

**UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE UM SISTEMA ELÉTRICO EM  
MÉDIA E BAIXA TENSÃO**

Área de Energia elétrica

por

Laudo Pereira Ramos

Geraldo Peres Caixeta, Doutor  
Orientador

Itatiba (SP), dezembro de 2009

**UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE UM SISTEMA ELÉTRICO EM  
MÉDIA E BAIXA TENSÃO**

Área de Energia elétrica

por

Laudo Pereira Ramos

Monografia apresentada à Banca Examinadora  
do Trabalho de Conclusão do Curso de  
Engenharia Elétrica para análise e aprovação.  
Orientador: Geraldo Peres Caixeta, Doutor

Itatiba (SP), dezembro de 2009

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>v</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>vi</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>viii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1.1. Objetivo Geral.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1.2. Objetivos Específicos.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2. METODOLOGIA.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....</b>	<b>2</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. SISTEMAS DE ATERRAMENTO.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1.1. Sistemas isolados.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1.2. Sistemas diretamente aterrados.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.3. Sistemas aterrados através de uma impedância.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.4. Sistemas compensados ou ressonantes.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2. COMPONENTES SIMÉTRICAS.....</b>	<b>9</b>
<b>2.2.1. Análise da corrente de sequência zero.....</b>	<b>12</b>
<b>2.3. MODELAMENTO E ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITOS.....</b>	<b>14</b>
<b>2.3.1. Curto-circuito trifásico.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3.2. Curto-circuito bifásico.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3.3. Curto-circuito monofásico.....</b>	<b>18</b>
<b>2.4. ANÁLISE DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO.....</b>	<b>19</b>
<b>2.4.1. Corrente de curto-circuito assimétrica.....</b>	<b>19</b>
<b>2.4.2. Corrente de curto-circuito simétrica.....</b>	<b>19</b>
<b>2.5. CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO.....</b>	<b>21</b>
<b>2.5.1. Sequência de cálculo da corrente de curto-circuito.....</b>	<b>22</b>
<b>2.6. CORRENTE DE SOBRECARGA EM SISTEMAS ELÉTRICOS.....</b>	<b>27</b>
<b>2.6.1. A integral de joule dos condutores.....</b>	<b>28</b>
<b>2.7. PLANEJAMENTO DA PROTEÇÃO ELÉTRICA.....</b>	<b>30</b>
<b>2.7.1. Requisitos de um sistema de proteção.....</b>	<b>30</b>
<b>2.7.2. Filosofia da Proteção.....</b>	<b>31</b>
<b>2.7.3. Dispositivos de Proteção.....</b>	<b>32</b>
<b>2.7.4. Condições de proteção.....</b>	<b>36</b>
<b>2.7.5. Etapas para a elaboração do estudo da proteção.....</b>	<b>40</b>
<b>3. PROJETO.....</b>	<b>40</b>

<b>3.1. DETERMINAÇÃO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO .....</b>	<b>41</b>
3.1.1. Cálculo das impedâncias de curto-circuito .....	41
3.1.2. Cálculo das correntes de curto-circuitos.....	48
3.1.3. Cálculo da Corrente de Icc no CCM1.....	49
3.1.4. Cálculo da Corrente de Icc no CCM2.....	49
3.1.5. Cálculo da Corrente de Icc no CCM3.....	50
3.1.6. Cálculo da Corrente de Icc no CCM4.....	50
3.1.7. Cálculo da Corrente de Icc no CCM5.....	50
3.1.8. Cálculo da Corrente de Icc no CCM6.....	51
3.1.9. Cálculo da Corrente de Icc no CCM7.....	51
3.1.10. Cálculo da Corrente de Icc no CCM8.....	51
3.1.11. Cálculo da Corrente de Icc no CCM9.....	52
3.1.12. Cálculo da Corrente de Icc no CCM10.....	52
3.1.13. Cálculo da Corrente de Icc no QGFL1.....	52
3.1.14. Cálculo da Corrente de Icc no QGFL2.....	53
<b>3.2. COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE .....</b>	<b>53</b>
3.2.1. Proteção do motor CCM's de 1 à 5 .....	53
3.2.2. Proteção do motor CCM 6.....	54
3.2.3. Proteção do motor CCM's 7 e 8 .....	56
3.2.4. Proteção do motor CCM's 9 e 10 .....	57
3.2.5. Proteção geral CCM's de 1 à 5.....	58
3.2.6. Proteção geral CCM 6.....	60
3.2.7. Proteção geral CCM's de 7 e 8 .....	61
3.2.8. Proteção geral CCM's de 9 e 10 .....	63
3.2.9. Proteção geral do QGFL1.....	64
3.2.10. Proteção geral do QGFL2.....	65
3.2.11. Proteção geral do QGBT.....	67
3.2.12. Proteção geral da cabine primária .....	67
<b>4. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>71</b>
<b>Anexo I – Cálculo Das impedâncias e correntes.....</b>	<b>73</b>
<b>Anexo II – Coordenação e seletividade.....</b>	<b>77</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

SEP	Sistema elétrico de potência
Tar	Tempo de Atuação do Relé
Taf	Tempo de Atuação do Fusível
Tad	Tempo de Atuação do Disjuntor
Inm	Corrente Nominal do Motor
Inr	Corrente Nominal do Relé
Imm	Corrente do maior motor
Ipm	Corrente de Partida do Motor
Imf	Corrente do Maior Fusível
$I_c$	Corrente de Carga
$I_f$	Corrente Fusível
$I_b$	Corrente do Projeto ou Corrente de Carga
$I_n$	Corrente Nominal do Condutor
$I_z$	Capacidade de Condução de Corrente do Condutor
$I_{cc}$	Corrente de Curto Circuito
$I_{cc3\emptyset}$	Corrente de Curto Circuito Trifásica Simétrica
$I_{cc3\emptyset A}$	Corrente de Curto Circuito Trifásica Assimétrica
$I_{cc3\emptyset I}$	Corrente de Curto Circuito Trifásica Impulso
$I_{cc2\emptyset}$	Corrente de Curto Circuito Bifásica
$I_{cc1\emptyset}$	Corrente de Curto Circuito Monofásica
Pb	Potencia de base
Vb	Tensão de base
Zus	Impedância Reduzida do Sistema
Zut	Impedância do Transformador de Potência
Zuc	Impedância dos cabos do transformador
Zuc1	Impedância dos cabos do QGBT ao CCM
Zuc2	Impedância dos cabos do CCM à carga
Zub1	Impedância dos barramentos do QGBT
QGBT	Quadro geral de baixa tensão
CCM	Centro de Controle de Motores
QGFL	Quadro Geral de Força e Luz
QTFL	Quadro Terminal de Força e Luz
TUG's	Tomada de Uso Geral
TUE's	Tomada de Uso Específico
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TRT	Tensão de Restabelecimento Transitória
Pn	Potência nominal do transformador
Zutp	Impedância percentual do transformador

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Diagrama fasorial do sistema em operação normal e sob falta respectivamente.....	4
Figura 2- Surgimento da Tensão de restabelecimento transitória (TRT). .....	5
Figura 3- Sistemas diretamente aterrados.....	6
Figura 4- Diagrama fasorial em operação normal e sob falta respectivamente. ....	7
Figura 5- Sistemas compensados ou ressonantes.....	8
Figura 6- Sistemas de sequências positiva, negativa e zero. ....	10
Figura 7- Carga conectada em estrela com neutro aterrado.....	13
Figura 8- Circuito equivalente do curto-circuito trifásico. ....	15
Figura 9- Circuito equivalente do curto-circuito bifásico.....	16
Figura 10- Circuito equivalente do curto-circuito monofásico.....	18
Figura 11- Ciclo completo do comportamento da corrente de curto-circuito.....	20
Figura 12- Fluxograma do processo do estudo da proteção .....	22
Figura 13- Zonas de proteção de um sistema elétrico .....	32
Figura 14- Características tempo x corrente de fusíveis tipos gG e AM respectivamente.....	34
Figura 15- Característica tempo x corrente de disjuntor termomagnético. ....	35
Figura 16 - Diagrama de impedâncias do sistema elétrico.....	42
Figura 17 – Diagrama unifilar do sistema elétrico de média tensão .....	75
Figura 18 – Diagrama unifilar do sistema elétrico de baixa tensão .....	76
Figura 19 – Característica de motores de indução trifásicos de IV pólos .....	77
Figura 20 - Característica tempo x corrente de fusíveis NH.....	78
Figura 21 - Curvas tempo x corrente de relés térmicos.....	79
Figura 22 - Capacidade máxima da corrente de curto-circuito.....	80
Figura 23 - Curva característica tempo x corrente para fusíveis “D”. ....	81
Figura 24 - Capacidade de condução de corrente de condutores de PVC”. ....	82
Figura 25 – Característica tempo x corrente de relés digitais.....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fator de assimetria F para $T=1/4$ ciclo .....	21
Tabela 2 - Temperaturas máximas para serviço contínuo, sobrecarga e curto circuito .....	28
Tabela 3 - Integral de Joule para aquecimento adiabático para condutores de cobre .....	30
Tabela 4 - Capacidade de corrente, resistência e reatância dos barramentos (Cu) .....	73
Tabela 5. Resistência e reatância dos condutores de PVC .....	74

## RESUMO

Ramos, Laudo Pereira. **Dimensionamento e análise de um sistema elétrico em média e baixa tensão**. Itatiba, 2009 no f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade São Francisco, Itatiba, 2009.

É desenvolvido todo um processo de estudo de proteção de sistemas elétricos de potência desde a baixa tensão -que corresponde ao quadro geral de baixa tensão, centro de controle de motores e quadro geral de força e luz- até a média tensão envolvendo o disjuntor geral e o relé primário.

Inicia-se com os tipos e conceitos de aterramentos. Apresenta uma metodologia para a determinação das impedâncias dos condutores e desenvolve o modelamento matemático dos curto-circuitos trifásico, bifásico e fase-terra.

Discorre sobre os conceitos envolvidos na proteção de sistemas elétricos de potência, aborda aspectos relacionados aos dispositivos de proteção e apresenta os critérios mínimos de coordenação e seletividade apontados nas normas nacionais.

Por fim, a partir do diagrama unifilar de um sistema elétrico específico, é desenvolvido todo o estudo de curto-circuito, que conduz ao dimensionamento e especificação dos dispositivos de proteção propriamente ditos.

**Palavras-chave:** Proteção. Elétrica. Sistemas.

## ABSTRACT

*Ramos, Laudo Pereira. Sizing and analysis of an electrical system in medium and low voltage. Itatiba, 2009 in Work of Course's Conclusion, Universidade São Francisco, Itatiba, 2009.*

*It is developed a study process protection system's electrical power from the low-voltage that corresponds to the general framework of low-center of motor control and general framework for strength and light-up to the medium-voltage, involving general circuit breaker and the primary relay.*

*It begins with the concepts and types of grounding. Presents a methodology for determining the impedances of the conductors and develops the mathematical modeling of short-circuit three-phase, two-phase and phase-earth.*

*Discusses about the concepts involved in the protection of electric power systems, discusses issues related to protection devices and presents the minimum criteria for selectivity and coordination aimed at national standards.*

*Finally, from the line diagram of an electric any specific system, is developed all- around the study of short-circuit, leading the design and specification of protective devices themselves.*

**Keywords:** *Protection. Electrical. Systems.*

# 1. INTRODUÇÃO

A matriz industrial brasileira é grande e variada, mas apesar desta diversificação de atividades e estratégias empresariais, uma preocupação é comum a todos os executivos -a interrupção da produção- que acarreta em grandes prejuízos ocasionados pelo lucro cessante.

Dentre os vários fatores que ocasionam a parada de produção, particularmente a falta de energia por seccionamento automático da alimentação, por motivos fúteis, preocupa engenheiros e técnicos ligados à produção, que são pressionados a tomar decisões emergenciais e muitas vezes sem embasamento técnico para manter a produção das fábricas.

Nestas situações, geralmente a causa do problema é a atuação indevida de um dispositivo de proteção, seja ele um fusível, disjuntor ou relé, que atuou de forma imprópria. No entanto vários são os motivos que podem sensibilizar um dispositivo de proteção, e a experiência mostra que na maioria das vezes, não foi uma anomalia no sistema de proteção ou falha do dispositivo a causa da atuação, e sim, a especificação errônea deste dispositivo que fora causado pelo dimensionamento inadequado.

É compreensível que isto ocorra considerando-se que na área de instalações elétricas, o projeto e a proteção de sistemas elétricos são tarefas distintas e como são desenvolvidas por profissionais diferentes, não permite a troca de informações necessárias para um bom resultado.

Na área de projetos elétricos é comum os projetos serem desenvolvidos de forma que não haja uma preocupação específica com a proteção elétrica do sistema, isto ocorre devido ao custo que este serviço acrescentaria ao projeto, por demandar profissionais especializados ou programas com preços elevados

Conseqüentemente, a proteção dos circuitos é feita considerando-se a condição mínima satisfatória, que é a escolha do dispositivo através da sua corrente nominal e desconsiderando-se qualquer outro critério que garanta a disponibilidade do sistema.

Na prática o que ocorre, é que outros fatores como aterramento, corrente de partida, corrente de magnetização etc., fazem com que estes dispositivos atuem de forma inadequada e não seletiva, provocando desligamentos indesejados e prejuízos.

No trabalho que se segue, é apresentada uma metodologia de cálculo e dimensionamento de dispositivos, que embora trabalhosa e específica, pode ser uma alternativa na solução de parte dos problemas básicos encontrados, quando se dimensiona dispositivos de proteção.

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Dimensionar e especificar os dispositivos de proteção contra sobrecorrentes para um sistema elétrico, sem causar grandes alterações nas suas características, ou gerar altos custos.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

Entender o processo de curto-circuito, determinar os níveis de curto-circuito nos barramentos dos quadros e apresentar uma metodologia para se obter coordenação e seletividade entre dispositivos de proteção.

## **1.2. METODOLOGIA**

A partir das impedâncias nos pontos, são determinadas as correntes de curto-circuito as quais possibilitam o dimensionamento e a especificação dos dispositivos de proteção, bem como a coordenação entre eles.

## **1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO**

Basicamente o trabalho pode ser dividido em duas etapas sendo que na primeira, no item fundamentação teórica são explanados os conceitos mínimos necessários para o entendimento do processo de curto-circuito, como sistemas de aterramento, cálculos das impedâncias e correntes de curto-circuito.

Na segunda parte é feita uma descrição do sistema elétrico a ser estudado, fazendo uma breve apresentação dos dispositivos de proteção utilizados neste sistema e descrevendo os cálculos de proteção e análise de coordenação dos dispositivos.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

A fundamentação teórica está sub-dividida em sistemas de aterramento, modelamento, análise de curto-circuito e cálculo da corrente de curto-circuito

### **2.1. SISTEMAS DE ATERRAMENTO**

O aterramento num SEP influencia o seu desempenho em diversos fatores, indo desde o funcionamento correto do sistema, até a segurança das pessoas e do patrimônio.

Existem diversos tipos de sistemas de aterramento, cada um com vantagens e desvantagens muito nítidas, as quais devem ser avaliadas para cada caso em questão. Dentre os fatores que podem influenciar na escolha de um sistema de aterramento destacam-se:

- Nível de tensão do SEP;
- Tensões transitórias;
- Componentes elétricos do sistema;
- Continuidade do fornecimento;
- Custo do sistema de proteção;
- Segurança;
- Níveis toleráveis de danos entre outros.

Em função dos objetivos que se pretende atingir em relação a estes fatores, pode-se classificar os aterramentos em:

- Sistemas isolados
- Sistemas diretamente aterrados
- Sistemas aterrados através de resistor ou reator
- Sistemas compensados ou ressonantes.

### 2.1.1. Sistemas isolados

Em sistemas isolados, o neutro do transformador não tem conexão intencional com a terra, pois este acoplamento é feito virtualmente através das capacitâncias fase-terra. Portanto dois fatores que contribuem para a corrente de falta –que é a intensidade de corrente de curto-circuito- nesse tipo de aterramento são; a resistência de falta e a reatância fase-terra de sequência negativa.

Quando ocorre uma falta fase-terra, esta capacitância é curto-circuitada, fazendo com que o ponto de neutro do triângulo de tensões seja deslocado para a fase em curto, assumindo assim a tensão desta fase. Por consequência, as fases sadias elevam suas tensões em relação ao neutro ou ainda tensão de fase, porém mantendo-se constantes as tensões entre fases, ou seja, a tensão de linha. Como o nível de tensão aumenta entre neutro e fases, isto também provoca um problema de isolação aos componentes da instalação conforme mostra a figura 1.

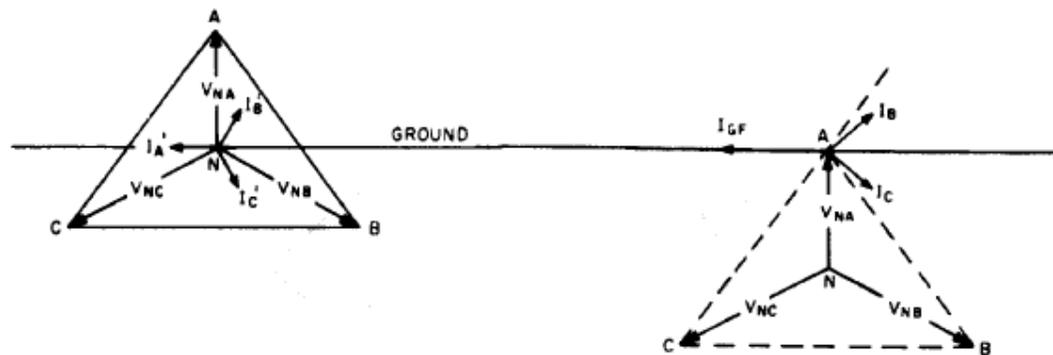


Figura 1-Diagrama fasorial do sistema em operação normal e sob falta respectivamente  
Fonte: Adaptado de IEEE (2001)

Supondo um sistema em baixa tensão de 380V tem-se:

- Diagrama fasorial do sistema em operação normal ( $V_f = 220V$  e  $V_l = 380V$ ).
- Diagrama fasorial do sistema sob falta ( $V_{na} = 0$ ,  $V_f = 380V$  e  $V_l = 380V$ ).

Para altos valores de correntes, a auto-extinção das faltas através da abertura das chaves ou disjuntores, se torna difícil, mesmo na passagem da corrente por zero, isto devido à elevada tensão transitória de restabelecimento.

Antes, porém, dessa efetiva abertura da chave a tensão sobre seus terminais provoca um transitório contendo altas taxas de crescimento ( $kV/\mu s$ ). Neste período a tensão sobre a chave é conhecida como Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) na Inglaterra é conhecida como

Tensão de Reignição. Na ocorrência da falta começa a circular pelo disjuntor uma corrente de curto-circuito  $I_{cc}$ . A abertura dos contatos do disjuntor não garante a interrupção da corrente, uma vez que pode ser formado um arco em seus terminais, através do qual a corrente se mantém. A eficiência da interrupção depende do tipo de disjuntor utilizado (alguns utilizam câmaras isoladas compostas por gás SF6, óleo isolante, etc.) sendo interrompida em alguns dos instantes que a corrente (alternada) passa pelo seu zero natural em regime permanente senoidal, conforme descrito em (Caixeta, 2005). A figura 2 ilustra o comportamento da tensão de restabelecimento transitória.

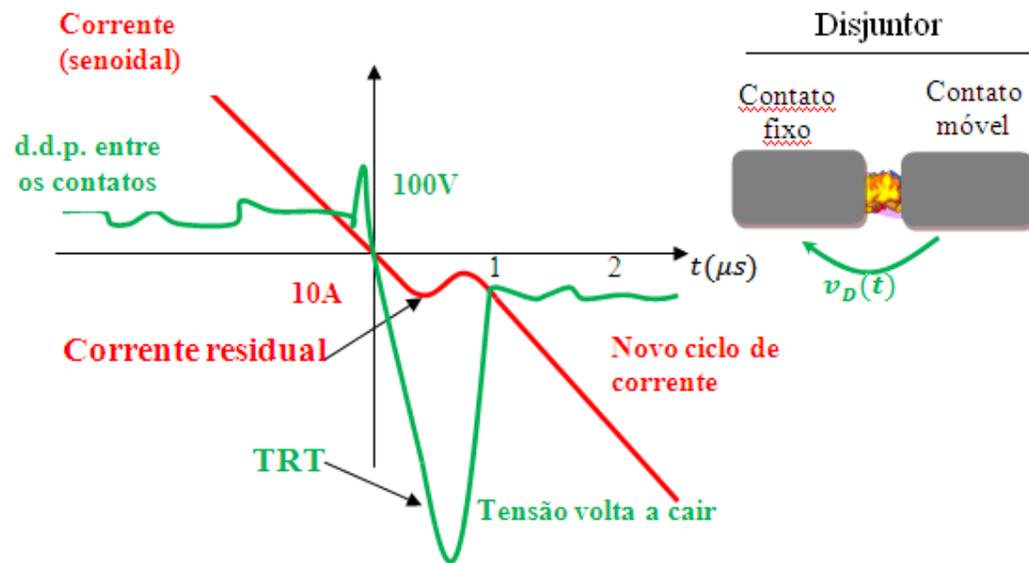


Figura 2- Surgimento da Tensão de restabelecimento transitória (TRT).  
Fonte: Adaptada de Caixeta (2005).

a) A TRT provoca o surgimento de uma corrente residual, a qual aquece o ar em torno dos contatos;

b) O ar quente se torna condutor;

c) A tensão sobre os terminais dos contatos cai;

d) Surge um novo ciclo de corrente.

Obs.: A reignição térmica ocorre quando o novo ciclo de corrente se estabelece em menos de  $\frac{1}{4}$  de ciclo. Caso contrário tem-se a reignição dielétrica.

A vantagem dos sistemas isolados é sua continuidade de operação, pois para correntes de baixos valores e o triângulo de tensões não sendo relativamente afetado, estes sistemas podem se manter operacionais durante faltas sustentadas, sem que o sistema sofra um desligamento automático.

### 2.1.2. Sistemas diretamente aterrados

Nestes sistemas o ponto neutro é conectado diretamente à terra na entrada de energia elétrica -antes da medição e proteção- e nos vários transformadores de baixa tensão que existirem em todo o circuito de distribuição na planta do consumidor. Este sistema é denominado multiaterrado e é normalmente usado nos sistemas de distribuição em baixa tensão no Brasil –estrela com neutro aterrado- conforme mostra a figura 3.

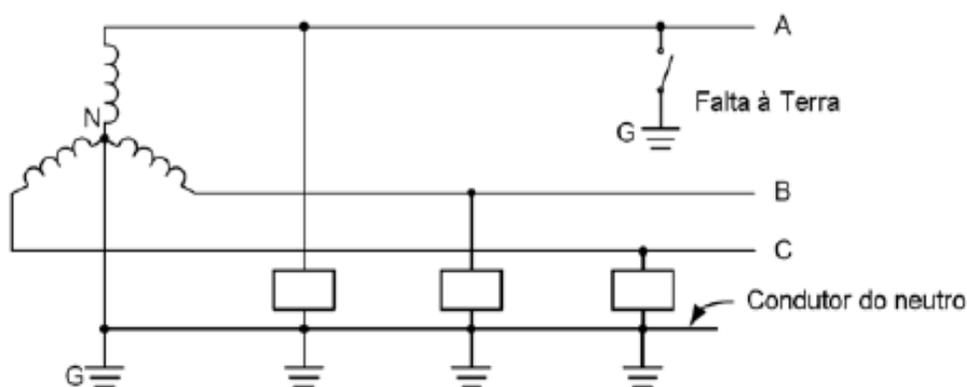


Figura 3- Sistemas diretamente aterrados  
Fonte: Adaptado de Schweitzer Engineering Laboratories (2001)

Uma vantagem deste esquema de aterramento é a fácil detecção da corrente de falta através de relés de sobrecorrente, pois, devido à baixa impedância do percurso entre as cargas e a terra, as correntes nestes casos são de valores elevadas, impondo assim a pronta interrupção do circuito quando do surgimento da falta, evitando os esforços térmicos e eletromecânicos causados ao sistema. A outra vantagem é a menor intensidade das sobretensões uma vez que as faltas não deslocam o neutro do sistema, diminuindo assim as solicitações da isolação conforme mostra a figura 4.

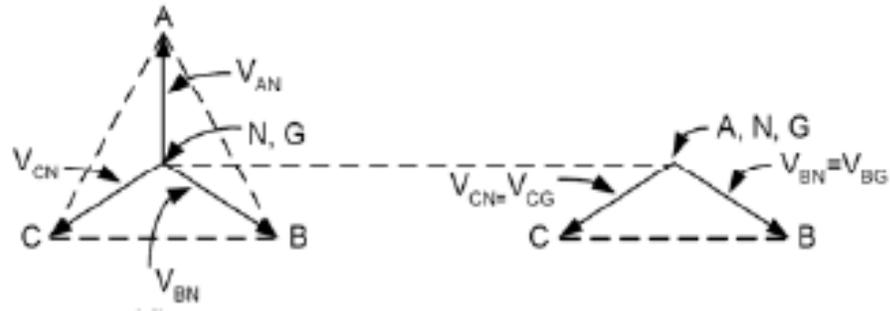


Figura 4- Diagrama fasorial em operação normal e sob falta respectivamente.  
 Fonte: Adaptado de Schweitzer Engineering Laboratories (2001)

No entanto, apesar de serem devastadoras quando sustentadas, a maioria das faltas à terra são transitórias e não demandam a interrupção definitiva do circuito. Por isso o religamento automático com várias tentativas é amplamente utilizado nestes casos, porém o ciclo resultante - interrupção/religamento - pode ser prejudicial para cargas como motores e sistemas de automação sensíveis a afundamentos de tensão. Outra desvantagem é que devido às correntes de falta serem de níveis elevados, qualquer contato com a terra, conduz a um curto-circuito fase-terra e que pode evoluir para um curto-circuito bifásico ou mais raramente trifásico.

### 2.1.3. Sistemas aterrados através de uma impedância

Quando o sistema é aterrado através de uma baixa impedância – seja esta resistiva ou indutiva - a intensidade da corrente de falta diminui, porém ainda se mantêm em níveis elevados , o que impossibilita a operação do sistema quando do surgimento da primeira falta à terra. No entanto esta diminuição é significativa também nos estresses térmicos e eletromecânicos dos componentes da instalação e por conseqüência no custo dos cubículos de média tensão.

Da mesma forma, quando o sistema é aterrado através de uma alta impedância – seja esta resistiva ou indutiva - a intensidade da corrente é limitada a valores mínimos, sendo o valor da impedância igual ou menor que a impedância capacitiva para a terra, reduzindo assim os níveis das sobretensões transitórias do sistema a valores suportáveis.

Em vários aspectos este tipo de aterramento é igual ao esquema com neutro isolado, pois faltas à terra nestes sistemas também deslocam o ponto de neutro sem alterar as tensões entre fases e permitem que o sistema opere sob faltas sustentadas.

#### 2.1.4. Sistemas compensados ou ressonantes

Pode-se dizer que neste sistema tem-se a combinação das várias possibilidades discutidas anteriormente. Neste sistema, uma bobina com núcleo de ar variável, é conectada entre o neutro do transformador em estrela e a terra de forma que se possa ajustar a corrente entre um valor mínimo e máximo, de uma faixa que depende do valor da indutância conforme mostra a figura 5.

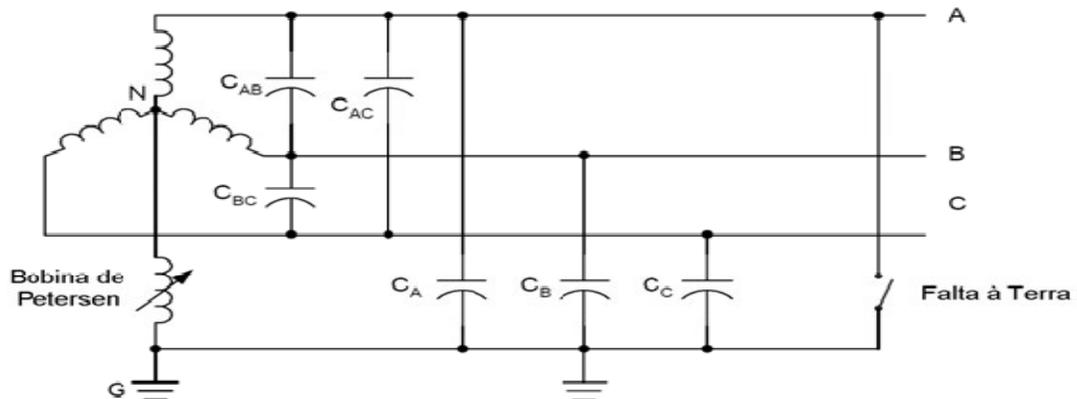


Figura 5- Sistemas compensados ou ressonantes.

Fonte: Adaptado de Schweitzer Engineering Laboratories (2001)

Conforme mostra a figura 5, quando ocorre uma falta à terra, o ponto neutro do sistema é deslocado e adquire a tensão fase-terra da fase em curto, provocando uma corrente de curto-circuito que percorre a bobina.

A bobina de Petersen é utilizada para diminuir ao máximo as correntes de faltas devidas à capacitâncias fase-terra do sistema. Para isso a bobina é ajustada de forma que apresente o mesmo valor de reatância das capacitâncias fase-terra, e quando isso ocorre diz-se que o sistema está compensado, sintonizado ou em ressonância.

Quando ocorre a falta, a corrente que circula na indutância está noventa graus atrasada em relação à tensão, e a corrente que circula pela capacitância está noventa graus adiantada em relação à mesma tensão, completando  $180^\circ$  de defasagem, portanto elas se anulam quase que totalmente, sobrando apenas uma pequena corrente residual.

Este tipo de aterramento reduz a corrente de curto-circuito em até menos de 10% em relação a sistemas não aterrados. Alguns tipos de reatores possuem êmbolo móvel que pode ser controlado automaticamente e podem conseguir sintonia de quase 100%.

Este tipo de reator recebe este nome em homenagem ao seu criador que introduziu este conceito em 1917.

## **2.2. COMPONENTES SIMÉTRICAS**

Conhecido como Teorema de Fortescue, este modelamento matemático foi apresentado pela primeira vez pelo Dr. Charles L. Fortescue em 1918 no trabalho intitulado “Method of Simetrical Coordinates Applied to Solution of Polyphase Networks”, e estabelece que qualquer sistema polifásico desequilibrado de fasores pode ser decomposto em três sistemas equilibrados de sequências zero, positiva e negativa.

Sistema de sequência zero - Sistema de fasores em que as tensões ou correntes atingem seus valores máximos no mesmo instante, ou seja, são fasores paralelos. Em sistemas desequilibrados com neutro aterrado, ou aterrado através de uma impedância, é necessária a presença dos três sistemas de sequência para representar o sistema original, pois além de combinar características de sistemas desequilibrados ainda existe o retorno da corrente de sequência zero, cujo percurso é através do neutro ou terra.

Sistema de sequência positiva- É um sistema de fasores em que as tensões ou correntes atingem seus valores máximos na mesma sequência do sistema original. Para representar o sistema trifásico original equilibrado de fasores, basta existir um sistema de sequência positiva para definir suas características como um todo.

Sistema de sequência negativa- É um sistema de fasores em que as tensões ou correntes atingem seus valores máximos na sequência inversa do sistema original. A inversão da sequência se dá pelo fato do sistema original apresentar desequilíbrio, e, portanto, na representação destes sistemas é necessário a parcela relativa às componentes de sequência negativa.

A figura 6 ilustra o exposto acima.

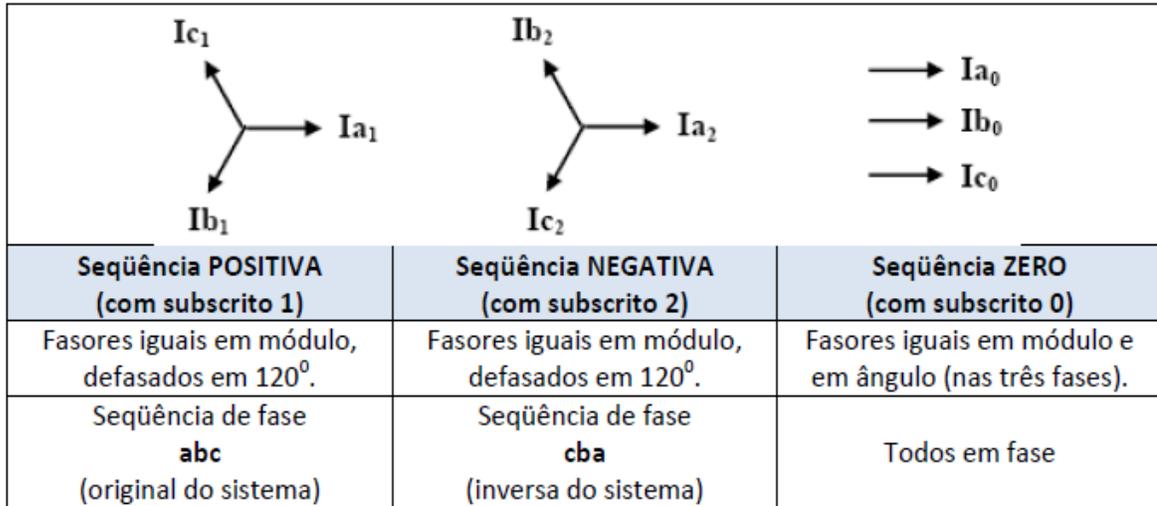


Figura 6- Sistemas de seqüências positiva, negativa e zero.  
Fonte: Adaptado de Caixeta (2005)

Considerando-se os sistemas da figura 8 pode-se escrever:

$$I_a = I_{a_0} + I_{a_1} + I_{a_2} \quad (2.2.1)$$

$$I_b = I_{b_0} + I_{b_1} + I_{b_2} \quad (2.2.2)$$

$$I_c = I_{c_0} + I_{c_1} + I_{c_2} \quad (2.2.3)$$

Analogamente, em termos de tensão tem-se:

$$V_a = V_{a_0} + V_{a_1} + V_{a_2} \quad (2.2.4)$$

$$V_b = V_{b_0} + V_{b_1} + V_{b_2} \quad (2.2.5)$$

$$V_c = V_{c_0} + V_{c_1} + V_{c_2} \quad (2.2.6)$$

Portanto ( $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$ ) são fasores de um sistema desequilibrado dos quais ( $V_{a_0} + V_{b_0} + V_{c_0}$ ), ( $V_{a_1} + V_{b_1} + V_{c_1}$ ) e ( $V_{a_2} + V_{b_2} + V_{c_2}$ ), são as componentes simétricas de seqüência zero, positiva e negativa respectivamente.

### O operador a

É um operador de valor unitário que quando aplicado a um fasor, submete este a uma rotação de  $120^\circ$  nos mesmos sentido e velocidade anteriores.

$$a = 1 \angle 120^\circ = -0,500 + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\Rightarrow a^2 = 1 \angle 240^\circ = 1 \angle -120^\circ = -0,500 - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Considerando como referência a figura 2.2.1 e as equações (2.2.4), (2.2.5) e (2.2.6) tem-se que:

$$V_{a_0} = V_{b_0} = V_{c_0} \quad (2.2.7)$$

$$V_{b_1} = a^2 V_{a_1} \text{ e } V_{c_1} = a V_{a_1} \quad (2.2.8)$$

$$V_{b_2} = a V_{a_2} \text{ e } V_{c_2} = a^2 V_{a_2} \quad (2.2.9)$$

Substituindo-se as equações (2.2.7), (2.2.8) e (2.2.9) em (2.2.4), (2.2.5) e (2.2.6) tem-se o sistema desequilibrado em função de  $V_{a_0}$ ,  $V_{a_1}$  e  $V_{a_2}$ .

$$V_a = V_{a_0} + V_{a_1} + V_{a_2} \quad (2.2.10)$$

$$V_b = V_{a_0} + a^2 V_{a_1} + a V_{a_2} \quad (2.2.11)$$

$$V_c = V_{a_0} + a V_{a_1} + a^2 V_{a_2} \quad (2.2.12)$$

Ou na forma matricial

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a_0} \\ V_{a_1} \\ V_{a_2} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_{a_0} \\ V_{a_1} \\ V_{a_2} \end{bmatrix} \quad (2.2.13)$$

Onde a matriz A e sua inversa são respectivamente:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.2.14)$$

E finalmente multiplicando-se a equação (2.2.13) por  $A^{-1}$  obtém-se:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.2.15)$$

Ou na forma algébrica:

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \quad (2.2.16)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (2.2.17)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (Va + a^2Vb + aVc) \quad (2.2.18)$$

Analogamente para corrente tem-se:

$$Ia_0 = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \quad (2.2.19)$$

$$Ia_1 = \frac{1}{3} (I_a + aIb + a^2 + a^2Ic) \quad (2.2.20)$$

$$Ia_2 = \frac{1}{3} (I_a + a^2Ib + aIc) \quad (2.2.21)$$

### 2.2.1. Análise da corrente de sequência zero

Esta análise em particular merece destaque, pois sua interpretação física possibilita a aplicação prática e direta no estudo de proteção de sistemas elétricos de potência.

Como exemplo considere-se um sistema elétrico com cargas equilibradas ou não, conectadas em estrela com neutro aterrado como mostra a figura 7.

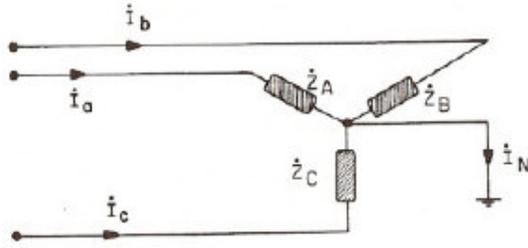


Figura 7- Carga conectada em estrela com neutro aterrado.  
 Fonte: Adaptado de Kindermann (1999)

Da equação (2.2.19) tem-se que:

$$I_{a_0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (2.2.19)$$

$$I_N = (I_a + I_b + I_c) \quad (2.2.22)$$

Substituindo-se (2.2.22) em (2.2.19) tem-se:

$$I_{a_0} = \frac{1}{3} I_N \quad (2.2.23)$$

Ou seja, para que haja corrente de sequência zero fluindo num sistema desequilibrado, é necessário que haja condutor de neutro, ou que o sistema seja aterrado através de uma impedância.

Já num sistema equilibrado tem-se:

$$I_a = I_b + I_c = 0 \quad (2.2.24)$$

$$I_{a_0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (2.2.19)$$

$$I_{a_0} = \frac{1}{3}(0) = 0 \quad (2.2.25)$$

Assim, fica evidente que num sistema equilibrado não existe corrente de sequência zero.

Portanto, percebe-se que a partir das conclusões expostas e dos grupos de equações [(2.2.4), (2.2.5), (2.2.6)]; [(2.2.7), (2.2.8), (2.2.9)] e [(2.2.16), (2.2.17), (2.2.18)], os sistemas elétricos de potência ficam definidos na íntegra, de forma que tanto pode-se determinar os fasores do sistema desequilibrado a partir das componentes simétricas, como também determinar as componentes

simétricas a partir dos fasores do sistema desequilibrado original, fato este, que será de grande utilidade na detecção das correntes de curto-circuito.

### **2.3. MODELAMENTO E ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITOS**

Os curtos-circuitos além de serem os defeitos mais comuns em sistemas elétricos de potência, são também os que podem causar danos de maior gravidade.

Podem ter origem de diversas naturezas desde acidentes na execução de serviços, quedas de árvores, animais silvestres até negligência técnica.

Podem ser divididos basicamente em curtos-circuitos monofásicos, bifásicos, trifásicos com suas respectivas variações.

Os Curto-circuitos monofásicos são essencialmente do tipo fase-terra e, portanto se caracterizam por serem assimétricos, representando a grande maioria dos casos, sendo que é o tipo de falta de menor intensidade podendo, no entanto evoluir rapidamente para um curto-circuito dupla fase-terra e mais raramente para um curto trifásico, se não for interrompido rapidamente.

Os curtos-circuitos bifásicos que também são assimétricos, são de menor frequência, porém de maior intensidade em corrente e são considerados os tipos mais graves de curtos-circuitos assimétricos.

Já os curtos-circuitos trifásicos simétricos, são os mais raros e mais fáceis de se calcular, no entanto devido às grandes magnitudes de correntes envolvidas, sua importância é fundamental nos estudos de proteção devido aos enormes esforços termo-dinâmicos que causam aos componentes do sistema elétrico.

O maior objetivo no cálculo das correntes de curto-circuito é obter o seu módulo a fim de se dimensionar os componentes e dispositivos de proteção do sistema elétrico, e para isto recorre-se a modelos de circuitos que representem os tipos básicos de curto-circuito.

### 2.3.1. Curto-circuito trifásico

Este primeiro caso trata-se de um curto-circuito simétrico que envolve as três fases, e portanto é equilibrado

Neste caso apenas a componente de sequência positiva se faz presente no modelo de curto-circuito.

A figura 8 mostra o circuito equivalente do curto-circuito trifásico.

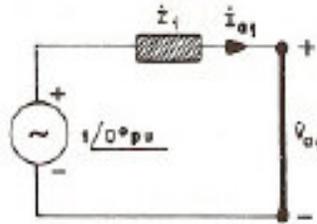


Figura 8- Circuito equivalente do curto-circuito trifásico.  
Fonte: Adaptada de Kindermann (1999).

Onde:

$V = 1 \angle 0^\circ$  pu é a tensão de fase do gerador (Vf)

$Z_1$  é a impedância de sequência positiva em pu e,

$I_{a_1}$  é a corrente que circula pela impedância de sequência positiva em pu,

portanto:

$$I_{a_1} = \frac{V}{Z_1} = \frac{1 \angle 0^\circ}{Z_1} \quad (2.3.1.1)$$

Em módulo a corrente de curto-circuito-trifásico é:

$$I_{cc3\phi} = \frac{1}{|Z_1|} I_b \text{ (A)} \quad (2.3.1.2)$$

### 2.3.2. Curto-circuito bifásico

Neste modelo de cálculo de falta, apenas duas fases fazem parte do curto-circuito, sendo assim é um curto-circuito assimétrico e, portanto, é desequilibrado. Como nestes casos o neutro e a terra não fazem parte do percurso da corrente de falta, apenas as impedâncias de sequência positiva e negativa fazem parte do modelamento.

A figura 9 mostra o circuito equivalente do curto-circuito bifásico.

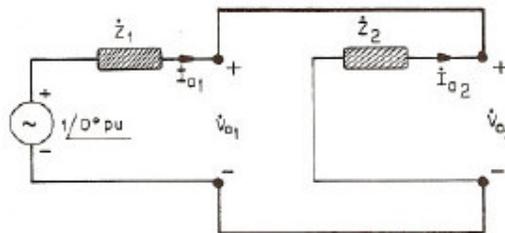


Figura 9- Circuito equivalente do curto-circuito bifásico.

Fonte: Adaptada de Kindermann (1999).

$V = 1 \angle 00$  pu é a tensão de fase do gerador (Vf).

$Z1 = Z2$  são as impedâncias de sequências positiva e negativa respectivamente em pu;

$I_{a1}$  = é a corrente que circula pela impedância de sequência positiva em pu e,

$I_{a2}$  = é a corrente que circula pela impedância de sequência negativa em pu, portanto pela figura tem-se que:

$$I_{a1} = \frac{1}{Z_1 + Z_2} = \frac{1}{2Z_1} \quad (2.3.2.1)$$

Como não há corrente de neutro,  $I_{a0} = 0$  e  $I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0$ , então

$$I_{a2} = I_{a1} \quad (2.3.2.2)$$

Portanto, se:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a_0} \\ I_{a_1} \\ I_{a_2} \end{bmatrix} \text{ Então, } \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_{a_1} \\ -I_{a_1} \end{bmatrix} \quad (2.3.2.3)$$

Da equação (2.3.2.3) tem-se que:  $b = I_{a_0} + I_{a_1} + I_{a_2}$

$$I_b = I_{a_0} + a^2 I_{a_1} - a I_{a_1}$$

$$I_b = I_{a_1}(a^2 + a)$$

$$I_b = I_{a_1} \sqrt{3} \angle -90^\circ, \quad (2.3.2.4)$$

Onde:

$I_b$  – corrente de linha na fase b.

Como de (2.3.2.1) vem que:

$$I_{a_1} = \frac{1}{aZ_1} \text{ tem-se que}$$

$$I_b = \frac{1}{2Z_1} \sqrt{3} \quad (2.3.2.5)$$

Em módulo a corrente de falta de um curto-circuito bifásico é:

$$I_{cc2\phi} = \frac{\sqrt{3}}{2Z_1} I_b \text{ (A)} \quad (2.3.2.6)$$

Onde,

$I_b$  é a corrente de base adotada em A.

$$I_{cc2\phi} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{cc3\phi}(A),$$

Ou,

$$I_{cc2\phi} = 0,866 I_{cc3\phi}(A) \quad (2.3.2.7)$$

### 2.3.3. Curto-circuito monofásico

Num curto-circuito monofásico a corrente de falta se estabelece num percurso que envolve a fase em curto, a terra, ou neutro ou não. Ocorre que, como neste tipo de curto existem características de desequilíbrio, combinadas com o retorno de corrente pelo neutro, no seu modelamento existem os três tipos de impedância de sequência.

A figura 10 mostra o circuito equivalente de um SEP submetido a um curto-circuito monofásico.

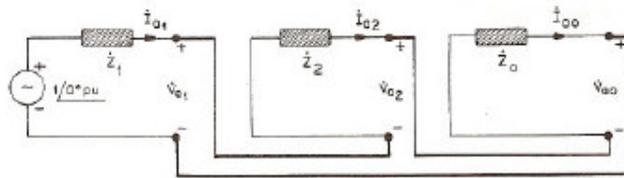


Figura 10- Circuito equivalente do curto-circuito monofásico.  
Fonte: Adaptada de Kindermann (1999).

$V = 1\angle 0^\circ$  pu é a tensão de fase do gerador (Vf);

$Z_0$ ,  $Z_1$  e  $Z_2$  são as impedâncias de seqüências zero, positiva e negativa em pu respectivamente;

$I_{a1}$  = é a corrente que circula pela impedância de seqüência positiva em pu e

$I_{a2}$  = é a corrente que circula pela impedância de seqüência negativa em pu, portanto pela figura tem-se que:

Como  $Z_1 = Z_2$  e  $Z_0$  depende da impedância do percurso da corrente de falta que pode ser pelo neutro ou pela terra tem-se que:

$$Z = 2Z_1 + Z_0 \text{ e,}$$

$$Z = 2Z_1 + Z_0 \text{ e } I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{1}{2Z_1 + Z_0} \quad (2.3.3.1)$$

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}, \quad (2.3.3.2)$$

e, portanto,

$$I_a = 3I_{a_1}, \quad (2.3.3.2)$$

$$I_a = 3 \frac{1}{2Z_1 + Z_0} \quad (2.3.3.3)$$

Em módulo a corrente de falta de um curto-circuito monofásico é:

$$I_{cc1\phi} = 3 \frac{1}{|2Z_1| + |Z_0|} I_b \text{ (A)} \quad (2.3.3.4)$$

## 2.4. ANÁLISE DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Toda falta que ocorre num sistema elétrico tem um período de duração mínimo, onde a corrente de curto-circuito se comporta e assume formas e valores diferentes em função do tempo.

### 2.4.1. Corrente de curto-circuito assimétrica

Este tipo de corrente apresenta uma simetria variável em função do tempo, devido ao regime transitório, e após decorrido os períodos de reatâncias sub-transitória e transitória –que variam desde alguns ciclos até alguns segundos- tende a se estabilizar quando entra no regime permanente.

Devido a esta assimetria, aparece uma componente contínua na corrente de curto-circuito, que só desaparece com a entrada no período de regime permanente.

Neste período transitório, a corrente assimétrica apresenta valores elevados por isso deve-se considerá-la no dimensionamento dos dispositivos de proteção, os quais ficam submetidos à grandes esforços dinâmicos neste período.

### 2.4.2. Corrente de curto-circuito simétrica

É a corrente de curto-circuito que apresenta simetria total em função do tempo, no período de duração da falta, ou seja, é caracterizada pelo regime permanente da corrente de curto-circuito.

Devido ao longo período de estabelecimento desta corrente, ela é fundamental no estudo de curto-circuito, devido aos grandes esforços térmicos que causam ao sistema sob falta.

A figura 11 mostra o ciclo completo de uma falta durante o processo de curto-circuito.

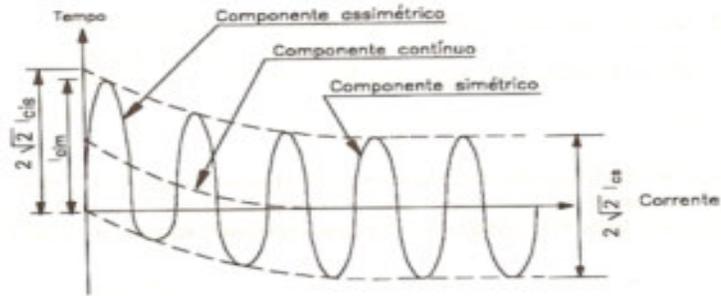


Figura 11- Ciclo completo do comportamento da corrente de curto-circuito  
Fonte: Adaptada de Mamede Filho (2007).

Quando num sistema elétrico ocorre uma falta, estabelece-se instantaneamente um percurso de baixa impedância entre a fonte inclusive e o ponto de falta, onde tal impedância possui uma parcela de componente resistiva e outra de componente reativa.

O fator de potência do circuito é determinado a partir da reatância indutiva e da resistência totais do percurso da corrente de curto-circuito, incluindo todos os componentes entre a fonte inclusive e o ponto onde ocorre a falta.

Assim, nos circuitos predominantemente indutivos, onde a reatância é muito superior à resistência e o defeito ocorrer no instante em que a tensão estiver passando pelo seu valor máximo, a corrente de curto-circuito é constituída apenas pelo seu valor simétrico.

Nos circuitos predominantemente indutivos, onde a reatância é muito superior à resistência e o defeito ocorrer no instante em que a tensão estiver passando pelo seu valor zero, a corrente de curto-circuito é constituída pelos componentes simétricos e contínuos.

O amortecimento da componente contínua, depende da relação  $(X/R)$  -fator de potência do circuito- que, além de determinar a constante de tempo de duração da componente contínua na falta, define também, o fator de assimetria para o cálculo da corrente de curto-circuito trifásica assimétrica conforme mostra a tabela 1.

Tabela 1 - Fator de assimetria F para T=1/4ciclo

Relação X/R	Fator de Assimetria F	Relação X/R	Fator de Assimetria F	Relação X/R	Fator de Assimetria F
0,40	1,00	3,80	1,37	11,00	1,58
0,60	1,00	4,00	1,38	12,00	1,59
0,80	1,02	4,20	1,39	13,00	1,60
1,00	1,04	4,40	1,40	14,00	1,61
1,20	1,07	4,60	1,41	15,00	1,62
1,40	1,10	4,80	1,42	20,00	1,64
1,60	1,12	5,00	1,43	30,00	1,67
1,80	1,16	5,50	1,46	40,00	1,68
2,00	1,19	6,00	1,47	50,00	1,69
2,20	1,21	6,50	1,49	60,00	1,70
2,40	1,24	7,00	1,51	70,00	1,71
2,60	1,26	7,50	1,52	80,00	1,71
2,80	1,28	8,00	1,53	100,00	1,71
3,00	1,30	8,50	1,54	200,00	1,72
3,20	1,32	9,00	1,55	400,00	1,72
3,40	1,34	9,50	1,56	600,00	1,73
3,60	1,35	10,00	1,57	1.000,00	1,73

A corrente assimétrica é a soma das parcelas da componente simétrica com a componente contínua e que implica em solicitações termo-dinâmicas as quais os dispositivos de proteção devem suportar durante o curto-circuito.

## 2.5. CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

A metodologia de cálculo da corrente de curto-circuito utilizada neste trabalho é baseada nos conceitos e modelos de circuitos equivalentes de curtos-circuitos estudados anteriormente para cada situação.

A partir do diagrama unifilar da instalação é elaborado um diagrama de impedâncias do sistema elétrico onde cada percurso específico é representado por uma impedância. Este diagrama representa as impedâncias de valor significativo do trecho de circuito do sistema elétrico desde o ponto de entrega de energia elétrica até os terminais da carga.

Para simplificação do procedimento de cálculo, será utilizado o método por unidade (pu) que utiliza bases como referências para o cálculo. Neste trabalho serão utilizadas como base a potência de base ( $P_b$ ) e a tensão de base ( $V_b$ ) da baixa tensão. A figura 12 ilustra através de um

fluxograma, a sequência do processo de estudo de proteção, desde o levantamento de informações do sistema até a especificação dos dispositivos.

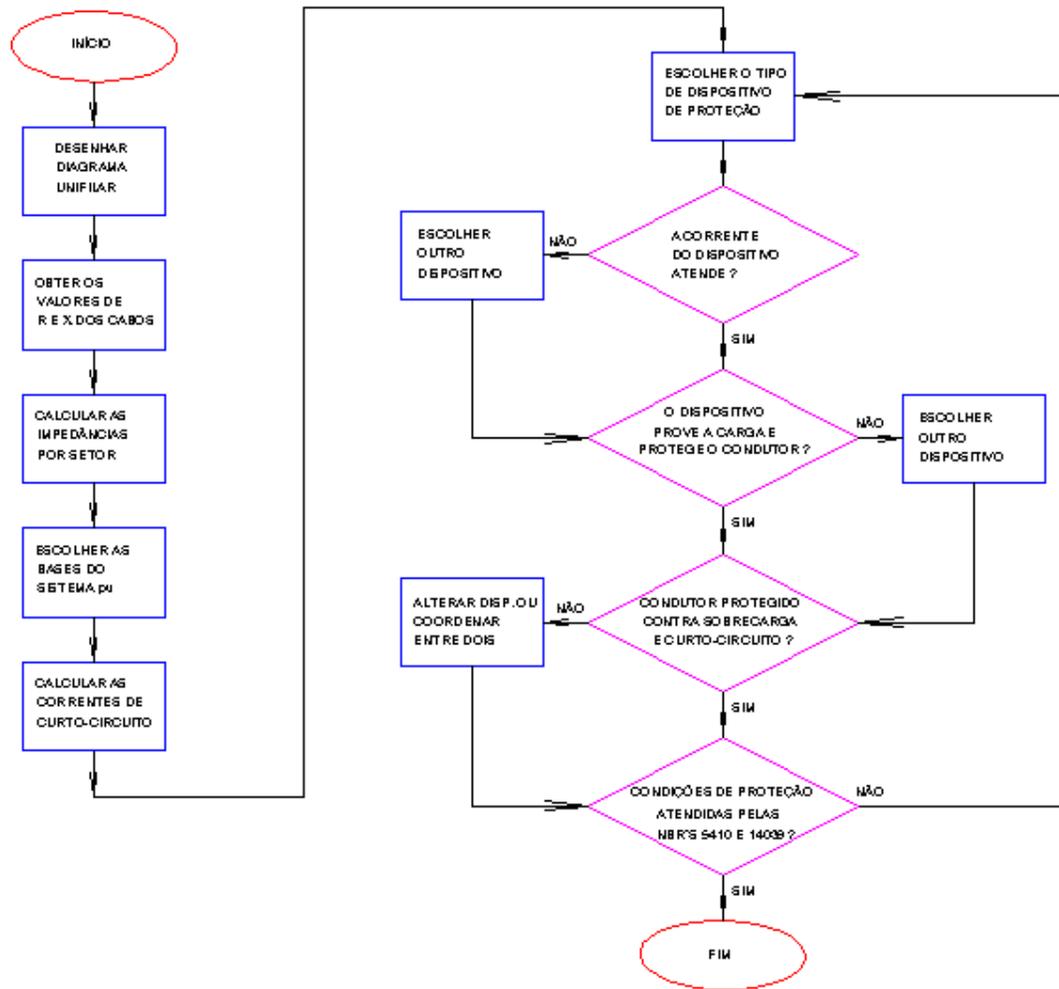


Figura 12- Fluxograma do processo do estudo da proteção

## 2.5.1. Sequência de cálculo da corrente de curto-circuito

### 2.5.1.1. Impedância reduzida do sistema ( $Z_{us}$ )

$$Z_{us} = R_{us} + X_{us} \quad (2.5.1.1.1)$$

Onde:

$R_{us}$  - é a resistência reduzida do sistema em pu e

$X_{us}$  - é a reatância reduzida do sistema em pu.

Ou a partir da potência de curto-circuito:

$$X_{us} = \frac{P_b}{P_{cc}} (\Omega) \quad (2.5.1.1.2)$$

Onde:

$P_b$  - é a potência de base adotada em kVA;

$P_{cc}$  - é a potência de curto-circuito no ponto de entrega de energia em kVA e

$R_{us}$  - é a resistência de suprimento e pode ser considerada desprezível.

### 2.5.1.2. Impedância do transformador de potência ( $Z_{ut}$ )

$$Z_{ut} = R_{ut} + X_{ut} \quad (2.5.1.1.3)$$

Onde:

$R_{ut}$  - é a resistência do transformador em pu;

$X_{ut}$  - é a reatância do transformador em pu.

Geralmente é dada em porcentagem nas bases do transformador, portanto é necessário alterar para a base adotada nos cálculos.

### 2.5.1.3. Impedância dos cabos do transformador ao QGBT ( $Z_{uc0}$ )

$$Z_{uc0} = R_{uc1} + X_{uc1} \quad (2.5.1.3.1)$$

Onde:

$R_{uc0}$  - resistência equivalente dos cabos em pu;

$X_{uc0}$  - reatância equivalente dos cabos em pu.

$R_{uc0}$  - é dada por:

$$R_{uc0} = R_{c1} \frac{P_b}{1000V_b^2} \quad (2.5.1.3.2)$$

e

$$Rc1 = \frac{Ru Lc0}{1000Nc1} \quad (2.5.1.3.2)$$

$$Xuc0 = Xc1 \frac{Pb}{1000Vb^2} \quad (2.5.1.3.4)$$

e

$$Xc0 = \frac{Xu Lc1}{1000Nc1} \quad (2.5.1.3.4)$$

*Sendo:*

$Rc0$  - resistência equivalente do cabo em ohms;

$Ru$  - resistência de sequência positiva do cabo em mΩ/m;

$Xc0$  - reatância equivalente do cabo em ohms;

$Xu$  - reatância de sequência positiva do cabo em mΩ/m;

$Vb$  - tensão de base adotada em kV;

$Lc0$  - comprimento do cabo em m e

$Nc0$  - número de cabos.

#### 2.5.1.4. Impedância dos barramentos do QGBT (Zub1)

$$Zub1 = Rub1 + Xub1 \quad (2.5.1.4.1)$$

*Onde:*

$Rub1$  - resistência equivalente dos cabos em pu;

$Xub1$  - reatância equivalente dos cabos em pu.

$Rub1$  - é dada por:

$$Rub1 = Rb1 \frac{Pb}{1000Vb^2} \quad (2.5.1.4.2)$$

e

$$Rb1 = \frac{Ru Lb1}{1000Nb1} \quad (2.5.1.4.3)$$

$$Xub1 = Xb1 \frac{Pb}{1000Vb^2} \quad (2.5.1.4.4)$$

*e*

$$Xb1 = \frac{Xu Lb1}{1000Nb1} \quad (2.5.1.4.5)$$

*Sendo:*

*Rb1* - resistência equivalente do barramento em ohms;

*Ru* - resistência de sequência positiva do barramento em mΩ/m;

*Xb1* - reatância equivalente do barramento em ohms;

*Xu* - reatância de sequência positiva do barramento em mΩ/m;

*Vb* - tensão de base adotada em kV;

*Lb1* - comprimento do barramento em m, e

*Nb1* - número de barramentos.

#### 2.5.1.5. Impedância dos cabos do QGBT ao CCM (Zuc1)

O modelamento é idêntico ao exposto no item 2.5.1.4.

#### 2.5.1.6. Impedância dos cabos do CCM à carga (Zuc2)

O modelamento é idêntico ao exposto no item 2.5.1.4.

#### 2.5.1.7. Corrente de curto-circuito trifásica simétrica ( $I_{cc3\emptyset}$ )

No cálculo desta corrente, recorre-se a equação 2.3.1.2, conforme deduzida do circuito equivalente.

$$I_{cc3\emptyset} = \frac{1}{|Z1|} I_b (A) \text{ com } I_b = \frac{Pb}{\sqrt{3}Vb} \text{ onde:}$$

$I_b$  - corrente de base adotada em A;

$P_b$  - Potência de base adotada em kVA;

$V_b$  - Tensão de base adotada em kV e

$|Z1| = Z_{uT}$  - Impedância total do sistema até o ponto do curto-circuito em  $\Omega$ .

#### 2.5.1.8. Corrente de curto-circuito trifásica assimétrica ( $I_{cc3\emptyset A}$ )

$$I_{cc3\emptyset A} = Fa I_{cc3\emptyset A} (A)$$

Onde:

Fa - Fator de assimetria determinado conforme a relação X/R dada na tabela 1

#### 2.5.1.9. Corrente de curto-circuito trifásica de impulso ( $I_{cc3\emptyset I}$ )

É o máximo valor que a corrente de curto-circuito assimétrica assume durante o período sub-transitório.

$$I_{cc3\emptyset I} = I_{cc3\emptyset A} \sqrt{2} (A) \quad (2.3.2.6)$$

#### 2.5.1.10. Corrente de curto-circuito bifásica ( $I_{cc2\emptyset}$ )

É determinada pela equação 2.3.2.7 deduzida do circuito equivalente

$$I_{cc2\emptyset} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{cc3\emptyset} (A) \quad (2.3.2.7)$$

#### 2.5.1.11. Corrente de curto-circuito monofásica ( $I_{cc1\emptyset}$ )

Esta corrente é calculada de duas formas, sendo corrente fase-terra máxima e mínima em função da impedância de malha de terra mínima e máxima respectivamente.

A corrente de fase-terra máxima ( $I_{cc1\emptyset máx}$ ) é dada pela equação 2.3.3.4.

$$I_{cc1\emptyset máx} = \frac{3I_b}{2Z_1 + Z_0} (A) \quad (2.3.3.4)$$

Onde:

$Z_1$  e  $Z_0$  = são as impedância de sequência positiva e zero em pu e.

$I_b$  = é a corrente de base em A.

A corrente de fase-terra mínima ( $I_{cc1\emptyset m\acute{m}n}$ ) é dada pela equação 2.3.3.5.

$$I_{cc1\emptyset m\acute{m}n} = \frac{3I_b}{2Z_{u1} + Z_{u0} + (R_{uct} + R_{umt} + R_{uat})} \quad (A) \quad (2.3.3.5)$$

Onde:

$Z_{u1}$  = impedância total de sequência positiva até o ponto da falta em pu;

$Z_{u0}$  = impedância total de sequência negativa até o ponto da falta em pu;

$R_{uct}$  = resistência de contato em pu;

$R_{umt}$  = resistência de malha de terra em pu, e

$R_{uat}$  = resistência de aterramento em pu.

## 2.6. CORRENTE DE SOBRECARGA EM SISTEMAS ELÉTRICOS

Sobrecarga é o valor de carga, que excede a plena carga normalmente imposta a um sistema elétrico. Analogamente sobrecorrente é o valor de corrente, que excede o valor nominal da corrente de carga normalmente imposta ao sistema.

Para efeito do estudo da proteção de sistemas elétricos de potência, podem-se dividir as correntes de sobrecargas em dois tipos básicos.

Correntes de sobrecargas transitórias e,

Correntes de sobrecargas devidas à faltas no sistema.

As correntes de sobrecargas transitórias são oriundas do funcionamento de equipamentos como motores ou transformadores, mais particularmente na sua energização, e podem atingir dezenas de vezes o valor da corrente nominal em um curto espaço de tempo, porém não devem provocar a atuação dos dispositivos de proteção.

As correntes de sobrecargas devidas às faltas são geralmente de magnitudes mais elevadas e se não forem interrompidas num curto intervalo de tempo, podem levar o condutor a atingir temperaturas acima dos limites que estes suportam, comprometendo assim a integridade da isolação e colocando a instalação em risco iminente. A tabela 2 mostra as máximas temperaturas para as respectivas isolações de condutores.

Tabela 2 - Temperaturas máximas para serviço contínuo, sobrecarga e curto circuito

Material de isolação	Temperatura máxima para serviço contínuo ( $T_m$ )	Temperatura de sobrecarga ( $T_s$ )	Temperatura de Curto-Circuito ( $T_{cc}$ )
PVC	70	100	160
EPR	90	130	250
XLPE	90	140	250

Assim é imperativo que num circuito submetido às correntes de sobrecargas, o dispositivo de proteção deve atuar e interromper o circuito num tempo tão curto quanto maior for a corrente.

Esta característica dos dispositivos de proteção é denominada, característica tempo x corrente inverso.

### 2.6.1. A integral de joule dos condutores

Quando as correntes assumem valores muito elevados, os condutores atingem valores de temperaturas altos em tempos tão curtos que não é viável considerar constante o valor eficaz da corrente como no caso das correntes de sobrecargas.

Por este motivo estas correntes são analisadas por métodos mais rigorosos como a integral de Joule, que quantifica a energia que um dispositivo de proteção deixa passar durante um processo de sobrecarga.

$$\int_{t_0}^{t_1} [i(t)]^2 dt = I_{cc}^2 \cdot T$$

Onde:

$I_{cc}$  = corrente de curto-circuito que atravessa o dispositivo de proteção

$T$  = tempo de duração da corrente de curto-circuito

A integral de Joule é aplicada no estudo do comportamento dos condutores elétricos em função dos efeitos térmicos devidos às correntes de sobrecargas.

A norma NBR 5410 estabelece que a integral de joule que o dispositivo de proteção deixa passar, não deve ser superior à integral de Joule necessária para aquecer o condutor desde a temperatura máxima para o serviço contínuo, até a temperatura limite de curto-circuito, ou então:

$$\int_{t_0}^{t_1} [i(t)]^2 dt \leq K^2 S^2$$

Onde:

$K^2 S^2$  = integral de Joule para o aquecimento do condutor desde a temperatura máxima de serviço contínuo até a temperatura de curto-circuito e;

$K = 115$  e define as características do material para condutores de cobre com isolamento em PVC;

$K = 135$  e define as características do material para condutores de cobre com isolamento em EPR ou XLPE

$S$  = seção do condutor em  $mm^2$ .

Para curtos-circuitos de qualquer duração, onde a assimetria não seja significativa e para curtos-circuitos assimétricos de duração igual ou superior a 0,1s e igual ou inferior a 0,5s, pode-se escrever:

$$I_{cc}^2 T \leq K^2 S^2$$

Na tabela 3 é apresentada a máxima integral de Joule que um condutor suporta, considerando uma dada corrente de curto-circuito durante um intervalo de tempo.

Tabela 3 - Integral de Joule para aquecimento adiabático para condutores de cobre

Seção mm <sup>2</sup>	Integral de Joule A <sup>2</sup> x s 10 <sup>3</sup>	
	Isolação PVC	Isolação EPR e XLPE
1,5	29,7	46
2,5	82,6	127
4	211,6	327
6	476,1	736
10	1.322	2.045
16	3.385	5.235
25	8.265	12.781
35	16.200	25.050
50	35.062	51.123
70	64.802	100.200
95	119.355	184.552
120	190.440	294.466
150	297.562	460.103
185	452.625	699.867
240	761.760	1.177.862

## 2.7. PLANEJAMENTO DA PROTEÇÃO ELÉTRICA

Sistema de proteção poderia ser definido de uma forma simples como o conjunto de dispositivos elétricos que deve ser devidamente dimensionados e especificados, com a finalidade de detectar e interromper condições anormais ou intoleráveis em um sistema elétrico de potência.

### 2.7.1. Requisitos de um sistema de proteção

#### 2.7.1.1. Velocidade

O dispositivo de proteção deve atuar o mais rápido possível evitando o mínimo de dano.

#### 2.7.1.2. Economia

Relação de custo x benefício que deve ser levada em conta em relação ao sistema elétrico.

#### 2.7.1.3. Simplicidade

Utilização do mínimo necessário de dispositivo que garanta a segurança.

#### 2.7.1.4. Seletividade

Capacidade do sistema de isolar o defeito sem interferir em zonas de circuito sadias.

#### 2.7.1.5. Coordenação

Capacidade que o sistema tem, de forma que os dispositivos de proteção possam atuar em determinada ordem ou seqüência de operação sob defeito.

### **2.7.2. Filosofia da Proteção**

O projeto e o planejamento de um sistema de proteção apesar de se basear em critérios técnicos, não constituem uma ciência exata, portanto muito de bom senso e experiência fazem parte do processo para se obter bons resultados.

Assim entende-se por sistema de proteção o conjunto de dispositivos devidamente especificados e que através de calibrações e ajustes, atuem sob condição de defeito, isolando a parte do sistema que sofreu a anomalia.

A filosofia de proteção de um sistema elétrico permite dividi-lo em “zonas de proteção” de forma a definir que parte ou componente do sistema elétrico vai ser protegido e que tipo de proteção será usado em cada situação.

A figura 13 na página seguinte, mostra um sistema elétrico com as respectivas zonas de proteção em evidência.

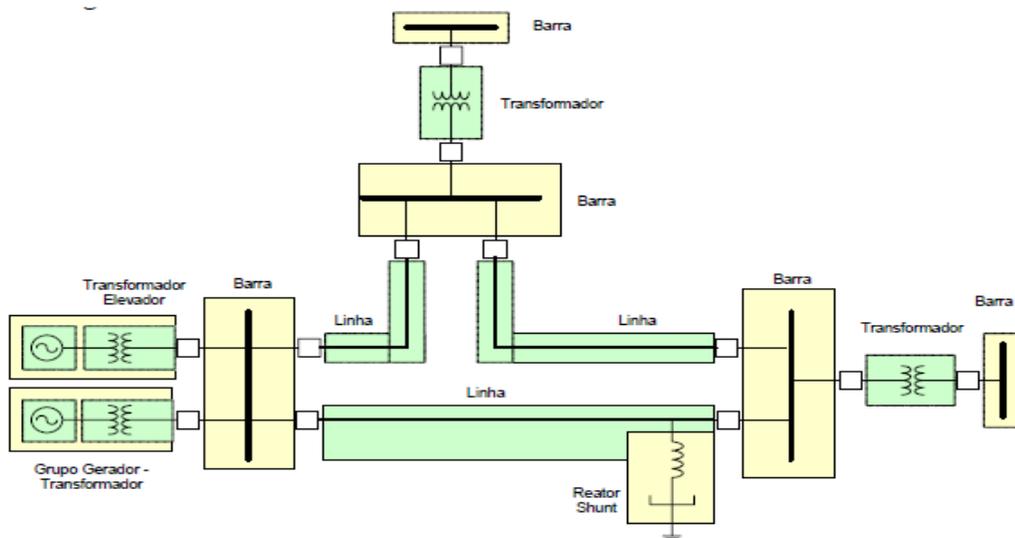


Figura 13- Zonas de proteção de um sistema elétrico  
 Fonte: Adaptada de Maezono (2004).

### 2.7.3. Dispositivos de Proteção

Em função das zonas e natureza da proteção pode-se visualizar a enorme variedade de elementos destinados à proteção de sistemas elétricos quando se combina eficiência, simplicidade e custo.

#### 2.7.3.1. Característica Tempo x Corrente

Todos os dispositivos de proteção quando atuam sob determinado defeito, combinam duas grandezas (tempo e corrente) que determinam seu comportamento num circuito.

A característica tempo x corrente é um gráfico que mostra o tempo de atuação do dispositivo de proteção em função da corrente de falta, ou seja mostra a energia liberada num circuito, que o dispositivo deixa passar. É o valor da energia térmica por unidade de resistência

$$I^2 t = \int_{t_0}^{t_1} I^2 dt \text{ (A}^2\text{s) sendo } A^2 s = J/\Omega$$

### 2.7.3.2. Capacidade de Interrupção

É a capacidade que um dispositivo de proteção tem, de interromper a circulação de corrente, quando submetido a uma corrente de falta de alta intensidade, sob uma dada tensão (tensão nominal).

### 2.7.3.3. Tipos de Dispositivos de Proteção

Considerando-se a relação (custo x desempenho) serão adotados como dispositivos de proteção fusíveis NH<sub>S</sub>, relés térmicos, disjuntores e relés de sobrecorrente, o que absolutamente não representa a totalidade de tipos e métodos de proteção, deixando o restante dos casos para outra oportunidade.

### 2.7.3.4. Dispositivos fusíveis

Conforme IEC60-269 os fusíveis podem ser divididos de forma resumida em dois tipos, sendo os fusíveis contra correntes de curto-circuito (AM) e os fusíveis contra correntes de curto-circuito e sobrecargas (gG).

aM – caracterizados pela proteção somente contra as correntes de curto-circuitos e indicados para a proteção de circuitos de motores.

Na figura 14 no gráfico para fusíveis aM, verifica-se que além da curva tempo x corrente do fusível, existe mais acima, a curva do dispositivo de proteção contra sobrecargas que deve ser associado ao fusível no caso de proteção de circuitos de motores.

gG/gM – caracterizados pela proteção contra curto-circuitos e sobrecargas e indicados para proteção de circuitos de uso geral.

Ainda na figura 14 é possível notar que nas várias curvas disponíveis para valores diferentes de fusíveis gG, existi uma proporcionalidade entre tempo e corrente de fusão, porém à medida que a corrente aumenta, o tempo diminui exponencialmente caracterizando a curva tempo x corrente inversa.

Apesar do termo fusível ser amplamente utilizado, o termo técnico é “Dispositivo Fusível”, que é constituído de base, porta fusível, fusível e indicador.

Esta constituição, permite a aplicação em diversos tipos de quadros e painéis de distribuição com excelente resultado e nada tem a ver com o pré-conceito existente sobre “fusíveis”, que existe sobre seu desempenho.

Portanto, os fusíveis de formato cartucho que são abordados por esta norma (IEC 60269) não condiz com os antigos “fusíveis cartucho” cujo corpo era em papelão. Da mesma forma que fusíveis roscáveis não são os antigos “fusíveis rolhas” que não são normalizados.

A figura 14 mostra a característica tempo x corrente dos fusíveis AM e gG.

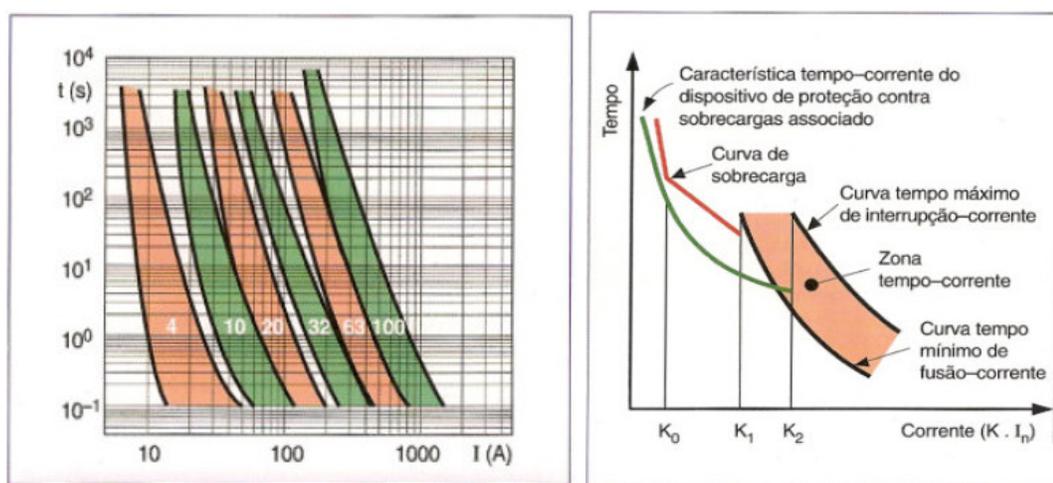


Figura 14- Características tempo x corrente de fusíveis tipos gG e AM respectivamente  
Fonte: Adaptada de “Guia EM da NBR 5410” (2001).

### 2.7.3.5. Disjuntores

São dispositivos de manobra e proteção de circuitos elétricos cuja função é conduzir continuamente a corrente elétrica em condições normais e interromper correntes sob condições anormais de sobrecarga e curto-circuito.

Podem ser divididos em disjuntores térmicos, magnéticos ou termomagnéticos.

Os disjuntores tradicionais utilizados em quadros de distribuição são termomagnéticos cujo disparador térmico é formado por duas lâminas bimetálicas, com coeficientes de dilatação diferentes que se curvam ao se aquecerem com a passagem da corrente de sobrecarga. Os disparadores eletromagnéticos são constituídos por um eletroímã cujo êmbolo provoca a abertura do disjuntor, quando a bobina é percorrida por uma corrente de curto-circuito.

Na figura 15 é possível notar duas zonas distintas de atuação do disjuntor, as quais são caracterizadas pela sensibilidade dos sensores térmicos para pequenas correntes de sobrecargas e magnéticos para corrente elevadas de curto-circuito.

A figura 15 mostra as curvas de atuação características de disjuntores termomagnéticos

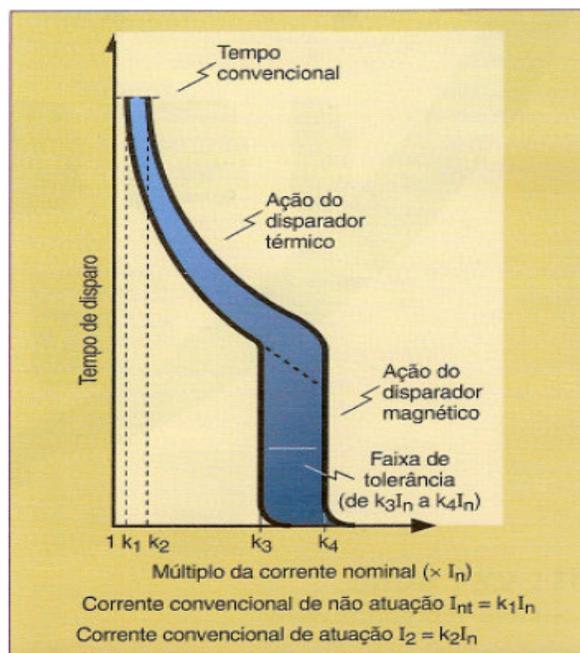


Figura 15- Característica tempo x corrente de disjuntor termomagnético.  
Fonte: Adaptada de “Guia EM da NBR 5410” (2001).

### 2.7.3.6. Chaves Seccionadoras Fusível

São dispositivos de manobra e proteção que associam as funções de manobra das chaves seccionadoras, com a função de proteção dos dispositivos fusíveis.

Podem ser acionadas manualmente, através de um contato de relé ou outro dispositivo.

Permitem o uso de fusíveis formato cartucho ou faca (NH).

Associadas aos fusíveis, as chaves seccionadoras se tornam dispositivos de manobra e proteção com grande capacidade de interrupção de corrente a custos relativamente baixos.

### 2.7.3.7. Relés de proteção

Os relés de proteção representam uma gama numerosa de equipamentos que variam quanto à sua forma de construção (eletrônicos, digitais e eletromecânicos) e operação.

Podem atuar em resposta à uma variedade de grandezas como corrente, tensão, potência, frequência etc..

No entanto, o tipo mais comum é o relé de sobrecorrente que será utilizado neste sistema e que atua para correntes de sobrecarga e curto-circuito.

## 2.7.4. Condições de proteção

### 2.7.4.1. Fusíveis

Conforme (Mamede Filho, 2007), a proteção de circuitos de motores em regime de funcionamento S1 (nº de manobras baixo) deve ser garantida quando:

$$I_{nf} \leq I_{pm} \times K$$

$$K = 0,5 \text{ para } I_{pm} \leq 40$$

$$K = 0,4 \text{ para } 40A \leq I_{pm} \leq 500A$$

$$K = 0,3 \text{ para } I_{pm} > 500A$$

Onde:

$I_{nf}$  = corrente nominal de fusão.

$I_{pm}$  = corrente de partida do motor.

$I_p/I_n$  = relação entre corrente de partida e corrente nominal do motor.

Para circuitos alimentadores de CCM's:

$$Inf \leq Ipmm \times K + \sum Inm,$$

Onde:

$Ipmm$  = corrente de partida do maior motor.

$K$  = definido como n0 item anterior

$\sum Inm$  = Somatória das correntes nominais dos motores

Para circuitos de aparelhos de uso geral:

$$Inf \leq \alpha \sum Ina$$

$\alpha = 1$  a  $1,5$  (Fator de segurança)

$Ina$  = somatória das correntes dos aparelhos

Além destas condições a NBR-5410 estabelece que:

$Ib \leq In \leq Iz$  onde:

$Ib$  – corrente de projeto =  $Ic$  - corrente de carga.

$In$  – corrente nominal do dispositivo proteção =  $Ia$  - corrente de ajuste

$Iz$  = corrente de condução do condutor

#### 2.7.4.2. Disjuntores Termomagnéticos

A corrente nominal ou de ajuste (da unidade térmica) do disjuntor deve ser igual ou superior à corrente de projeto (ou de carga).

$$Ia \geq Ic$$

$Ia$  - corrente de ajuste

$Ic$  – corrente de carga (projeto)

A corrente nominal ou de ajuste (da unidade térmica), deve ser igual ou menor que a corrente de condução do condutor

$$I_a \leq I_{nc}$$

$I_{nc}$  - corrente nominal do condutor

A corrente de atuação convencional do disjuntor deve ser menor ou igual à corrente de condução dos condutores.

$$K = 1,35$$

$$I_{adc} \leq 1,45I_n$$

$$K \times I_a \leq 1,45I_n$$

$$1,35I_a \leq 1,45I_n$$

Onde:

$I_{adc}$  - corrente atuação convencional disjuntor.

$I_n$  - corrente nominal disjuntor.

## Resumo

$I_c \leq I_a \leq I_{nc}$  - para disjuntores sem unidade de ajuste.

$I_c \leq \frac{1,35I_a}{I_{adc}} \leq 1,45I_{nc}$  - para disjuntores com unidade de ajuste.

$I_c$  - corrente de carga =  $I_b$  - corrente de projeto

$I_a$  - corrente de ajuste =  $I_n$  - corrente nominal do dispositivo proteção

$I_{nc}$  -  $I_z$  - corrente de condução do condutor

### 2.7.4.3. Relés térmicos

#### 2.7.4.3.1. Critérios para ajuste dos relés térmicos de sobrecarga.

O tempo de ajuste em múltiplos é determinado através de

$$M = \frac{I_c}{I_a}$$

Onde

$I_c$  = corrente de carga

e

$I_a$  = corrente de ajuste

Com o valor de M acessa-se a figura 21 do anexo II obtendo-se o tempo de atuação do relé ( $T_{ar}$ ).

A corrente de ajuste do relé térmico deve ser igual ou superior à corrente de projeto (carga).

$I_a \geq I_c$ , ou seja, o relé deve deixar passar a corrente de carga sem abrir (atuar).

A corrente de ajuste do relé deve ser igual ou inferior à capacidade de condução dos condutores.

$I_a \leq I_{cond}$ , ou seja, o rele não deve permitir uma corrente maior que a do condutor.

O tempo de partida do motor deve ser inferior ao tempo de atuação do relé, para a corrente de partida.

$T_{ar} \geq T_{pm}$ , o relé deve “esperar” o tempo necessário para o motor partir. (figura 21 do anexo II)

### **2.7.5. Etapas para a elaboração do estudo da proteção**

As etapas a serem seguidas num estudo de proteção são:

- 1 – levantamento das características do sistema.
- 2 – Escolha da filosofia de proteção definindo as zonas a serem protegidas e os tipos de proteção.
- 3 – Determinação das impedâncias de sequência.
- 4 – Cálculo da corrente de curto circuito.
- 5 – Elaboração do diagrama unifilar.
- 6 – Alocação dos dispositivos de proteção.
- 7 – Coordenação da proteção.

## **3. PROJETO**

O sistema que será a referência para o estudo da proteção está representado nas Figuras 17 e 18 do anexo I.

A entrada de energia é em média tensão com tensão nominal de 13,8kV, transformador de 750kVA que alimenta um QGBT, ao qual estão subordinados dez CCM's e dois QGFL's.

Os CCM's são painéis com função de proteção e comando de motores e os QGFL's são quadros que alimentam quadros de distribuição terminais de cargas de uso geral como iluminação, tomadas, etc..

A filosofia de proteção usada neste trabalho, consta da proteção das linhas elétricas – portanto excluí-se a proteção de equipamentos como o transformador– contra correntes de sobrecargas e curtos-circuitos.

Sendo assim, este sistema de proteção atende a um critério específico de proteção contra sobrecorrente como prescrito em 5.3 de (ABNT, 2003).

Os CCM'S são painéis que combinam as funções de comando e proteção dos circuitos de motores, enquanto os QGFL'S são quadros de distribuição primários que alimentam QTFL'S cujas cargas são heterogêneas e de aplicação diversificada, como iluminação de escritórios e fábrica, TUG'S, TUE'S e aparelhos de uso geral.

As bases adotadas na metodologia de cálculo são as seguintes:

$$Pb = 750kVA$$

$$Vb = 220V$$

$$Ib = \frac{Pb}{Vb \sqrt[3]{3}}$$

$$Ib = \frac{750}{0,22 \sqrt[3]{3}}$$

$$Ib = 1.970A$$

### **3.1. DETERMINAÇÃO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO**

#### **3.1.1. Cálculo das impedâncias de curto-circuito**

A seguir é executado o cálculo das impedâncias nos pontos onde serão estudados os níveis de curto-circuito, para tanto será usado como referência o diagrama de impedâncias do sistema elétrico a seguir.

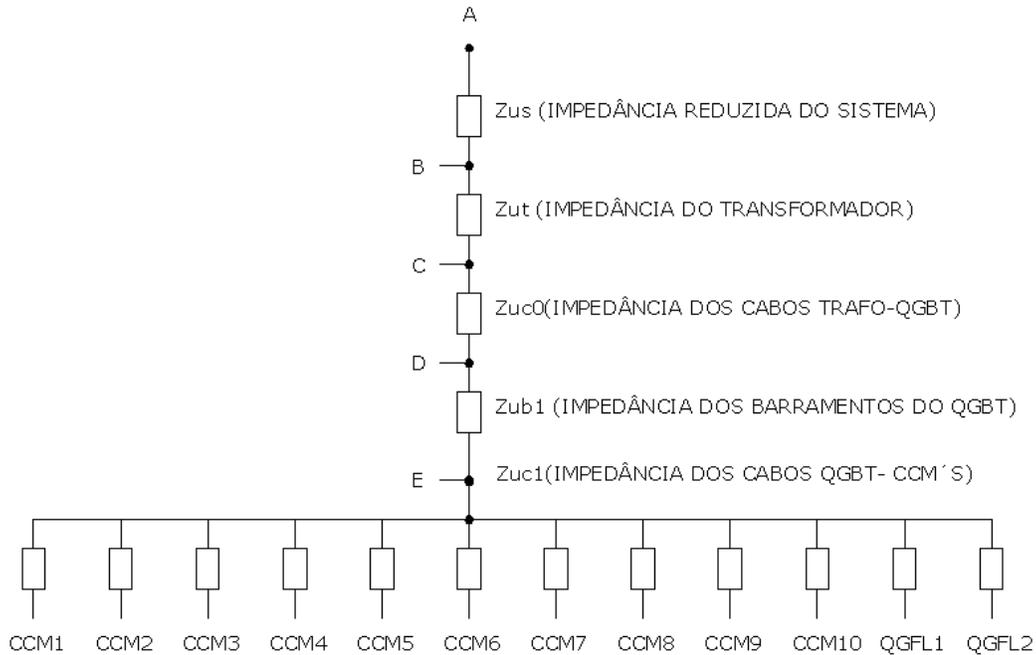


Figura 16 - Diagrama de impedâncias do sistema elétrico.

### 3.1.1.1. Impedância reduzida do sistema ( $Z_{us}$ )

$$Z_{us} = R_{us} + X_{us} ; R_{us} = 0$$

$$X_{us} = \frac{P_b}{P_{cc}} (\Omega) = \frac{750}{250 \cdot 10^3} = j0,003 pu$$

$$Z_{us} = 0 + j0,003 pu$$

### 3.1.1.2. Impedância do transformador ( $Z_{ut}$ )

$$P_{nt} = 750 \text{ kVA} - P_{cu\Omega} = 10 \text{ kW} - Z_{utp} = 5,5\%$$

$$R_{ut} = \frac{P_{cu}}{10 P_{nt}} \left[ \frac{P_b}{P_{nt}} \left( \frac{V_{nt}}{V_b} \right)^2 \right]$$

$$X_{ut} = \sqrt{Z_{ut} - R_{ut}}$$

$$X_{ut} = \sqrt{0,055 - 0,0133} = 0,041$$

$$R_{ut} = \frac{10.000}{10 \times 750} = \left( \frac{750}{750} \right) \left( \frac{0,220}{0,220} \right)^2 = 0,13 pu$$

Onde,

$Z_{ut}$  - Impedância do transformador em pu

$X_{ut}$  - Reatância do transformador em pu

$R_{ut}$  - Resistência do transformador em pu

$P_{cu}$  - Perdas no cobre conforme anexo 1

$$\bar{Z}_{ut} = R_{ut} + X_{ut} = 0,013 + j0,042pu$$

A Impedância  $Z_0$  nos transformadores é muito próxima da impedância  $Z_+$ , portanto:

$$Z_{u\phi t} = 0,013 + 10,042 pu$$

### 3.1.1.3. Impedância dos cabos do transformador ao QGBT( $Z_{uc0}$ )

$S_c = \#240\text{mm}^2 - L_c = 17\text{m}$ , sendo 6 cabos por fase e impedância conforme tabela 5, anexo I.

$$R_{uc0} = \left( \frac{0,1070 \times 17}{1000 \times 6} \right) \left( \frac{750}{1000 \times 0,22^2} \right) = \left( \frac{0,1070 \times 17}{1000 \times 6} \right) \times 15,5 = 0,0047pu$$

$$X_{uc0} = \left( \frac{0,0958 \times 17}{1000 \times 6} \right) \times 15,5 = 0,0042pu$$

$$Z_{uc0} = 0,0047 + j0,0042pu$$

### 3.1.1.4. Impedância dos barramentos do QGBT( $Z_{ub1}$ )

Barramentos de cobre 4x1/2"  $R_{u\Omega} = 0,0553$  e  $X_{u\Omega} = 0,1870$ , conforme tabela 4, anexo I.

$$R_{ub1} = \left( \frac{0,0553 \times 3,4}{1000 \times 4} \right) \times 15,5 = 0,0007286$$

$$X_{ub1} = \left( \frac{0,1870 \times 3,4}{1000 \times 4} \right) \times 15,5 = j0,002464$$

$$Z_{ub1} = 0,0007286 + j0,002464$$

### 3.1.1.5. Impedância acumulada na saída do QGBT ( $Z_{uA}$ )

$$Z_{uA} = Z_{us} + Z_{ut} + Z_{uc0} + Z_{ub1}$$

$$Z_{uA} = 0,01843 + j0,05166 \text{ pu}$$

### 3.1.1.6. Impedância do QGBT ao CCM1 ( $Z_{uc1}$ )

$S_c = \#70\text{mm}^2 - L_c = 26\text{m}$  e impedância conforme tabela 5, anexo I.

$$Z_{uc1} = \left( \frac{0,3184 \times 26}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 + j \left( \frac{0,1096 \times 26}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 = 0,1283 + j0,04417$$

Impedância acumulada até o CCM1 ( $Z_{ucA}$ )

$$Z_{ucA} = (0,01843 + j0,05166) + (0,1283 + j0,04417)$$

$$Z_{ucA} = 0,1467 + j0,09583 \text{ pu}$$

### 3.1.1.7. Impedância do QGBT ao CCM2 ( $Z_{uc2}$ )

$S_c = \#70\text{mm}^2 - L_c = 34\text{m}$  e impedância conforme tabela 5, anexo I.

$$Z_{uc2} = \left( \frac{0,3184 \times 34}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 + j \left( \frac{0,1096 \times 34}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 = 0,1678 + j0,0578$$

Impedância acumulada até o CCM2 ( $Z_{ucA}$ )

$$Z_{ucA} = (0,01843 + j0,05166) + (0,1678 + j0,0578)$$

$$Z_{ucA} = 0,18623 + j0,1095 \text{ pu}$$

### 3.1.1.8. Impedância do QGBT ao CCM3 ( $Z_{uc3}$ )

$S_c = \#70\text{mm}^2 - L_c = 36\text{m}$  e impedância conforme tabela 5, anexo I.

$$Z_{uc3} = \left( \frac{0,3184 \times 36}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 + j \left( \frac{0,1096 \times 36}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 = 0,1777 + j0,06116$$

Impedância acumulada até o CCM3 ( $Z_{ucA}$ )

$$Z_{ucA} = (0,01843 + j0,05166) + (0,1777 + j0,06116)$$

$$Z_{ucA} = 0,1961 + j0,1128 pu$$

### 3.1.1.9. Impedância do QGBT ao CCM4 ( $Z_{uc4}$ )

$S_c = \#70\text{mm}^2 - L_c = 42\text{m}$  e impedância conforme tabela 5, anexo I.

$$Z_{uc4} = \left( \frac{0,3184 \times 42}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 + j \left( \frac{0,1096 \times 42}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 = 0,2073 + j0,07135$$

Impedância acumulada até o CCM4 ( $Z_{ucA}$ )

$$Z_{ucA} = (0,01843 + j0,05166) + (0,2073 + j0,07135)$$

$$Z_{ucA} = 0,22573 + j0,1230 pu$$

### 3.1.1.10. Impedância do QGBT ao CCM5 ( $Z_{uc5}$ )

$S_c = \#70\text{mm}^2 - L_c = 51\text{m}$  e impedância conforme tabela 5, anexo I.

$$Z_{uc5} = \left( \frac{0,3184 \times 51}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 + j \left( \frac{0,1096 \times 51}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 = 0,2517 + j0,0866$$

Impedância acumulada até o CCM5 ( $Z_{ucA}$ )

$$Z_{ucA} = (0,01843 + j0,05166) + (0,2517 + j0,0866)$$

$$Z_{ucA} = 0,27013 + j0,13826 pu$$

### 3.1.1.11. Impedância do QGBT ao CCM6 ( $Z_{uc6}$ )

$S_c = \#35\text{mm}^2 - L_c = 36\text{m}$  e impedância conforme tabela 5, anexo I.

$$Z_{uc6} = \left( \frac{0,6356 \times 42}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 + j \left( \frac{0,1128 \times 36}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 = 0,3545 + j0,06294$$

Impedância acumulada até o CCM6 ( $Z_{ucA}$ )

$$Z_{ucA} = (0,01843 + j0,05166) + (0,3545 + j0,06294)$$

$$Z_{ucA} = 0,3729 + j0,1146 pu$$

### 3.1.1.12. Impedância do QGBT ao CCM7( $Z_{uc7}$ )

$S_c = \#35\text{mm}^2 - L_c = 42\text{m}$  e impedância conforme tabela 5, anexo I.

$$Z_{uc7} = \left( \frac{0,6356 \times 42}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 + j \left( \frac{0,1128 \times 42}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 = 0,4135 + j0,07343$$

Impedância acumulada até o CCM7 ( $Z_{ucA}$ )

$$Z_{ucA} = (0,01843 + j0,05166) + (0,4135 + j0,07343)$$

$$Z_{ucA} = 0,4318 + j0,1251\text{pu}$$

### 3.1.1.13. Impedância do QGBT ao CCM8( $Z_{uc8}$ )

$S_c = \#35\text{mm}^2 - L_c = 27\text{m}$  e impedância conforme tabela 5, anexo I.

$$Z_{uc8} = \left( \frac{0,6356 \times 27}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 + j \left( \frac{0,1128 \times 27}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 = 0,2659 + j0,04721$$

Impedância acumulada até o CCM8 ( $Z_{ucA}$ )

$$Z_{ucA} = (0,01843 + j0,05166) + (0,2659 + j0,04721)$$

$$Z_{ucA} = 0,843 + j0,0990\text{pu}$$

### 3.1.1.14. Impedância do QGBT ao CCM9( $Z_{uc9}$ )

$S_c = \#50\text{mm}^2 - L_c = 46\text{m}$  e impedância conforme tabela 5, anexo I.

$$Z_{uc9} = \left( \frac{0,4450 \times 46}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 + j \left( \frac{0,1127 \times 46}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 = 0,3173 + j0,08036$$

Impedância acumulada até o CCM9 ( $Z_{ucA}$ )

$$Z_{ucA} = (0,01843 + j0,05166) + (0,3173 + j0,08036)$$

$$Z_{ucA} = 0,3357 + j0,1607\text{pu}$$

### 3.1.1.15. Impedância do QGBT ao CCM10( $Z_{uc10}$ )

$S_c = \#50\text{mm}^2 - L_c = 37\text{m}$  e impedância conforme tabela 5, anexo I.

$$Z_{uc1} = \left( \frac{0,4450 \times 37}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 + j \left( \frac{0,1127 \times 37}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 = 0,2552 + j0,06463$$

Impedância acumulada até o CCM10 ( $Z_{ucA}$ )

$$Z_{ucA} = (0,01843 + j0,05166) + (0,2552 + j0,06463)$$

$$Z_{ucA} = 0,2736 + j0,1163\text{pu}$$

### 3.1.1.16. Impedância do QGBT ao QGFL1( $Z_{uc11}$ )

$S_c = \#185\text{mm}^2 - L_c = 31\text{m}$  e impedância conforme tabela 5, anexo I.

$$Z_{uc11} = \left( \frac{0,1226 \times 31}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 + j \left( \frac{0,1073 \times 31}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 = 0,059 + j0,0515$$

Impedância acumulada até o QGFL1 ( $Z_{ucA}$ )

$$Z_{ucA} = (0,01843 + j0,05166) + (0,059 + j0,0515)$$

$$Z_{ucA} = 0,07743 + j0,1032\text{pu}$$

### 3.1.1.17. Impedância do QGBT ao QGFL2( $Z_{uc12}$ )

$S_c = \#150\text{mm}^2 - L_c = 24\text{m}$  e impedância conforme tabela 5, anexo I.

$$Z_{uc12} = \left( \frac{0,1502 \times 24}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 + j \left( \frac{0,1074 \times 24}{1000 \times 1} \right) \times 15,5 = 0,0559 + j0,0399$$

Impedância acumulada até o QGFL2 ( $Z_{ucA}$ )

$$Z_{ucA} = (0,01843 + j0,05166) + (0,0559 + j0,0399)$$

$$Z_{ucA} = 0,0743 + j0,0916\text{pu}$$

### 3.1.2. Cálculo das correntes de curto-circuitos

Ponto de entrega de energia

$$I_{cc} = \frac{P_{cc} (KVA)}{13,8 \sqrt{3}} = \frac{250.000}{13,8 \sqrt{3}} = 10,46kA$$

#### 3.1.2.1. Barramento do QGBT

##### 3.1.2.1.1. Corrente trifásica simétrica

$$I_{cc3\phi} = \frac{I_b}{Z_{uAA}} = \frac{1970}{0,01843 + j0,05166}$$

$$I_{cc3\phi} = 35,9kA$$

##### 3.1.2.1.2. Corrente bifásica

$$I_{cc2\phi} = 0,866 \times I_{cc3\phi} = 35.900 \times 0,866$$

$$I_{cc2\phi} = 31,1kA$$

##### 3.1.2.1.3. Corrente trifásica assimétrica

$$I_{cc3\phi A} = \sqrt{2} Fa \times I_{cc3\phi} = \sqrt{2} \times 1,28 \times 35.900 = 65,01kA$$

$$\frac{X}{R} = \frac{0,05166}{0,01843} = 2,8$$

Pela tabela 1,  $Fa = 1,28$

##### 3.1.2.1.4. Corrente Fase-terra máxima

$$I_{cc1\phi\text{máx}} = \frac{3I_b}{2Z_1 + Z_0} =$$

$$I_{cc1\phi\text{máx}} = \frac{3 \times 1970}{2(0,01843 + j0,05166) + (0,09625 + j0,1487)} = 20,7kA$$

### 3.1.2.1.5. Corrente Fase terra mínima

$$I_{cc1\phi\min} = \frac{3I_b}{2Z_1 + Z_0 + 3Z_d}$$

$$I_{cc1\phi\min} = \frac{3 \times 1970}{2(0,1843 + j0,05166) + (0,09625 + j0,1487) + 3 \times 103,3} = 53,5A$$

$Z_d = 5\Omega$  - Impedância de defeito conforme adotado pela concessionária

### 3.1.3. Cálculo da Corrente de $I_{cc}$ no CCM1

$$a) I_{cc3\phi} = \frac{I_b}{Z_{ut}} = \frac{1970}{0,1467+10,09583} = 11,24kVA$$

$$b) I_{cc2\phi} = 0,866 \times I_{cc3\phi} = 0,866 \times 11,24 = 9,74kVA$$

$$c) I_{cc3\phi imp} = \sqrt{2} Fa \times I_{cc3\phi} = \sqrt{2} \times 1,01 \times 11,24 = 16,1kA$$

$$\frac{X}{R} = \frac{0,09583}{0,1467} = 0,65$$

Pela tabela 1,  $Fa = 1,01$

### 3.1.4. Cálculo da Corrente de $I_{cc}$ no CCM2

$$a) I_{cc3\phi} = \frac{I_b}{Z_{ut}} = \frac{1970}{0,18623+0,1095} = 9,1kA$$

$$b) I_{cc2\phi} = 0,866 \times I_{cc3\phi} = 0,866 \times 9,1 = 7,89kVA$$

$$c) I_{cc3\phi imp} = \sqrt{2} Fa \times I_{cc3\phi} = \sqrt{2} \times 1,0 \times 9,1 = 12,8kA$$

$$\frac{X}{R} = \frac{0,1095}{0,18623} = 0,59$$

Pela tabela 1,  $Fa = 1,0$

### 3.1.5. Cálculo da Corrente de $I_{cc}$ no CCM3

$$a) I_{cc3\phi} = \frac{I_b}{Z_{ut}} = \frac{1970}{0,1961+j0,1128} = 8,7kA$$

$$b) I_{cc2\phi} = 0,866 \times I_{cc3\phi} = 0,866 \times 8,7 = 7,54kA$$

$$c) I_{cc3\phi imp} = \sqrt{2} \text{ Fa} \times I_{cc3\phi} = \sqrt{2} \times 1,0 \times 8,7 = 12,3kA$$

$$\frac{X}{R} = \frac{0,1128}{0,19613} = 0,58$$

Pela tabela 1,  $Fa = 1,0$

### 3.1.6. Cálculo da Corrente de $I_{cc}$ no CCM4

$$a) I_{cc3\phi} = \frac{I_b}{Z_{ut}} = \frac{1970}{0,22573+j0,1230} = 7,66kA$$

$$b) I_{cc2\phi} = 0,866 \times I_{cc3\phi} = 0,866 \times 7,66 = 6,64kA$$

$$c) I_{cc3\phi imp} = \sqrt{2} \text{ Fa} \times I_{cc3\phi} = \sqrt{2} \times 1,0 \times 7,66 = 10,83kA$$

$$\frac{X}{R} = \frac{0,1230}{0,22573} = 0,55$$

Pela tabela 1,  $Fa = 1,0$

### 3.1.7. Cálculo da Corrente de $I_{cc}$ no CCM5

$$a) I_{cc3\phi} = \frac{I_b}{Z_{ut}} = \frac{1970}{0,27013+j0,13826} = 6,5kA$$

$$b) I_{cc2\phi} = 0,866 \times I_{cc3\phi} = 0,866 \times 6,5 = 5,62kA$$

$$c) I_{cc3\phi imp} = \sqrt{2} \text{ Fa} \times I_{cc3\phi} = \sqrt{2} \times 1,0 \times 6,5 = 9,19kA$$

$$\frac{X}{R} = \frac{0,13826}{0,270133} = 0,51$$

Pela tabela 1,  $Fa = 1,0$

### 3.1.8. Cálculo da Corrente de $I_{cc}$ no CCM6

$$a) I_{cc3\phi} = \frac{I_b}{Z_{ut}} = \frac{1970}{0,3729+j0,1146} = 5,1kA$$

$$b) I_{cc2\phi} = 0,866 \times I_{cc3\phi} = 0,866 \times 5,1 = 4,37kA$$

$$c) I_{cc3\phi imp} = \sqrt{2} \text{ Fa} \times I_{cc3\phi} = \sqrt{2} \times 1,0 \times 5,1 = 7,2kA$$

$$\frac{X}{R} = \frac{0,1146}{0,3729} = 0,31$$

Pela tabela 1,  $Fa = 1,0$

### 3.1.9. Cálculo da Corrente de $I_{cc}$ no CCM7

$$a) I_{cc3\phi} = \frac{I_b}{Z_{ut}} = \frac{1970}{0,4719+j0,1251} = 3,88kA$$

$$b) I_{cc2\phi} = 0,866 \times I_{cc3\phi} = 0,866 \times 3,88 = 3,36kA$$

$$c) I_{cc3\phi imp} = \sqrt{2} \text{ Fa} \times I_{cc3\phi} = \sqrt{2} \times 1,0 \times 3,88 = 5,48kA$$

$$\frac{X}{R} = \frac{0,1251}{0,4919} = 0,25$$

Pela tabela 1,  $Fa = 1,0$

### 3.1.10. Cálculo da Corrente de $I_{cc}$ no CCM8

$$a) I_{cc3\phi} = \frac{I_b}{Z_{ut}} = \frac{1970}{0,2843+j0,099} = 6,54kA$$

$$b) I_{cc2\phi} = 0,866 \times I_{cc3\phi} = 0,866 \times 6,54 = 5,67kA$$

$$c) I_{cc3\phi imp} = \sqrt{2} \text{ Fa} \times I_{cc3\phi} = \sqrt{2} \times 1,0 \times 6,54 = 9,25kA$$

$$\frac{X}{R} = \frac{0,099}{0,2843} = 0,348$$

Pela tabela 1,  $Fa = 1,0$

### 3.1.11. Cálculo da Corrente de $I_{cc}$ no CCM9

$$a) I_{cc3\phi} = \frac{I_b}{Z_{ut}} = \frac{1970}{0,3357+j0,1607} = 5,3kA$$

$$b) I_{cc2\phi} = 0,866 \times I_{cc3\phi} = 0,866 \times 5,3 = 4,58kA$$

$$c) I_{cc3\phi imp} = \sqrt{2} \text{ Fa} \times I_{cc3\phi} = \sqrt{2} \times 1,0 \times 5,3 = 7,49A$$

$$\frac{X}{R} = \frac{0,1607}{0,3357} = 0,48$$

Pela tabela 1,  $Fa = 1,0$

### 3.1.12. Cálculo da Corrente de $I_{cc}$ no CCM10

$$a) I_{cc3\phi} = \frac{I_b}{Z_{ut}} = \frac{1970}{0,2736+j0,1163} = 6,63kA$$

$$b) I_{cc2\phi} = 0,866 \times I_{cc3\phi} = 0,866 \times 6,63 = 5,74kA$$

$$c) I_{cc3\phi imp} = \sqrt{2} \text{ Fa} \times I_{cc3\phi} = \sqrt{2} \times 1,0 \times 6,63 = 9,4kA$$

$$\frac{X}{R} = \frac{0,1163}{0,2736} = 0,42$$

Pela tabela 1,  $Fa = 1,0$

### 3.1.13. Cálculo da Corrente de $I_{cc}$ no QGFL1

$$a) I_{cc3\phi} = \frac{I_b}{Z_{uit}} = \frac{1970}{0,07743+j0,1032} = 15,3kA$$

$$b) I_{cc2\phi} = 0,866 \times I_{cc3\phi} = 0,866 \times 15,3 = 13,25kA$$

$$c) I_{cc3\phi imp} = \sqrt{2} \text{ Fa} \times I_{cc3\phi} = \sqrt{2} \times 1,0 \times 15,3 = 18,7kA$$

$$\frac{X}{R} = \frac{0,08223}{0,10726} = 0,80$$

Pela tabela 1,  $Fa = 1,0$

### 3.1.14. Cálculo da Corrente de $I_{cc}$ no QGFL2

$$a) I_{cc3\phi} = \frac{I_b}{Z_{uit}} = \frac{1970}{0,0743+j0,0916} = 16,7kA$$

$$b) I_{cc2\phi} = 0,866 \times I_{cc3\phi} = 0,866 \times 16,7 = 14,5kA$$

$$c) I_{cc3\phi imp} = \sqrt{2} Fa \times I_{cc3\phi} = \sqrt{2} \times 1,0 \times 14,5 = 20,5kA$$

$$\frac{X}{R} = \frac{0,2046}{0,09882} = 2,07$$

Pela tabela 1,  $Fa = 2,1$

$$\frac{X}{R} = 0,48$$

## 3.2. COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE

### 3.2.1. Proteção do motor CCM's de 1 à 5

Motores de 5cv - #2,5mm<sup>2</sup> PVC - In=13,7A - Ip/In = 7,0 - Tpm=5s, figura 19, anexo II

$$I_{pm} = \left(\frac{I_p}{I_n}\right) \times I_n = 7 \times 13,7 = 95,9A$$

$K = 0,4$ , conforme item 2.2.4.1

$$I_{nf} \leq I_{pm} \times K$$

$I_{nf} \leq 95,9 \times 0,4 = 38,4A$ , portanto fusível de 35A.

#### Condição do fusível na partida do motor

No gráfico da figura 20, anexo II, para  $I_{pm} = 95,9A$ , na curva do fusível de 35A o tempo de atuação é próximo de 20 segundos, portanto:

$(T_{pm} = 5s) < (T_{af} = 20s)$ , ou seja, o fusível não atua durante a partida do motor.

### Proteção do Contador

$I_{nf} \leq I_{mf} \Rightarrow 35A < 63A$ , a condição foi satisfeita por escolher um contator com capacidade maior que 35A.

### Condição do relé térmico na partida do motor

$$I_{nm} = 13,7A$$

Relé com faixa de ajuste  $\rightarrow$  (11 a 17)A

$Ma = \frac{95,9}{14} = 6,85$ , pela figura 21, anexo II para  $XIn = 6,85$ , o tempo de atuação do relé ( $T_{ar}$ ) é próximo de 8s, portanto:

$(T_{pm} = 5s) < (T_{ar} = 8s)$ , ou seja, o relé não atua na partida do motor.

### Proteção do Condutor para $I_{cc}$

$$I_{cc} = 11,24kA$$

$$T_{sc} \leq \frac{K^2 S^2}{I_{cc}^2} \leq \frac{115^2 \times 2,5^2}{11240^2} \leq 0,7ms$$

Pelo gráfico da figura 20, anexo II, para curva de 35A e 1KA  $T_{af} = 4ms$ , então para 10kA, tempo de atuação do fusível próximo de 0,4ms, portanto

$(T_{af} = 0,4ms) \leq (T_{sc} = 0,7ms)$ , ou seja, o condutor suporta a corrente de curto circuito até o fusível atuar.

### 3.2.2. Proteção do motor CCM 6

Motores de 7,5cv – #4,0mm<sup>2</sup> PVC -  $I_n=22,0A$  –  $I_p/I_n = 7,7$  –  $T_{pm}=6s$ , figura 19, anexo II

$$I_{pm} = \left(\frac{I_p}{I_n}\right) \times I_n = 7,7 \times 22,0 = 154A$$

$K = 0,4$ , conforme item 2.6.4.1

$$I_{nf} \leq I_{pm} \times K$$

$I_{nf} \leq 154 \times 0,4 = 61,6A$ , portanto fusível de 50A.

### **Condição do fusível na partida do motor**

No gráfico da figura 20, anexo II, para  $I_{pm} = 154A$ , na curva do fusível de 50A o tempo de atuação é próximo de 20 segundos, portanto:

$(T_{pm} = 6s) \leq (T_{af} = 20s)$ , ou seja, o fusível não atua durante a partida do motor.

### **Proteção do Contador**

$I_{nf} < I_{mf} \Rightarrow 50 < 125A$ , a condição foi satisfeita por escolher um contator com capacidade maior que 50A.

### **Condição do relé térmico na partida do motor**

$$I_{nm} = 22A$$

Relé com faixa de ajuste  $\rightarrow (15 \text{ a } 23)A$

$Ma = \frac{I_p}{I_n} = \frac{154}{22} = 7,7$ , pela figura 21, anexo II para  $XI_n = 6,85$ , o tempo de atuação do relé( $T_{ar}$ ) é próximo de 8s, portanto:

$(T_{pm} = 6s) \leq (T_{ar} = 8s)$ , ou seja, o relé não atua na partida do motor.

### **Proteção do Condutor para $I_{cc}$**

$$I_{cc} = 11,24KA$$

$$T_{sc} \leq \frac{K^2 S^2}{I_{cc}^2} \leq \frac{115^2 \times 4^2}{11240^2} = 1,7ms$$

Pelo gráfico da figura 20, anexo II, para curva de 50 e 1KA  $T_{af} = 8ms$ , então para 10KA,  $T_{af} = 0,8ms$ , portanto,

$(T_{af} = 0,8ms) < (T_{sc} = 1,7ms)$ , ou seja, o condutor suporta a corrente de curto circuito até o fusível atuar.

### 3.2.3. Proteção do motor CCM's 7 e 8

Motores de 10,0cv – #6,0mm<sup>2</sup> PVC - In=28,0A – Ip/In = 8,0 – Tpm=5s, figura 19, anexo II

$$I_{pm} = \left(\frac{I_p}{I_n}\right) \times I_n = 8,0 \times 28,0A = 224A$$

$K = 0,4$ , conforme item 2.6.4.1

$$I_{nf} \leq I_{pm} \times K$$

$I_{nf} \leq 224 \times 0,4 = 89,6A$ , portanto fusível de 80A.

#### Condição do fusível na partida do motor

No gráfico da figura 20, anexo II, para  $I_{pm} = 224A$ , na curva do fusível de 80A, o tempo de atuação é próximo de 40 segundos, portanto:

$(T_{pm} = 8s) < (T_{af} = 40s)$ , ou seja, o fusível não atua durante a partida do motor.

#### Proteção do Contador

$I_{nf} < I_{mf} \Rightarrow 63A < 125A$ , a condição foi satisfeita por escolher um contator com capacidade maior que 63A.

#### Condição do relé térmico na partida do motor

$$I_{nm} = 28A$$

Relé com faixa de ajuste  $\rightarrow (22 \text{ a } 32)A$

$Ma = \frac{I_p}{I_n} = \frac{224}{28} = 8,0$ , pela figura 21, anexo II para  $XI_n = 8,0$ , o tempo de atuação do relé( $T_{ar}$ ) é próximo de 6s, portanto:

$(T_{pm} = 6s) \leq (T_{ar} = 6s)$ , ou seja, não atendida, requerendo dispositivo de redução da corrente de partida.

### **Proteção do Condutor para $I_{cc}$**

$$I_{cc} = 11,24kA$$

$$T_{sc} \leq \frac{K^2 S^2}{I_{cc}^2} \leq \frac{115^2 \times 6^2}{11240^2} = 3,7ms$$

Pelo gráfico da figura 20, anexo II, para curva de 80A e  $1kA Taf = 30ms$ , então para 10kA,  $Taf \cong 3,0ms$ , portanto,

$(Taf \cong 3,0ms) \leq (Tsc = 3,7ms)$ , ou seja, o condutor suporta a corrente de curto circuito até o fusível atuar.

### **3.2.4. Proteção do motor CCM's 9 e 10**

Motores de 20cv – #160mm<sup>2</sup> PVC -  $I_n=52,0A$  –  $I_p/I_n = 8,3$  –  $T_{pm}=6s$ , figura 19, anexo II

Será considerada partida estrela-triângulo com redução da corrente de partida em 58%, portanto,

$$I_{pm} = \left(\frac{I_p}{I_n}\right) \times I_n = 8,3 \times 52,0A \times 0,58 = 250,3A$$

$$K = 0,4, \text{ conforme item 2.6.4.1}$$

$$I_{nf} \leq I_{pm} \times K$$

$$I_{nf} \leq 250,3 \times 0,4 = 100A, \text{ portanto fusível de } 100A.$$

#### **Condição do fusível na partida do motor**

No gráfico da figura 20, anexo II, para  $I_{pm} = 250A$ , na curva do fusível de 100A, o tempo de atuação é próximo de 40 segundos, portanto:

$$(T_{pm} = 6s) < (Taf = 40s), \text{ ou seja, o fusível não atua durante a partida do motor.}$$

#### **Proteção do Contador**

$I_{nf} < I_{mf} \Rightarrow 100A < 224A$ , a condição foi satisfeita por escolher um contador com capacidade maior que 100A.

### Condição relé térmico na partida do motor

$$I_{nm} = 52A$$

Relé com faixa de ajuste  $\rightarrow$  (42 a 62)A

$$Ma = \frac{I_p}{I_n} = \frac{250}{52} = 4,8, \text{ pela figura 21, anexo II para } XIn = 4,8, \text{ o tempo de atuação do relé}$$

( $T_{ar}$ ) é próximo de 7s, portanto:

$$(T_{pm} = 6s) \leq (T_{ar} = 7s), \text{ ou seja, o relé não atua na partida do motor.}$$

### Proteção do Condutor para $I_{cc}$

$$I_{cc} = 11,24kA$$

$$T_{sc} \leq \frac{K^2 S^2}{I_{cc}^2} \leq \frac{115^2 \times 16^2}{11240^2} = 27ms$$

Pelo gráfico da figura 20, anexo II, para curva de 100A e 11,2kA  $T_{af} < 27ms$ , então para 11,2kA,  $T_{af} \cong 1,0ms$ , portanto,

( $T_{af} < 1,0ms$ )  $\leq$  ( $T_{sc} = 27ms$ ), ou seja, o condutor suporta a corrente de curto circuito até o fusível atuar.

### 3.2.5. Proteção geral CCM's de 1 à 5

$$I_{cc3\phi} = 30kA, \# 70mm^2 \text{ PVC}, I_z = 171A$$

#### Dimensionamento do fusível

$$I_c = \Sigma I_{nm} = 10 \times 13,7 = 137A$$

$$I_{nf} \leq (I_{pmm} \times K) + \Sigma I_{nm}.$$

$$I_{nf} \leq (95,9 \times 0,4) + 9 \times 13,7$$

$$I_{nf} \leq 38,4 + 137$$

$$I_{nf} \leq 161,7A.$$

Portanto, fusível NH de 160A

### **Proteção da chave seccionadora**

$$Inch \geq 1,15 \times \Sigma Inm$$

$$Inch \geq 1,15 (10 \times 13,7)$$

$$Inch \geq 137A \times 1,15$$

$$Inch \geq 157A$$

Portanto, chave seccionadora de 250A/400V/50kA

Como  $In_f < Im_f$

160 < 250A, portanto condição satisfeita.

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

137A ≤ 160A ≤ 171A, portanto, condição satisfeita

### **Proteção do condutor para $I_{cc3\phi}$**

$$T_{sc} \leq \frac{K^2 S^2}{I_{cc}^2}$$

$$T_{sc} \leq \frac{115^2 70^2}{35900^2}$$

$$T_{sc} \leq 50ms$$

Pelo gráfico da figura 20, anexo II, para curva de 160A e 35,9kA  $T_{af} < 1ms$ , portanto,

( $T_{af} = 1,0ms$ ) < ( $T_{sc} = 50ms$ ), ou seja, o condutor suporta a  $I_{cc}$  até o fusível atuar.

### **Condição do fusível na partida**

O fusível não deve atuar na partida do maior motor, portanto:

Pelo gráfico da figura 20 do anexo II, para  $I_{pm} = 95,9$ , curva 160A, o tempo de atuação do fusível ( $T_{af} = 10.000s$ ).

( $T_{af} 10.000s$ ) > ( $T_{pm} 5s$ ), portanto o motor parte sem o fusível atuar.

### 3.2.6. Proteção geral CCM 6

$$I_{cc30} = 35,9kA, \# 35mm^2 \text{ PVC}, I_z = 110A$$

#### Dimensionamento do fusível

$$I_c = \Sigma I_{nm} = 2 \times 22 = 44A$$

$$I_{nf} \leq (I_{pmm} \times K) + \Sigma I_{nm}.$$

$$I_{nf} \leq (154,0 \times 0,4) + 1 \times 22,0$$

$$I_{nf} \leq 84A$$

$$I_{nf} \leq 83,6A \text{ lb.}$$

Portanto, fusível NH de 80A

#### Proteção da chave seccionadora

$$I_{nch} \geq 1,15 \times \Sigma I_{nm}$$

$$I_{nch} \geq 1,15 \times 44$$

$$I_{nch} \geq 50,6A$$

Portanto, chave seccionadora de 160A/400V /50kA

Como  $I_{nf} < I_{mf}$

50A < 160A, portanto condição satisfeita.

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

44A ≤ 80A ≤ 110A, portanto, condição satisfeita

### **Proteção do condutor para $I_{cc3\phi}$**

$$T_{sc} \leq \frac{K^2 S^2}{I_{cc}^2}$$

$$T_{sc} \leq \frac{115^2 35^2}{35900^2}$$

$$T_{sc} \leq 12ms$$

Pelo gráfico da figura 20, anexo II, para curva de 80A e 35,9kA  $T_{af} < 1ms$ , portanto,

( $T_{af} = 1,0ms$ ) < ( $T_{sc} = 12ms$ ), ou seja, o condutor suporta a corrente de curto circuito até o fusível atuar.

### **Condição do fusível na partida**

Pelo gráfico da figura 20 do anexo II, para  $I_{pm} = 154A$ , curva 80A, o tempo de atuação do fusível ( $T_{af} > 1.000s$ ).

( $T_{af} 1.000s$ ) > ( $T_{pm} 6s$ ), portanto o motor parte sem o fusível atuar

### **3.2.7. Proteção geral CCM's de 7 e 8**

$$I_{cc3\phi} = 35,9kA, \# 35mm^2 \text{ PVC}, I_z = 110A \text{ } I_{nm} = 28A, T_{pm} = 5s$$

#### **Dimensionamento do fusível**

$$I_c = \Sigma I_{nm}$$

$$I_c = 2 \times 28$$

$$I_c = 56A$$

$$I_{nf} = (I_{pm} \times K) + \Sigma I_{nm}.$$

$$I_{nf} \leq (224 \times 0,4) + 2 \times 28$$

$$I_{nf} \leq 145,6A.$$

Portanto, fusível NH de 100A

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

$56A \leq 100A \leq 110A$ , condição satisfeita

### **Proteção da chave seccionadora**

$$I_{nch} = 1,15I_c$$

$$I_{nch} = 1,15 \times 56$$

$$I_{nch} = 64,4A$$

Como  $(I_{nf} = I_{mf}) < (I_{mf} = K)$

Portanto, chave seccionadora de 160A/SFW/400V/50kA

### **Proteção do condutor para $I_{cc3\phi}$**

$$T_{sc} \leq \frac{K^2 S^2}{F_{cc}^2}$$

$$T_{sc} \leq \frac{115^2 \cdot 35^2}{35900^2}$$

$$T_{sc} \leq 12ms$$

Pelo gráfico da figura 20, anexo II, para curva de 100A e 35,9kA  $T_{af} < 1ms$ , portanto,

$(T_{af} = 1,0ms) < (T_{sc} = 12ms)$ , ou seja, o condutor suporta a corrente de curto circuito.

### **Condição do fusível na partida**

Pelo gráfico da figura 20 do anexo II, para  $I_{pm} = 224$ , curva 100A.

$T_{af} 100s$ , portanto,

$T_{af} 100s > T_{pm} (5s)$ , o motor parte sem o fusível atuar

### 3.2.8. Proteção geral CCM's de 9 e 10

$$I_{cc3\phi} = 35,9\text{kA}, \# 50\text{mm}^2 \text{ PVC}, I_z = 134\text{A } I_n = 52\text{A}, T_{pm} = 6\text{s}$$

#### Dimensionamento do fusível

$$I_c = \Sigma I_{nm}$$

$$I_c = 2 \times 52$$

$$I_c = 104\text{A}$$

$$I_{nf} = (I_{pm} \times K) + \Sigma I_{nm}.$$

Supondo partida estrela-triângulo, a corrente de partida reduz em 58%.

$$I_{nf} = (I_{pm} \times 0,58 \times K) + \Sigma I_{nm}.$$

$$I_{nf} \leq (431,6 \times 0,58 \times 0,4) + 52$$

$$I_{nf} \leq 152,1\text{A}.$$

Portanto, fusível NH de 125A

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

$$104\text{A} \leq 125\text{A} \leq 134\text{A}, \text{condição satisfeita}$$

#### Proteção da chave seccionadora

$$I_{nch} = 1,15I_c$$

$$I_{nch} = 1,15 \times 104$$

$$I_{nch} = 119,2\text{A}$$

Portanto, chave seccionadora de 160A/400V/50kA

Como  $(I_{nf} = 125\text{A}) < (I_{mf} = 160\text{A})$ , condição satisfeita.

### Proteção do condutor para $I_{cc3\phi}$

$$T_{sc} \leq \frac{K^2 S^2}{F_{cc}^2}$$

$$T_{sc} \leq \frac{115^2 30^2}{35900^2}$$

$$T_{sc} \leq 25,6ms$$

Pelo gráfico da figura 20, anexo II, para curva de 100A e 35,9kA  $T_{af} < 1ms$ , portanto,

( $T_{af} = 1,0ms$ ) < ( $T_{sc} = 12ms$ ), ou seja, o condutor suporta a corrente de curto circuito.

### Condição do fusível na partida

Pelo gráfico da figura 20 do anexo II, para  $I_{pm} = 250A$ , curva 125A.

$T_{af} 100s$ , portanto,

$T_{af} 100s > T_{pm} (5s)$ , o motor parte sem o fusível atuar

### 3.2.9. Proteção geral do QGFL1

$S = 98,4KVA$ , # 185mm<sup>2</sup> PVC,  $I_{cc} = 15,3kA$   $I_z = 314A$ .

#### Dimensionamento do fusível

$$I_c = \frac{98,4 \times 10^3}{220\sqrt{3}}$$

$$I_c = 258,2A$$

$$I_{nf} \geq 1,15I_{nc} = 297A.$$

Portanto, fusível de 300A

$$I_c \leq I_n \leq I_z$$

$258A \leq 300A \leq 314A$ , condição satisfeita

### **Proteção da chave seccionadora**

$$Inch = 1,15Inc = 297A$$

Portanto, chave seccionadora de 400A/400V/50kA

$$Inf < Inm$$

300A < 400A, condição satisfeita

### **Proteção do condutor contra $I_{cc}$**

$$Taf < 1ms$$

$$Tsc \leq \frac{K^2 S^2}{I_{cc}^2}$$

$$Tsc \leq \frac{115^2 185^2}{14600^2}$$

$$Tsc \leq 1,9s$$

Portanto, o fusível protege o cabo contra  $I_{cc}$ .

### **3.2.10. Proteção geral do QGFL2**

$S = 98,4kVA$ , # 150mm<sup>2</sup> PVC,  $I_{cc} = 16,7kA$ ,  $Iz = 275A$ .

#### **Dimensionamento do fusível**

$$Ic = \frac{98,4 \times 10^3}{220\sqrt{3}}$$

$$Ic = 257,2A$$

$$Inf \geq 1,15Inc = 297A.$$

$$Inf \geq 1,15 \times 257,2 = 297A.$$

Portanto, fusível de 300A

$$I_c \leq I_n \leq I_z$$

$$257A \leq 300A \leq 275A, \text{ condição não satisfeita}$$

Neste caso a seção do condutor deve aumentar para # 185mm<sup>2</sup>, com  $I_z = 314A$ , então.

$$I_c \leq I_n \leq I_z$$

$$257 \leq 300 \leq 314, \text{ condição satisfeita.}$$

### **Proteção da chave seccionadora**

$$I_{ch} = 1,15I_{nc} = 297A$$

Portanto, chave seccionadora de 400A/400V/50kA

$$I_{nf} < I_{nm}$$

$$300A < 400A, \text{ condição satisfeita}$$

### **Proteção do condutor contra $I_{cc}$**

$$T_{af} < 1ms$$

$$T_{sc} \leq \frac{K^2 S^2}{I_{cc}^2}$$

$$T_{sc} \leq \frac{115^2 150^2}{16700^2}$$

$$T_{sc} \leq 1,0s$$

Portanto, o fusível protege o cabo contra  $I_{cc}$ .

### 3.2.11. Proteção geral do QGBT

$$S = 98,4\text{kVA}, \# 6 \times 240\text{mm}^2 \text{ PVC}, I_z = 370\text{A}, I_{cc} = 35,9\text{kA}.$$

**Dimensionamento do disjuntor.**

$$I_c = \frac{750 \times 10^3}{220\sqrt{3}}$$

$$I_c = 1.968\text{A},$$

Portanto, corrente nominal do disjuntor,  $I_{nd} = 2000\text{A}$ .

$$I_{nc} = 6 \times 370 = 2.220\text{A} = I_z.$$

$$I_c \leq I_n \leq I_z$$

$$1.968\text{A} \leq 2000\text{A} \leq 2220\text{A}, \text{ condição satisfeita}$$

Condição para atender capacidade de interrupção.

As unidades de sobrecargas e curto-circuito podem ser ajustadas para corrente nominal, assim, naturalmente se obtêm a seletividade.

Proteção adicional = Bobina de subtensão temporizada.

### 3.2.12. Proteção geral da cabine primária

$$S = 750\text{kVA}, \# 16\text{mm}^2 \text{ PVC}, I_{cc3\phi} = 35,9\text{kA} \text{ (No secundário do transformador)}$$

**Ajuste da proteção primária (Relé)**

$$I_c = \frac{750 \times 10^3}{13.800\sqrt{3}}$$

$$I_c = 31,4\text{A},$$

Prevendo sobrecarga de 50% -  $F_{sc} = 1,5$ .

$$I_a = 1,5 \times 31,4 = 47,1\text{A}$$

Referindo a corrente de curto-circuito trifásica ao primário do transformador.

$$I_{cc3\phi} = \frac{35.900 \times 13.800}{220} = 574A$$

O múltiplo da corrente de curto-circuito é

$$M = \frac{I_{cc3\phi}}{I_a}$$

$$M = \frac{574}{47}$$

$$M = 12,2$$

Pelo gráfico da figura 25 anexo II para  $M = 12,2$ , curva mais baixa.  $T_{ar} = 0,11s$

Para coordenação com disjuntores conforme (Mamede, 2007)

$$T_c = 0,4s$$

Tempo de atuação do disjuntor para 35,9kA,  $T_{ad} = 0,02s$ , portanto o relé deve ser ajustado para

$$T_{ar} = T_{ad} + 0,4 = 0,42s$$

Finalmente as figura 17 e 18 do anexo I, juntamente com o quadro da página seguinte, apresentam um resumo dos resultados obtidos através do processo de cálculo executado.

QUADRO RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS E DISPOSITIVOS DO SISTEMA

	Seção do cabo	Comprimento (m)	Impedância de lcc (pu)	Corrente lcc3φ (KA)	Tipo de proteção
<b>QGBT</b>	70	17	0,0184 + j0,0517	35,9	DTM 2000A/85KA
<b>CCM1</b>	70	26	0,1467 + j0,0958	11,2	Seccionadora NH 160A
<b>CCM2</b>	70	34	0,1862 + j0,01095	9,1	Seccionadora NH 160A
<b>CCM3</b>	70	36	0,1961 + j0,1128	8,7	Seccionadora NH 160A
<b>CCM4</b>	70	42	0,2257 + j0,1230	7,7	Seccionadora NH 160A
<b>CCM5</b>	70	51	0,2701 + j0,1383	6,5	Seccionadora NH 160A
<b>CCM6</b>	35	36	0,3729 + j0,1146	5,1	Seccionadora NH 180A
<b>CCM7</b>	35	42	0,4318 + j0,1251	3,9	Seccionadora NH 100A
<b>CCM8</b>	35	27	0,843 + j0,099	6,5	Seccionadora NH 100A
<b>CCM9</b>	50	46	0,3357 + j0,1607	5,3	Seccionadora NH 125A
<b>CCM10</b>	50	37	0,2736 + j0,1163	6,6	Seccionadora NH 125A
<b>QGFL1</b>	185	18	0,0184 + j0,0517	15,3	Seccionadora NH 300A
<b>QGFL2</b>	150	27	0,2046 + j0,099	16,7	Seccionadora NH 300A

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de demandar cuidados devido aos cálculos e informações detalhadas que são necessárias, o método proposto atingiu seu objetivo podendo inclusive ser convenientemente adaptado para sistemas maiores e mais complexos.

Percebe-se durante todo do processo de estudo da proteção, que situações contraditórias sempre surgem, como nos cálculos teóricos, onde os valores encontrados não são exatamente iguais aos valores comerciais de dispositivos, ou que não são viáveis de serem aplicados na prática. Este tipo de problema exige do profissional experiência e conhecimento que vão além do método apresentado aqui para a tomada de decisão.

Qualquer decisão errada na especificação de um dispositivo, pode causar atuação indevida das proteções, com conseqüente parada de produção e em casos mais extremos poderia colocar em risco a integridade do SEP.

Talvez esta seja a grande vantagem de se utilizar softwares para este trabalho como o ANAFAS desenvolvido pelo CEPEL, pois supõe-se que estes programas “cubram” todas as possibilidades de cálculos e dispositivos, e quando isto não ocorre, o erro pode ser detectado através de simulações que estes softwares oferecem.

Ainda assim, o método apresentado é válido e permite o domínio do processo por parte do técnico em proteção, de forma que este possa realizar o trabalho sem o alto custo dos programas sofisticados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]-Kindermann, Geraldo – Curto-circuito - 2a edição – Porto Alegre:Sagra Luzzatto,1997
- [2]-Robba, Ernesto João – Introdução a sistemas elétricos de potência:componentes simétricas.São Paulo: Edgard Blucher, 1931.
- [3]- Maezono,Paulo Koiti- Curso básico de proteção de sistemas elétricos de potência – São Paulo:Virtus Consultoria, 2004.
- [4]-IEEE - Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Comercial Power Systems, 2001.
- [5]-SEL-Schweitzer Engineering Laboratories comercial - Análise dos métodos de proteção contra faltas à terra nos sistemas da distribuição aterrados, não aterrados e compensados:  
<http://www.selinc.com.br>
- [6]-IEEE - Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, 1993
- [7]-Kindermann,Geraldo – Proteção de sistemas elétricos de potência-Florianópolis:Ed. Do Autor, 1999.
- [8]-Mamede filho, João - Manual de equipamentos elétricos volume1 - Rio de Janeiro:LTC-Livros técnicos e científicos, Ed. 1993.
- [9]-Mamede filho, João - Manual de equipamentos elétricos volume 2 - Rio de Janeiro:LTC-Livros técnicos e científicos, Ed. 1993.
- [10]-Caixeta, Geraldo Peres - Componentes simétricas:Apostila de apoio à disciplina Instalações e acionamentos elétricos 8º semestre,Universidade São Francisco.
- [11] - Geraldo Peres – Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência - Apostila de apoio à disciplina Instalações e acionamentos elétricos 8º semestre,Universidade São Francisco.
- [12]-Stevenson Junior, Willian D – Analisis de sistemas eléctricos de potência – México:Mc Graw Hill, 1979.
- [13]-Caminha, Amadeu Casal – Introdução à proteção dos sistemas elétricos de potência – São Paulo:Edgard Blucher, 1977.
- [14]-ABNT – NBR-14039 Instalações elétricas de média tensão (De 1,0KV a 36,2KV) – Rio de Janeiro:,2003.
- [15]-ABNT – NBR-5410 Instalações elétricas de baixa tensão – Rio de Janeiro:1997.
- [16]-Cotrim, Ademaro A.M.B. – Instalações elétricas – 3ª edição-São Paulo:Makron Books, 1992.
- [17]-Mamede filho, João – Instalações elétricas industriais – 7ª edição-Rio de Janeiro:LTC, 2007.
- [18]-Revista Eletricidade Moderna – Guia EM da NBR 5410 – São Paulo:2001

[19]-AES Eletropaulo – LIGMT 2004 Fornecimento de energia elétrica em tensão primária – São Paulo:2004.

## ANEXO I – CÁLCULO DAS IMPEDÂNCIAS E CORRENTES

Tabela 4 - Capacidade de corrente, resistência e reatância dos barramentos (Cu)

Dimensões		Corrente (A)	Resistência (mΩ/m)	Reatância (mΩ/m)
Polegadas	Milimetro			
1/2 x 1/16	12,7 x 1,59	96	0,8843	0,2430
3/4 x 1/16	19,0 x 1,59	128	0,8591	0,2300
1 x 1/16	25,4 x 1,59	176	0,4421	0,2280
1/2 x 1/8	12,7 x 3,18	144	0,4421	0,2430
3/4 x 1/8	19,0 x 3,18	208	0,2955	0,2330
1 x 1/8	25,4 x 3,18	250	0,2210	0,2070
1 1/2 x 1/8	38,1 x 3,18	370	0,1474	0,1880
1 x 3/16	25,4 x 4,77	340	0,1474	0,2100
1 1/2 x 3/16	38,1 x 4,77	460	0,0982	0,1880
2 x 3/16	50,8 x 4,77	595	0,0736	0,1700
1 x 1/4	25,4 x 6,35	400	0,1110	0,2100
1 1/2 x 1/4	38,1 x 6,35	544	0,0738	0,1870
2 x 1/4	50,8 x 6,35	700	0,0553	0,1670
2 1/2 x 1/4	63,5 x 6,35	850	0,0442	0,1550
2 3/4 x 1/4	70,2 x 6,35	1000	0,0400	0,1510
3 1/2 x 1/4	88,9 x 6,35	1130	0,0316	0,1450
4 x 1/4	101,6 x 6,35	1250	0,0276	0,1320
1 x 1/2	25,4 x 12,70	600	0,0553	0,1870
2 x 1/2	50,8 x 12,70	1010	0,0276	0,1630
3 x 1/2	76,2 x 12,70	1425	0,0184	0,1450
4 x 1/2	101,6 x 12,77	1810	0,0138	0,1300

1 - Para espaçamentos entre barras maiores do que 2D na horizontal é necessário aplicar fatores de redução, visto que o aquecimento mútuo é desprezível;  
 2 - os valores de resistência e reatância são aproximados;  
 3 - a distância entre as barras é de aproximadamente 150mm.

Tabela 5. Resistência e reatância dos condutores de PVC

Seção cabo	Impedância de sequência positiva (mΩ/m)		Impedância de sequência zero (mΩ/m)	
	Resistência	Reatância	Resistência	Reatância
1,5	14,8137	0,1378	16,6137	2,9262
2,5	8,8882	0,1345	10,6882	2,8755
4	5,5518	0,1279	7,3552	2,8349
6	3,7035	0,1225	5,5035	2,8
10	2,2221	0,1207	4,0222	2,7639
16	1,3899	0,1173	3,189	2,173
25	0,8891	0,1164	2,6891	2,6692
35	0,6353	0,1128	2,4355	2,6382
50	0,445	0,1127	2,245	2,5991
70	0,3184	0,1096	2,1184	2,5681
95	0,2352	0,109	2,0352	2,5325
120	0,1868	0,1076	1,9868	2,5104
150	0,1502	0,1074	1,9502	2,4843
185	0,1226	0,1073	1,9226	2,4594
240	0,0958	0,107	1,8958	2,4312
300	0,0781	0,1068	1,8781	2,4067
400	0,0608	0,1058	1,8608	2,3757
500	0,0507	0,1051	1,855	2,3491

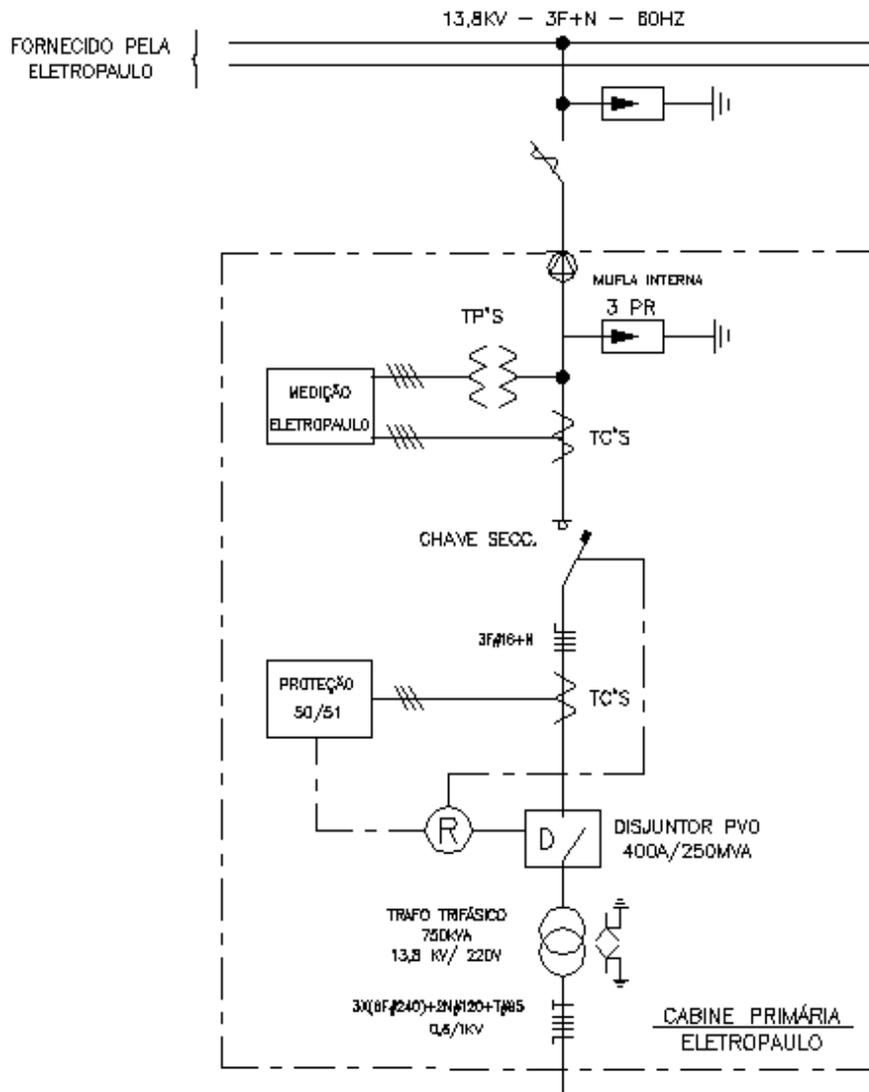


Figura 17 – Diagrama unifilar do sistema elétrico de média tensão



## ANEXO II – COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE

POTÊNCIA		CORRENTE NOMINAL(A)			ip/In	FATOR DE SERVIÇO	TEMPO COM ROTOR BLOQUEADO (s) A QUENTE
CV	kW	220	380	440		F.S.	
0.16	0.12	0.90	0.52	0.45	4.8	1.35	11
0.25	0.18	1.30	0.75	0.65	4.5	0.35	11
0.33	0.25	1.60	0.92	0.80	5.2	0.35	8.0
0.5	0.37	2.10	1.21	1.05	4.6	0.25	12
0.75	0.55	3.00	1.73	1.50	6.0	0.25	6.0
1	0.75	3.80	2.20	1.90	6.4	1.15	6.0
1.5	1.10	5.00	2.90	2.50	5.1	1.15	6.0
2	1.50	6.50	3.75	3.25	6.3	1.15	6.0
3	2.20	9.00	5.20	4.50	6.8	1.15	6.0
4	3.00	12.0	6.95	6.00	7.4	1.15	6.0
5	3.70	15.0	8.65	7.50	7.1	1.15	6.0
6	4.40	17.0	9.80	8.50	7.9	1.15	6.0
7.5	5.50	22.0	12.7	11.0	7.7	1.15	6.0
10	7.50	28.0	16.2	14.0	8.0	1.15	5.0
12.5	9.20	34.0	19.6	17.0	8.8	1.15	5.0
15	11.0	40.0	23.0	20.0	8.2	1.15	5.0
20	15.0	52.0	30.0	26.0	8.3	1.15	6.0
25	18.5	62.0	36.0	31.0	8.6	1.15	6.0
30	22.0	76.0	44.0	38.0	8.0	1.15	6.0
40	30.0	98.0	56.5	49.0	8.7	1.15	8.0
50	37.0	120	69.0	60.0	8.7	1.15	8.0
60	45.0	148	86.0	74.0	7.3	1.00	8.0
75	55.0	180	104	90.0	7.4	1.00	8.0
100	75.0	250	144	125	8.5	1.00	6.0
125	90.0	310	179	155	7.3	1.00	12
150	110	380	220	190	8.0	1.00	11
175	130	440	254	220	8.0	1.00	11
200	150	500	289	250	7.2	1.00	15
250	185	610	352	305	8.0	1.00	13
300	220	740	427	370	7.0	1.00	20
350	260	860	496	430	7.0	1.00	18
400	300	980	566	490	7.0	1.00	21
450	330	1050	606	525	7.0	1.00	20
500	370	1220	704	610	7.2	1.00	20

Figura 19 – Característica de motores de indução trifásicos de IV pólos

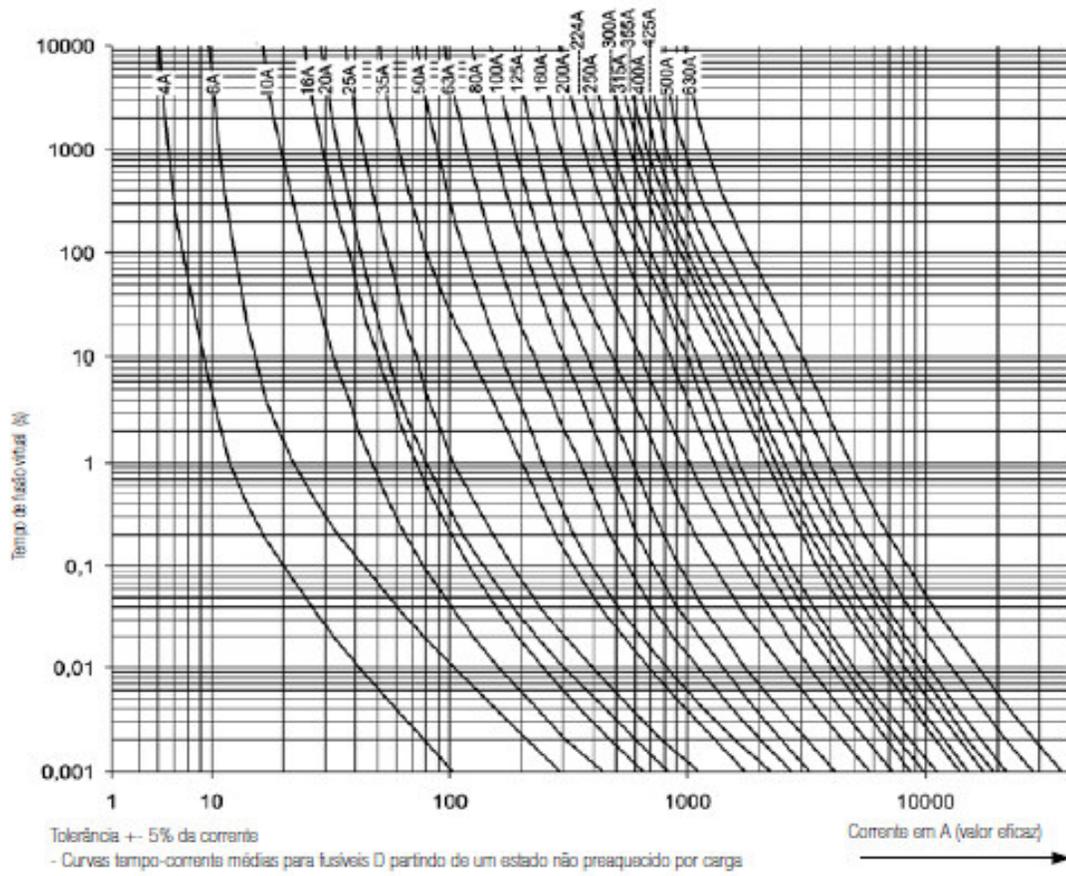


Figura 20 - Característica tempo x corrente de fusíveis NH.

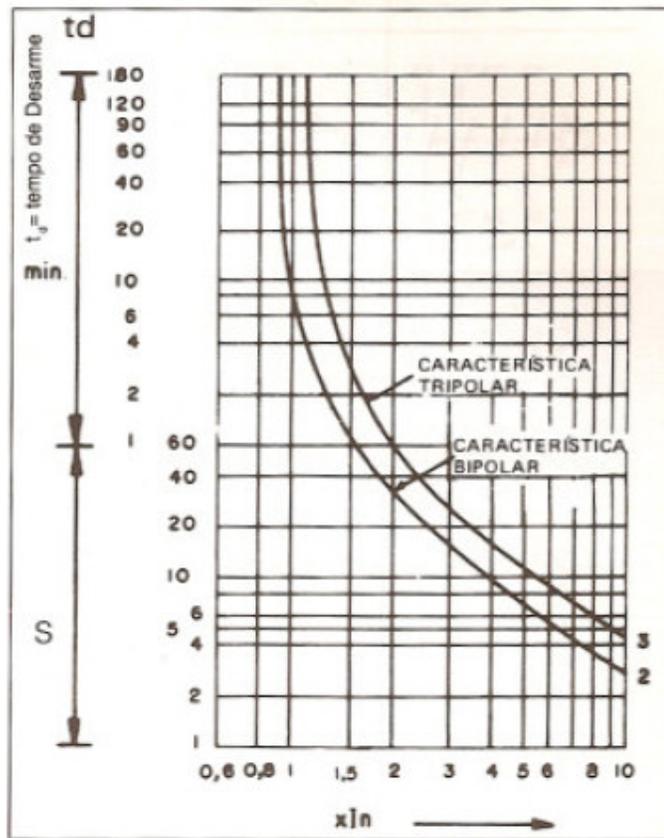


Figura 21 - Curvas tempo x corrente de relés térmicos.

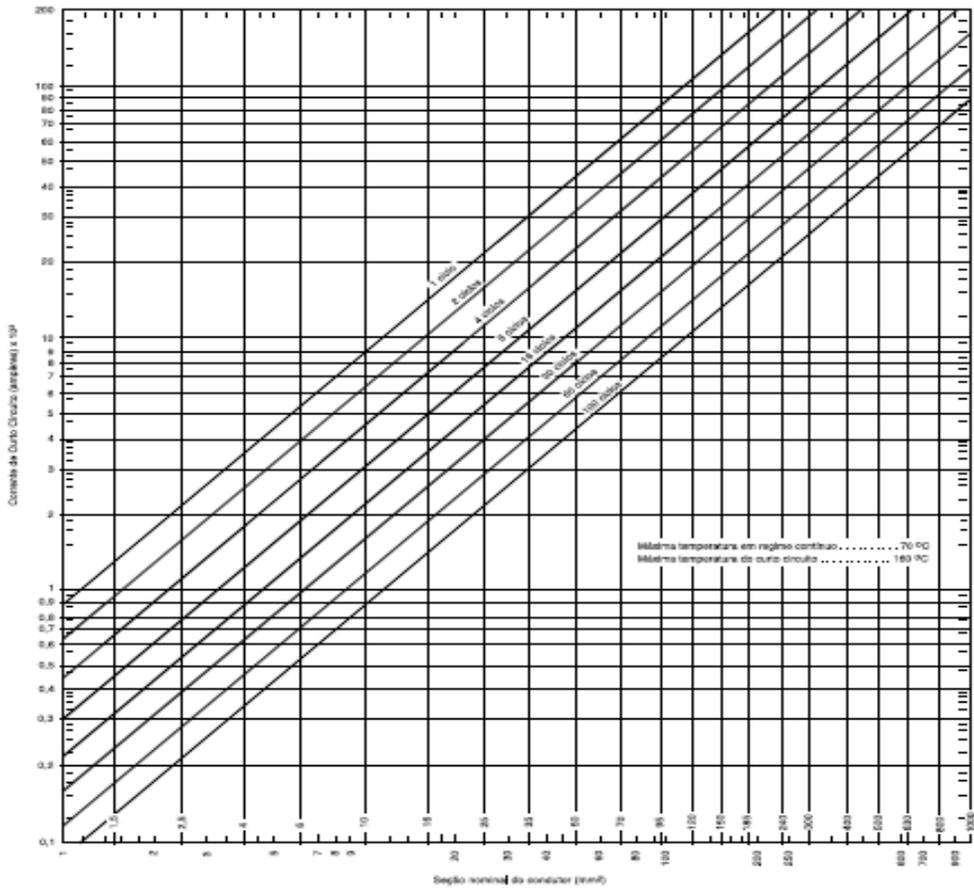


Figura 22 - Capacidade máxima da corrente de curto-circuito.

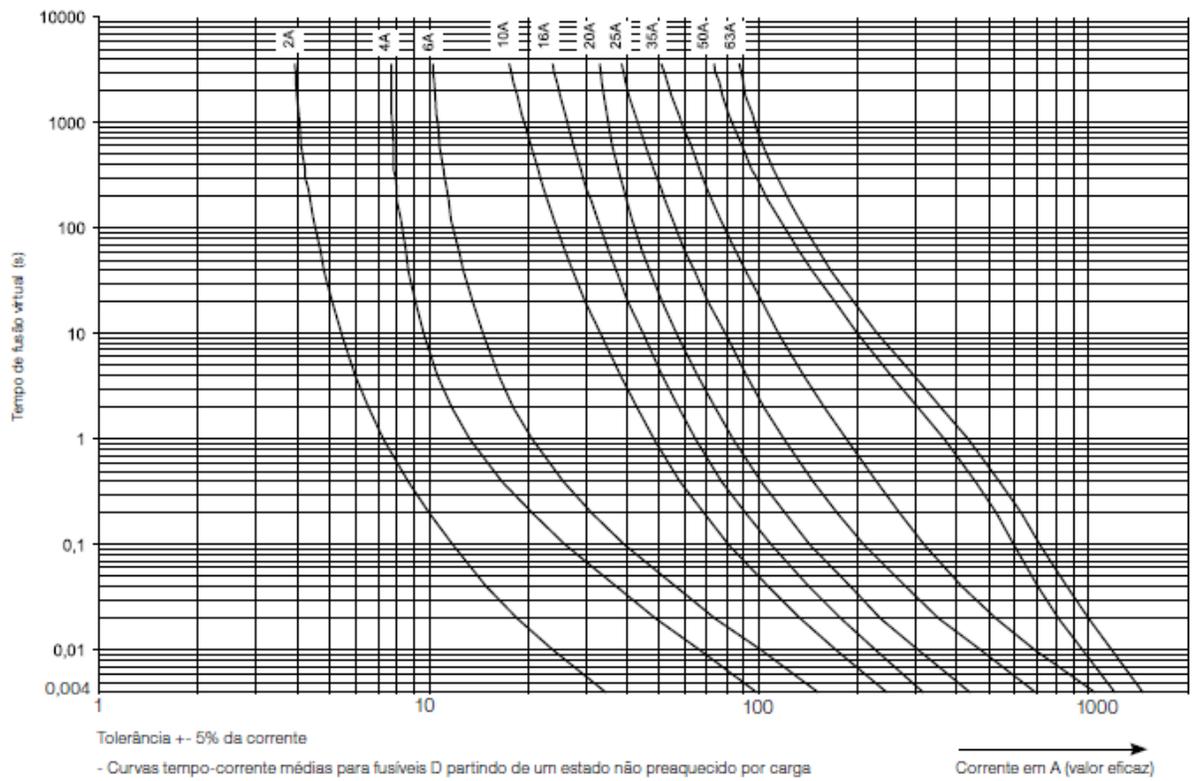


Figura 23 - Curva característica tempo x corrente para fusíveis “D”.

Seções normais (mm <sup>2</sup> )	Capacidade de condução de corrente (A)		Queda de tensão para cos $\phi = 0,8$ (V/A, km)		
			Conduto não-magnético		Conduto magnético
	2 condutores corrigidos	3 condutores corrigidos	Circuito monofásico	Circuito trifásico	
1,5	17,5	15,5	23,3	20,2	23
2,5	24	21	14,3	12,4	14
4	32	28	8,96	7,79	9,0
6	41	36	6,03	5,25	5,87
10	57	50	3,63	3,17	3,54
16	76	68	2,32	2,03	2,27
25	101	89	1,51	1,33	1,50
35	125	111	1,12	0,98	1,12
50	151	134	0,85	0,76	0,86
70	192	171	0,62	0,55	0,64
95	232	207	0,48	0,43	0,50
120	269	239	0,40	0,36	0,42
150	309	275	0,35	0,31	0,37
185	353	314	0,30	0,27	0,32
240	415	369	0,26	0,23	0,29
300	472	420	0,23	0,21	0,27

Figura 24 - Capacidade de condução de corrente de condutores de PVC”.

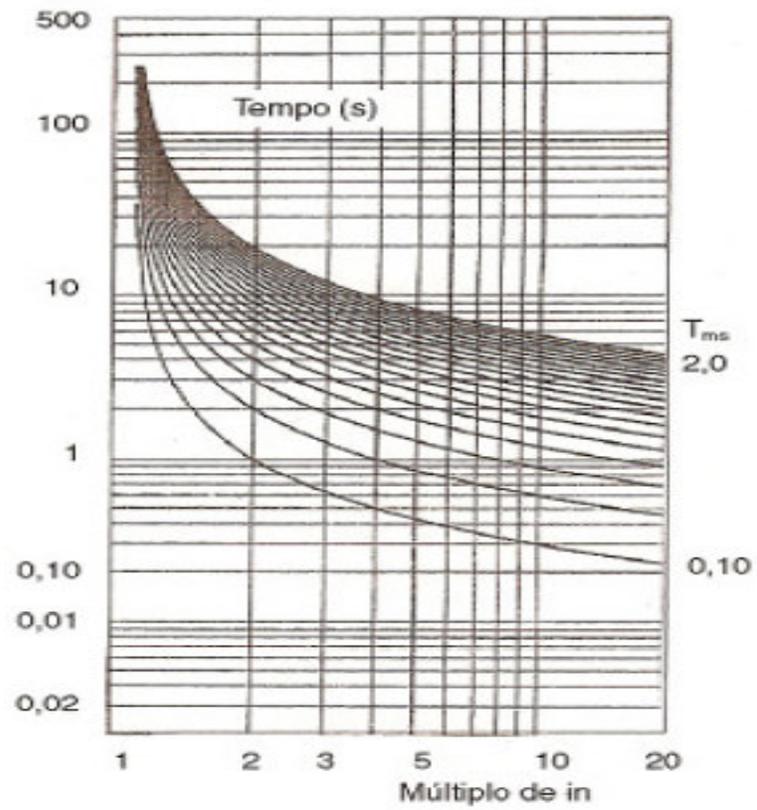


Figura 25 – Característica tempo x corrente de relés digitais.