	36,85	31,12	32,74	32,86
603-702PBT013C	0,38	5,10	36,85	31,12	32,74	32,86
70-700PMT004G	13,8	8,40	15,13	11,55	12,26	9,55

Os valores de I_{kmin} em cada barra dependem, principalmente, da contribuição dos geradores do sistema, neste caso, TG-2. Neste ponto há de ser lembrada a aplicação dos fatores C_{max} e C_{min} e os fatores de correção de tensão da tabela 4.1.

A tabela-5.13 reproduz as contribuições do gerador TG-2 para as correntes de regime. Os valores apresentados de corrente, I_{kG} , para cada simulação, revelam o comportamento da excitação da máquina ante os vários tipos de cálculos prescritos na “IEC-60909”.

Salientam-se as diferenças das contribuições entre o sistema de excitação “Series-1” (onde o suprimento de potência da excitação é feito via transformador ligado aos terminais do gerador) e “Series-2” (onde o suprimento de potência da excitação é feito com alimentação composta de tensões e correntes do gerador) para um mesmo X_d e cálculo de λ_{\max} .

Nota-se também que, no caso de $I_{k\min}$, além da utilização dos fatores de correção da tensão c_{\min} , os valores de λ_{\min} são iguais para a excitação “Series-1” e “Series-2”.

Tabela 5.13 Contribuições do gerador TG-2 para as correntes de curto-circuito de regime I_k na barra 70-700PMT004G.

CONTRIBUIÇÕES TG-2				
	Caso-1	Caso-2	Caso-3	Caso-4
I_r (kA)	1,929	1,929	1,929	1,929
I'_k (kA)	8,033	8,033	8,033	7,303
I''_k/I_r	4,165	4,165	4,165	3,787
X_{dsat} (pu)	-	1,60	1,60	1,60
λ_{\max} (λ_{\min})	-	1,782	2,197	(0,48)
I_{kG} (kA)	6,050	3,436	4,237	0,925
Excitação	-	“Series-1”	“Series-2”	“Series-2”

5.5 Análise comparativa entre as duas normas e o método Abrangente

5.5.1 Conceituais

5.5.1.1 Tipos de cálculos

A tabela 5.14 apresenta a designação utilizada em cada norma para cada tipo de cálculo de curto-circuito.

Tabela 5.14 Designação para cada tipo de corrente de curto-circuito calculada.

CÁLCULO ANSI	CÁLCULO IEC
Primeiro ciclo	Inicial, I_k''
Momentânea ou " <i>closing and latching, momentary</i> "	Pico, i_p ou " <i>making</i> "
Interrupção ou " <i>Interrupting</i> "	Interrupção ou " <i>breaking</i> ", I_b
Regime ou 30 ciclos ou " <i>time delayed</i> ", ou " <i>steady state</i> "	Regime ou " <i>steady state</i> ", I_k

5.5.1.2 Decaimento "ac"

A "ANSI", para realizar o cálculo das correntes de interrupção, utiliza multiplicadores nas reatâncias subtransitórias e transitórias de máquinas rotativas, conforme tabela 3.1, e que levam em consideração o tipo, porte da máquina e velocidade angular. Utiliza-se de curvas para modelagem do decremento "ac" em estações geradoras. A geração é considerada como "local" ou "remota".

A "IEC" não utiliza correções iniciais nas reatâncias de máquinas. O decremento "ac" é modelado considerando-se o tipo de máquina, porte, e velocidade angular, tempo exato de separação dos contatos dos disjuntores e a proximidade da máquina ao ponto da falta, utilizando os conceitos de "próximo da geração" e "longe da geração".

5.5.1.3 Decaimento “dc”

A “ANSI” recomenda aplicação de multiplicadores às correntes simétricas para a determinação das correntes assimétricas. O conceito da norma “ANSI” está pautado na relação X/R e as normas correlatas são unânimes em recomendar a determinação dos valores de X e de R através de reduções separadas para reatâncias e resistências.

A “IEC” não adota uma relação X/R ou R/X única e, em geral mais de uma relação X/R é considerada. A técnica aplicada às diversas fontes independentes que alimentam a falta baseia-se no princípio da superposição.

5.5.1.4 Tensões de pré-falta

A “ANSI” estabelece tensão pré-falta de 1,0 pu, enquanto que a “IEC” determina os valores de multiplicadores de tensão “ c ”, apresentados na tabela 5.7, onde se definem fatores para valores “*máximos*” e “*mínimos*” das correntes de curto-circuito.

5.5.2 Corrente de falta inicial

A “ANSI” define corrente simétrica de primeiro ciclo como “*a corrente verificada imediatamente após o início da falta*”, enquanto a “IEC”, define corrente inicial como “*a corrente esperada disponível no ponto da falta no momento do defeito, com as impedâncias inalteradas*”. As correntes são ambas simétricas e podem ser comparadas.

A tabela 5.15 apresenta o resultado das correntes de primeiro ciclo obtidas conforme cálculo Abrangente e conforme as duas normas para o sistema exemplo do ANEXO-3.

Note-se que os valores calculados das correntes, conforme os procedimentos “*IEC*”, são maiores que os obtidos conforme a norma “*ANSI*”. Essa diferença é atribuída principalmente ao fator de correção da tensão “*c*”, com tensões pré-falta superiores a 1,0 pu e ao fato de que as impedâncias subtransitórias são utilizadas pela “*IEC*” no cálculo das correntes iniciais para todos os tipos de cargas rotativas.

Tabela 5.15 Correntes de curto-circuito iniciais e de pico – Abrangente – “ANSI” – “IEC”

SISTEMA		METODO ABRANGENTE				METODO ANSI				METODO IEC		
Barra	kV	X/R	$I_{inicial}$ rms (kA)	I_{rms} assim. (kA)	I_{pico} (kA)	X/R	kA	I_{rms} assim. (kA)	I_{pico} (kA)	X/R	I_k'' (kA)	i_D (kA)
01-138 KV	138	4,50	9,72	11,88	20,54	5,14	9,62	12,13	20,99	4,42	9,88	21,05
04-QDAT-C	13,8	16,40	9,23	14,19	23,83	17,15	8,95	13,82	23,19	14,08	10,10	25,92
06-700PMT005	13,8	16,60	8,50	13,08	21,96	17,29	8,49	13,13	22,02	16,13	9,34	24,24
20-700PMT003E	13,8	13,50	8,99	13,50	22,77	13,86	8,70	13,12	22,12	12,20	9,94	24,94
21-707PMT002	13,8	9,80	8,82	12,64	21,51	10,20	8,55	12,33	20,97	9,71	9,66	23,75
211-707PMT004	3,80	11,80	6,61	9,75	16,52	13,30	6,58	9,87	16,66	10,99	7,21	18,02
22-707PMT051	13,8	13,10	25,79	38,58	65,17	20,47	20,59	32,37	54,09	7,75	28,01	66,82
221-700CCMZ	3,8	8,00	4,77	6,60	11,29	9,49	4,54	6,46	11,02	6,58	5,22	12,11
222-700BT052	0,38	8,60	57,64	80,76	138,03	10,56	57,64	(1)	(1)	5,59	60,20	137,30
223-700CCMMH	0,38	8,60	58,00	81,27	138,87	10,54	58,00	(1)	(1)	5,59	60,58	138,19
23-703PMT601	13,8	8,10	8,69	12,04	20,62	8,15	8,41	11,66	19,97	8,33	9,52	22,99
231-703BT601	0,38	8,50	57,39	80,24	137,26	10,48	57,39	(1)	(1)	5,65	59,61	136,36
24-300PMT007	13,8	6,10	21,74	28,46	49,14	17,95	8,06	24,85	42,57	5,38	23,67	52,92
241-300BT007	0,38	7,50	52,47	71,66	122,91	7,60	52,47	(1)	(1)	7,41	56,89	134,62
242-300BT008	0,38	7,50	52,96	72,33	124,06	7,59	52,96	(1)	(1)	7,35	57,41	135,84
243-300BT009	0,38	7,50	52,61	71,85	123,23	7,59	52,61	(1)	(1)	7,41	57,03	134,97
25-300PMT010	13,8	7,50	24,36	33,27	57,16	10,43	19,68	28,48	48,42	5,92	26,47	60,27
251-300BT010	0,38	7,50	51,99	71,01	121,94	7,64	51,99	(1)	(1)	7,41	56,40	133,53
252-300BT011	0,38	7,50	52,42	71,59	122,94	7,64	52,42	(1)	(1)	7,41	56,85	134,60
253-300BT012	0,38	7,50	52,49	71,69	123,11	7,64	52,49	(1)	(1)	7,41	56,93	134,78
254-300BT006	0,38	6,20	32,16	42,25	72,91	7,27	32,16	(1)	(1)	4,85	36,00	79,45
26-300PMT001	13,8	12,60	25,09	37,34	63,11	19,32	20,18	31,55	52,78	7,69	27,26	64,91
261-CCM-MA-A	3,80	15,50	18,36	28,05	47,160	17,51	17,19	27,06	45,39	9,26	20,12	49,31
2611-CCMSIEMEN	3,80	8,50	17,97	25,13	42,99	9,43	17,16	24,43	41,66	6,71	19,71	45,92
2612-PILAO-1-2	3,80	3,80	16,28	19,14	33,11	8,45	15,59	19,40	33,60	3,86	17,98	37,44
2613-PILAO-3-4	3,80	3,80	16,56	19,47	33,58	4,75	16,08	19,90	34,47	3,80	18,29	37,95
262-CCM-MA-B	3,80	15,80	18,72	28,66	48,18	17,68	18,15	28,12	47,14	9,17	20,53	50,26
27-300PMT003	13,8	5,70	23,29	30,05	52,00	7,67	19,00	26,06	44,71	5,03	25,33	55,89
271-300BT003	0,38	7,40	51,67	70,39	120,88	7,53	51,67	(1)	(1)	7,30	56,06	132,49
272-300BT004	0,38	7,40	51,53	70,19	120,55	7,53	51,53	(1)	(1)	7,30	55,86	132,02
273-300BT005	0,38	7,40	52,16	71,05	122,03	7,53	52,16	(1)	(1)	7,30	56,58	133,70
28-305PMT001	13,8	2,90	20,57	22,81	38,31	3,63	17,23	20,04	34,61	3,03	22,62	44,29
281-305BT001	0,38	5,80	40,34	52,24	90,25	6,03	40,34	(1)	(1)	5,62	43,34	97,75
29-917PMT001	13,8	2,40	19,21	20,56	34,61	2,93	16,18	17,98	30,72	2,63	21,28	40,15
291-918BT067	0,38	7,20	58,14	78,77	135,61	8,17	58,14	(1)	(1)	5,18	60,74	136,26
292-918BT065	0,38	4,80	17,17	21,31	36,92	5,04	17,17	(1)	(1)	4,83	18,52	40,56
293-918BT066	0,38	5,80	32,00	41,44	71,59	5,99	32,00	(1)	(1)	4,65	33,55	73,36
30-781PMT001	13,8	8,90	8,60	12,12	20,73	9,19	8,34	11,83	20,18	9,09	9,43	22,99
301-718BT001	0,44	7,50	36,38	49,69	85,29	8,03	36,38	(1)	(1)	6,76	39,26	91,50
31-702PMT001	13,8	5,60	23,60	30,33	52,41	7,51	19,20	26,23	45,02	4,90	25,66	56,33
311-702QGBT002	0,38	4,70	16,20	20,01	34,67	4,72	16,20	(1)	(1)	4,69	17,50	38,06
32-707PMT001	13,8	6,60	24,47	32,57	56,03	9,08	19,76	27,96	47,72	5,41	26,58	59,48
321-707PMT003	3,80	7,20	6,05	8,20	14,08	8,74	5,97	8,40	14,35	6,94	6,53	15,31
40-700PMT003G	13,8	15,50	26,02	39,75	66,83	25,65	20,74	33,22	55,29	8,26	28,27	68,19
50-700PMT004E	13,8	16,20	26,17	40,18	67,48	27,93	20,84	33,58	55,81	8,40	28,43	68,94
51-509PMT001	13,8	3,80	22,41	26,35	45,63	4,80	18,36	22,78	39,46	3,73	24,48	50,52
511-509CCMME	0,38	7,90	61,72	85,14	145,91	9,90	61,72	(1)	(1)	5,43	64,48	146,09
512-509CCMMF	0,38	7,90	61,72	85,14	145,91	9,90	61,72	(1)	(1)	5,43	64,48	146,09
52-507PMT001	13,8	2,20	18,50	19,53	32,52	2,69	15,75	17,21	29,21	2,46	20,59	38,11
521-507CCMMC	0,38	6,40	60,75	80,35	138,40	8,19	60,75	(1)	(1)	5,05	63,62	141,35

(1) As correntes de curto-circuito de baixa tensão são calculadas pela norma “ANSI” através de outro procedimento.

Tabela 5.15 - Correntes de curto-circuito iniciais e de pico – Abrangente – “ANSI – IEC” - continuação

SISTEMA		METODO ABRANGENTE				METODO ANSI				METODO IEC		
Barra	kV	X/R	$I_{inicial}$ rms (kA)	I_{rms} assim. (kA)	I_{pico} (kA)	X/R	kA	I_{rms} assim. (kA)	I_{pico} (kA)	X/R	I_k'' (kA)	i_p (kA)
53-722PMT001	13,8	4,10	22,15	26,51	45,85	5,33	18,27	23,22	40,17	3,97	24,18	50,66
531-722CCM01	0,38	7,30	61,67	83,78	139,91	7,46	61,67	(1)	(1)	6,85	66,58	155,65
532-722CCM02	0,38	7,30	61,67	83,78	143,91	7,46	61,67	(1)	(1)	6,85	66,58	155,65
533-722CCM03	0,38	7,30	61,67	83,78	143,91	7,46	61,67	(1)	(1)	6,85	66,58	155,65
54-709PMT001	13,8	2,00	17,60	18,34	30,24	2,39	14,99	16,04	26,91	2,27	19,71	35,74
541-709CCM502	0,38	7,20	57,90	78,45	134,82	9,56	57,90	(1)	(1)	5,08	60,51	135,04
542-709CCM503	0,38	7,10	57,89	78,22	134,56	9,00	57,89	(1)	(1)	5,05	60,50	134,23
543-709CCM504	0,38	7,10	57,89	78,22	134,56	9,00	57,89	(1)	(1)	5,05	60,50	134,23
55-510PMT001	13,8	9,00	23,59	33,32	56,86	12,46	19,11	28,39	48,02	6,58	25,63	59,59
551-510CCMMH	0,38	7,50	55,59	75,92	130,44	7,65	52,59	(1)	(1)	7,41	60,16	142,41
552-510CCMMI	0,38	7,50	52,38	71,54	122,93	7,65	52,39	(1)	(1)	7,41	56,80	134,49
554-511CCMML	0,38	7,30	54,56	74,12	127,43	7,39	54,56	(1)	(1)	6,06	57,77	133,21
555-511CCMMN	0,38	7,30	54,56	74,12	127,43	7,39	54,56	(1)	(1)	6,06	57,77	133,21
556-511CCMMO	0,38	8,30	56,85	79,14	135,49	10,21	56,85	(1)	(1)	5,78	59,70	136,76
557-511CCMMP	0,38	7,40	47,82	65,14	111,78	7,43	47,82	(1)	(1)	7,25	51,98	122,61
56-721PMT001	13,8	3,80	22,39	26,33	45,52	4,97	18,41	23,03	39,87	3,73	24,46	50,47
561-721PMT002	3,80	7,80	4,68	6,44	11,04	9,11	4,52	6,40	10,92	6,90	5,14	12,04
562-721PBT001	0,38	10,30	62,98	90,98	154,65	11,28	62,98	(1)	(1)	7,30	66,85	159,45
563-710PBT020	0,38	7,00	44,03	59,32	101,90	7,03	44,03	(1)	(1)	6,94	48,02	112,43
57-709PMT002	13,8	2,50	19,45	20,97	35,17	3,08	16,47	18,49	31,69	2,68	21,52	40,80
571-709PBT011	0,38	6,60	53,57	71,31	122,69	6,69	53,57	(1)	(1)	6,49	58,02	134,42
58-513PMT001	13,8	12,00	25,25	37,32	63,22	18,00	20,19	31,35	52,54	7,46	27,42	65,21
581-513CCMMR	0,40	11,50	68,85	101,14	171,51	12,68	68,85	(1)	(1)	7,35	72,22	173,16
582-513CCMMS	0,40	11,50	68,85	101,14	171,51	12,68	68,85	(1)	(1)	7,35	72,22	173,16
583-513CCMMT	0,40	11,50	68,85	101,14	171,51	12,68	68,85	(1)	(1)	7,35	72,22	173,16
584-513CCMML	0,40	6,70	36,48	48,71	83,77	6,70	36,48	(1)	(1)	6,58	39,68	92,08
585-513CCMMV	0,40	11,50	68,85	101,14	171,51	12,68	68,85	(1)	(1)	7,35	72,22	173,16
59-719PMT001	13,8	6,40	24,19	31,99	55,21	8,89	19,56	27,57	47,09	5,35	26,29	58,73
591-719QBT001	0,40	10,90	68,69	100,10	169,87	11,31	68,69	(1)	(1)	6,49	71,30	168,02
592-719CCM001	3,80	12,80	11,43	17,05	288,22	14,48	10,99	16,66	28,06	8,85	12,55	30,54
60-702PMT001	13,8	11,50	25,56	37,55	63,63	17,54	20,44	31,65	53,08	7,30	27,76	65,59
601-702PBT013A	0,38	6,30	39,74	52,39	90,42	7,37	39,74	(1)	(1)	5,10	41,82	93,08
602-702PBT013B	0,38	6,00	39,57	51,62	89,24	6,16	39,57	(1)	(1)	5,10	41,65	92,69
603-702PBT013C	0,38	6,30	39,57	52,16	90,05	7,38	39,57	(1)	(1)	5,10	41,65	92,69
70-700PMT004G	13,8	16,20	26,17	40,18	67,49	27,95	20,84	33,59	55,81	8,40	28,43	69,40

(1) As correntes de curto-circuito de baixa tensão são calculadas pela norma “ANSI” por meio de outro procedimento.

5.5.3 Correntes assimétricas rms

A análise comparativa das correntes assimétricas tem como ponto de partida o método Abrangente. Neste método, a equação (2.17), ou equação do meio-ciclo, define as correntes assimétricas, a qual também é parâmetro padrão no software empregado, SKM Comprehensive, [SKM, PTW Short-circuit Comprehensive].

A “ANSI” define as correntes assimétricas rms, calculadas para meio ciclo (da mesma forma o software PTW Short-circuit A_Fault utilizado neste trabalho) conforme a equação (2.17). Esses valores apresentam-se tabulados na coluna 6 da tabela 5.23.

A “IEEE”, [IEEE Std 551, 2006], por sua vez, define corrente assimétrica , rms, por meio da equação (2.19), conforme explanado no Capítulo-1. A coluna 8 da tabela 5.16 reporta os valores das correntes momentâneas, a partir da equação (2.19).

A “IEC” não explicita uma rotina para cálculo de correntes de primeiro ciclo assimétricas rms, entretanto, para efeito de comparação, os valores da coluna 12 foram obtidos a partir da equação (2.18).

Tabela 5.16 - Correntes de curto-circuito Assimétricas rms – Abrangente – “ANSI – IEC”

SISTEMA		ABRANGENTE		ANSI					IEC			
Barra	kV	X/R	I_{rms} assim. (kA) (1)	X/R	I_{rms} assim. (kA)(1)	DESVIO %	$I_{k''}$ assim. (kA)(2)	DESVIO %	X/R	I_k'' (kA)	I_k'' rms assim (kA) (3)	DESVIO %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
01-138 KV	138	4,50	11,88	5,14	12,13	2,10	12,29	3,45	4,42	9,88	12,24	3,03
04-QDAT-C	13,8	16,40	14,19	17,15	13,82	-2,61	13,86	-2,33	14,08	10,10	15,38	8,39
06-700PMT005	13,8	16,60	13,08	17,29	13,13	0,38	13,16	0,61	16,13	9,34	14,44	10,40
20-700PMT003E	13,8	13,50	13,50	13,86	13,12	-2,81	13,15	-2,59	12,20	9,94	14,87	10,15
21-707PMT002	13,8	9,80	12,64	10,20	12,33	-2,45	12,38	-2,06	9,71	9,66	13,98	10,60
211-707PMT004	3,80	11,80	9,75	13,30	9,87	1,23	9,89	1,44	10,99	7,21	10,63	9,03
22-707PMT051	13,8	13,10	38,58	20,47	32,37	-16,10	32,43	-15,94	7,75	28,01	39,01	1,11
221-700CCMZ	3,8	8,00	6,60	9,49	6,46	-2,12	6,50	-1,52	6,58	5,22	7,05	6,82
222-700BT052	0,38	8,60	80,76	10,56	-	-	83,93	3,93	5,59	60,20	78,57	-2,71
223-700CCMMH	0,38	8,60	81,27	10,54	-	-	84,43	3,89	5,59	60,58	79,06	-2,72
23-703PMT601	13,8	8,10	12,04	8,15	11,66	-3,16	11,74	-2,49	8,33	9,52	13,43	11,54
231-703BT601	0,38	8,50	80,24	10,48	-	-	83,47	4,03	5,65	59,61	77,97	-2,83
24-300PMT007	13,8	6,10	28,46	17,95	24,85	-12,68	24,90	-12,51	5,38	23,67	30,64	7,66
241-300BT007	0,38	7,50	71,66	7,60	-	-	72,35	0,96	7,41	56,89	78,58	9,66
242-300BT008	0,38	7,50	72,33	7,59	-	-	73,01	0,94	7,35	57,41	79,18	9,47
243-300BT009	0,38	7,50	71,85	7,59	-	-	72,53	0,95	7,41	57,03	78,77	9,63
25-300PMT010	13,8	7,50	33,27	10,43	28,48	-14,40	28,60	-14,04	5,92	26,47	34,97	5,11
251-300BT010	0,38	7,50	71,01	7,64	-	-	71,76	1,06	7,41	56,40	77,90	9,70
252-300BT011	0,38	7,50	71,59	7,64	-	-	72,35	1,06	7,41	56,85	78,52	9,68
253-300BT012	0,38	7,50	71,69	7,64	-	-	72,45	1,06	7,41	56,93	78,63	9,68
254-300BT006	0,38	6,20	42,25	7,27	-	-	43,99	4,12	4,85	36,00	45,54	7,79
26-300PMT001	13,8	12,60	37,34	19,32	31,55	-15,51	31,61	-15,35	7,69	27,26	37,91	1,53
261-CCM-MA-A	3,80	15,50	28,05	17,51	27,06	-3,53	26,67	-4,92	9,26	20,12	28,89	2,99
2611-CCSIEMEN	3,80	8,50	25,13	9,43	24,43	-2,79	24,55	-2,31	6,71	19,71	26,71	6,29
2612-PILAO-1-2	3,80	3,80	19,14	8,45	19,40	1,36	21,90	14,42	3,86	17,98	21,60	12,85
2613-PILAO-3-4	3,80	3,80	19,47	4,75	19,90	2,21	20,20	3,75	3,80	18,29	21,89	12,43
262-CCM-MA-B	3,80	15,80	28,66	17,68	28,12	-1,88	28,19	-1,64	9,17	20,53	29,44	2,72
27-300PMT003	13,8	5,70	30,05	7,67	26,06	-13,28	26,24	-12,68	5,03	25,33	32,31	7,52
271-300BT003	0,38	7,40	70,39	7,53	-	-	71,13	1,05	7,30	56,06	77,22	9,70
272-300BT004	0,38	7,40	70,19	7,53	-	-	70,93	1,05	7,30	55,86	76,94	9,62
273-300BT005	0,38	7,40	71,05	7,53	-	-	72,42	1,93	7,30	56,58	77,93	9,68
28-305PMT001	13,8	2,90	22,81	3,63	20,04	-12,14	20,43	-10,43	3,03	22,62	25,74	12,85
281-305BT001	0,38	5,80	52,24	6,03	-	-	53,22	1,88	5,62	43,34	56,63	8,40
29-917PMT001	13,8	2,40	20,56	2,93	17,98	-12,55	18,36	-10,70	2,63	21,28	23,52	14,40
291-918BT067	0,38	7,20	78,77	8,17	-	-	81,21	3,10	5,18	60,74	77,97	-1,02
292-918BT065	0,38	4,80	21,31	5,04	-	-	21,84	2,49	4,83	18,52	23,41	9,85
293-918BT066	0,38	5,80	41,44	5,99	-	-	42,16	1,74	4,65	33,55	42,04	1,45
30-781PMT001	13,8	8,90	12,12	9,19	11,83	-2,39	11,88	-1,98	9,09	9,43	13,50	11,39
301-718BT001	0,44	7,50	49,69	8,03	-	-	50,66	1,95	6,76	39,26	53,28	7,22
31-702PMT001	13,8	5,60	30,33	7,51	26,23	-13,52	26,42	-12,89	4,90	25,66	32,54	7,29
311-702QGBT002	0,38	4,70	20,01	4,72	-	-	20,32	1,55	4,69	17,50	21,97	9,80
32-707PMT001	13,8	6,60	32,57	9,08	27,96	-14,15	28,10	-13,72	5,41	26,58	34,45	5,77
321-707PMT003	3,80	7,20	8,20	8,74	8,40	2,44	8,44	2,93	6,94	6,53	8,91	8,66
40-700PMT003G	13,8	15,50	39,75	25,65	33,22	-16,43	33,27	-16,30	8,26	28,27	39,82	0,18
50-700PMT004E	13,8	16,20	40,18	27,93	33,58	-16,43	33,63	-16,30	8,40	28,43	40,17	-0,02
51-509PMT001	13,8	3,80	26,35	4,80	22,78	-13,55	23,11	-12,30	3,73	24,48	29,18	10,74
511-509CCMME	0,38	7,90	85,14	9,90	-	-	88,99	4,52	5,43	64,48	83,63	-1,77
512-509CCMMF	0,38	7,90	85,14	9,90	-	-	88,99	4,52	5,43	64,48	83,63	-1,77
52-507PMT001	13,8	2,20	19,53	2,69	17,21	-11,88	17,58	-9,98	2,46	20,59	22,48	15,10
521-507CCMMC	0,38	6,40	80,35	8,19	-	-	84,89	5,65	5,05	63,62	81,21	1,07

(1)Conforme equação (2.17) - (2)Conforme equação (2.19) – (3) Conforme equação (2.18)

**Tabela 5.16 Correntes de curto-circuito assimétricas rms – Abrangente
– “ANSI – IEC” – continuação**

SISTEMA		ABRANGENTE		ANSI					IEC			
Barra	kV	X/R	I_{rms} assim. (kA) (1)	X/R	I_{rms} assim. (kA)(1)	DESVIO %	I_{rms} assim. (kA)(2)	DESVIO %	X/R	I_k'' (kA)	I_k'' rms assim (kA) (3)	DESVIO %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
53-722PMT001	13,8	4,10	26,51	5,33	23,22	-12,41	23,51	-11,32	3,97	24,18	29,23	10,26
531-722CCM01	0,38	7,30	83,78	7,46	-	-	84,75	1,16	6,85	66,58	90,59	8,13
532-722CCM02	0,38	7,30	83,78	7,46	-	-	84,75	1,16	6,85	66,58	90,59	8,13
533-722CCM03	0,38	7,30	83,78	7,46	-	-	84,75	1,16	6,85	66,58	90,59	8,13
54-709PMT001	13,8	2,00	18,34	2,39	16,04	-12,54	16,37	-10,74	2,27	19,71	21,21	15,65
541-709CCM502	0,38	7,20	78,45	9,56	-	-	83,02	5,83	5,08	60,51	77,34	-1,41
542-709CCM503	0,38	7,10	78,22	9,00	-	-	82,20	5,09	5,05	60,50	77,23	-1,27
543-709CCM504	0,38	7,10	78,22	9,00	-	-	82,20	5,09	5,05	60,50	77,23	-1,27
55-510PMT001	13,8	9,00	33,32	12,46	28,39	-14,80	28,49	-14,50	6,58	25,63	34,60	3,84
551-510CCMMH	0,38	7,50	75,92	7,65	-	-	72,60	-4,37	7,41	60,16	83,10	9,46
552-510CCMMI	0,38	7,50	71,54	7,65	-	-	72,32	1,09	7,41	56,80	78,45	9,66
554-511CCMML	0,38	7,30	74,12	7,39	-	-	74,85	0,98	6,06	57,77	76,69	3,47
555-511CCMMN	0,38	7,30	74,12	7,39	-	-	74,85	0,98	6,06	57,77	76,69	3,47
556-511CCMMO	0,38	8,30	79,14	10,21	-	-	82,36	4,07	5,78	59,70	78,47	-0,85
557-511CCMMP	0,38	7,40	65,14	7,43	-	-	65,67	0,81	7,25	51,98	71,50	9,76
56-721PMT001	13,8	3,80	26,33	4,97	23,03	-12,53	23,35	-11,32	3,73	24,46	29,15	10,71
561-721PMT002	3,80	7,80	6,44	9,11	6,40	-0,62	6,43	-0,16	6,90	5,14	7,00	8,70
562-721PBT001	0,38	10,30	90,98	11,28	-	-	92,60	1,78	7,30	66,85	92,08	1,21
563-710PBT020	0,38	7,00	59,32	7,03	-	-	59,85	0,89	6,94	48,02	65,50	10,42
57-709PMT002	13,8	2,50	20,97	3,08	18,49	-11,83	18,88	-9,97	2,68	21,52	23,88	13,88
571-709PBT011	0,38	6,60	71,31	6,69	-	-	72,13	1,15	6,49	58,02	78,11	9,54
58-513PMT001	13,8	12,00	37,32	18,00	31,35	-16,00	31,41	-15,84	7,46	27,42	37,92	1,61
581-513CCMMR	0,40	11,50	101,14	12,68	-	-	102,87	1,71	7,35	72,22	99,60	-1,52
582-513CCMMS	0,40	11,50	101,14	12,68	-	-	102,87	1,71	7,35	72,22	99,60	-1,52
583-513CCMMT	0,40	11,50	101,14	12,68	-	-	102,87	1,71	7,35	72,22	99,60	-1,52
584-513CCMML	0,40	6,70	48,71	6,70	-	-	49,13	0,86	6,58	39,68	53,56	9,96
585-513CCMMV	0,40	11,50	101,14	12,68	-	-	102,87	1,71	7,35	72,22	99,60	-1,52
59-719PMT001	13,8	6,40	31,99	8,89	27,57	-13,82	27,72	-13,35	5,35	26,29	33,99	6,25
591-719QBT001	0,40	10,90	100,10	11,31	-	-	101,03	0,93	6,49	71,30	95,98	-4,12
592-719CCM001	3,80	12,80	17,05	14,48	16,66	-2,29	16,70	-2,05	8,85	12,55	17,89	4,93
60-702PMT001	13,8	11,50	37,55	17,54	31,65	-15,71	31,72	-15,53	7,30	27,76	38,24	1,84
601-702PBT013A	0,38	6,30	52,39	7,37	-	-	54,49	4,01	5,10	41,82	53,50	2,12
602-702PBT013B	0,38	6,00	51,62	6,16	-	-	52,43	1,57	5,10	41,65	53,28	3,22
603-702PBT013C	0,38	6,30	52,16	7,38	-	-	54,27	4,05	5,10	41,65	53,28	2,15
70-700PMT004G	13,8	16,20	40,18	27,95	33,59	-16,40	33,63	-16,30	8,40	28,43	40,17	-0,02

(1)Conforme equação (2.17) - (2)Conforme equação (2.19) – (3) Conforme equação (2.18)

5.5.4 Correntes de pico – Valores Teóricos

As correntes de pico apresentam metodologias de cálculo diferentes. No final do Capítulo-2, tratou-se das equações da máxima corrente de pico, onde foram apresentadas a “*equação de meio ciclo*”, (2.10), a “*equação da IEC-60909*”, (2.11) e (2.12) e a “*equação da IEEE-551 – Violet Book*”, (2.15).

Utilizando-se da solução da equação geral do curto-circuito (2.2) e, por meio do algoritmo listado no ANEXO-2, foram determinados os valores da coluna 3 da tabela 5.17, que são considerados os “*valores exatos*” das correntes de pico para vários valores de X/R .

Nas colunas 5, 7 e 9 são tabulados os valores de pico, determinados segundo as equações de meio ciclo, “*IEC-60909*” e “*IEEE-521 – Violet Book*”, respectivamente. Uma análise dos erros calculados em relação ao valor exato e, considerando-se que o sinal “-” no erro percentual calculado indica **Valor inferior ao EXATO** ou “**não conservativo**” justifica as seguintes conclusões:

- O método do “*meio ciclo*” certamente **não é recomendável** devido à introdução de resultados “**não conservativos**” para valores de X/R até 100.

- As equações da “**IEC**” são, na maioria das situações, conservativas exceto para X/R entre 1,0 e 2,5.

- As equações do “**Violet Book**”, [IEEE Std 551, 2006], apresentam resultados conservativos para X/R superiores a 0,5, introduzindo valores que mais se aproximam da solução EXATA. Os erros “**não conservativos**” verificados na região de $X/R=10$ são desprezíveis.

Tabela 4-17 - Valores das correntes de pico, em PU, e erros percentuais verificados pelas equações de “Meio ciclo”, “IEC” e “IEEE std-551”

X/R	Tempo Pico (ciclos)	Valor Exato		Meio ciclo		IEC-6909		IEEE STD-551	
		Max pico	I_{dc}	Max Pico	Erro%	Max Pico	Erro %	Max Pico	Erro %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,5	0,32128	1,0078	0,0078	1,0019	-0,59	1,0224	1,45	1,0061	-0,16
1	0,36353	1,0694	0,0694	1,0432	-2,45	1,0688	-0,06	1,0722	0,26
1,5	0,38908	1,1571	0,1571	1,1231	-2,94	1,1526	-0,39	1,1656	0,73
2	0,40630	1,2418	0,2418	1,2079	-2,73	1,2387	-0,25	1,2521	0,83
2,5	0,41875	1,3157	0,3157	1,2846	-2,36	1,3152	-0,04	1,3255	0,75
3	0,42821	1,3786	0,3786	1,3509	-2,01	1,3805	0,14	1,3870	0,61
3,5	0,43565	1,4319	0,4319	1,4075	-1,70	1,4359	0,28	1,4388	0,48
4	0,44167	1,4774	0,4774	1,4559	-1,45	1,4829	0,37	1,4827	0,36
4,5	0,44665	1,5164	0,5164	1,4975	-1,25	1,5231	0,44	1,5205	0,27
5	0,45083	1,5503	0,5503	1,5335	-1,08	1,5578	0,49	1,5532	0,19
5,5	0,45440	1,5798	0,5798	1,5648	-0,94	1,5880	0,52	1,5819	0,13
6	0,45748	1,6057	0,6057	1,5924	-0,83	1,6144	0,54	1,6072	0,09
6,5	0,46017	1,6287	0,6287	1,6167	-0,74	1,6377	0,55	1,6297	0,06
7	0,46253	1,6492	0,6492	1,6384	-0,66	1,6584	0,56	1,6498	0,03
7,5	0,46463	1,6676	0,6676	1,6578	-0,59	1,6769	0,56	1,6679	0,02
8	0,46651	1,6842	0,6842	1,6752	-0,53	1,6935	0,56	1,6843	0,01
8,5	0,46819	1,6992	0,6992	1,6910	-0,48	1,7086	0,55	1,6992	0,00
9	0,46971	1,7128	0,7128	1,7053	-0,44	1,7222	0,55	1,7128	0,00
9,5	0,47110	1,7253	0,7253	1,7184	-0,40	1,7346	0,54	1,7252	-0,01
10	0,47236	1,7368	0,7368	1,7304	-0,37	1,7460	0,53	1,7367	-0,01
10,5	0,47351	1,7473	0,7473	1,7414	-0,34	1,7564	0,52	1,7472	-0,01
11	0,47457	1,7570	0,7570	1,7516	-0,31	1,7661	0,51	1,7570	0,00
11,5	0,47555	1,7661	0,7661	1,7610	-0,29	1,7750	0,51	1,7660	0,00
12	0,47646	1,7744	0,7744	1,7697	-0,27	1,7832	0,50	1,7744	0,00
12,5	0,4773	1,7822	0,7822	1,7778	-0,25	1,7909	0,49	1,7823	0,00
13	0,47809	1,7895	0,7895	1,7853	-0,23	1,7980	0,48	1,7896	0,01
13,5	0,47882	1,7963	0,7963	1,7924	-0,22	1,8047	0,47	1,7965	0,01
14	0,47950	1,8027	0,8027	1,7990	-0,20	1,8110	0,46	1,8029	0,01
14,5	0,48014	1,8087	0,8087	1,8052	-0,19	1,8168	0,45	1,8090	0,02
15	0,48075	1,8143	0,8143	1,8110	-0,18	1,8224	0,44	1,8147	0,02
15,5	0,48131	1,8196	0,8196	1,8165	-0,17	1,8275	0,43	1,8200	0,02
16	0,48185	1,8247	0,8247	1,8217	-0,16	1,8324	0,43	1,8251	0,02
16,5	0,48235	1,8294	0,8294	1,8266	-0,15	1,8371	0,42	1,8299	0,03
17	0,48283	1,8339	0,8339	1,8313	-0,14	1,8415	0,41	1,8345	0,03
17,5	0,48328	1,8382	0,8382	1,8357	-0,14	1,8456	0,40	1,8388	0,03
18	0,48371	1,8422	0,8422	1,8398	-0,13	1,8496	0,40	1,8429	0,03
18,5	0,48411	1,8461	0,8461	1,8438	-0,12	1,8533	0,39	1,8468	0,04
19	0,48450	1,8498	0,8498	1,8476	-0,12	1,8569	0,38	1,8505	0,04
19,5	0,48487	1,8533	0,8533	1,8512	-0,11	1,8603	0,38	1,8540	0,04
20	0,48522	1,8566	0,8566	1,8546	-0,11	1,8635	0,37	1,8574	0,04
21	0,48588	1,8629	0,8629	1,8611	-0,10	1,8695	0,36	1,8637	0,04
22	0,48648	1,8686	0,8686	1,8669	-0,09	1,8751	0,35	1,8694	0,04
23	0,48703	1,8739	0,8739	1,8723	-0,08	1,8802	0,34	1,8747	0,05
24	0,48754	1,8787	0,8787	1,8773	-0,08	1,8848	0,33	1,8796	0,05
25	0,48801	1,8832	0,8832	1,8819	-0,07	1,8892	0,32	1,8841	0,05
30	0,48991	1,9015	0,9015	1,9006	-0,05	1,9067	0,27	1,9025	0,05
40	0,49234	1,9250	0,9250	1,9245	-0,03	1,9292	0,22	1,9259	0,05
50	0,49383	1,9395	0,9395	1,9391	-0,02	1,9429	0,18	1,9403	0,04
100	0,49687	1,9692	0,9692	1,9691	0,00	1,9710	0,09	1,9697	0,03
250	0,49873	1,9875	0,9875	1,9875	0,00	1,9883	0,04	1,9878	0,01
500	0,49937	1,9937	0,9937	1,9937	0,00	1,9941	0,02	1,9939	0,01
750	0,49958	1,9958	0,9958	1,9958	0,00	1,9961	0,01	1,9959	0,00
1000	0,49968	1,9969	0,9969	1,9969	0,00	1,9971	0,01	1,9969	0,00

5.5.5 Correntes de pico – Valores calculados no Caso-estudo

No caso-estudo, para a determinação das correntes de curto-circuito pelo Método Abrangente, é utilizada a equação (2.10) em $t=0,5$ ciclos.

A “ANSI” define correntes de pico a partir da equação (2.10), entretanto, a “IEEE std 551-2006” as determina por meio do conjunto de equações (2.14) e (2.15). Os valores de X/R equivalentes são calculados por meio de reduções separadas para as reatâncias e resistências.

Já a “IEC”, apresenta as equações (4.41) e (4.42) para cálculos da corrente de pico em sistemas radiais. No caso de sistemas em malha são prescritos três métodos para a determinação da relação X/R a ser utilizada nos cálculos. Tais técnicas são as apresentadas no Capítulo 4:

- Técnica do X/R dominante;
- Técnica do X/R equivalente;
- Técnica da frequência equivalente.

O método utilizado pelo software empregado SKM, IEC_Fault, [SKM, PTW Short-circuit IEC_Fault] é o da técnica do X/R equivalente.

A Tabela 5.18 apresenta os valores calculados de corrente de pico para cada uma das normas, notando-se que não há valores de corrente de pico para as barras de baixa tensão pela “ANSI”, a qual utiliza outro método de calculo para sua obtenção.

A coluna 6 da tabela 5.18 apresenta os valores calculados conforme a norma “ANSI” por meio da equação (2.10) pata $t=0,5$ ciclos. Para efeito de comparação, a coluna 8 mostra os valores obtidos com a utilização da equação (2.15), recomendada pela “IEEE std-551-2006”.

Tabela 5.18 - Correntes de curto-circuito de Pico – Abrangente – “ANSI” – “IEC”

SISTEMA		ABRANGENTE		ANSI					IEC		
Barra	kV	X/R	I_{pico} (kA) (1)	X/R	I_{pico} (kA) (2)	DESVIO %	I_{pico} (kA) (3)	DESVIO %	X/R	I_b (kA) (4)	DESVIO %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
01-138 KV	138	4,50	20,54	5,14	20,99	2,19	21,25	3,46	4,42	21,05	2,48
04-QDAT-C	13,8	16,40	23,83	17,15	23,19	-2,69	23,24	-2,48	14,08	25,92	8,77
06-700PMT005	13,8	16,60	21,96	17,29	22,02	0,27	22,06	0,46	16,13	24,24	10,38
20-700PMT003E	13,8	13,50	22,77	13,86	22,12	-2,85	22,16	-2,68	12,20	24,94	9,53
21-707PMT002	13,8	9,80	21,51	10,20	20,97	-2,51	21,05	-2,14	9,71	23,75	10,41
211-707PMT004	3,80	11,80	16,52	13,30	16,66	0,85	16,69	1,03	10,99	18,02	9,08
22-707PMT051	13,8	13,10	65,17	20,47	54,09	-17,00	54,17	-16,88	7,75	66,82	2,53
221-700CCMZ	3,8	8,00	11,29	9,49	11,02	-2,39	11,08	-1,86	6,58	12,11	7,26
222-700BT052	0,38	8,60	138,03	10,56	-	-	142,52	3,25	5,59	137,30	-0,53
223-700CCMMH	0,38	8,60	138,87	10,54	-	-	143,38	3,25	5,59	138,19	-0,49
23-703PMT601	13,8	8,10	20,62	8,15	19,97	-3,15	20,09	-2,57	8,33	22,99	11,49
231-703BT601	0,38	8,50	137,26	10,48	-	-	141,77	3,29	5,65	136,36	-0,66
24-300PMT007	13,8	6,10	49,14	17,95	42,57	-13,37	43,12	-12,25	5,38	52,92	7,69
241-300BT007	0,38	7,50	122,91	7,60	-	-	124,02	0,90	7,41	134,62	9,53
242-300BT008	0,38	7,50	124,06	7,59	-	-	125,15	0,88	7,35	135,84	9,50
243-300BT009	0,38	7,50	123,23	7,59	-	-	124,32	0,88	7,41	134,97	9,53
25-300PMT010	13,8	7,50	57,16	10,43	48,42	-15,29	48,59	-14,99	5,92	60,27	5,44
251-300BT010	0,38	7,50	121,94	7,64	-	-	122,98	0,85	7,41	133,53	9,50
252-300BT011	0,38	7,50	122,94	7,64	-	-	124,00	0,86	7,41	134,60	9,48
253-300BT012	0,38	7,50	123,11	7,64	-	-	124,16	0,85	7,41	134,78	9,48
254-300BT006	0,38	6,20	72,91	7,27	-	-	75,49	3,54	4,85	79,45	8,97
26-300PMT001	13,8	12,60	63,11	19,32	52,78	-16,37	52,87	-16,23	7,69	64,91	2,85
261-CCM-MA-A	3,80	15,50	47,160	17,51	45,39	-3,75	44,70	-5,22	9,26	49,31	4,56
2611-CCMSIEMEN	3,80	8,50	42,99	9,43	41,66	-3,09	41,83	-2,70	6,71	45,92	6,82
2612-PILAO-1-2	3,80	3,80	33,11	8,45	33,60	1,48	37,43	13,05	3,86	37,44	13,08
2613-PILAO-3-4	3,80	3,80	33,58	4,75	34,47	2,65	34,96	4,11	3,80	37,95	13,01
262-CCM-MA-B	3,80	15,80	48,18	17,68	47,14	-2,16	47,24	-1,95	9,17	50,26	4,32
27-300PMT003	13,8	5,70	52,00	7,67	44,71	-14,02	44,97	-13,52	5,03	55,89	7,48
271-300BT003	0,38	7,40	120,88	7,53	-	-	121,95	0,89	7,30	132,49	9,60
272-300BT004	0,38	7,40	120,55	7,53	-	-	121,62	0,89	7,30	132,02	9,51
273-300BT005	0,38	7,40	122,03	7,53	-	-	124,17	1,75	7,30	133,70	9,56
28-305PMT001	13,8	2,90	38,31	3,63	34,61	-9,66	35,35	-7,73	3,03	44,29	15,61
281-305BT001	0,38	5,80	90,25	6,03	-	-!	91,77	1,68	5,62	97,75	8,31
29-917PMT001	13,8	2,40	34,61	2,93	30,72	-11,24	31,56	-8,81	2,63	40,15	16,01
291-918BT067	0,38	7,20	135,61	8,17	-	-	138,91	2,43	5,18	136,26	0,48
292-918BT065	0,38	4,80	36,92	5,04	-	-	37,77	2,30	4,83	40,56	9,86
293-918BT066	0,38	5,80	71,59	5,99	-	-	72,71	1,56	4,65	73,36	2,47
30-781PMT001	13,8	8,90	20,73	9,19	20,18	-2,65	20,26	-2,27	9,09	22,99	10,90
301-718BT001	0,44	7,50	85,29	8,03	-	-	86,70	1,65	6,76	91,50	7,28
31-702PMT001	13,8	5,60	52,41	7,51	45,02	-14,10	45,30	-13,57	4,90	56,33	7,48
311-702QGBT002	0,38	4,70	34,67	4,72	-	-	35,18	1,47	4,69	38,06	9,78
32-707PMT001	13,8	6,60	56,03	9,08	47,72	-14,83	47,92	-14,47	5,41	59,48	6,16
321-707PMT003	3,80	7,20	14,08	8,74	14,35	1,92	14,40	2,27	6,94	15,31	8,74
40-700PMT003G	13,8	15,50	66,83	25,65	55,29	-17,27	55,34	-17,19	8,26	68,19	2,04
50-700PMT004E	13,8	16,20	67,48	27,93	55,81	-17,29	55,87	-17,21	8,40	68,94	2,16
51-509PMT001	13,8	3,80	45,63	4,80	39,46	-13,52	40,00	-12,34	3,73	50,52	10,72
511-509CCMME	0,38	7,90	145,91	9,90	-	-	151,39	3,76	5,43	146,09	0,12
512-509CCMMF	0,38	7,90	145,91	9,90	-	-	151,39	3,76	5,43	146,09	0,12
52-507PMT001	13,8	2,20	32,52	2,69	29,21	-10,18	30,07	-7,53	2,46	38,11	17,19
521-507CCMMC	0,38	6,40	138,40	8,19	-	-	145,20	4,91	5,05	141,35	2,13

Tabela 5.18 - Correntes de curto-circuito de Pico – Abrangente – “ANSI” – “IEC” - continuação

SISTEMA		ABRANGENTE		ANSI					IEC		
Barra	kV	X/R	I_{pico} (kA) (1)	X/R	I_{pico} (kA) (2)	DESVIO %	I_{pico} (kA) (3)	DESVIO %	X/R	I_p (kA) (4)	DESVIO %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
53-722PMT001	13,8	4,10	45,85	5,33	40,17	-12,39	40,63	-11,38	3,97	50,66	10,49
531-722CCM01	0,38	7,30	139,91	7,46	-	-	145,34	3,88	6,85	155,65	11,25
532-722CCM02	0,38	7,30	143,91	7,46	-	-	145,34	0,99	6,85	155,65	8,16
533-722CCM03	0,38	7,30	143,91	7,46	-	-	145,34	0,99	6,85	155,65	8,16
54-709PMT001	13,8	2,00	30,24	2,39	26,91	-11,01	27,78	-8,13	2,27	35,74	18,19
541-709CCM502	0,38	7,20	134,82	9,56	-	-	141,38	4,87	5,08	135,04	0,16
542-709CCM503	0,38	7,10	134,56	9,00	-	-	140,22	4,21	5,05	134,23	-0,25
543-709CCM504	0,38	7,10	134,56	9,00	-	-	140,22	4,21	5,05	134,23	-0,25
55-510PMT001	13,8	9,00	56,86	12,46	48,02	-15,55	48,15	-15,32	6,58	59,59	4,80
551-510CCMMH	0,38	7,50	130,44	7,65	-	-	124,43	-4,61	7,41	142,41	9,18
552-510CCMMI	0,38	7,50	122,93	7,65	-	-	123,95	0,83	7,41	134,49	9,40
554-511CCMML	0,38	7,30	127,43	7,39	-	-	128,40	0,76	6,06	133,21	4,54
555-511CCMMN	0,38	7,30	127,43	7,39	-	-	128,40	0,76	6,06	133,21	4,54
556-511CCMMO	0,38	8,30	135,49	10,21	-	-	139,99	3,32	5,78	136,76	0,94
557-511CCMMP	0,38	7,40	111,78	7,43	-	-	112,63	0,76	7,25	122,61	9,69
56-721PMT001	13,8	3,80	45,52	4,97	39,87	-12,41	40,39	-11,27	3,73	50,47	10,87
561-721PMT002	3,80	7,80	11,04	9,11	10,92	-1,09	10,97	-0,63	6,90	12,04	9,06
562-721PBT001	0,38	10,30	154,65	11,28	-	-	156,95	1,49	7,30	159,45	3,10
563-710PBT020	0,38	7,00	101,90	7,03	-	-	102,80	0,88	6,94	112,43	10,33
57-709PMT002	13,8	2,50	35,17	3,08	31,69	-9,89	32,51	-7,56	2,68	40,80	16,01
571-709PBT011	0,38	6,60	122,69	6,69	-	-	124,06	1,12	6,49	134,42	9,56
58-513PMT001	13,8	12,00	63,22	18,00	52,54	-16,89	52,62	-16,77	7,46	65,21	3,15
581-513CCMMR	0,40	11,50	171,51	12,68	-	-	173,80	1,34	7,35	173,16	0,96
582-513CCMMS	0,40	11,50	171,51	12,68	-	-	173,80	1,34	7,35	173,16	0,96
583-513CCMMT	0,40	11,50	171,51	12,68	-	-	173,80	1,34	7,35	173,16	0,96
584-513CCMML	0,40	6,70	83,77	6,70	-	-	84,50	0,87	6,58	92,08	9,92
585-513CCMMV	0,40	11,50	171,51	12,68	-	-	173,80	1,34	7,35	173,16	0,96
59-719PMT001	13,8	6,40	55,21	8,89	47,09	-14,71	47,30	-14,33	5,35	58,73	6,38
591-719PBT001	0,40	10,90	169,87	11,31	-	-	171,23	0,80	6,49	168,02	-1,09
592-719CCM001	3,80	12,80	28,22	14,48	28,06	-	28,11	-0,39	8,85	30,54	8,22
60-702PMT001	13,8	11,50	63,63	17,54	53,08	-16,58	53,16	-16,45	7,30	65,59	3,08
601-702PBT013A	0,38	6,30	90,42	7,37	-	-	93,48	3,38	5,10	93,08	2,94
602-702PBT013B	0,38	6,00	89,24	6,16	-	-	90,36	1,26	5,10	92,69	3,87
603-702PBT013C	0,38	6,30	90,05	7,38	-	-	93,10	3,39	5,10	92,69	2,93
70-700PMT004G	13,8	16,20	67,49	27,95	55,81	-17,31	55,87	-17,22	8,40	69,40	2,83

(1)(2)Conforme equação (2.10) - (3)Conforme equações (2.14) e (2.15) – (4) Conforme equações (4.41) e (4.42)

A uma breve análise da tabela 5.18 revela valores de correntes de curto-circuito de pico conservativas na média tensão para os cálculos conforme a norma “IEC”. A análise para de corrente de curto-circuito de baixa tensão, revela, na maioria dos casos, valores conservativos para os cálculos conforme a norma “IEC”.

5.5.6 Correntes de interrupção

Correntes de interrupção são as correntes verificadas durante o momento da separação dos contatos de um disjuntor. A “ANSI”, por meio da tabela 3.1 prescreve ajustes iniciais nas reatâncias das máquinas para realização dos cálculos.

As correntes assimétricas são obtidas através de curvas parametrizadas que consideram o tipo de construção do disjuntor, tempos de separação dos contatos e relação X/R . Utilizam-se dois sets de curvas; um para faltas alimentadas por fontes locais e outro com fontes remotas. A aplicação das curvas, assim como outros conceitos correlatos foi detalhada no Capítulo-3.

A “IEC” não recomenda correções prévias nas reatâncias das máquinas para modelagem do decremento “ ac ”. Uma simplificação é introduzida pela “IEC”, utilizando corrente inicial I_k' como sendo corrente de interrupção I_b . Este procedimento força a corrente de interrupção a um valor superior ao real.

A “IEC” também prescreve um valor mais preciso da corrente de interrupção I_b para sistemas “*em malha*” por meio da equação (4.54) . O software de cálculo [SKM, PTW Short-circuit IEC_Fault] foi programado para utilização da equação (4.54) para cálculos de sistemas em malha.

Correntes de interrupção assimétricas são constituídas pelas componentes “ ac ” e “ dc ” da corrente de falta. As correntes de componente “ dc ”, conforme “IEC”, foram abordadas no capítulo 4.

A tabela 5.19 exemplifica os multiplicadores aplicados às reatâncias de máquinas para cálculo das correntes de interrupção simétricas em cada norma. Note-se que, para a “ANSI”, os valores são obtidos da tabela 3.1. Na “IEC” os valores de μ e q são obtidos a partir de dois conjuntos de equações (4.23) e (4.37), respectivamente.

Tabela 5.19 - Multiplicadores de reatâncias de máquinas para faltas nos terminais.

MÁQUINA ROTATIVA	ANSI	IEC			
		0,02s	0,05s	0,10s	0,25s
Gerador TG2	1,0	1,08	1,17	1,23	1,33
Motor síncrono 707C5001 1100 HP	1,5	1,10	1,23	1,34	1,47
Motor de indução MA1401 1609 HP	1,5	1,37	2,20	3,90	30,06

As tabelas 5.20, 5.21 e 5.22 apresentam o resumo das correntes de interrupção em média tensão calculadas em 2, 3 e 5 ciclos, respectivamente. Nas colunas 9 e 13 são mostrados os desvios dos cálculos da “ANSI” e “IEC” em relação ao método Abrangente, onde desvios positivos são conservativos. Notam-se desvios máximos da ordem de 37% para os cálculos conforme “ANSI” e da ordem de 23% para os cálculos conforme “IEC” para cálculo de 2 ciclos e, desvios inferiores nos cálculos de 3 e 5 ciclos.

Tais erros eram previsíveis, uma vez que a equação empregada pelo método Abrangente, (2.17), não leva em consideração características das contribuições como local-remota ou próximo-longe da geração ou contribuições “*ac*” e “*dc*” da corrente de curto-circuito.

Tabela 5.20 - Correntes de interrupção calculadas em 2 ciclos conforme “ANSI” e “IEC”

SISTEMA		ABRANGENTE			ANSI				IEC			
Barra	kV	X/R	E/Z (kA)	Sim 2 ciclos (kA)	X/R	E/Z (kA)	Sim 2 ciclos (kA)	DESVIO	X/R	I_k'' (kA)	I_b Sim 2 ciclos (kA)	DESVIO
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
01-138 KV	138	4,50	9,72	9,76	5,13	9,56	9,56	-2,05	4,42	9,88	9,74	-0,20
04-QDAT-C	13,8	16,40	9,23	11,05	17,25	8,75	8,75	-20,81	14,08	10,10	9,95	-9,95
06-700PMT005	13,8	16,60	8,50	10,20	17,27	8,48	8,48	-16,86	16,13	9,34	9,34	-8,43
20-700PMT003E	13,8	13,50	8,99	10,29	13,88	8,51	8,51	-17,30	12,20	9,94	9,64	-6,32
21-707PMT002	13,8	9,80	8,82	9,47	10,19	8,35	8,35	-11,83	9,71	9,66	9,51	0,42
211-707PMT004	3,80	11,80	6,61	7,35	12,49	6,07	6,07	-17,41	10,99	7,21	6,98	-5,03
22-707PMT051	13,8	13,10	25,79	29,33	22,27	18,14	18,39	-37,30	7,75	28,01	24,10	-17,83
221-700CCMZ	3,8	8,00	4,77	4,97	8,06	3,92	3,92	-21,13	6,58	5,22	4,69	-5,63
23-703PMT601	13,8	8,10	8,69	9,07	8,23	8,22	8,22	-9,37	8,33	9,52	9,36	3,20
24-300PMT007	13,8	6,10	21,74	22,09	8,79	16,02	16,02	-27,48	5,38	23,67	21,09	-4,53
25-300PMT010	13,8	7,50	24,36	25,20	11,46	17,42	17,42	-30,87	5,92	26,47	23,09	-8,37
26-300PMT001	13,8	12,60	25,09	28,30	20,82	17,79	17,86	-36,89	7,69	27,26	23,62	-16,54
261-CCM-MA-A	3,80	15,50	18,36	21,69	16,64	14,57	14,57	-32,83	9,26	20,12	16,82	-22,45
2611-CCMSIEMEN	3,80	8,50	17,97	18,88	9,61	14,32	14,32	-24,15	6,71	19,71	16,61	-12,02
2612-PILAO-1-2	3,80	3,80	16,28	16,30	4,66	13,17	13,17	-19,20	3,86	17,98	15,45	-5,21
2613-PILAO-3-4	3,80	3,80	16,56	16,58	4,51	13,79	13,79	-16,83	3,80	18,29	15,67	-5,49
262-CCM-MA-B	3,80	15,80	18,72	22,21	17,11	15,35	15,35	-30,89	9,17	20,53	17,07	-23,14
27-300PMT003	13,8	5,70	23,29	23,57	8,42	16,88	16,88	-28,38	5,03	25,33	22,23	-5,69
28-305PMT001	13,8	2,90	20,57	20,57	4,00	15,51	15,51	-24,60	3,03	22,62	20,49	-0,39
29-917PMT001	13,8	2,40	19,21	19,21	3,24	14,69	14,69	-23,53	2,63	21,28	19,42	1,09
30-781PMT001	13,8	8,90	8,60	9,10	9,20	8,16	8,16	-10,33	9,09	9,43	9,26	1,76
31-702PMT001	13,8	5,60	23,60	23,86	8,35	17,06	17,06	-28,50	4,90	25,66	22,62	-5,20
32-707PMT001	13,8	6,60	24,47	25,01	10,05	17,50	17,50	-30,03	5,41	26,58	23,24	-7,08
321-707PMT003	3,80	7,20	6,05	6,23	8,18	5,68	5,68	-8,83	6,94	6,53	6,39	2,57
40-700PMT003G	13,8	15,50	26,02	30,73	27,67	18,26	19,30	-37,19	8,26	28,27	24,29	-20,96
50-700PMT004E	13,8	16,20	26,17	31,23	30,18	18,35	19,72	-36,86	8,40	28,43	24,41	-21,84
51-509PMT001	13,8	3,80	22,41	22,44	5,35	16,43	16,43	-26,78	3,73	24,48	21,81	-2,81
52-507PMT001	13,8	2,20	18,50	18,50	2,98	14,36	14,36	-22,38	2,46	20,59	18,97	2,54
53-722PMT001	13,8	4,10	22,15	22,20	5,76	16,29	16,29	-26,62	3,97	24,18	21,46	-3,33
54-709PMT001	13,8	2,00	17,60	17,60	2,64	13,74	13,74	-21,93	2,27	19,71	18,26	3,75
55-510PMT001	13,8	9,00	23,59	24,99	13,69	16,98	16,98	-32,05	6,58	25,63	22,44	-10,20
56-721PMT001	13,8	3,80	22,39	22,42	5,44	16,45	16,45	-26,63	3,73	24,46	21,81	-2,72
561-721PMT002	3,80	7,80	4,68	4,86	8,01	4,15	4,15	-14,61	6,90	5,14	4,87	0,21
57-709PMT002	13,8	2,50	19,45	19,45	3,39	14,93	14,93	-23,24	2,68	21,52	19,69	1,23
58-513PMT001	13,8	12,00	25,25	28,19	19,75	17,85	17,85	-36,68	7,46	27,42	23,67	-16,03
59-719PMT001	13,8	6,40	24,19	24,66	9,73	17,34	17,34	-29,68	5,35	26,29	22,99	-6,77
592-719CCM001	3,80	12,80	11,43	12,94	13,57	9,42	9,42	-27,20	8,85	12,55	11,13	-13,99
60-702PMT001	13,8	11,50	25,56	28,29	19,27	18,04	18,04	-36,23	7,30	27,76	23,96	-15,31
70-700PMT004G	13,8	16,20	26,17	31,23	30,21	18,35	19,72	-36,86	8,40	28,43	24,42	-21,81

Tabela 5.21 - Correntes de interrupção calculadas em 3 ciclos conforme “ANSI” e “IEC”

SISTEMA		ABRANGENTE			ANSI				IEC			
Barra	kV	X/R	E/Z (kA)	Sim 3 ciclos (kA)	X/R	E/Z (kA)	Sim 3 ciclos (kA)	DESVIO	X/R	I_k'' (kA)	I_b Sim 3 ciclos (kA)	DESVIO
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
01-138 KV	138	4,50	9,72	9,72	5,13	9,56	9,56	-1,65	4,42	9,88	9,73	0,10
04-QDAT-C	13,8	16,40	9,23	10,11	17,25	8,75	8,92	-11,77	14,08	10,10	9,89	-2,18
06-700PMT005	13,8	16,60	8,50	9,34	17,27	8,48	8,65	-7,39	16,13	9,34	9,34	0,00
20-700PMT003E	13,8	13,50	8,99	9,52	13,88	8,51	8,51	-10,61	12,20	9,94	9,56	0,42
21-707PMT002	13,8	9,80	8,82	9,01	10,19	8,35	8,35	-7,33	9,71	9,66	9,45	4,88
211-707PMT004	3,80	11,80	6,61	6,88	12,49	6,07	6,07	-11,77	10,99	7,21	6,98	1,45
22-707PMT051	13,8	13,10	25,79	27,20	22,27	18,14	18,83	-30,77	7,75	28,01	22,66	-16,69
221-700CCMZ	3,8	8,00	4,77	4,81	8,06	3,92	3,92	-18,50	6,58	5,22	4,49	-6,65
23-703PMT601	13,8	8,10	8,69	8,77	8,23	8,22	8,22	-6,27	8,33	9,52	9,29	5,93
24-300PMT007	13,8	6,10	21,74	21,78	8,79	16,02	16,02	-26,45	5,38	23,67	20,14	-7,53
25-300PMT010	13,8	7,50	24,36	24,52	11,46	17,42	17,42	-28,96	5,92	26,47	21,85	-10,89
26-300PMT001	13,8	12,60	25,09	26,32	20,82	17,79	18,30	-30,47	7,69	27,26	22,28	-15,35
261-CCM-MA-A	3,80	15,50	18,36	19,91	16,64	14,57	14,68	-26,27	9,26	20,12	15,70	-21,15
2611-CCMSIEMEN	3,80	8,50	17,97	18,18	9,61	14,32	14,32	-21,23	6,71	19,71	15,56	-14,41
2612-PILAO-1-2	3,80	3,80	16,28	16,28	4,66	13,17	13,17	-19,10	3,86	17,98	14,58	-10,44
2613-PILAO-3-4	3,80	3,80	16,56	16,56	4,51	13,79	13,79	-16,73	3,80	18,29	14,77	-10,81
262-CCM-MA-B	3,80	15,80	18,72	20,37	17,11	15,35	15,52	-23,81	9,17	20,53	15,87	-22,09
27-300PMT003	13,8	5,70	23,29	23,32	8,42	16,88	16,88	-27,62	5,03	25,33	21,23	-8,96
28-305PMT001	13,8	2,90	20,57	20,57	4,00	15,51	15,51	-24,60	3,03	22,62	19,70	-4,23
29-917PMT001	13,8	2,40	19,21	19,21	3,24	14,69	14,69	-23,53	2,63	21,28	18,74	-2,45
30-781PMT001	13,8	8,90	8,60	8,72	9,20	8,16	8,16	-6,42	9,09	9,43	9,20	5,50
31-702PMT001	13,8	5,60	23,60	23,63	8,35	17,06	17,06	-27,80	4,90	25,66	21,50	-9,01
32-707PMT001	13,8	6,60	24,47	24,55	10,05	17,50	17,50	-28,72	5,41	26,58	22,01	-10,35
321-707PMT003	3,80	7,20	6,05	6,08	8,18	5,68	5,68	-6,58	6,94	6,53	6,34	4,28
40-700PMT003G	13,8	15,50	26,02	28,21	27,67	18,26	19,80	-29,81	8,26	28,27	22,84	-19,04
50-700PMT004E	13,8	16,20	26,17	28,61	30,18	18,35	20,25	-29,22	8,40	28,43	22,93	-19,85
51-509PMT001	13,8	3,80	22,41	22,41	5,35	16,43	16,43	-26,68	3,73	24,48	20,80	-7,18
52-507PMT001	13,8	2,20	18,50	18,50	2,98	14,36	14,36	-22,38	2,46	20,59	18,36	-0,76
53-722PMT001	13,8	4,10	22,15	22,15	5,76	16,29	16,29	-26,46	3,97	24,18	20,47	-7,58
54-709PMT001	13,8	2,00	17,60	17,60	2,64	13,74	13,74	-21,93	2,27	19,71	17,70	0,57
55-510PMT001	13,8	9,00	23,59	23,95	13,69	16,98	16,98	-29,10	6,58	25,63	21,27	-11,19
56-721PMT001	13,8	3,80	22,39	22,39	5,44	16,45	16,45	-26,53	3,73	24,46	20,82	-7,01
561-721PMT002	3,80	7,80	4,68	4,72	8,01	4,15	4,15	-12,08	6,90	5,14	4,75	0,64
57-709PMT002	13,8	2,50	19,45	19,45	3,39	14,93	14,93	-23,24	2,68	21,52	19,02	-2,21
58-513PMT001	13,8	12,00	25,25	26,32	19,75	17,85	18,27	-30,59	7,46	27,42	22,26	-15,43
59-719PMT001	13,8	6,40	24,19	24,26	9,73	17,34	17,34	-28,52	5,35	26,29	21,78	-10,22
592-719CCM001	3,80	12,80	11,43	12,02	13,57	9,42	9,42	-21,63	8,85	12,55	10,50	-12,65
60-702PMT001	13,8	11,50	25,56	26,51	19,27	18,04	18,42	-30,52	7,30	27,76	22,57	-14,86
70-700PMT004G	13,8	16,20	26,17	28,61	30,21	18,35	20,25	-29,22	8,40	28,43	22,96	-19,75

Tabela 5.22 - Correntes de interrupção calculadas em 5 ciclos conforme “ANSI” e “IEC”

SISTEMA		ABRANGENTE			ANSI				IEC			
Barra	kV	X/R	E/Z (kA)	Sim 5 ciclos (kA)	X/R	E/Z (kA)	Sim 5 ciclos (kA)	DESVIO	X/R	I_k'' (kA)	I_b Sim 5 ciclos (kA)	DESVIO
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
01-138 KV	138	4,50	9,72	9,72	5,13	9,56	9,56	-1,65	4,42	9,88	9,71	-0,10
04-QDAT-C	13,8	16,40	9,23	9,43	17,25	8,75	8,93	-5,30	14,08	10,10	9,84	4,35
06-700PMT005	13,8	16,60	8,50	8,69	17,27	8,48	8,67	-0,23	16,13	9,34	9,34	7,48
20-700PMT003E	13,8	13,50	8,99	9,08	13,88	8,51	8,51	-6,28	12,20	9,94	9,49	4,52
21-707PMT002	13,8	9,80	8,82	8,83	10,19	8,35	8,35	-5,44	9,71	9,66	9,40	6,46
211-707PMT004	3,80	11,80	6,61	6,64	12,49	6,07	6,07	-8,58	10,99	7,21	6,82	2,71
22-707PMT051	13,8	13,10	25,79	26,00	22,27	18,14	18,69	-28,12	7,75	28,01	21,34	-17,92
221-700CCMZ	3,8	8,00	4,77	4,77	8,06	3,92	3,92	-17,82	6,58	5,22	4,31	-9,64
23-703PMT601	13,8	8,10	8,69	8,69	8,23	8,22	8,22	-5,41	8,33	9,52	9,22	6,10
24-300PMT007	13,8	6,10	21,74	21,74	8,79	16,02	16,02	-26,31	5,38	23,67	19,24	-11,50
25-300PMT010	13,8	7,50	24,36	24,37	11,46	17,42	17,42	-28,52	5,92	26,47	20,70	-15,06
26-300PMT001	13,8	12,60	25,09	25,26	20,82	17,79	18,22	-27,87	7,69	27,26	21,05	-16,67
261-CCM-MA-A	3,80	15,50	18,36	18,68	16,64	14,57	14,72	-21,20	9,26	20,12	14,64	-21,63
2611-CCMSIEMEN	3,80	8,50	17,97	17,98	9,61	14,32	14,32	-20,36	6,71	19,71	14,58	-18,91
2612-PILAO-1-2	3,80	3,80	16,28	16,28	4,66	13,17	13,17	-19,10	3,86	17,98	13,77	-15,42
2613-PILAO-3-4	3,80	3,80	16,56	16,56	4,51	13,79	13,79	-16,73	3,80	18,29	13,92	-15,94
262-CCM-MA-B	3,80	15,80	18,72	19,07	17,11	15,35	15,54	-18,51	9,17	20,53	14,76	-22,60
27-300PMT003	13,8	5,70	23,29	23,29	8,42	16,88	16,88	-27,52	5,03	25,33	20,21	-13,22
28-305PMT001	13,8	2,90	20,57	20,57	4,00	15,51	15,51	-24,60	3,03	22,62	18,97	-7,78
29-917PMT001	13,8	2,40	19,21	19,21	3,24	14,69	14,69	-23,53	2,63	21,28	18,10	-5,78
30-781PMT001	13,8	8,90	8,60	8,61	9,20	8,16	8,16	-5,23	9,09	9,43	9,14	6,16
31-702PMT001	13,8	5,60	23,60	23,60	8,35	17,06	17,06	-27,71	4,90	25,66	20,47	-13,26
32-707PMT001	13,8	6,60	24,47	24,47	10,05	17,50	17,50	-28,48	5,41	26,58	20,88	-14,67
321-707PMT003	3,80	7,20	6,05	6,05	8,18	5,68	5,68	-6,12	6,94	6,53	6,29	3,97
40-700PMT003G	13,8	15,50	26,02	26,47	27,67	18,26	19,38	-26,79	8,26	28,27	21,50	-18,78
50-700PMT004E	13,8	16,20	26,17	26,71	30,18	18,35	19,83	-25,76	8,40	28,43	21,58	-19,21
51-509PMT001	13,8	3,80	22,41	22,41	5,35	16,43	16,43	-26,68	3,73	24,48	19,88	-11,29
52-507PMT001	13,8	2,20	18,50	18,50	2,98	14,36	14,36	-22,38	2,46	20,59	17,79	-3,84
53-722PMT001	13,8	4,10	22,15	22,15	5,76	16,29	16,29	-26,46	3,97	24,18	19,56	-11,69
54-709PMT001	13,8	2,00	17,60	17,60	2,64	13,74	13,74	-21,93	2,27	19,71	17,18	-2,39
55-510PMT001	13,8	9,00	23,59	23,61	13,69	16,98	16,98	-28,08	6,58	25,63	20,18	-14,53
56-721PMT001	13,8	3,80	22,39	22,39	5,44	16,45	16,45	-26,53	3,73	24,46	19,92	-11,03
561-721PMT002	3,80	7,80	4,68	4,68	8,01	4,15	4,15	-11,32	6,90	5,14	4,63	-1,07
57-709PMT002	13,8	2,50	19,45	19,45	3,39	14,93	14,93	-23,24	2,68	21,52	18,39	-5,45
58-513PMT001	13,8	12,00	25,25	25,38	19,75	17,85	18,21	-28,25	7,46	27,42	20,97	-17,38
59-719PMT001	13,8	6,40	24,19	24,19	9,73	17,34	17,34	-28,32	5,35	26,29	20,66	-14,59
592-719CCM001	3,80	12,80	11,43	11,51	13,57	9,42	9,42	-18,16	8,85	12,55	9,91	-13,90
60-702PMT001	13,8	11,50	25,56	25,67	19,27	18,04	18,37	-28,44	7,30	27,76	21,28	-17,10
70-700PMT004G	13,8	16,20	26,17	26,71	30,21	18,35	19,84	-25,72	8,40	28,43	21,61	-19,09

5.5.7 Correntes de regime

Correntes de curto-circuito de regime são consideradas pelas duas normas como aquelas que permanecem após a extinção dos efeitos transitórios. A “ANSI” recomenda uma redução que compreenda a concessionária e os geradores representados por sua reatância transitória.

A norma “IEC”, para curto-circuitos próximos à geração, alimentados por um único gerador, a corrente de regime I_k depende do sistema de excitação, da ação do regulador de tensão e das influências da saturação.

Os geradores são discriminados como de rotor cilíndrico e de pólos salientes e, consideram-se os efeitos da excitação entre níveis máximos e mínimos. A contribuição de cada gerador é função de sua corrente nominal, de multiplicadores obtidos a partir de curvas parametrizadas com a reatância saturada X_{dsat} , do tipo de excitação e do tipo de gerador.

A tabela 5.23 apresenta as tabulações das correntes de regime obtidas nos métodos Abrangente, “ANSI” e “IEC”.

Também, na tabela 5.23 são encontrados os valores das correntes de regime conforme “IEC” para quatro condições:

- Cálculo sem considerar o efeito do regulador de tensão do gerador – coluna 9.
- Cálculo (1) considerando-se o efeito de um regulador de tensão “Series-1” – coluna 10.
- Cálculo (2) considerando-se o efeito de um regulador de tensão “Series-2” – coluna 11.
- Cálculo (3) considerando-se o efeito de um regulador de tensão para correntes de regime mínimas – coluna 12.

A tabela 5.23, por praticidade, apresenta os desvios entre os métodos Abrangente e o “ANSI” e a tabela 5.24 os desvios entre os métodos Abrangente e o “IEC”.

Salienta-se que valores de desvios positivos são conservativos.

Tabela 5.23 - Correntes de curto-circuito de Regime – Abrangente – “ANSI – IEC”

SISTEMA		ABRANGENTE		ANSI			IEC				
Barra	kV	X/R	I regime (kA)	X/R	I regime (kA)	DESVIO %	X/R	I _k (kA)	I _k (kA)(1)	I _k (kA) (2)	I _k (kA) (3)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
01-138 KV	138	4,40	9,43	5,16	9,43	0,00	4,42	9,52	9,31	9,37	9,13
04-QDAT-C	13,8	16,40	8,43	17,12	8,43	0,00	14,08	9,56	9,15	9,20	9,13
06-700PMT005	13,8	16,40	8,47	17,35	8,47	0,00	16,13	9,32	9,10	9,13	9,14
20-700PMT003E	13,8	13,20	8,19	13,94	8,19	0,00	12,20	9,27	8,90	8,95	8,85
21-707PMT002	13,8	9,70	8,04	10,15	8,04	0,00	9,71	9,09	8,75	8,78	8,68
211-707PMT004	3,80	10,30	5,06	13,28	5,06	0,00	10,99	6,64	5,75	5,85	5,52
22-707PMT051	13,8	16,20	14,62	18,06	14,62	0,00	7,75	14,98	11,46	12,14	9,45
221-700CCMZ	3,8	6,80	3,48	9,83	3,48	0,00	6,58	3,81	3,21	3,37	3,38
222-700BT052	0,38	7,70	45,08	10,56	45,08	0,00	5,59	49,43	41,31	43,45	43,62
223-700CCMMH	0,38	7,70	45,42	10,54	45,42	0,00	5,59	49,79	41,61	43,77	43,93
23-703PMT601	13,8	8,10	7,92	8,39	7,92	0,00	8,33	9,43	8,63	8,68	8,54
231-703BT601	0,38	7,40	46,07	10,48	46,07	0,00	5,65	50,45	48,38	48,55	48,49
24-300PMT007	13,8	8,50	13,19	6,86	13,19	0,00	5,38	13,76	10,63	11,32	8,53
241-300BT007	0,38	7,40	44,40	7,60	44,40	0,00	7,41	48,66	40,72	42,83	42,97
242-300BT008	0,38	7,40	44,86	7,59	44,86	0,00	7,35	49,15	41,12	43,26	43,40
243-300BT009	0,38	7,40	44,53	7,53	44,53	0,00	7,41	48,80	40,83	42,96	43,09
25-300PMT010	13,8	10,40	14,14	8,85	14,14	0,00	5,92	14,59	11,21	11,90	9,15
251-300BT010	0,38	7,50	44,81	7,64	44,81	0,00	7,41	49,14	41,09	43,22	43,38
252-300BT011	0,38	7,50	45,21	7,64	45,21	0,00	7,41	49,56	41,44	43,60	43,75
253-300BT012	0,38	7,50	45,28	7,64	45,28	0,00	7,41	49,63	41,50	43,66	43,81
254-300BT006	0,38	5,90	28,27	7,27	28,27	0,00	4,85	30,75	25,93	27,28	27,37
26-300PMT001	13,8	15,30	14,32	16,83	14,32	0,00	7,69	14,73	11,28	11,96	9,25
261-CCM-MA-A	3,80	13,80	10,61	16,89	10,61	0,00	9,26	11,75	10,68	10,68	8,23
2611-CCMSIEMEN	3,80	9,30	10,47	9,29	10,47	0,00	6,71	11,58	10,60	10,60	8,19
2612-PILAO-1-2	3,80	4,80	9,83	4,91	9,83	0,00	3,86	10,59	10,15	10,15	7,92
2613-PILAO-3-4	3,80	4,80	9,83	4,86	9,83	0,00	3,80	10,86	10,15	10,15	7,92
262-CCM-MA-B	3,80	13,80	10,61	17,34	10,61	0,00	9,17	11,75	10,68	10,68	8,23
27-300PMT003	13,8	8,20	13,78	6,45	13,78	0,00	5,03	14,29	11,03	11,72	8,93
271-300BT003	0,38	7,40	44,51	7,53	44,51	0,00	7,30	48,81	40,83	42,95	43,10
272-300BT004	0,38	7,40	44,38	7,53	44,38	0,00	7,30	48,67	40,72	42,83	42,98
273-300BT005	0,38	7,40	44,97	7,53	44,97	0,00	7,30	49,30	41,23	43,38	43,53
28-305PMT001	13,8	4,30	12,90	3,04	12,90	0,00	3,03	13,57	10,65	11,36	8,40
281-305BT001	0,38	5,60	33,96	6,03	33,96	0,00	5,62	36,78	31,04	32,66	32,77
29-917PMT001	13,8	3,60	12,35	2,65	12,35	0,00	2,63	13,11	10,38	11,09	8,06
291-918BT067	0,38	6,60	45,54	8,17	45,54	0,00	5,18	49,78	41,84	44,02	44,16
292-918BT065	0,38	4,60	15,60	5,04	15,60	0,00	4,83	16,91	14,38	15,13	15,18
293-918BT066	0,38	5,50	26,03	5,99	26,03	0,00	4,65	28,37	23,97	25,22	25,30
30-781PMT001	13,8	9,00	7,85	9,14	7,85	0,00	9,09	8,86	8,54	8,59	8,45
301-718BT001	0,44	6,80	28,33	8,03	28,33	0,00	6,76	31,05	29,72	29,90	30,08
31-702PMT001	13,8	8,20	13,92	6,28	13,92	0,00	4,90	14,41	11,12	11,81	9,02
311-702QGBT002	0,38	4,80	15,99	4,72	15,99	0,00	4,69	17,32	14,72	15,49	15,54
32-707PMT001	13,8	9,40	14,20	7,59	14,20	0,00	5,41	14,64	11,28	11,97	9,20
321-707PMT003	3,80	6,70	5,09	8,64	5,09	0,00	6,94	6,07	4,88	5,18	4,95
40-700PMT003G	13,8	18,30	14,70	23,02	14,70	0,00	8,26	15,04	11,50	12,18	9,50
50-700PMT004E	13,8	19,30	14,77	25,25	14,77	0,00	8,40	15,11	11,55	12,23	9,55
51-509PMT001	13,8	5,70	13,53	4,34	13,53	0,00	3,73	14,10	10,96	11,66	8,79
511-509CCMME	0,38	7,10	48,87	7,53	48,87	0,00	5,43	53,74	44,73	47,06	47,22
512-509CCMMF	0,38	7,10	48,87	7,53	48,87	0,00	5,43	53,74	44,73	47,06	47,22
52-507PMT001	13,8	3,30	12,14	2,44	12,14	0,00	2,46	12,94	10,28	11,00	7,93
521-507CCMMC	0,38	5,90	50,51	8,19	50,51	0,00	5,05	54,77	46,08	48,49	48,62

Tabela 5.23 - Correntes de curto-circuito de Regime – Abrangente – “ANSI – IEC” - continuação

SISTEMA		ABRANGENTE		ANSI			IEC				
Barra	kV	X/R	I regime (kA)	X/R	I regime (kA) (1)	DESVIO % (1)	X/R	I _k (kA)	I _k (kA) (1)	I _k (kA) (2)	I _k (kA) (3)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
53-722PMT001	13,8	5,90	13,39	4,48	13,39	0,00	3,97	14,10	10,86	11,55	8,69
531-722CCM01	0,38	7,10	48,82	7,46	48,82	0,00	6,85	53,19	44,68	47,00	47,16
532-722CCM02	0,38	7,10	48,82	7,46	48,82	0,00	6,85	53,19	44,68	47,00	47,16
533-722CCM03	0,38	7,10	48,82	7,46	48,82	0,00	6,85	53,19	44,68	47,00	47,16
54-709PMT001	13,8	3,00	11,72	2,41	11,72	0,00	2,27	12,82	10,06	10,78	7,66
541-709CCM502	0,38	6,30	45,34	9,56	45,34	0,00	5,08	49,51	41,69	43,86	43,99
542-709CCM503	0,38	6,30	45,33	9,00	45,33	0,00	5,05	49,50	41,69	43,86	46,99
543-709CCM504	0,38	6,30	45,33	9,00	45,33	0,00	5,05	49,50	41,69	43,86	46,99
55-510PMT001	13,8	12,00	13,87	10,83	13,87	0,00	6,58	14,44	11,01	11,69	8,96
551-510CCMMH	0,38	7,60	48,99	7,65	48,99	0,00	7,41	53,38	44,77	47,10	47,26
552-510CCMMI	0,38	7,60	46,02	7,65	46,02	0,00	7,41	50,24	42,15	44,34	44,49
554-511CCMML	0,38	7,60	46,02	7,65	46,02	0,00	6,06	50,24	42,15	44,34	44,49
555-511CCMMN	0,38	7,60	46,02	7,65	46,02	0,00	6,06	50,24	42,15	44,34	44,49
556-511CCMMO	0,38	7,60	46,02	7,65	46,02	0,00	5,78	50,24	42,15	44,34	44,49
557-511CCMMP	0,38	7,60	46,02	7,65	46,02	0,00	7,25	50,24	42,15	44,34	44,49
56-721PMT001	13,8	5,70	13,53	4,28	13,53	0,00	3,73	14,22	10,96	11,66	8,79
561-721PMT002	3,80	7,10	3,87	9,39	3,87	0,00	6,90	4,26	3,58	3,77	3,77
562-721PBT001	0,38	9,60	50,17	11,28	50,17	0,00	7,30	55,02	45,87	48,25	48,31
563-710PBT020	0,38	7,10	42,51	7,03	42,51	0,00	6,94	46,54	39,09	41,13	41,27
57-709PMT002	13,8	3,70	12,53	2,59	12,53	0,00	2,68	13,45	10,47	11,19	8,17
571-709PBT011	0,38	6,60	48,99	6,69	48,99	0,00	6,49	53,37	44,90	47,23	47,38
58-513PMT001	13,8	15,20	14,45	16,21	14,45	0,00	7,46	14,89	11,36	12,04	9,33
581-513CCMMR	0,40	10,90	55,74	12,68	55,74	0,00	7,35	60,81	50,60	53,23	53,11
582-513CCMMS	0,40	10,90	55,74	12,68	55,74	0,00	7,35	60,81	50,60	53,23	53,11
583-513CCMMT	0,40	10,90	55,74	12,68	55,74	0,00	7,35	60,81	50,60	53,23	53,11
584-513CCMML	0,40	6,80	35,43	6,70	35,43	0,00	6,58	38,66	32,53	34,22	34,34
585-513CCMMV	0,40	10,90	55,74	12,68	55,74	0,00	7,35	60,81	50,60	53,23	53,11
59-719PMT001	13,8	9,00	14,09	7,61	14,09	0,00	5,35	14,63	11,21	11,90	9,13
591-719QBT001	0,40	10,30	51,98	11,31	51,98	0,00	6,49	56,83	47,33	49,79	49,70
592-719CCM001	3,80	11,20	7,34	14,43	7,34	0,00	8,85	8,12	7,36	7,36	6,37
60-702PMT001	13,8	15,00	14,58	15,24	14,58	0,00	7,30	14,99	11,46	12,13	9,43
601-702PBT013A	0,38	6,00	34,25	7,37	34,25	0,00	5,10	37,01	31,26	32,89	33,01
602-702PBT013B	0,38	6,00	34,10	6,16	34,10	0,00	5,10	36,85	31,12	32,74	32,86
603-702PBT013C	0,38	6,00	34,10	7,38	34,10	0,00	5,10	36,85	31,12	32,74	32,86
70-700PMT004G	13,8	19,30	14,77	25,27	14,77	0,00	8,40	15,13	11,55	12,26	9,55

Tabela 5.24 - Desvios nas Correntes de Regime Abrangente e "IEC".

SISTEMA		ABRANGENTE		CORRENTES DE REGIME CONFORME IEC								
Barra	kV	X/R	I regime (kA)	X/R	I _k (kA)	Desvio %	I _k (kA) (1)	Desvio %	I _k (kA) (2)	Desvio %	I _k (kA) (3)	Desvio %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
01-138 KV	138	4,40	9,43	4,42	9,52	0,95	9,31	-1,27	9,37	-0,64	9,13	-3,18
04-QDAT-C	13,8	16,40	8,43	14,08	9,56	13,40	9,15	8,54	9,20	9,13	9,13	8,30
06-700PMT005	13,8	16,40	8,47	16,13	9,32	10,04	9,10	7,44	9,13	7,79	9,14	7,91
20-700PMT003E	13,8	13,20	8,19	12,20	9,27	13,19	8,90	8,67	8,95	9,28	8,85	8,06
21-707PMT002	13,8	9,70	8,04	9,71	9,09	13,06	8,75	8,83	8,78	9,20	8,68	7,96
211-707PMT004	3,80	10,30	5,06	10,99	6,64	31,23	5,75	13,64	5,85	15,61	5,52	9,09
22-707PMT051	13,8	16,20	14,62	7,75	14,98	2,46	11,46	-21,61	12,14	-16,96	9,45	-35,36
221-700CCMZ	3,8	6,80	3,48	6,58	3,81	9,48	3,21	-7,76	3,37	-3,16	3,38	-2,87
222-700BT052	0,38	7,70	45,08	5,59	49,43	9,65	41,31	-8,36	43,45	-3,62	43,62	-3,24
223-700CCMMH	0,38	7,70	45,42	5,59	49,79	9,62	41,61	-8,39	43,77	-3,63	43,93	-3,28
23-703PMT601	13,8	8,10	7,92	8,33	9,43	19,07	8,63	8,96	8,68	9,60	8,54	7,83
231-703BT601	0,38	7,40	46,07	5,65	50,45	9,51	48,38	5,01	48,55	5,38	48,49	5,25
24-300PMT007	13,8	8,50	13,19	5,38	13,76	4,32	10,63	-19,41	11,32	-14,18	8,53	-35,33
241-300BT007	0,38	7,40	44,40	7,41	48,66	9,59	40,72	-8,29	42,83	-3,54	42,97	-3,22
242-300BT008	0,38	7,40	44,86	7,35	49,15	9,56	41,12	-8,34	43,26	-3,57	43,40	-3,25
243-300BT009	0,38	7,40	44,53	7,41	48,80	9,59	40,83	-8,31	42,96	-3,53	43,09	-3,23
25-300PMT010	13,8	10,40	14,14	5,92	14,59	3,18	11,21	-20,72	11,90	-15,84	9,15	-35,29
251-300BT010	0,38	7,50	44,81	7,41	49,14	9,66	41,09	-8,30	43,22	-3,55	43,38	-3,19
252-300BT011	0,38	7,50	45,21	7,41	49,56	9,62	41,44	-8,34	43,60	-3,56	43,75	-3,23
253-300BT012	0,38	7,50	45,28	7,41	49,63	9,61	41,50	-8,35	43,66	-3,58	43,81	-3,25
254-300BT006	0,38	5,90	28,27	4,85	30,75	8,77	25,93	-8,28	27,28	-3,50	27,37	-3,18
26-300PMT001	13,8	15,30	14,32	7,69	14,73	2,86	11,28	-21,23	11,96	-16,48	9,25	-35,41
261-CCM-MA-A	3,80	13,80	10,61	9,26	11,75	10,74	10,68	0,66	10,68	0,66	8,23	-22,43
2611-CCMSIEMEN	3,80	9,30	10,47	6,71	11,58	10,60	10,60	1,24	10,60	1,24	8,19	-21,78
2612-PILAO-1-2	3,80	4,80	9,83	3,86	10,59	7,73	10,15	3,26	10,15	3,26	7,92	-19,43
2613-PILAO-3-4	3,80	4,80	9,83	3,80	10,86	10,48	10,15	3,26	10,15	3,26	7,92	-19,43
262-CCM-MA-B	3,80	13,80	10,61	9,17	11,75	10,74	10,68	0,66	10,68	0,66	8,23	-22,43
27-300PMT003	13,8	8,20	13,78	5,03	14,29	3,70	11,03	-19,96	11,72	-14,95	8,93	-35,20
271-300BT003	0,38	7,40	44,51	7,30	48,81	9,66	40,83	-8,27	42,95	-3,50	43,10	-3,17
272-300BT004	0,38	7,40	44,38	7,30	48,67	9,67	40,72	-8,25	42,83	-3,49	42,98	-3,15
273-300BT005	0,38	7,40	44,97	7,30	49,30	9,63	41,23	-8,32	43,38	-3,54	43,53	-3,20
28-305PMT001	13,8	4,30	12,90	3,03	13,57	5,19	10,65	-17,44	11,36	-11,94	8,40	-34,88
281-305BT001	0,38	5,60	33,96	5,62	36,78	8,30	31,04	-8,60	32,66	-3,83	32,77	-3,50
29-917PMT001	13,8	3,60	12,35	2,63	13,11	6,15	10,38	-15,95	11,09	-10,20	8,06	-34,74
291-918BT067	0,38	6,60	45,54	5,18	49,78	9,31	41,84	-8,12	44,02	-3,34	44,16	-3,03
292-918BT065	0,38	4,60	15,60	4,83	16,91	8,40	14,38	-7,82	15,13	-3,01	15,18	-2,69
293-918BT066	0,38	5,50	26,03	4,65	28,37	8,99	23,97	-7,91	25,22	-3,11	25,30	-2,80
30-781PMT001	13,8	9,00	7,85	9,09	8,86	12,87	8,54	8,79	8,59	9,43	8,45	7,64
301-718BT001	0,44	6,80	28,33	6,76	31,05	9,60	29,72	4,91	29,90	5,54	30,08	6,18
31-702PMT001	13,8	8,20	13,92	4,90	14,41	3,52	11,12	-20,11	11,81	-15,16	9,02	-35,20
311-702QGBT002	0,38	4,80	15,99	4,69	17,32	8,32	14,72	-7,94	15,49	-3,13	15,54	-2,81
32-707PMT001	13,8	9,40	14,20	5,41	14,64	3,10	11,28	-20,56	11,97	-15,70	9,20	-35,21
321-707PMT003	3,80	6,70	5,09	6,94	6,07	19,25	4,88	-4,13	5,18	1,77	4,95	-2,75
40-700PMT003G	13,8	18,30	14,70	8,26	15,04	2,31	11,50	-21,77	12,18	-17,14	9,50	-35,37
50-700PMT004E	13,8	19,30	14,77	8,40	15,11	2,30	11,55	-21,80	12,23	-17,20	9,55	-35,34
51-509PMT001	13,8	5,70	13,53	3,73	14,10	4,21	10,96	-18,99	11,66	-13,82	8,79	-35,03
511-509CCMME	0,38	7,10	48,87	5,43	53,74	9,97	44,73	-8,47	47,06	-3,70	47,22	-3,38
512-509CCMMF	0,38	7,10	48,87	5,43	53,74	9,97	44,73	-8,47	47,06	-3,70	47,22	-3,38
52-507PMT001	13,8	3,30	12,14	2,46	12,94	6,59	10,28	-15,32	11,00	-9,39	7,93	-34,68
521-507CCMMC	0,38	5,90	50,51	5,05	54,77	8,43	46,08	-8,77	48,49	-4,00	48,62	-3,74

Tabela 5.24 - Desvios nas Correntes de Regime Abrangente e “IEC” - continuação.

SISTEMA		ABRANGENTE		CORRENTES DE REGIME CONFORME IEC								
Barra	kV	X/R	I regime (kA)	X/R	I _k (kA)	Desvio %	I _k (kA) (1)	Desvio %	I _k (kA) (2)	Desvio %	I _k (kA) (3)	Desvio %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
53-722PMT001	13,8	5,90	13,39	3,97	14,10	5,30	10,86	-18,89	11,55	-13,74	8,69	-35,10
531-722CCM01	0,38	7,10	48,82	6,85	53,19	8,95	44,68	-8,48	47,00	-3,73	47,16	-3,40
532-722CCM02	0,38	7,10	48,82	6,85	53,19	8,95	44,68	-8,48	47,00	-3,73	47,16	-3,40
533-722CCM03	0,38	7,10	48,82	6,85	53,19	8,95	44,68	-8,48	47,00	-3,73	47,16	-3,40
54-709PMT001	13,8	3,00	11,72	2,27	12,82	9,39	10,06	-14,16	10,78	-8,02	7,66	-34,64
541-709CCM502	0,38	6,30	45,34	5,08	49,51	9,20	41,69	-8,05	43,86	-3,26	43,99	-2,98
542-709CCM503	0,38	6,30	45,33	5,05	49,50	9,20	41,69	-8,03	43,86	-3,24	46,99	3,66
543-709CCM504	0,38	6,30	45,33	5,05	49,50	9,20	41,69	-8,03	43,86	-3,24	46,99	3,66
55-510PMT001	13,8	12,00	13,87	6,58	14,44	4,11	11,01	-20,62	11,69	-15,72	8,96	-35,40
551-510CCMMH	0,38	7,60	48,99	7,41	53,38	8,96	44,77	-8,61	47,10	-3,86	47,26	-3,53
552-510CCMMI	0,38	7,60	46,02	7,41	50,24	9,17	42,15	-8,41	44,34	-3,65	44,49	-3,32
554-511CCMML	0,38	7,60	46,02	6,06	50,24	9,17	42,15	-8,41	44,34	-3,65	44,49	-3,32
555-511CCMMN	0,38	7,60	46,02	6,06	50,24	9,17	42,15	-8,41	44,34	-3,65	44,49	-3,32
556-511CCMMO	0,38	7,60	46,02	5,78	50,24	9,17	42,15	-8,41	44,34	-3,65	44,49	-3,32
557-511CCMMP	0,38	7,60	46,02	7,25	50,24	9,17	42,15	-8,41	44,34	-3,65	44,49	-3,32
56-721PMT001	13,8	5,70	13,53	3,73	14,22	5,10	10,96	-18,99	11,66	-13,82	8,79	-35,03
561-721PMT002	3,80	7,10	3,87	6,90	4,26	10,08	3,58	-7,49	3,77	-2,58	3,77	-2,58
562-721PBT001	0,38	9,60	50,17	7,30	55,02	9,67	45,87	-8,57	48,25	-3,83	48,31	-3,71
563-710PBT020	0,38	7,10	42,51	6,94	46,54	9,48	39,09	-8,05	41,13	-3,25	41,27	-2,92
57-709PMT002	13,8	3,70	12,53	2,68	13,45	7,34	10,47	-16,44	11,19	-10,69	8,17	-34,80
571-709PBT011	0,38	6,60	48,99	6,49	53,37	8,94	44,90	-8,35	47,23	-3,59	47,38	-3,29
58-513PMT001	13,8	15,20	14,45	7,46	14,89	3,04	11,36	-21,38	12,04	-16,68	9,33	-35,43
581-513CCMMR	0,40	10,90	55,74	7,35	60,81	9,10	50,60	-9,22	53,23	-4,50	53,11	-4,72
582-513CCMMS	0,40	10,90	55,74	7,35	60,81	9,10	50,60	-9,22	53,23	-4,50	53,11	-4,72
583-513CCMMT	0,40	10,90	55,74	7,35	60,81	9,10	50,60	-9,22	53,23	-4,50	53,11	-4,72
584-513CCMML	0,40	6,80	35,43	6,58	38,66	9,12	32,53	-8,19	34,22	-3,42	34,34	-3,08
585-513CCMMV	0,40	10,90	55,74	7,35	60,81	9,10	50,60	-9,22	53,23	-4,50	53,11	-4,72
59-719PMT001	13,8	9,00	14,09	5,35	14,63	3,83	11,21	-20,44	11,90	-15,54	9,13	-35,20
591-719QBT001	0,40	10,30	51,98	6,49	56,83	9,33	47,33	-8,95	49,79	-4,21	49,70	-4,39
592-719CCM001	3,80	11,20	7,34	8,85	8,12	10,63	7,36	0,27	7,36	0,27	6,37	-13,22
60-702PMT001	13,8	15,00	14,58	7,30	14,99	2,81	11,46	-21,40	12,13	-16,80	9,43	-35,32
601-702PBT013A	0,38	6,00	34,25	5,10	37,01	8,06	31,26	-8,73	32,89	-3,97	33,01	-3,62
602-702PBT013B	0,38	6,00	34,10	5,10	36,85	8,06	31,12	-8,74	32,74	-3,99	32,86	-3,64
603-702PBT013C	0,38	6,00	34,10	5,10	36,85	8,06	31,12	-8,74	32,74	-3,99	32,86	-3,64
70-700PMT004G	13,8	19,30	14,77	8,40	15,13	2,44	11,55	-21,80	12,26	-16,99	9,55	-35,34

Salienta-se que as correntes de regime pelo método Abrangente e pelo método “ANSI” são iguais, o que era esperado devido às premissas utilizadas no cálculo Abrangente.

Na análise do cálculo da “IEC”, denota-se que as correntes de regime calculadas sem o efeito do regulador de tensão **são conservativas**. As correntes calculadas considerando-se regulador de tensão “Series-1” e “Series-2” são **não conservativas**, observando-se o efeito regulador mais efetivo do regulador “Series-2”, ou seja, com desvios menores.

5.6 Estudo de Caso de Superação de Disjuntores de média tensão no sistema elétrico do ANEXO-3

A título de exemplificação, os conceitos apresentados serão aplicados na análise de superação de disjuntores de média tensão na instalação real, cujo diagrama unifilar é apresentado no ANEXO-3.

A BARRA objeto desta análise é a 50-700PMT004E, cujas correntes de curto-circuito calculadas por softwares comerciais SKM - A_Fault, [SKM, PTW Short-circuit A_Fault], conforme a norma “ANSI”, e SKM – IEC_Fault, [SKM, PTW Short-circuit IEC_Fault], conforme a norma “IEC”, são apresentadas nas figuras 5.2 e 5.3, respectivamente. A corrente de curto-circuito fase-terra na barra é limitada em 50A, pela utilização de resistores de aterramento.

50-700PMT004E E/Z: 18.347 KA AT -86.89 DEG (438.54 MVA)				
X/R: 30.18 VOLTAGE: 13800.				
EQUIV. IMPEDANCE= 0.0235 + J 0.4336 OHMS				
GENERATOR NAME	-- AT BUS --	KA	VOLTS PU	LOCAL/REMOTE
ELEKTRO-1		8.116	0.91	R
TG-2		6.878	0.00	L
TOTAL REMOTE: 8.116 KA NACD RATIO: 0.4424				
	SYM2	SYM3	SYM5	SYM8
MULT. FACT:	1.075	1.104	1.081	1.103
DUTY (KA):	19.715	20.250	19.834	20.238
	TOT2	TOT3	TOT5	TOT8
MULT. FACT:	1.493	1.313	1.175	1.093
DUTY (KA):	27.391	24.085	21.555	20.058
50-700PMT004E E/Z: 20.839 KA AT -86.65 DEG (498.10 MVA)				
X/R: 27.93 VOLTAGE: 13800.				
EQUIV. IMPEDANCE= 0.0223 + J 0.3817 OHMS				

Figura 5.2 - Correntes de interrupção e momentâneas conforme “ANSI”.

*FAULT BUS: 50-700PMT004E Voltage: 13.800 kV				
Eq. Volt. Source: 1.10 p.u.				
R/X of Z(eq):	0.1188	Ik”(kA):	28.425	
Ip(kA):	68.940	Ik(kA):	15.141	
TIME (Cycles)	2.0	3.0	5.0	8.0
Ib(Asym. RMS) (kA)	26.576	23.624	21.647	20.368
Ib(Sym. RMS) (kA)	24.406	22.932	21.576	20.366
i(DC) (kA)	10.518	5.677	1.747	0.330
Ib(Asym)/Ib(Sym)	1.089	1.030	1.003	1.000

Figura 5.3 - Correntes de interrupção e momentâneas conforme “IEC”.

A tabela 5.25 resume as características de 11 disjuntores, de diferentes fabricantes, dos quais apenas alguns permaneceriam em operação em decorrência do estudo de superação, ora apresentado.

Na tabela 5.26 se apresenta o resumo das correntes de interrupção e de primeiro ciclo calculadas e das capacidades nominais dos disjuntores apresentados na Tabela 5.25.

Tabela 5.25 – Características de disjuntores de média tensão analisados

Disjuntor	Tipo	Max kV	Tempo Interrupção (ciclos)	Critério	Correntes			
					Momentânea (kA)		Interrupção (kA)	
					rms	pico	Max kV	Max kA
1	AM-13,8-500	15	8	TOT	40	-	19,3	25,0
2	AM-13,8-500B	15	5	SYM	37	-	18,0	23,0
3	VB-13,8-500	15	5	SYM	37	62	18,0	23,0
4	VB-13,8-500	15	3	SYM	-	52	20,0	20,0
5	VB-13,8-750	15	5	SYM	-	98	28,0	36,0
6	VB-15-25	15	3	SYM	-	65	25,0	25,0
7	ADVAC-15.12.25	15	3	SYM	-	65	25,0	25,0
8	3AH1-1542	15	3 #	IEC	-	63	-	25,0
9	3AE1284-2	17,5	3 #	IEC	-	65	-	25,0
10	VZ-20M25	24	2 #	IEC	-	63	-	25,0
11	VZ-20M40	24	2 #	IEC	-	100	-	40,0

Tempo de separação dos contatos (ciclos)

Tabela 5.26 – Verificação da Superação dos disjuntores

Caso	Disjuntor Tipo	Critério	Corrente de Interrupção (kA)		Corrente Momentânea (kA)		Status
			Calculada	Disjuntor	Calculada	Disjuntor	
1	AM-13,8-500	8TOT	20,06	20,90	33,63	40	No limite
2	AM-13,8-500B	5SYM	19,83	19,56	33,63	37	Subdimensionado
3	VB-13,8-500	5SYM	19,83	19,56	33,6/55,8	37/62	Subdimensionado
4	VB-13,8-500	3SYM	20,25	20,00	55,87	52	Subdimensionado
5	VB-13,8-750	5SYM	19,83	31,37	55,87	98	OK
6	VB-15-25	3SYM	20,25	25,00	55,87	65	OK
7	ADVAC-15.12.25	3SYM	20,25	25,00	55,87	65	OK
8	3AH1-1542	3Ciclos #	22,93	25,00	68,90	63	Subdimensionado
9	3AE1-304-2	3Ciclos #	22,93	25,00	68,90	65	Subdimensionado
10	VZ-20M25	2ciclos #	24,41	25,00	68,90	63	Subdimensionado
11	VZ-20M40	2ciclos #	24,41	40,00	68,90	100	OK

Tempo de separação dos contatos (ciclos)

O disjuntor do Caso-1, concebido segundo o critério das “*correntes totais*” da “ANSI”, apresenta potência de interrupção de 500 MVA, constante

para tensões entre 11,55 e 15 kV, corrente momentânea de 1,6 vezes a máxima corrente de interrupção e tempo de interrupção de 8 ciclos.

Sabe-se que este disjuntor só pode ser comparado com os cálculos da “ANSI” para disjuntores TOT8. Como o fator K de 1,3 permite a utilização linear da capacidade de interrupção em tensões entre 11,55 kV (25,0 kA) e 15 kV (19,30kA), a corrente de interrupção do disjuntor em 13,8 kV será de 20,9 kA, não os 25 kA anotados nos dados de placa do equipamento. Assim, quando comparada à corrente calculada de 20,06 kA, (TOT8), esse disjuntor apresenta-se “*no limite*” de suas capacidades para operação neste painel, situação não muito confortável quando se considera um equipamento em operação há 40 anos. A principal consequência dessa aplicação seria uma possível falha do equipamento ao tentar interromper a corrente de curto-circuito presumida.

O disjuntor do Caso-2 é similar ao do Caso-1, porém concebido segundo o critério SYM5. Assim, suas características de interrupção devem ser comparadas ao cálculo para SYM5.

Também neste caso, o equipamento encontra-se subdimensionado para correntes de interrupção e com sua capacidade momentânea solicitada a 90% da nominal.

O Caso-3 considera um disjuntor a vácuo, SYM5, similar ao do Caso-2. As diferenças neste caso são o fator $K \neq 1$ para disjuntor a vácuo e a corrente momentânea nominal, definida também em valores de pico.

Este caso foi apresentado por dois motivos. Primeiro, mostrar a transição entre a “ANSI C37-06 1987” onde se aplica $K > 1$ e a versão “ANSI C37-06 2000”, [ANSI C37.06, 2000], onde se prescreve $K = 1$. Segundo, esclarecer a utilização de $K = 1$. A aplicação $K > 1$ tira proveito da característica do aumento da capacidade de interrupção de disjuntores a óleo e a ar com a redução da tensão de operação. Entretanto, nos modernos disjuntores a vácuo e SF6, descobriu-se que a redução da tensão de operação não apresentava aumentos significativos na capacidade de

interrupção desses equipamentos [EATON, T.P. PU01301002E2010], o que levou à revisão da norma “ANSI C37-06 1987” para $K=1$.

Assim, com $K > 1$, a corrente de interrupção para este disjuntor é de 19,56 kA, aplicado num sistema com corrente calculada de 19,83 kA.

Quanto à corrente momentânea, definida em 37 kA, rms, (neste caso 1,6 vezes a corrente de interrupção máxima), sabe-se que o equipamento foi testado com $X/R=25$ e, como pela figura 5.2, a relação calculada é $X/R=27,93$ torna-se necessária a correção da corrente momentânea do disjuntor, utilizando as equações (2.19) e (2.15).

Com base em (2.19), calculada para $X/R=27,93$ se obtém o valor a ser utilizado para corrente na barra, ou seja, $1,614 \times 20,839 = 33,63$ kA. No caso da corrente de pico, esta é calculada para $X/R=27,93$ utilizando-se (2.14) e (2.15), o que resultaria em $2,68 \times 20,839 = 55,87$ kA na barra.

Como o disjuntor foi ensaiado com relação X/R inferior a calculada (25 para corrente de pico rms e 17 para corrente de pico) é necessária uma correção adicional, que será implementada por meio das equações 3.15 e 3.16, para correntes rms e de pico, respectivamente. Então, ter-se-á: $\text{Multiplicador}_{\text{rms}} = 1,614/1,60 = 1,00875$, e $\text{Multiplicador}_{\text{pico}} = 2,68/2,6 = 1,0307$ que são os fatores a serem aplicados às correntes momentâneas rms e de pico calculadas para comparação com as nominais do disjuntor. Assim, a corrente rms calculada e corrigida será $33,63 \times 1,00875 = 33,92$ kA, e, a corrente de pico corrigida será $55,87 \times 1,0307 = 57,58$ kA, valores inferiores aos nominais do disjuntor.

Conclue-se então que o disjuntor do Caso-3 se apresenta subdimensionado para interromper as correntes previstas no sistema.

O Caso-4 trata de um equipamento a vácuo, SYM3, com $K=1$ (a corrente de interrupção é de 20 kA, independente da tensão de operação ≤ 15 kV). Note-se que, para esta aplicação o equipamento encontra-se subdimensionado, tanto no critério da corrente de interrupção quanto no da corrente momentânea.

Um disjuntor SYM5 com fator K de 1,25 constitui o equipamento analisado no Caso-5. Considerando-se a tensão de operação, verifica-se que o equipamento está corretamente dimensionado para a aplicação.

No Caso-6 utilizou-se um disjuntor a vácuo, SYM3, $K=1$, com corrente de interrupção de 25 kA, aplicado em um sistema cuja solicitação é de 20,25 kA, e com corrente momentânea de 65 kA (pico) para uma corrente calculada de 55,87 kA (pico). Note-se que como $K=1$ a corrente de interrupção nominal do disjuntor é 25 kA, independente da tensão de operação ≤ 15 kV, assim, o disjuntor suporta as correntes de interrupção e momentânea calculadas.

Na aplicação do Caso-7 analisou-se um disjuntor “*européu*” definido sob os critérios da “ANSI” como SYM3 e $K=1$. Considerando-se as solicitações do sistema o equipamento encontra-se corretamente dimensionado.

Os próximos casos são aplicações da metodologia “IEC” e, o Caso-8 apresenta um equipamento caracterizado por tensão nominal de 15 kV, separação dos contatos em 3 ciclos, corrente de interrupção de 25 kA, e corrente momentânea de pico, “*peak making current*”, de 63 kA. Neste caso, os valores a serem utilizados para comparação são os da figura 5.3. Note-se que o equipamento suporta a corrente de interrupção, “*breaking current*”, prevista com uma folga de 9,2%, entretanto, a análise de sua corrente momentânea nominal revela que o disjuntor se apresenta subdimensionado.

No Caso-9, um disjuntor similar, mas de tensão nominal 17,5 kV apresenta-se igualmente subdimensionado.

Quando se utiliza um disjuntor de 2 ciclos, como no Caso-10, verifica-se que a corrente de interrupção, “*breaking current*”, calculada é mais elevada, o que agrava ainda mais a aplicação do equipamento escolhido. A

corrente de interrupção se apresenta no limite da aplicação e a momentânea imposta pelo sistema é superior à do equipamento.

No Caso-11 demonstra-se que a utilização de um disjuntor de tensão nominal de 24 kV, e, mesmo que o equipamento suporte as correntes impostas pelo sistema, sua classe de tensão não introduz vantagens adicionais à aplicação.

Como análise final, qual seria o resultado da aplicação de um “*disjuntor IEC*” num sistema cuja base de cálculo é a da “*ANSI*” e vice-versa?

Considere-se o disjuntor do Caso-10, subdimensionado em sua aplicação original “*IEC*”, utilizando os dados da figura 5.2, cuja base de cálculo é a “*ANSI*”, onde a relação X/R é 30,18. A corrente momentânea de pico calculada conforme (2.15) seria: $2,69 \times 20,839 = 56,09$ kA (sem considerar o fator $c=1,1$), a ser comparada com os 68 kA nominais do disjuntor. Para a corrente de interrupção calcula-se a corrente assimétrica, a partir da componente “*dc*” da corrente de curto-circuito [Cossé R. E., Hazel T.G., Thomasset G., 2000].

Pela equação (4.62) com $t=33$ ms (2ciclos) e X/R de teste=17 ter-se-á: $I_{dc} = \sqrt{2} \times I_{ACrms} \times 0,48$. A corrente assimétrica nesse caso será $\sqrt{1 + 2 \cdot (0,48)^2}$, ou $1,21 \times I_{Sim}$. Repetindo-se os cálculos para $X/R=30,18$ determina-se $I_{Assim} = 1,37 \times I_{Sim}$. Assim, o valor simétrico corrigido a ser considerado no cálculo do disjuntor seria: $I_{Simcorr} = I_{Sim} \times 1,37 / 1,21 = 1,13 \times I_{Sim}$ ou $18,347 \text{kA} \times 1,13 = 20,77 \text{kA}$.

Como se observa, o disjuntor, neste caso estaria sendo aplicado dentro de suas características nominais de operação.

Analogamente, supondo a aplicação de um disjuntor “*ANSI*” com as características do Caso-6, num sistema cuja base de cálculo é a “*IEC*”.

Tal disjuntor é de 2 ciclos (separação dos contatos), cuja corrente de interrupção é de 25 kA e a de pico é de 65 kA e, que se apresentou

corretamente dimensionado para um sistema cuja base de cálculo é a “ANSI”.

A corrente de interrupção calculada a partir da figura 5.3 é de 24,41 kA, compatível, porém no limite, com os 25 kA nominais do equipamento.

Contudo, a corrente de pico calculada é de 68,94 kA contra os 65 kA nominais do disjuntor o que **inviabiliza a aplicação**.

5.7 Estudo comparativo de correntes de curto-circuito de pico e fatores de correção de correntes de interrupção de disjuntores de baixa tensão quando X/R calculado é maior X/R de teste.

Sabe-se que, para disjuntores de baixa tensão, quando a relação X/R calculada é maior do que a relação X/R de teste (ensaio do fabricante) há de ser feita uma correção para a adequada comparação das correntes de interrupção. Tal assunto foi tratado no Capítulo 3, ilustrado inclusive, por um exemplo de aplicação.

A tabela 5.27 apresenta um estudo comparativo entre os fatores de correção obtidos segundo a “ANSI C37-13”, [IEEE Std C37.13, 2008], e os fatores de correção obtidos segundo a “IEEE-551”, [IEEE Std 551, 2006].

Tabela 5.27 – Fatores de correção de correntes de interrupção para disjuntores de Baixa tensão

X/R	I_{pico} IEEE-551	I_{pico} C37-13	Fator de Correção IEEE-551 p/ $X/R=4,9$	Fator de Correção C37-13 p/ $X/R=4,9$	Fator de Correção IEEE-551 p/ $X/R=6,6$	Fator de Correção C37-13 p/ $X/R=6,6$
7	2,333	2,317	1,066	1,073	1,010	1,011
8	2,382	2,369	1,089	1,097	1,031	1,033
9	2,422	2,412	1,107	1,117	1,048	1,052
10	2,456	2,447	1,123	1,133	1,063	1,067
11	2,485	2,477	1,136	1,147	1,075	1,080
12	2,509	2,503	1,147	1,159	1,086	1,092
13	2,531	2,525	1,157	1,169	1,095	1,101
14	2,550	2,544	1,165	1,178	1,103	1,110
15	2,566	2,561	1,173	1,186	1,111	1,117
16	2,581	2,576	1,180	1,193	1,117	1,124
17	2,594	2,590	1,186	1,200	1,123	1,130
18	2,606	2,602	1,191	1,205	1,128	1,135
19	2,617	2,613	1,196	1,210	1,133	1,140
20	2,627	2,623	1,201	1,215	1,137	1,144
30	2,690	2,688	1,230	1,245	1,164	1,172
40	2,724	2,722	1,245	1,261	1,179	1,187
50	2,744	2,742	1,254	1,270	1,188	1,196
100	2,786	2,785	1,273	1,290	1,206	1,215

Nota-se que, embora os fatores para determinação das correntes de pico pela “*IEEE-551*” sejam conservativos, os fatores de correção de corrente de interrupção de disjuntores de baixa tensão pela “*IEEE-551*” apresentam-se com valores “*não conservativos*”.

5.8 Considerações finais

No presente capítulo foi feito o estudo comparativo entre os métodos Abrangente, “*ANSI*” e “*IEC*” para cálculos das correntes de curto-circuito em um sistema elétrico industrial de grande porte. Foram calculadas correntes iniciais, momentâneas assimétricas, de pico, de interrupção e finalmente correntes de regime.

Apresentou-se também um estudo prático de análise superação de disjuntores de média tensão, assim como uma análise do “*conservatismo*” dos fatores de correção de correntes de interrupção para disjuntores de baixa tensão frente às prescrições da norma “*IEEE-551*”, [IEEE Std 551, 2006].

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

6.1 Conclusões gerais

Da análise individual da norma americana “ANSI”, aplicada ao sistema-exemplo, mister se fazem algumas notas de significativa relevância:

A utilização do “*Método combinado*” como alternativa para os cálculos de curto-circuito, conforme “ANSI-C37.010” e “ANSI-C37.13”, demonstrou que é necessário ter cautela quando da utilização deste primeiro. As correntes de interrupção em baixa tensão, determinadas pela aplicação do “*Método combinado*” são “**não conservativas**” com desvios da ordem de até 10%. Contudo, os resultados das correntes momentâneas em média e alta tensão apresentados pelo “*Método combinado*” mostraram-se conservativas e com desvios da ordem de até 15%. Assim, verifica-se que o método alternativo proposto, leva a valores “**não conservativos**” para cálculos das correntes de interrupção em baixa tensão e a valores “**conservativos**” para cálculos das correntes momentâneas em média e alta tensão.

Da mesma forma, a análise dos fatores de correção “*interpolados*” ou “*remotos*” das contribuições locais e remotas, na determinação das correntes de interrupção em média e alta tensão revelou algumas peculiaridades:

- Os desvios são evidentes, para relação X/R da ordem de 17 e superiores, em cálculos de 3 e 5 ciclos e X/R da ordem de 19 para cálculos de 2 ciclos;
- Os desvios são mais significativos para cálculos de 3 e 5 ciclos onde diferenças da ordem de 5% foram encontradas.

Com relação à análise individual da norma europeia “IEC”, aplicada ao sistema-exemplo, justificam-se, outrossim, algumas considerações relevantes.

A análise da dependência dos resultados das correntes de curto-circuito com fator de correção da tensão “ c ” conduziu às seguintes conclusões:

- Nas barras de baixa tensão a relação X/R sofre variações de até 1,5% superiores aos valores de c_{max} normalizados.

- Quando se considera a corrente inicial nas barras de média e alta tensão, (onde $c_{max}=1,10$ conforme prescrição da norma), e se utiliza $c_{max}=1,0$, a redução verificada é de, no máximo, 5,6%. Já, para correntes de pico, a máxima redução verificada é de 6,5% e ocorre na mesma barra.

- Para as barras de baixa tensão as reduções verificadas são de 0,80 e 0,83% para as correntes iniciais e de pico, respectivamente.

As verificações foram estendidas às correntes de interrupção simétricas para 2, 3 e 5 ciclos e observa-se nesta análise que, na média e alta tensão, as reduções máximas foram de 4,6% e ocorrem para o cálculo de 2 ciclos. Observa-se, também, que para a mesma barra, as reduções para 3 e 5 ciclos são inferiores às de 2 ciclos.

Na baixa tensão, denota-se que as reduções máximas obtidas com $c_{max}=1,0$ foram de 0,5% também para correntes calculadas em 2 ciclos.

Em linhas gerais, conclui-se que a redução da corrente de curto-circuito quando se utiliza $c_{max}=1,0$ não provoca as “**esperadas**” reduções de 10% nas correntes de curto-circuito calculadas em média tensão.

A segunda análise tratou dos efeitos do sistema de excitação adotado no cálculo das correntes de curto-circuito de regime e, conduziu às seguintes conclusões:

- As correntes de regime calculadas sem a especificação de um sistema de excitação são superiores às correntes determinadas quando se especifica um sistema de excitação “*Series-1*” ou “*Series-2*”.

- No caso da utilização de um dos sistemas de excitação prescritos na norma, fica claro que o “*Series-2*” obtém os maiores valores de correntes de regime.

- Os valores mínimos das correntes de regime são obtidos com a utilização do parâmetro “ λ_{min} ” e, na baixa tensão, são superiores aos obtidos adotando-se a excitação “*Series-2*”.

As observações supracitadas permitem concluir que, na determinação das correntes de regime mínimas, o tipo de excitação utilizado deve ser considerado corretamente, salientando-se que, como as correntes de regime são utilizadas para a determinação dos tempos de coordenação entre relés de sobrecorrente temporizados, valores inferiores aos reais podem resultar em perda da coordenação entre os relés, assim como valores superiores aos reais proporcionam excesso de temporização, desnecessária, entre relés.

No que concerne às observações atinentes ao estudo comparativo entre os três métodos de cálculo analisados, algumas conclusões foram contundentes a demonstrar os diferentes resultados obtidos do aludido estudo.

Nas correntes assimétricas, “*rms*”, a metodologia da “*IEC*” apresenta valores “*conservativos*” na maioria das barras do sistema, salientando-se

que, a norma europeia não apresenta procedimento para tal modalidade de corrente de curto-circuito. No caso da “ANSI”, os valores obtidos foram “*não conservativos*”, relevando-se que a prescrição apresentada pela norma “*IEEE std 551*”, [IEEE Std 551, 2006] introduz valores mais conservativos do que os propostos pela “ANSI”.

Quanto aos valores das correntes de curto-circuito de pico, tem-se que:

- O pico máximo de corrente ocorre em uma fase (de um sistema trifásico) durante o primeiro ciclo e não necessariamente em meio ciclo.
- O pico máximo de corrente não ocorre para o valor do “*componente dc*” inicial máximo.
- A máxima corrente de pico ocorre **antes** de meio ciclo.
- A máxima corrente de pico ocorre **antes** do pico da corrente simétrica de curto-circuito.

Da análise “*Correntes de pico – Valores Teóricos*”, também se depreendem considerações bastante relevantes.

- O método do “*meio ciclo*” certamente não é recomendável devido à introdução de resultados “*não conservativos*” para valores de X/R até 100.

- As equações da “**IEC**” são, na maioria das situações, conservativas exceto para X/R entre 1,0 e 2,5.

- As equações da “*IEEE std-551-2006*”, [IEEE Std 551, 2006], apresentam resultados “*conservativos*” para X/R superiores a 0,5, introduzindo valores que mais se aproximam da solução EXATA.

Assim, com base nas conclusões supramencionadas, recomenda-se que, para cálculos de correntes de pico, conforme metodologia “*ANSI*”, seja utilizado o procedimento da “*IEEE std 551-2006*”, [IEEE Std 551, 2006].

Contudo, o procedimento para determinação dos fatores de correção das correntes de interrupção de disjuntores de baixa tensão, no caso da “*IEEE std 551-2006*”, devem ser revistos, uma vez que sua aplicação introduz valores “*não conservativos*” às correções, conforme demonstrado neste trabalho.

Para as correntes de interrupção denotou-se que os valores obtidos por meio do “*método Abrangente*” são “*conservativos*”. Contudo, salienta-se que nesta metodologia não se consideram as características de construção dos disjuntores para os quais os cálculos de interrupção são necessários, também, não se consideram os decrementos individuais de motores e geradores do sistema, bem como, a disposição das contribuições individuais para as correntes de interrupção. Ainda para as correntes de interrupção os valores obtidos pela metodologia de cálculo da “*IEC*” são conservativos em relação aos da “*ANSI*” na maioria das barras do sistema estudado.

Os cálculos das correntes de regime também se apresentam diferentes, conceitualmente e computacionalmente, nas quais o tipo de gerador e o tipo de excitação são parâmetros imprescindíveis nos cálculos de metodologia “*IEC*” e não utilizados nos cálculos de metodologia “*ANSI*”. Definitivamente, a proposta pela metodologia da “*IEC*” é “*conservativa*”, ressaltando-se a importância da correta aplicação do sistema de excitação utilizado nas máquinas síncronas.

De uma maneira geral, depreende-se, pela quantidade de procedimentos disponíveis pela “ANSI”, que esta é uma norma voltada para o dimensionamento e seleção de disjuntores. A “IEC”, pelos conceitos firmados, é voltada para os cálculos das correntes de curto-circuito.

A “IEC” apresenta procedimentos mais detalhados e trabalhosos e, em grande número, o que torna impraticável a não utilização de meios computacionais específicos a realização dos cálculos.

As informações necessárias para condução de cálculos de curto-circuito são mais facilmente obtidas para os requerimentos da “ANSI”, que dispõem, além de uma vasta coletânea de informações sobre equipamentos elétricos, também de procedimentos completos e detalhados para cálculos em alta, média e baixa tensão. No que tange a “IEC”, esta faz uso de informações que devem ser obtidas junto aos fabricantes dos equipamentos, nem sempre disponíveis em instalações existentes.

Os resultados das simulações pela “IEC” apresentaram valores mais elevados do que os da “ANSI”, como era de se esperar, devido às diferenças de modelagem utilizadas nas reatâncias, nos métodos de cálculo empregados e, devido também, as tensões pré-falta consideradas por cada norma.

O modelamento do “*decaimento ac*” é conceitualmente e computacionalmente diferente em cada norma.

A “ANSI” prescreve correções iniciais nas reatâncias de máquinas, independentemente de tempos e separação de contatos ou da proximidade destas com o ponto de falta.

A “IEC”, por sua vez, tem como pontos de partida: o tipo de máquina, a proximidade com o ponto de falta e os tempos de separação de contatos. Verifica-se, pelos procedimentos definidos na “IEC”, que os métodos

computacionais são mais complexos e que demandam, portanto, de tempos de processamento superiores.

6.2 Conclusões Finais

Em síntese, chega-se a conclusão de que, cada norma apresenta particularidades próprias na determinação das correntes de curto-circuito, assim como os ensaios dos equipamentos de interrupção de alta, média e baixa tensão são definidos em cada norma.

A análise de superação de disjuntores não pode estar restrita aos dados de placa do equipamento, mas também, deve se considerar suas normas de concepção, o tempo de separação de contatos, o valor do X/R de teste e demais dados do fabricante. O engenheiro de sistemas deve estar atento às particularidades, tanto das normas “ANSI”, muito aplicadas nas instalações de nosso parque industrial, bem como, na “IEC”, base da normatização brasileira de disjuntores de média tensão.

Especial atenção deve ser dedicada à “*componente dc*” presente na corrente de curto-circuito assimétrica, principalmente, em sistemas com X/R elevado. O presente trabalho também demonstrou que a correta aplicação de um disjuntor deve ter o procedimento de cálculo de curto-circuito atrelado à sua norma de concepção.

Salienta-se, ainda, que em sistemas solidamente aterrados, as correntes de curto-circuito fase-terra podem ser superiores às trifásicas, o que deverá direcionar todas as verificações para as correntes fase-terra, assunto este, não contemplado neste trabalho.

6.3 Propostas para trabalhos futuros

Tendo-se em vista os elementos analisados apresentam-se as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Desenvolvimento e incorporação à norma “*IEC 60909*” do método CCM “*Characteristic Current Method*” apresentado por alguns autores para o cálculo das Correntes de curto-circuito de pico para sistemas em MALHA, “*Meshed*”.
- Desenvolvimento de algoritmos que permitam a obtenção de uma conversão entre os métodos de cálculo da “*IEC*” e “*ANSI*”.
- Criação de banco de dados com parâmetros de transformadores de força, de aplicação industrial, que forneça informações para aplicação na modelagem dos mesmos nos softwares de cálculo de correntes de curto-circuito.
- Desenvolvimento e incorporação à norma de novos procedimentos para correção de correntes de interrupção de disjuntores de baixa tensão.
- Aplicação das metodologias “*ANSI*” e “*IEC*” para cálculos de correntes de curto-circuito e análise de superação de disjuntores em sistemas solidamente aterrados.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS

- [Alberto Berizzi, 1995] Alberto Berizzi, Andrea Silvestri, Dario Zaninelli, **Short-circuit current calculation: a comparison between methods of IEC and ANSI Standards using dynamic simulation as reference** IEEE Transactions on Industry applications, Vol. 30 Jul/Aug 1994.
- [ANSI C37.06, 2000] ANSI C37.06-2000 **AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis— Preferred Ratings and Related Required Capabilities.**
- [ANSI C37.5, 1979] ANSI C37.5-1979 **Guide for Calculation of Fault Currents for Application of AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Total Current Basis;**
- [Bridger B., 1993] Baldwin Bridger, **All Amperes Are Not Created Equal: A Comparison of Current Ratings of High-Voltage Circuit Breakers Rated According to ANSI and IEC Standards** - IEEE Transactions on Industry applications, Vol. 29 Jan/Feb 1993.
- [Cossé R. E., Hazel T.G., Thomasset G., 2000] Roy E. Cossé, Terence G. Hazel, Georges Thomasset **“IEC Medium-Voltage Circuit-Breaker Interrupting Ratings—Unstated Short-Circuit Considerations”** IEEE Transactions on industry Applications Vol. 36 N° 3 May/June 2000
- [Craig N. Harman, 1985] Craig N. Harman, **Understanding Asymmetry**, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS. VOL. IA-21, NO. 4. JULY/AUGUST 1985.
- [Crisford D.S., 1996] D S Crisford - National Grid Company plc, **Introduction to IEC 909 (BS 7639) Short-circuit Current Calculation in Three-phase A.C. Systems**, 1996 The Institution of Electrical Engineers.
- [EATON, T.P. PU01301002E2010] EATON Technical Publication PU01301002E 2010 - $K > 1.0$ vs. $K = 1$ ANSI circuit breaker standards
- [EPC-1, 2002] ELECTRIC POWER CONSULTANTS - Thechnical Newsletters **Data on IEC Breaker Nameplates** - C. St. Pierre, January 2002.

[EPC-2, 2002] ELECTRIC POWER CONSULTANTS -
 Technical Newsletters **IEC High Voltage Breaker Application** - C. St.
 Pierre, January 2002.

[Gene Knight, 1993] Gene Knight, Harry Sieling, **Comparison of
 ANSI and IEC 909 Short-circuit Current Calculation Procedures** - IEEE
 Transactions on Industry applications, Vol. 29 May/June 1993.

[Garzon Ruben D., 2002] Ruben D. Garzon **High Voltage Circuit
 Breakers: Design and Applications**, Second Edition, Revised and
 Expanded 2002.

[GE, SC Short-circuit calculation program, 1989] General Electric
 SC Short-circuit calculation program, 1989"

[GER-2660, 1969] IEEE Transactions on Industry and General
 Application - Walter C. Huening JR, **Interpretation of New American
 National Standard for Power Circuit Breaker Application**, Adenda nº 1,
 february-1981 - Supplement to GER-2660 for Power Systems Seminar "Why
 the fault X/R ratio should not be obtained from the equivalent $R + jX = Z$
 impedance of a complex network reduction"

[Grigoletto F. 2012-1] Fernando A. Grigoletto, José M. C. Filho,
**Aplicação da Norma IEEE std 551-2006 no Estudo de Superação de
 Disjuntores de Média Tensão**, 10th IEEE/IAS International Conference on
 Industry Applications – INDUSCON, Nov/2012;

[Grigoletto F. 2012-2] Fernando A. Grigoletto, José M. C. Filho,
**Aplicação da Norma IEEE std 551-2006 no Dimensionamento de
 Disjuntores de Baixa Tensão**, 10th IEEE/IAS International Conference on
 Industry Applications – INDUSCON, Nov/2012;

[Huening JR, 1981] Walter C. Huening JR, **Interpretation of New
 American National Standard for Power Circuit Breaker Application**,
 IEEE TRANSACTIONS IGA-5, NO. 5, SEP/OCT 1969, revised 1981;

[Huening JR, 1982] Walter C. Huening JR, **Calculating Short-circuit
 Currents with Contributions from Induction Motors**, IEEE
 TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. IA-18, NO. 2,
 MARCH/APRIL 1982;

[IEC 60038, 2002-07] IEC-60038-2002-07 **IEC standard voltages**;

[IEC 60056, 1987] IEC-60056-1987 **High Voltage Alternating
 Currents Circuit Breakers**;

[IEC 60269-1, 2006] IEC 60269-1-2006 **Low-voltage fuses – Part 1: General requirements;**

[IEC 60282-1, 2009] IEC 60282-1-2009 **High-voltage fuses – Part 1: Current-limiting fuses;**

[IEC 60282-2, 2008] IEC 60282-2-2008 **High-voltage fuses – Part 2: Expulsion fuses;**

[IEC 60909-0, 2001-07] IEC 60909-0 **Short-circuit Currents in Three-phase A.C. Systems - Part 0, First edition 2001-07**

[IEC 60909-4, 2000-07] IEC 60909-4 **Examples for the calculation of short-circuit currents - Part 4, First edition 2000-07**

[IEC 60947-2, 2009] IEC 60947-2-2009 **Low-voltage switchgear and controlgear Part 2: Circuit-breakers;**

[IEC 62271-100, 2008] IEC 62271-100 Edition 2.0 2008-04 **High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: Alternating-current circuit-breakers;**

[IEEE Std 1015, 2006] IEEE Std 1015-2006 IEEE Recommended Practice for Applying Low Voltage Circuit Breakers Used in Industrial and Commercial Power Systems

[IEEE Std 141, 1993] IEEE Std 141-1993 **IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants;**

[IEEE Std 242, 2001] IEEE Std 242-2001, **IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power systems.**

[IEEE Std 551, 2006] IEEE Std 551-2006 **IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems – Violet Book;**

[IEEE Std C37.04, 1999(R2006)] IEEE Std C37.04-1999(R2006) (Revision of IEEE Std C37.04-1979) **IEEE Standard Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers.**

[IEEE Std C37.010, 2005] IEEE Std C37.010-2005 **IEEE Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis;**

[IEEE Std C37.13, 2008] IEEE Std C37.13-2008 **IEEE Standard for Low-voltage AC Power Circuit Breakers Used in Enclosures;**

- [Kasikci, Ismail, 2002] Ismail Kasikci, **Short Circuits in Power Systems, A practical Guide to IEC 60909**, WILEY-VCH 2002.
- [K.C.A. Smith,1996] K.C.A. Smith & R.E. Alley, **ELECTRICAL CIRCUITS AN INTRODUCTION** Editora Cambridge, 1996
- [Kindermann G., 2007] Geraldo Kindermann, **Curto-Circuito – 4ª edição**, editora UFSC-EEL-LABPLAN - 2007;
- [Luke YU, 1982] Luke Y. YU, Ivan Minceff, Duane W. Hamilton, Gerald W. Bottrell, **Motor Contribution During Three-Phase Short Circuit Fault**, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. IA-18, NO. 6, NOV/DEC 1982
- [NBR IEC 60947-2, 1998] NBR IEC-60947-2-1998, **Dispositivos de Manobra e Comando de Baixa Tensão – Parte-2**
- [Nexans, Cabos de baixa tensão] Nexans **Catálogo geral de cabos de baixa tensão.**
- [Olaf E. Roennspiess, 1990] Olaf E. Roennspiess and A. E. Efthymiadis, **A Comparison of Static and Dynamic in Short-circuit Analysis Procedures** - IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 26, NO. 3, MAY/JUNE 1990.
- [Parise Giuseppe, 1995] Giuseppe Parise, **A New Approach to Calculate the Decaying AC Contributions to Short Circuit: The “Characteristic” Currents Method**, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 31, NO. 1, January/February 1995.
- [Parise,Massimiano,Halpin, 1995] Giuseppe Parise, Marco Massimiano, Mark Halpin, **Short-circuit Analysis on a Simple Power System Network: The “Characteristic” Currents Method**, 1995.
- [Pirelli, Cabos de média tensão] Pirelli **Catálogo geral de cabos de média tensão.**
- [R. M. Kerchner, 1938] R. M. Kerchner and G. F. Corcoran, **Alternating Current Circuits**, New York: Wiley, 1938.
- [Rodolakis A. J., 1993] Anthony J. Rodolakis, **A Comparison of North American (ANSI) and European (IEC) Fault Calculation Guidelines** - IEEE Transactions on Industry applications, Vol. 29 May/June 1993.
- [Silveira P.M., 2008] Paulo Marcio da Silveira, **Proteção de Sistemas Elétricos – UNIFEI – CEPSE – 2008;**

[SKM, PTW IEC_Fault Reference Manual] SKM PTW – Power Tools for Windows IEC 60909_FAULT Reference Manual - 2006

[SKM, PTW Short-circuit A_Fault] SKM PTW - Power Tools for Windows **A-Fault Short Circuit Study software** conforme ANSI C37.010, C37.5, and C37.13, e IEEE Standard 141

[SKM, PTW Short-circuit Comprehensive] SKM PTW - Power Tools for Windows - **Comprehensive Short Circuit Study software**

[SKM, PTW Short-circuit IEC_Fault] SKM PTW - Power Tools for Windows **IEC_Fault Short Circuit Study software** conforme IEC 60909 - Short-circuit current calculation in threephase a.c. systems.

[Skuderna, John E., 1959] John E. Skuderna, **The XIR Method of Applying Power Circuit Breakers**, AIEE Transactions (Power Apparatus and Systems), Jun, 1959.

[St Pierre C., 2001] Conrad St Pierre, **A Practical Guide to Short-Circuit Calculations**, First Edition 2001 - Thomson-Shore

8- ANEXOS

8.1 ANEXO-1

SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DIFERENCIAL DO CURTO-CIRCUITO

Considerando-se o circuito da figura 8-1 que consiste de uma fonte com forma de onda senoidal e uma combinação de um resistor, uma indutância e uma chave em série.

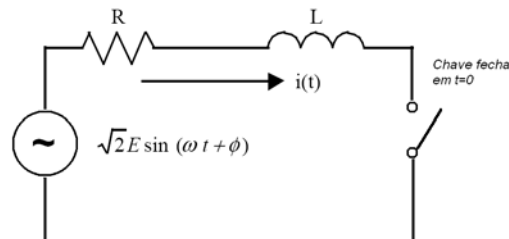


Figura 8.1 - Circuito para estudo de assimetria

A falta é iniciada com o fechamento da chave em $t=0$. Tem-se para $t>0$:

$$I=E/Z \quad (8.1)$$

Sendo Z a impedância de “Thevenin” equivalente do sistema do ponto de falta à fonte de corrente de curto-circuito do sistema.

Considerando-se a tensão da fonte inicialmente como tensão dc vale a equação:

$$L \frac{di}{dt} + iR = V \quad (8.2)$$

Obviamente que a solução de regime para a equação é $i_{regime}=V/R$, contudo, a solução completa da equação contém um termo que vai a zero conforme “ t ” aumenta.

Assim, a solução transitória é a de interesse e a solução de regime será obtida para $t \rightarrow \infty$.

Reescrevendo-se a equação (8.2) separando-se as variáveis, integrando e utilizando-se as variáveis $i=0$ para $t=0^+$ ter-se-á:

$$i = \frac{V}{R} - \frac{V}{R} e^{-\frac{Rt}{L}} \quad (8.3)$$

Esses dois termos e seu somatório são mostrados na figura 8-1 para tensão “**dc**”.

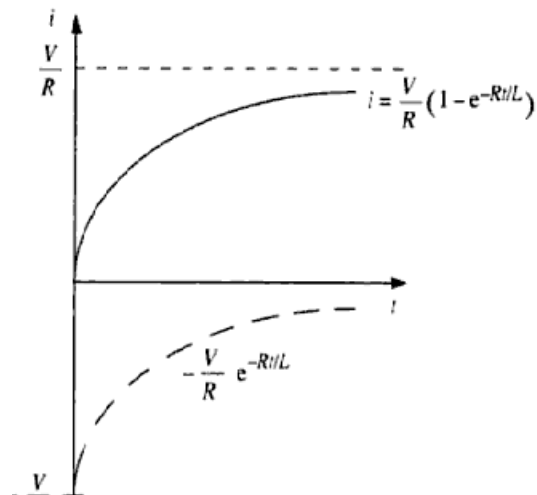


Figura 8.2 - Termos individuais da equação (8.2) e sua resultante

Contudo, quando a tensão da fonte é senoidal a equação (8.2) se torna:

$$L \frac{di}{dt} + iR = V_m \cdot \text{sen}(\omega t + \Phi) \quad (8.4)$$

onde Φ é o ângulo de fase.

Fazendo-se $R/L = \alpha$

$$\frac{di}{dt} + \alpha i = \frac{V_m}{L} \cdot \text{sen}(\omega t + \Phi) \quad (8.5)$$

Para resolver essa equação multiplica-se pelo fator de integração:

$$e^{\int \alpha dt} = e^{\alpha t}$$

$$e^{\alpha t} \frac{di}{dt} + e^{\alpha t} \alpha i = e^{\alpha t} \frac{V_m}{L} \cdot \text{sen}(\omega t + \Phi) \quad (8.6)$$

a integração leva a:

$$ie^{\alpha t} \frac{di}{dt} = \frac{V_m}{L} \int e^{\alpha t} \cdot \text{sen}(\omega t + \Phi) dt \quad (8.7)$$

A integração da parcela da direita da equação (8-7) resulta em:

$$ie^{\alpha t} = \frac{V_m e^{\alpha t}}{L(\alpha^2 + \omega^2)} [\alpha \text{sen}(\omega t + \Phi) - \omega \text{cos}(\omega t + \Phi)] + K \quad (8.8)$$

Multiplicando-se a equação (8.8) por $e^{-\alpha t}$ e simplificando a expressão trigonométrica entre colchetes pela identidade:

$$A \text{sen} \beta - B \text{cos} \beta = \sqrt{A^2 + B^2} \text{sen}(\beta - \theta)$$

$$\text{Onde } \theta = \tan^{-1} \frac{B}{A}$$

Então, ter-se-á:

$$i = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \text{sen}(\omega t + \Phi - \theta) + Ke^{-\alpha t} \quad (8.9)$$

Para obtenção do valor de K faz-se $i=0$ para $t=0^+$ resultando:

$$K = -\frac{V_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \text{sen}(\Phi - \theta) \quad (8.10)$$

E, finalmente:

$$i = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + (\omega\omega L)^2}} \text{sen}(\omega t + \Phi - \theta) - \frac{V_m e^{-\alpha t}}{\sqrt{R^2 + (\omega\omega L)^2}} \text{sen}(\Phi - \theta) \quad (8.11)$$

A equação (8.11) pode ser considerada como um somatório de duas componentes: $i = i_{regime} + i_{natural}$ ou seja, uma componente de regime ou componente forçada i_{regime} , e outra, $i_{natural}$ transitória ou de resposta natural do circuito.

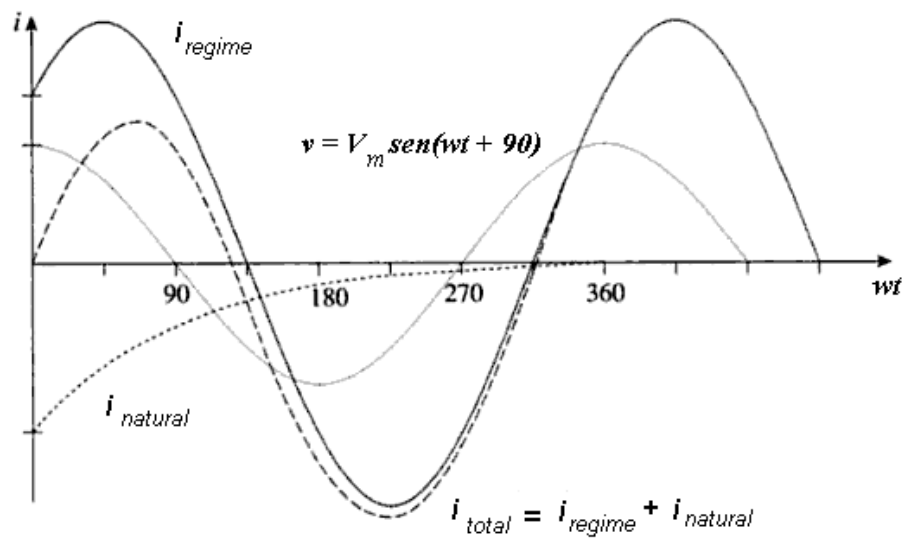


Figura 8.3 - Resposta de um circuito RL a uma fonte de tensão senoidal - plotagem da equação (8.11) com $\Phi=90^\circ$ e $\theta=45^\circ$

8.2 ANEXO-2

ALGORITMO UTILIZADO PARA O CÁLCULO DAS CORRENTES DE PICO MÁXIMAS

Utilizou-se o software Matlab como ferramenta para obtenção dos valores máximos das correntes de curto-circuito de pico.

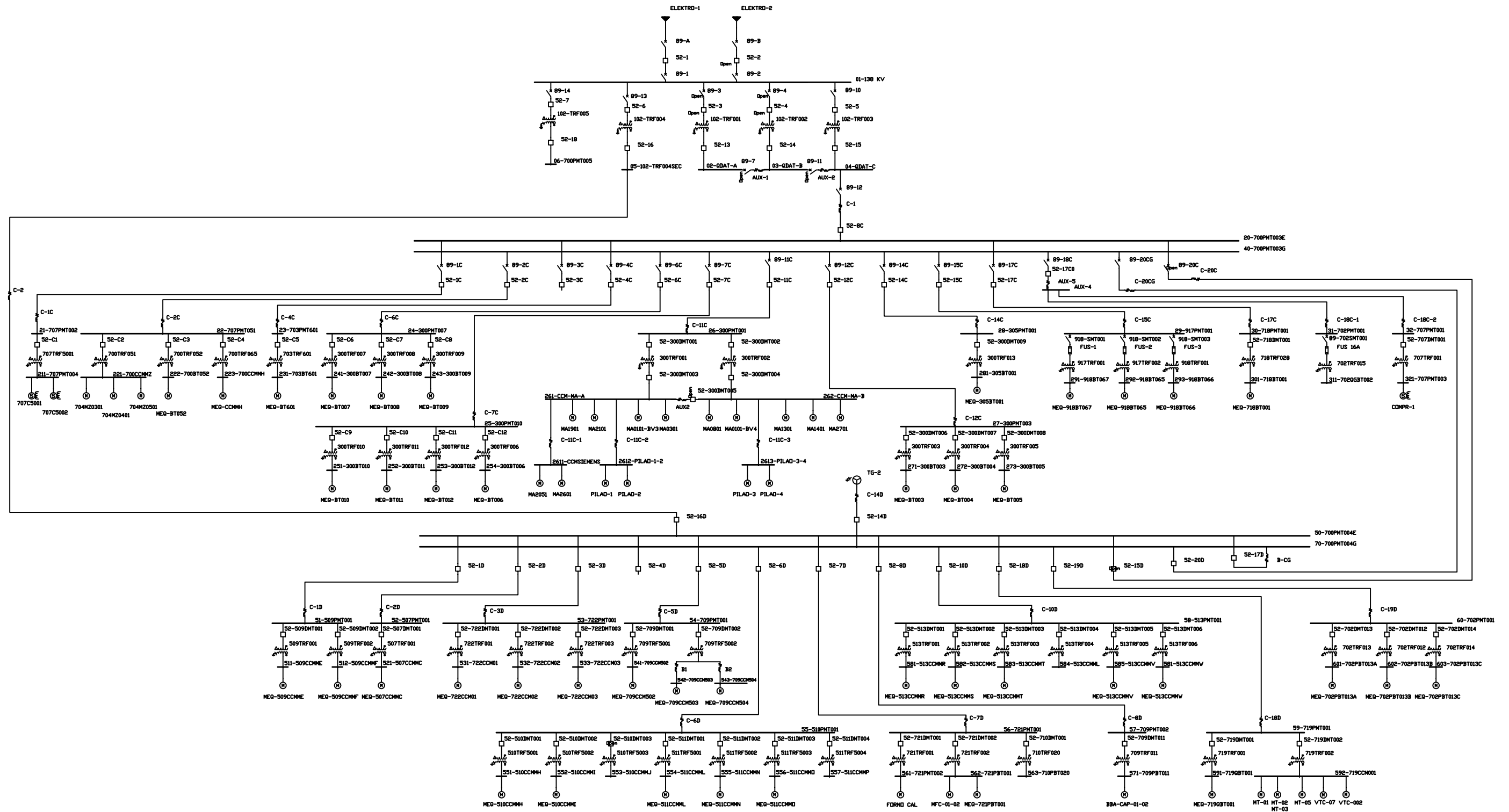
Abaixo a programação utilizada.

```
clc;
clear all;
tmax=0;
imax=0;
XR=15;
RX=(1/XR);
alpha=45;
alpha2=pi*(alpha)/180;
idc=1;
iac=1;
phi=atan(XR);
t=0:0.000001:1;
i=(-(sin(alpha2-phi))*exp(-2*pi*t*(RX)))+(sin(2*pi*t+alpha2-phi));
[imax,idx]=max(i);
format long
imax
tmax=idx/1000000
```

8.3 ANEXO-3

DIAGRAMA UNIFILAR DO CASO ESTUDO

DIAGRAMA UNIFILAR - ESTUDO DE CASO



8.4 ANEXO-4

CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ELÉTRICO PARA SIMULAÇÃO DOS CÁLCULOS CONFORME “ANSI”

8.4.1 Concessionária

Tabela 8.1 - Características da concessionária

IDENT	Barra	kV	A 3f	X/R 3f	A 1f	X/R 1f
ELEKTRO-1	01-138 KV	138	9.059,4	4,23	5.643,3	4,1
ELEKTRO-2	01-138 KV	138	9.059,4	4,23	5.643,3	4,1

8.4.2 Geradores

Tabela 8.2 - Características dos geradores

IDENT	Barra	MVA	KV Base	rpm	FP	X % 3f	X/R 3f	X % f-t	X/R
TG-2	70-700PMT004G	46,10	13,8	3600	0,80	28,0	60,99	9,00	60,99

8.4.3 Transformadores

Tabela 8.3 - Características dos Transformadores

IDENT	kVA	Z%	X/R	kV	Tap	De	Para
102-TRF001	10.000	9,06	16,70	138/13,8	138	01-138 KV	02-QDAT-A
102-TRF002	10.000	9,13	16,70	138/13,8	138	01-138 KV	03-QDAT-B
102-TRF003	20.000	9,05	22,25	138/13,8	138	01-138 KV	04-QDAT-C
102-TRF004	20.000	9,00	22,25	138/13,8	138	01-138 KV	10-700PMT004
102-TRF005	20.000	9,00	22,25	138/13,8	138	01-138 KV	06-700PMT005
707-TRF5001	2.500	6,20	10,47	13,8/3,80	13,8	21-707PMT002	211-707PMT004
700-TRF051	1.500	6,12	6,54	13,8/3,80	13,8	22-707PMT051	221-700CCMMZ
700-TRF052	2.000	6,17	7,29	13,8/0,38	13,8	22-707PMT051	222-700BT052
700-TRF065	2.000	6,12	7,29	13,8/0,38	13,8	22-707PMT051	223-700CCMMH
703-TRF601	2.000	5,54	7,29	13,8/0,38	13,8	23-703PMT601	231-703BT601
300-TRF007	2.000	6,21	7,29	13,8/0,38	13,8	24-300PMT007	241-300BT007
300-TRF008	2.000	6,14	7,29	13,8/0,38	13,8	24-300PMT007	242-300BT008
300-TRF009	2.000	6,19	7,29	13,8/0,38	13,8	24-300PMT007	243-300BT009
300-TRF010	2.000	6,19	7,29	13,8/0,38	13,8	25-300PMT010	251-300BT010
300-TRF011	2.000	6,13	7,29	13,8/0,38	13,8	25-300PMT010	252-300BT011

Tabela 8.3 - Características dos Transformadores - continuação

IDENT	kVA	Z%	X/R	kV	Tap	De	Para
300-TRF012	2.000	6,12	7,29	13,8/0,38	13,8	25-300PMT010	253-300BT012
300-TRF006	1.000	5,08	5,71	13,8/0,38	13,8	25-300PMT010	254-300BT006
300-TRF001	6.000	6,84	13,49	13,8/3,80	13,8	26-300PMT001	261-CCM-MA-A
300-TRF002	6.000	6,84	13,49	13,8/3,80	13,8	26-300PMT001	262-CCM-MA-B
300-TRF003	2.000	6,22	7,29	13,8/0,38	13,8	27-300PMT003	271-300BT003
300-TRF004	2.000	6,24	7,29	13,8/0,38	13,8	27-300PMT003	272-300BT004
300-TRF005	2.000	6,15	7,29	13,8/0,38	13,8	27-300PMT003	273-300BT005
305-TRF001	1.000	4,15	5,71	13,8/0,38	13,8	28-305PMT001	281-305BT001
917-TRF001	2.000	6,00	7,29	13,8/0,38	13,8	29-917PMT001	291-918BT067
917-TRF002	500	4,70	4,69	13,8/0,38	13,8	29-917PMT001	292-918BT065
918-TRF001	1.000	5,50	5,71	13,8/0,38	13,8	29-917PMT001	293-918BT066
718-TRF028	1.500	6,15	6,54	13,8/0,44	13,8	30-718PMT001	301-718BT001
702-TRF015	500	4,60	4,69	13,8/0,38	13,8	31-702PMT001	311-702QGBT002
707-TRF001	500	4,04	6,54	13,8/3,80	13,8	32-707PMT001	321-707PMT003
509-TRF001	2.000	5,60	7,29	13,8/0,38	13,8	51-509PMT001	511-509CCMME
507-TRF051	1.500	4,00	6,54	13,8/3,80	13,8	52-507PMT001	521-507CCMMC
722-TRF001	2.000	5,60	7,29	13,8/0,38	13,8	53-722PMT001	531-722CCM01
722-TRF002	2.000	5,60	7,29	13,8/0,38	13,8	53-722PMT001	532-722CCM02
722-TRF003	2.000	5,60	7,29	13,8/0,38	13,8	53-722PMT001	533-722CCM03
709-TRF5001	2.000	6,00	7,29	13,8/0,38	13,8	54-709PMT001	541-709CCM502
709-TRF5002	2.000	6,00	7,29	13,8/0,38	13,8	54-709PMT001	542-709CCM503
510-TRF5001	2.000	5,60	7,29	13,8/0,38	13,8	55-510PMT001	551-510CCMMH
510-TRF5002	2.000	6,00	7,29	13,8/0,38	13,8	55-510PMT001	552-510CCMMI
510-TRF5003	2.000	6,00	7,29	13,8/0,38	13,8	55-510PMT001	553-510CCMMJ
511-TRF5001	2.000	6,00	7,29	13,8/0,38	13,8	55-510PMT001	554-511CCMML
511-TRF5002	2.000	6,00	7,29	13,8/0,38	13,8	55-510PMT001	555-511CCMMN
511-TRF5003	2.000	6,00	7,29	13,8/0,38	13,8	55-510PMT001	556-511CCMMP
511-TRF5004	2.000	6,00	7,29	13,8/0,38	13,8	55-510PMT001	557-511CCMMP
721-TRF001	2.000	7,24	7,29	13,8/3,80	13,8	56-721PMT001	561-721PMT002
721-TRF002	2.500	6,80	10,47	13,8/0,38	13,8	56-721PMT001	562-721PBT001
710-TRF020	2.000	5,63	7,29	13,8/0,38	13,8	56-721PMT001	563-710PBT020
709-TRF011	2.000	5,54	7,29	13,8/0,38	13,8	57-709PMT002	571-709PBT011
513-TRF001	2.500	5,75	10,47	13,8/0,40	13,8	58-513PMT001	581-513CCMMR
513-TRF002	2.500	5,75	10,47	13,8/0,40	13,8	58-513PMT001	582-513CCMMS
513-TRF003	2.500	5,75	10,47	13,8/0,40	13,8	58-513PMT001	583-513CCMMT
513-TRF004	1.500	6,00	6,54	13,8/0,38	13,8	58-513PMT001	584-513CCMML
513-TRF005	2.500	5,75	10,47	13,8/0,40	13,8	58-513PMT001	585-513CCMMV
513-TRF006	2.500	5,75	10,47	13,8/0,40	13,8	58-513PMT001	586-513CCMMW
719-TRF001	2.500	6,20	10,47	13,8/0,38	13,8	59-719PMT001	591-719QBT001
719-TRF002	4.000	7,09	11,65	13,8/3,80	13,8	59-719PMT001	592-719CCM001
702-TRF013	1.000	4,15	5,71	13,8/0,38	13,8	60-702PMT001	601-702PBT013A
702-TRF012	1.000	4,17	5,71	13,8/0,38	13,8	60-702PMT001	602-702PBT013B
702-TRF014	1.000	4,14	5,71	13,8/0,38	13,8	60-702PMT001	603-702PBT013C

8.4.4 Cabos

Tabela 8.4 - Características dos cabos

IDENT	Bitola	Comprimento (m)	kV	De	Para
C-1	2 x 3X1/C # 400mm ²	480	13,8	04-QDAT-C	20-700PMT003E
C-2	2 x 3X1/C # 400mm ²	600	13,8	05-102TRF004SEC	50-700PMT004E
C-1C	1 x 3X1/C # 95mm ²	115	13,8	20-700PMT003E	21-707PMT002
C-2C	1 x 3X1/C # 120mm ²	20	13,8	20-700PMT003E	22-707PMT051
C-4C	1 x 3X1/C # 95mm ²	200	13,8	20-700PMT003E	23-703PMT601
C-6C	1 x 3X1/C # 300mm ²	500	13,8	20-700PMT003E	24-300PMT007
C-7C	2 x 3X1/C # 150mm ²	300	13,8	20-700PMT003E	25-300PMT010
C-11C	1 x 3X1/C # 500mm ²	250	13,8	20-700PMT003E	26-300PMT001
C-11C-1	1 x 3X1/C # 50mm ²	15	3,80	261-CCM-MA-A	2611-CCMSIEMENS
C-11C-2	1 x 3X1/C # 70mm ²	90	3,80	261-CCM-MA-A	2612-PILAO-1-2
C-11C-3	1 x 3X1/C # 70mm ²	90	3,80	261-CCM-MA-B	2613-PILAO-3-4
C-12C	1 x 3X1/C # 150mm ²	250	13,8	20-700PMT003E	27-300PMT003
C-14C	1 x 3X1/C # 95mm ²	440	13,8	20-700PMT003E	28-305PMT001
C-15C	1 x 3X1/C # 95mm ²	580	13,8	20-700PMT003E	29-917PMT001
C-17C	1 x 3X1/C # 185mm ²	300	13,8	20-700PMT003E	30-718PMT001
C-18C1	1 x 3X1/C # 120mm ²	200	13,8	20-700PMT003E	31-702PMT001
C-18C12	1 x 3X1/C # 95mm ²	120	13,8	20-700PMT003E	32-707PMT001
C-1D	1 x 3X1/C # 95mm ²	300	13,8	50-700PMT004E	51-509PMT001
C-2D	1 x 3X1/C # 95mm ²	650	13,8	50-700PMT004E	52-507PMT001
C-3D	1 x 3X1/C # 120mm ²	630	13,8	50-700PMT004E	53-722PMT001
C-5D	1 x 3X1/C # 95mm ²	675	13,8	50-700PMT004E	54-709PMT001
C-6D	1 x 3X1/C # 400mm ²	300	13,8	50-700PMT004E	55-510PMT001
C-7D	1 x 3X1/C # 95mm ²	300	13,8	50-700PMT004E	56-721PMT001
C-8D	1 x 3X1/C # 95mm ²	550	13,8	50-700PMT004E	57-709PMT002
C-10D	1 x 3X1/C # 300mm ²	100	13,8	50-700PMT004E	58-513PMT001
C-18D	1 x 3X1/C # 120mm ²	175	13,8	50-700PMT004E	59-719PMT001
C-19D	1 x 3X1/C # 250MCM	50	13,8	50-700PMT004E	60-702PMT001

8.4.5 Motores

Tabela 8.5 - Características dos motores

IDENT	Barra	HP	KVA	Tipo	rpm	FP	KV Base	X %	X/R
707C5001	211-707PMT004	1100	990	Síncrono > 1000 HP	900	-	3,80	15,0	23,30
707C5002	211-707PMT004	1100	990	Síncrono > 1000 HP	900	-	3,80	15,0	23,30
704MZ0301	221-700CCMMZ	500	475	Indução < 1000 HP	1800	-	3,80	16,7	19,33
704MZ0401	221-700CCMMZ	500	475	Indução < 1000 HP	1800	-	3,80	16,7	19,33
704MZ0501	221-700CCMMZ	500	475	Indução < 1000 HP	1800	-	3,80	16,7	19,33
MEQ-BT052	222-700BT052	1200	1200	Indução < 50 HP	1800	-	0,38	16,7	23,69
MEQ-BT065	223-700CCMMH	1200	1200	Indução < 50 HP	1800	-	0,38	16,7	23,69
MEQ-BT601	231-703BT601	1200	1200	Indução < 50 HP	1800	-	0,38	16,7	23,69
MEQ-BT007	241-300BT007	10x140	1400	Inversor regenerativo	1800	-	0,38	33,0	10
MEQ-BT008	242-300BT008	10x140	1400	Inversor regenerativo	1800	-	0,38	33,0	10
MEQ-BT009	243-300BT009	10x140	1400	Inversor regenerativo	1800	-	0,38	33,0	10
MEQ-BT010	251-300BT010	10x120	1200	Inversor regenerativo	1800	-	0,38	33,0	10
MEQ-BT011	252-300BT011	10x120	1200	Inversor regenerativo	1800	-	0,38	33,0	10
MEQ-BT012	253-300BT012	10x120	1200	Inversor regenerativo	1800	-	0,38	33,0	10
MEQ-BT006	254-300BT006	600	600	Indução < 50 HP	1800	-	0,38	27,8	20,75
MA2051	2611-CCMSIEMENS	469	454,1	Indução < 1000 HP	881	-	3,80	16,7	18,83
MA2601	2611-CCMSIEMENS	704	691,1	Indução < 1000 HP	710	-	3,80	16,7	22,06
MA1901	261-CCM-A-A	1609	1448	Indução > 1000 HP	514	-	3,80	16,7	24,86
MA2101	261-CCM-A-A	603	650	Indução < 1000 HP	886	-	3,80	16,7	20,81
PILAO-1	2612-PILAO-1-2	700	645	Indução < 1000 HP	714	-	3,80	16,7	22,01
PILAO-2	2612-PILAO-1-2	700	645	Indução < 1000 HP	714	-	3,80	16,7	22,01
MA101-BV3	261-CCM-A-A	1340	1198	Indução = 1000 HP	714	-	3,80	13,3	24,17
MA0301	261-CCM-A-A	1609	1456	Indução > 1000 HP	514	-	3,80	16,7	24,86
MA0801	262-CCM-A-B	1609	1456	Indução > 1000 HP	514	-	3,80	16,7	24,86
MA1001-BV4	262-CCM-A-B	1340	1198	Indução = 1000 HP	714	-	3,80	13,3	24,17
PILAO-3	2612-PILAO-3-4	700	645	Indução < 1000 HP	714	-	3,80	16,7	22,01
PILAO-4	2612-PILAO-3-4	700	645	Indução < 1000 HP	714	-	3,80	16,7	22,01
MA1301	262-CCM-A-B	1005	895	Indução > 1000 HP	1187	-	3,80	16,7	22,85
MA1401	262-CCM-A-B	1609	1456	Indução > 1000 HP	514	-	3,80	16,7	24,86
MA2701	262-CCM-A-B	1340	1198	Indução = 1000 HP	714	-	3,80	13,3	24,17
MEQ-BT003	271-300BT003	10x120	120	Inversor regenerativo	1800	-	0,38	33,0	10,00
MEQ-BT004	272-300BT004	10x120	120	Inversor regenerativo	1800	-	0,38	33,0	10,00
MEQ-BT005	273-300BT005	10x120	120	Inversor regenerativo	1800	-	0,38	33,0	10,00
MEQ-305BT001	281-305BT001	5x120	120	Indução > 50 HP	1800	-	0,38	16,7	9,57
MEQ-918BT067	291-918BT067	4x300	1200	Indução < 50 HP	1800	-	0,38	16,7	15,48
MEQ-918BT065	292-918BT065	300	300	Inversor regenerativo	1800	-	0,38	33,0	10,00
MEQ-918BT066	293-918BT066	6x100	600	Indução < 50 HP	1800	-	0,38	16,7	8,54
MEQ-718BT001	301-718BT001	5x200	1200	Indução > 50 HP	1800	-	0,44	16,7	12,71
COMPR-01	321-707PMT003	1100	990	Síncrono > 1000 HP	900	-	3,80	15,0	23,30
MEQ-509CCMME	511-509CCMME	1200	1200	Indução < 50 HP	1800	-	0,38	16,7	23,69
MEQ-509CCMMF	512-509CCMMF	1200	1200	Indução < 50 HP	1800	-	0,38	16,7	23,69
MEQ-507CCMMC	521-507CCMMC	900	900	Indução < 50 HP	1800	-	0,38	16,7	24,08
MEQ-722CCM01	531-722CCM01	10x120	120	Indução > 50 HP	1800	-	0,38	16,7	9,57
MEQ-722CCM02	531-722CCM02	10x120	120	Indução > 50 HP	1800	-	0,38	16,7	9,57
MEQ-722CCM03	531-722CCM03	10x120	120	Indução > 50 HP	1800	-	0,38	16,7	9,57
MEQ-709CCM502	541-709CCM502	1200	1200	Indução < 50 HP	1800	-	0,38	16,7	23,69
MEQ-709CCM503	542-709CCM503	600	600	Indução < 50 HP	1800	-	0,38	16,7	20,77
MEQ-709CCM504	543-709CCM504	600	600	Indução < 50 HP	1800	-	0,38	16,7	20,77
MEQ-510CCMMH	551-510CCMMH	10x100	100	Inversor regenerativo	1800	-	0,38	33,0	10,00
MEQ-510CCMMI	552-510CCMMI	10x100	100	Inversor regenerativo	1800	-	0,38	33,0	10,00
MEQ-511CCMML	554-510CCMML	10x75	75	Indução < 50 HP	1800	-	0,38	16,7	7,10
MEQ-511CCMMN	555-510CCMMN	10x75	75	Indução < 50 HP	1800	-	0,38	16,7	7,10
MEQ-511CCMMO	556-510CCMMO	1000	1000	Indução < 50 HP	1800	-	0,38	16,7	24,97
FORNO CAL	561-721PMT002	800	760	Indução < 1000 HP	1800	-	3,80	16,7	23,11
MFC-01-02	562-721PBT001	2x200	160	Indução > 50 HP	1800	-	0,38	16,7	12,71
MEQ-721PBT001	562-721PBT001	800	800	Indução < 50 HP	1800	-	0,38	16,7	23,11
BBA-CAP-01-02	571-709PBT011	2x150	142,5	Indução > 50 HP	1800	-	0,38	16,7	10,88
MEQ-513CCMMR	581-513CCMMR	1200	1200	Indução < 50 HP	1800	-	0,40	16,7	23,69

Tabela 8.5 - Características dos motores - continuação

IDENT	Barra	HP	KVA	Tipo	rpm	FP	KV Base	X %	X/R
MEQ-513CCMMS	582-513CCMMS	1200	1200	Indução < 50 HP	1800	-	0,40	16,7	23,69
MEQ-513CCMMT	583-513CCMMT	1200	1200	Indução < 50 HP	1800	-	0,40	16,7	23,69
MEQ-513CCMMV	585-513CCMMV	1200	1200	Indução < 50 HP	1800	-	0,40	16,7	23,69
MEQ-513CCMMW	586-513CCMMW	1200	1200	Indução < 50 HP	1800	-	0,40	16,7	23,69
MEQ-719QBT001	591-719QBT001	5x300	300	Indução < 50 HP	1800	-	0,38	16,7	15,50
MT-01	592-719CCM001	1250	1125	Indução > 1000 HP	1800	-	3,80	16,7	23,88
MT-02 MT-03	592-719CCM001	2x500	475	Indução < 1000 HP	1800	-	3,80	16,7	19,33
MT-05	592-719CCM001	350	332,5	Indução < 1000 HP	1800	-	3,80	16,7	16,62
VTC-007	592-719CCM001	1250	1125	Indução > 1000 HP	1800	-	3,80	16,7	23,88
VTC-002	592-719CCM001	500	475	Indução < 1000 HP	1800	-	3,80	16,7	19,33
MEQ-702PBT013A	601-702PBT013A	500	500	Indução < 50 HP	1800	-	0,38	16,7	19,33
MEQ-702PBT013B	602-702PBT013B	5x100	100	Indução < 50 HP	1800	-	0,38	16,7	8,56
MEQ-702PBT013C	603-702PBT013C	5x100	100	Indução < 50 HP	1800	-	0,38	16,7	8,56

8.5 ANEXO-5

CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ELÉTRICO PARA SIMULAÇÃO DOS CALCULOS CONFORME “IEC”

8.5.1 Geradores conforme “IEC”

Tabela 8.6 - Características dos geradores conforme “IEC”

IDENT	Barra	MVA	KV Base	rpm	FP	X g	Rg	X/R
TG-2	70-700PMT004G	46,10	13,8	3600	0,80	0,28	0,0196	14,29

8.5.2 Motores conforme “IEC”

Tabela 8.7 - Características dos motores conforme “IEC”

IDENT	Barra	HP	KVA	kW	Tipo	Par de pólos	MW / par pólos	KV Base	X %	X/R
707C5001	211-707PMT004	1100	990	820,3	Síncrono > 1000 HP	4	0,21	3,80	20,0	14,29
707C5002	211-707PMT004	1100	990	820,3	Síncrono > 1000 HP	4	0,21	3,80	20,0	14,29
704MZ0301	221-700CCMMZ	500	475	372,8	Indução < 1000 HP	2	0,19	3,80	16,7	6,67
704MZ0401	221-700CCMMZ	500	475	372,8	Indução < 1000 HP	2	0,19	3,80	16,7	6,67
704MZ0501	221-700CCMMZ	500	475	372,8	Indução < 1000 HP	2	0,19	3,80	16,7	6,67
MEQ-BT052	222-700BT052	1200	1200	894,8	Indução < 50 HP	2	0,45	0,38	20,0	2,38
MEQ-BT065	223-700CCMMH	1200	1200	894,8	Indução < 50 HP	2	0,45	0,38	20,0	2,38
MEQ-BT601	231-703BT601	1200	1200	894,8	Indução < 50 HP	2	0,45	0,38	20,0	2,38
MEQ-BT007	241-300BT007	10x140	1400	187,7	Inversor regenerativo	2	0,09	0,38	33,0	10
MEQ-BT008	242-300BT008	10x140	1400	187,7	Inversor regenerativo	2	0,09	0,38	33,0	10
MEQ-BT009	243-300BT009	10x140	1400	187,7	Inversor regenerativo	2	0,09	0,38	33,0	10
MEQ-BT010	251-300BT010	10x120	1200	160,9	Inversor regenerativo	2	0,08	0,38	33,0	10
MEQ-BT011	252-300BT011	10x120	1200	160,9	Inversor regenerativo	2	0,08	0,38	33,0	10
MEQ-BT012	253-300BT012	10x120	1200	160,9	Inversor regenerativo	2	0,08	0,38	33,0	10
MEQ-BT006	254-300BT006	600	600	447,4	Indução < 50 HP	2	0,22	0,38	20,0	2,38
MA2051	2611-CCMSIEMENS	469	454,1	349,7	Indução < 1000 HP	4	0,09	3,80	16,7	6,67
MA2601	2611-CCMSIEMENS	704	691,1	525,0	Indução < 1000 HP	5	0,10	3,80	16,7	6,67
MA1901	261-CCM-A-A	1609	1448	1199,8	Indução > 1000 HP	7	0,17	3,80	16,7	6,67
MA2101	261-CCM-A-A	603	650	449,7	Indução < 1000 HP	4	0,11	3,80	16,7	6,67
MEQ-513CCMMT	583-513CCMMT	1200	1200	1609,2	Indução < 50 HP	2	0,80	0,40	20,0	2,38
MEQ-513CCMMV	585-513CCMMV	1200	1200	1609,2	Indução < 50 HP	2	0,80	0,40	20,0	2,38
MEQ-513CCMMW	586-513CCMMW	1200	1200	1609,2	Indução < 50 HP	2	0,80	0,40	20,0	2,38
MEQ-719QBT001	591-719QBT001	5x300	300	402,3	Indução < 50 HP	2	0,20	0,38	20,0	2,38
MT-01	592-719CCM001	1250	1125	1676,3	Indução > 1000 HP	2	0,84	3,80	16,7	6,67
MT-02 MT-03	592-719CCM001	2x500	475	670,5	Indução < 1000 HP	2	0,34	3,80	16,7	6,67
MT-05	592-719CCM001	350	332,5	469,4	Indução < 1000 HP	2	0,23	3,80	16,7	6,67

Tabela 8.8 - Características dos motores conforme "IEC" - continuação

IDENT	Barra	HP	KVA	kW	Tipo	Par de pólos	MW / par pólos	KV Base	X %	X/R
VTC-007	592-719CCM001	1250	1125	1676,3	Indução > 1000 HP	4	0,42	3,80	16,7	6,67
VTC-002	592-719CCM001	500	475	670,5	Indução < 1000 HP	2	0,34	3,80	16,7	6,67
MEQ-702PBT013A	601-702PBT013A	500	500	670,5	Indução < 50 HP	2	0,34	0,38	20,0	2,38
MEQ-702PBT013B	602-702PBT013B	5x100	100	134,1	Indução < 50 HP	2	0,07	0,38	20,0	2,38
MEQ-702PBT013C	603-702PBT013C	5x100	100	134,1	Indução < 50 HP	2	0,07	0,38	20,0	2,38
PILAO-1	2612-PILAO-1-2	700	645	522,0	Indução < 1000 HP	5	0,10	3,80	16,7	6,67
PILAO-2	2612-PILAO-1-2	700	645	522,0	Indução < 1000 HP	5	0,10	3,80	16,7	6,67
MA101-BV3	261-CCM-A-A	1340	1198	999,2	Indução = 1000 HP	5	0,20	3,80	13,3	6,67
MA0301	261-CCM-A-A	1609	1456	1199,8	Indução > 1000 HP	7	0,17	3,80	16,7	6,67
MA0801	262-CCM-A-B	1609	1456	1199,8	Indução > 1000 HP	7	0,17	3,80	16,7	6,67
MA1001-BV4	262-CCM-A-B	1340	1198	999,2	Indução = 1000 HP	5	0,20	3,80	13,3	6,67
PILAO-3	2612-PILAO-3-4	700	645	522,0	Indução < 1000 HP	5	0,10	3,80	16,7	6,67
PILAO-4	2612-PILAO-3-4	700	645	522,0	Indução < 1000 HP	5	0,10	3,80	16,7	6,67
MA1301	262-CCM-A-B	1005	895	749,4	Indução > 1000 HP	3	0,25	3,80	16,7	6,67
MA1401	262-CCM-A-B	1609	1456	1199,8	Indução > 1000 HP	7	0,17	3,80	16,7	6,67
MA2701	262-CCM-A-B	1340	1198	999,2	Indução = 1000 HP	5	0,20	3,80	13,3	6,67
MEQ-BT003	271-300BT003	10x120	120	160,9	Inversor regenerativo	2	0,08	0,38	33,0	10,00
MEQ-BT004	272-300BT004	10x120	120	160,9	Inversor regenerativo	2	0,08	0,38	33,0	10,00
MEQ-BT005	273-300BT005	10x120	120	160,9	Inversor regenerativo	2	0,08	0,38	33,0	10,00
MEQ-305BT001	281-305BT001	5x120	120	160,9	Indução > 50 HP	2	0,08	0,38	16,7	6,67
MEQ-918BT067	291-918BT067	4x300	1200	402,3	Indução < 50 HP	2	0,20	0,38	20,0	2,38
MEQ-918BT065	292-918BT065	300	300	402,3	Inversor regenerativo	2	0,20	0,38	33,0	10,00
MEQ-918BT066	293-918BT066	6x100	600	134,1	Indução < 50 HP	2	0,07	0,38	20,0	2,38
MEQ-718BT001	301-718BT001	5x200	1200	268,2	Indução > 50 HP	2	0,13	0,44	16,7	6,67
COMPR-01	321-707PMT003	1100	990	1475,1	Síncrono > 1000 HP	4	0,37	3,80	20,0	14,29
MEQ-509CCMME	511-509CCMME	1200	1200	1609,2	Indução < 50 HP	2	0,80	0,38	20,0	2,38
MEQ-509CCMMF	512-509CCMMF	1200	1200	1609,2	Indução < 50 HP	2	0,80	0,38	20,0	2,38
MEQ-507CCMMC	521-507CCMMC	900	900	1206,9	Indução < 50 HP	2	0,60	0,38	20,0	2,38
MEQ-722CCM01	531-722CCM01	10x120	120	160,9	Indução > 50 HP	2	0,08	0,38	16,7	6,67
MEQ-722CCM02	531-722CCM02	10x120	120	160,9	Indução > 50 HP	2	0,08	0,38	16,7	6,67
MEQ-722CCM03	531-722CCM03	10x120	120	160,9	Indução > 50 HP	2	0,08	0,38	16,7	6,67
MEQ-709CCM502	541-709CCM502	1200	1200	1609,2	Indução < 50 HP	2	0,80	0,38	20,0	2,38
MEQ-709CCM503	542-709CCM503	600	600	804,6	Indução < 50 HP	2	0,40	0,38	20,0	2,38
MEQ-709CCM504	543-709CCM504	600	600	804,6	Indução < 50 HP	2	0,40	0,38	20,0	2,38
MEQ-510CCMMH	551-510CCMMH	10x100	100	134,1	Inversor regenerativo	2	0,07	0,38	33,0	10,00
MEQ-510CCMMI	552-510CCMMI	10x100	100	134,1	Inversor regenerativo	2	0,07	0,38	33,0	10,00
MEQ-511CCMML	554-510CCMML	10x75	75	100,6	Indução < 50 HP	2	0,05	0,38	20,0	2,38
MEQ-511CCMMN	555-510CCMMN	10x75	75	100,6	Indução < 50 HP	2	0,05	0,38	20,0	2,38
MEQ-511CCMMO	556-510CCMMO	1000	1000	1341,0	Indução < 50 HP	2	0,67	0,38	20,0	2,38
FORNO CAL	561-721PMT002	800	760	1072,8	Indução < 1000 HP	2	0,54	3,80	16,7	6,67
MFC-01-02	562-721PBT001	2x200	160	268,2	Indução > 50 HP	2	0,13	0,38	16,7	6,67
MEQ-721PBT001	562-721PBT001	800	800	1072,8	Indução < 50 HP	2	0,54	0,38	20,0	2,38
BBA-CAP-01-02	571-709PBT011	2x150	142,5	201,2	Indução > 50 HP	2	0,10	0,38	16,7	6,67
MEQ-513CCMMR	581-513CCMMR	1200	1200	1609,2	Indução < 50 HP	2	0,80	0,40	20,0	2,38
MEQ-513CCMMS	582-513CCMMS	1200	1200	1609,2	Indução < 50 HP	2	0,80	0,40	20,0	2,38

8.6 ANEXO-6

SISTEMAS DE EXCITAÇÃO *IEEE* “*SERIES-1*” E “*SERIES-2*”

A “*IEC-60909-0*” faz uso de dois modelos diferentes de sistemas de excitação de máquinas síncronas para determinação das correntes de curto-circuito de regime I_K .

A primeira, “*Series-1*”, considera um modelo de excitação estática cujo suprimento de potência é feito por meio de transformador ligado aos terminais do gerador, conforme ilustrado na figura 8.4. Nesta configuração, o regulador de tensão atua sobre os retificadores controlados. O modelo matemático correspondente é o representado na figura 8.5.

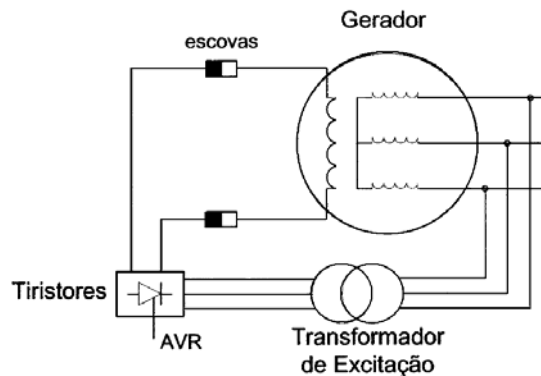


Figura 8.4 - Sistema de excitação estático “*IEEE Series-1*” alimentado pelos terminais do gerador.

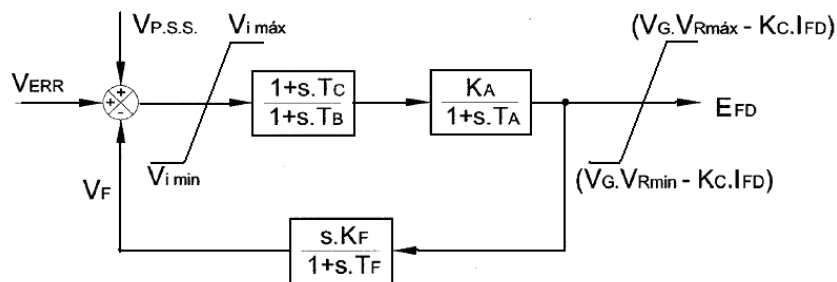


Figura 8.5 - Diagrama de blocos do modelo “*IEEE Series-1*”.

O segundo modelo, “Series-2”, considera a representação matemática do sistema de excitação estático com alimentação composta, ou seja, com suprimento de potência feito por meio das correntes e tensões do gerador, conforme ilustrado na figura 8.6.

Nesta configuração o regulador de tensão atua sobre os retificadores controlados. O modelo matemático correspondente é o representado na figura 8.7.

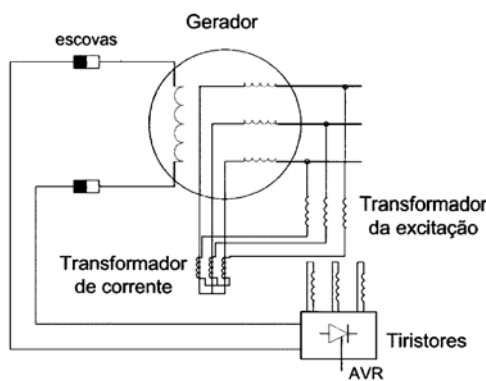


Figura 8.6 - Sistema de excitação estático “IEEE Series-2” alimentado pelos terminais do gerador por meio de tensões e correntes.

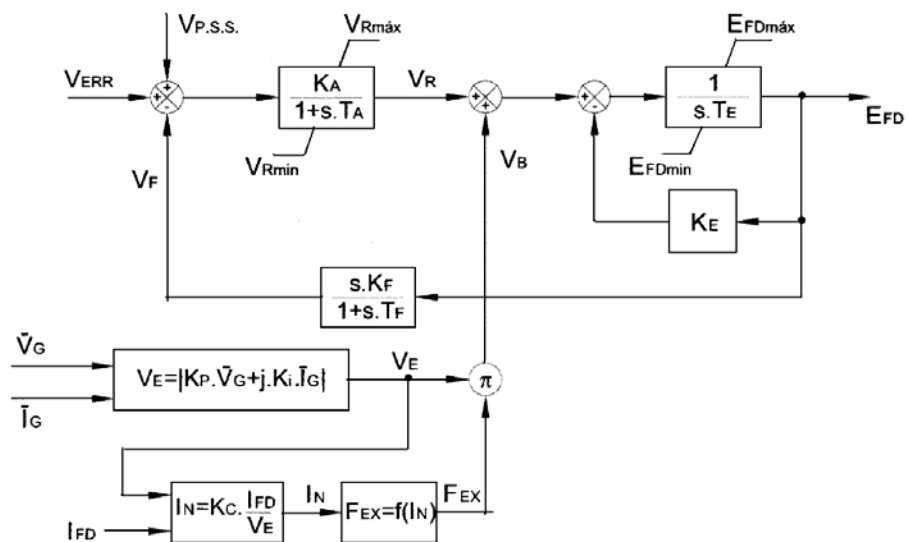


Figura 8.7 - Diagrama de blocos do modelo “IEEE Series-2”.