

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CURITIBA
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA – ÊNFASE ELETROTÉCNICA

DIEGO WILLIAN NUNES
KAIO CEZAR DE ANDRADE BARBANTI
RAFAEL GRAUMANN POLTL

**SOFTWARE DE DIMENSIONAMENTO DE ISOLADORES E
BARRAMENTOS PARA PAINÉIS DE DISTRIBUIÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

DIEGO WILLIAN NUNES
KAIO CEZAR DE ANDRADE BARBANTI
RAFAEL GRAUMANN POLTL

**SOFTWARE DE DIMENSIONAMENTO DE ISOLADORES E
BARRAMENTOS PARA PAINÉIS DE DISTRIBUIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à disciplina TCC 2, do curso de Engenharia Industrial Elétrica, com Ênfase em Eletrotécnica, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Erley Schafranski

CURITIBA
2013

DIEGO WILLIAN NUNES
KAIO CEZAR DE ANDRADE BARBANTI
RAFAEL GRAUMANN POLTL

SOFTWARE DE DIMENSIONAMENTO DE ISOLADORES E BARRAMENTOS PARA PAINÉIS DE DISTRIBUIÇÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Industrial Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 12 de Setembro de 2013.

Prof. Dr. Emerson Rigoni
Coordenador de Curso
Engenharia Industrial Elétrica

Prof^a. Me. Annemarlen Gehrke Castagna
Coordenadora dos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTADOR

Prof. Dr. Luiz Erley Schafranski
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gilberto Manoel Alves
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Ivan Born
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Industrial Elétrica.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, aos nossos familiares pela compreensão e paciência a nós dedicados, em especial a empresa Engerey, que nos ajudou com todo o suporte necessário para o desenvolvimento do *software* e ao nosso orientador, o Prof. Dr. Luiz Erley Schafranski, pelo apoio e dedicação necessários para a realização do trabalho.

RESUMO

NUNES, Diego; BARBANTI, Kaio; POLTL, Rafael. **Software de dimensionamento de isoladores e barramentos para painéis de distribuição**. 2013. 92f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

Neste trabalho foi descrito passos de desenvolvimento do *software* de dimensionamento de isoladores e barramentos para painéis de distribuição através da corrente de curto circuito. O dimensionamento de barramentos rígidos e isoladores aplicados em painéis de baixa tensão é um procedimento que assume contornos de complexidade, pois a norma não trata o procedimento de uma forma clara. Surge então a necessidade de desenvolver um programa que agregue toda a informação necessária para o dimensionamento de barramentos e isoladores e ainda execute toda a parte de cálculos de dimensionamento, poupando assim tempo, trabalho e material ao usuário.

Palavras Chaves: Curto-circuito, painéis, barramento e isoladores.

ABSTRACT

NUNES, Diego; BARBANTI, Kaio; POLTL, Rafael. **Software for dimensioning of insulators, bus bar and distribution panels structure through short-circuit current.** 2013. 92f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

It describes the steps to dimensioning of insulators and bus bar software developing for distribution panel. The rigid bus bar and insulator dimensioning applied in low voltage panels is a procedure that takes contour of complexity because the standard doesn't treat the procedure clearly. Then comes the necessity of develop a program that adds the necessary information for dimensioning of bus bar and insulators and still perform the calculation of dimensioning, saving time, labor and material for the user.

Key Words: Short-circuit, panels, bus bar and insulators.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de valor nominal de diversidade.....	29
Tabela 2 - Características elétricas do barramento.....	30
Tabela 3 - Características físicas do barramento.....	30
Tabela 4 - Principais propriedades do cobre eletrolítico.....	32
Tabela 5 - Dimensionamento de barramento de cobre seção retangular.....	32
Tabela 6 - Capacidade de Corrente em Barramento de Cobre.....	33
Tabela 7 - Momento de inércia.....	46
Tabela 8 - Dados de entrada para os cálculos manuais.	70
Tabela 9 – Tabela de Carga de segurança à flexão.....	71
Tabela 10 - Dados do projeto QGBT 300KVA.....	73
Tabela 11- Dados iniciais do projeto QGBT 300KVA.....	77
Tabela 12 - Características dos barramentos dimensionados. Fonte: Própria.....	78
Tabela 13 - Comparação resultados cálculo dinâmico.....	80
Tabela 14 - Comparação resultados cálculo térmico.	80
Tabela 15 - Comparação entre as análises de verificações. Erro! Indicador não definido.	
Tabela 16 - Comparação dos resultados do isolador.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicações de painéis de baixa tensão.	20
Figura 2 - Suporte barramentos individuais.....	24
Figura 3 - Suporte barramentos individuais.....	24
Figura 4 - Suporte barramentos 3pólos até 360 A.....	25
Figura 5 - Diagrama de resistência a curto-circuito suporte barramento 3pólos até 360A.....	25
Figura 6 - Suporte barramento 3pólos até 800 A.	26
Figura 7 - Diagrama de resistência a curto-circuito suporte barramento 3 polos até 800 A.....	26
Figura 8 - Diagrama de resistência a curto-circuito suporte barramento para circuito de alimentação 3pólos até 1250 A.	27
Figura 9 - Diagrama de resistência a curto-circuito suporte barramento para circuito de alimentação 3pólos até 1250 A.	27
Figura 10 - Diagrama de resistência a curto-circuito suporte barramento para circuito de alimentação 3 polos até 1600 A.	28
Figura 11 - Diagrama de resistência a curto-circuito suporte barramento para circuito de alimentação 3 polos até 1600 A.	28
Figura 12 - Efeito da corrente de curto-circuito sobre condutores paralelos	35
Figura 13 - Possíveis comportamentos da corrente elétrica no curto-circuito	37
Figura 14 - Relação de fase da corrente e tensão num curto-circuito, desprezando a parte resistiva da impedância.....	38
Figura 15 - Comportamento da corrente de curto-circuito em relação ao valor da tensão no instante da falta.	39
Figura 16 - Condições para obter a máxima assimetria na corrente de curto-circuito em um circuito com X e R.	40
Figura 17 - Componentes da corrente assimétrica de falta.....	41
Figura 18 – Variação da corrente de curto-circuito.....	42
Figura 19 - O fator $\varphi(fi)$ de impulso ou de assimetria	43
Figura 20– Cisalhamento	44
Figura 21 - Valor máximo de tensão	45
Figura 22 – Flexão	45
Figura 23 - Algoritmo de funcionamento do software no modo “Dimensionar”	55

Figura 24 - Algoritmo de funcionamento do software no modo "Testar Dimensionamento"	59
Figura 25 - Tela inicial do Software de dimensionamento de isoladores e barramentos "Dimesnion" para painéis de B.T.....	61
Figura 26 - Tela de inserção dos dados iniciais no modo "Indicar Dimensionamento".	62
Figura 27 - Tela de teste do dimensionamento do barramento.....	63
Figura 28 – Tela dimensionamento do isolador.....	64
Figura 29 – Tela base de dados do software.	65
Figura 30 – Cadastrar novos barramentos.....	66
Figura 31 - Tela de inserção dos dados iniciais no modo "Teste de Dimensionamento"	67
Figura 32 – Tela dimensionamento do isolador.....	68
Figura 33 - Entrada do barramento utilizado no projeto QGBT 300KVA.	74
Figura 34 - Inserção dos dados de entrada do projeto no software.	74
Figura 35 - Resultados do teste do dimensionamento do barramento	75
Figura 36 - Teste de dimensionamento do isolador utilizado no projeto	76
Figura 37 - Inserção dos dados de entrada no software.	77
Figura 38- Resultados do dimensionamento.....	78
Figura 39 - Indicação do isolador mais adequado ao projeto.....	79

LISTA DE SÍMBOLOS

A_s	Seção transversal nominal do condutor (m^2)
a	Distância entre condutores principais (m)
a_m	Distância efetiva entre elementos condutores principais (m)
a_s	Distância efetiva entre elementos subcondutores (m)
a_{1n}	Distâncias geométricas entre subcondutores, entre o 1o e o n-ésimo condutor (m)
a_{1s}	Distâncias efetiva entre subcondutores (m)
b	Largura do condutor (m)
b_m	Largura efetiva do condutor (m)
c	Fator de influência dos espaçadores (1)
d	Espessura do condutor (m)
d_m	Espessura efetiva do condutor (m)
E	Módulo de Young (N/m^2)
F	Força entre condutores paralelos devido ao curto-circuito (N)
F_d	Força no isolador (N)
F_m	Força entre condutores principais devido ao curto-circuito (N)
F_{m2}	Força entre condutores principais devido ao curto-circuito fase-fase (N)
F_{m3}	Força no condutor principal central durante curto-circuito trifásico balanceado (N)
F_s	Força entre subcondutores principais devido ao curto-circuito (N)
f	Frequência do sistema (Hz)
f_c	Frequência natural de um condutor principal (Hz)
f_{cs}	Frequência natural de um subcondutor (Hz)
I_k''	Corrente inicial de curto-circuito simétrica (A)
I_s	Valor de pico da corrente de curto-circuito (A)
I_{s2}	Valor de pico da corrente de curto-circuito fase-fase (A)
I_{s3}	Valor de pico da corrente de curto-circuito trifásica balanceada (A)
i_1, i_2	Valor instantâneo da corrente nos condutores (A)
M	Momento de inércia do condutor principal (m^4)
J_s	Momento de inércia do subcondutor (m^4)

k	Número de espaçadores entre dois isoladores (1)
k_{1n}	Fator de correção para espaçamento efetivo entre dois subcondutores (1)
k_{1s}	Fator para distância efetiva do condutor (1)
κ	Fator para cálculo da corrente de pico de curto-circuito (fator de assimetria) (1)
l	Distância das linhas de centro entre isoladores (m)
l_s	Distância entre espaçadores ou espaçadores e isoladores (m)
m'	Massa por unidade de comprimento de um condutor principal (kg/m)
m'_s	Massa por unidade de comprimento de um subcondutor (kg/m)
m_z	Massa total dos espaçadores (kg)
n	Número de subcondutores de um condutor principal (1)
q	Fator de plasticidade (1)
$R_{p0,2}$	Tensão mecânica correspondente ao ponto de ruptura (N/m^2)
V_F	Fator da força dinâmica e estática sobre isoladores (1)
V_r	Fator da tensão mecânica para um condutor principal (1)
V_{rs}	Fator da tensão mecânica para um subcondutor (1)
$V\sigma$	Fator da tensão mecânica dinâmica e estática em condutores principais (1)
$V\sigma_s$	Fator da tensão mecânica dinâmica e estática em subcondutores (1)
Z	Momento de inércia linear de um condutor principal (m^3)
Z_s	Momento de inércia linear de um subcondutor (m^3)
α	Fator para força no isolador (1)
β	Fator para tensão mecânica em condutores principais (1)
Y	Fator para frequência natural (1)
μ_o	Constante de permeabilidade magnética no vácuo (H/m)
σ_m	Tensão mecânica causada por forças entre condutores principais (N/m^2)
σ_s	Tensão mecânica causada por forças entre subcondutores (N/m^2)
σ_{tot}	Tensão mecânica resultante no condutor (N/m^2)
W	Momento de resistência (cm^2)
M	Momento de flexão (kgf.cm)
τ	Tensão de cisalhamento (N/m^2)
V	Força cortante interna(N)
I	Momento de inercia de toda área ($kg.m^2$)

t	Largura da área da seção transversal (m)
A^{\wedge}	Área da parte inferior ou superior da seção transversal (m ²)
y^{\wedge}	Distância até o centroide (m)
S	Resistência necessária
A	Seção transversal do condutor principal (m ²)
I_k	Corrente eficaz de curto-circuito (A)
I_{th}	Corrente térmica de curta duração (A)
I_{thi}	Corrente térmica de curta duração no caso de religamento (A)
I_{thr}	Corrente térmica instantânea admissível do condutor (A)
K	Fator para o cálculo de S_{th} (As ^{0,5} /m ²)
m	Fator para o efeito de aquecimento da componente d.c. (1)
n	Fator para o efeito de aquecimento da componente a.c. (1)
S_{th}	Densidade de corrente térmica de curta duração (A/m ²)
S_{thr}	Densidade de corrente térmica instantânea admissível (A/m ²)
T_k	Duração da corrente de curto-circuito (s)
T_{ki}	Duração individual da corrente de curto-circuito no caso de religamento (s)
T_{kr}	Tempo admissível do curto-circuito no condutor (s)
θ_b	Temperatura do condutor no início do curto-circuito (°C)
R	Resistência do condutor (Ω)
X	Reatância do condutor (Ω)
F_e	Força eletromagnética (N)

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IEC	Internacional Electrotechnical Commission
DIN	Deutsches Institut fur Normung
EN	Europäische Norm
TTA	Painéis elétricos com ensaio do tipo totalmente testados
PTTA	Painéis elétricos com ensaio do tipo parcialmente testados
CMF	Conjunto de Manobra e Controle de Baixa Tensão Montados em Fábrica
PBT	Poliéster termoplástico
CP	Calor específico
PVC	Cloreto de polivinila
NBR	Norma Brasileira

SUMÁRIO

SUMÁRIO	11
1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 TEMA.....	14
1.1.1 Delimitação do Tema	14
1.2 PROBLEMA E PREMISAS.....	14
1.3 OBJETIVOS.....	15
1.3.1 Objetivo geral.....	15
1.3.2 Objetivos específicos	15
1.4 JUSTIFICATIVA.....	16
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	16
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 NORMAS	18
2.2 PAINÉIS.....	19
2.2.1 Aplicações básicas de painéis de baixa tensão	20
2.3 CONJUNTOS DE MANOBRA E CONTROLE DE BAIXA TENSÃO	21
2.3.1 Definição.....	21
2.4 DISJUNTORES.....	22
2.4.1 Princípio de funcionamento	22
2.5 ISOLADORES.....	22
2.6 BARRAMENTO.....	28
2.7 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS E MECÂNICAS DE CONDUTORES DE COBRE.....	31
2.8 CURTO-CIRCUITO.....	34
2.8.1 Efeitos dinâmicos decorrentes da corrente de curto-circuito.	34
2.8.2 Efeitos térmicos decorrentes da corrente de curto-circuito.	35
2.8.3 Corrente de curto-circuito simétrica e assimétrica	36
2.9 CONSIDERAÇÕES MECÂNICAS	43
2.10 BASE PARA DIMENSIONAMENTO DE INSTALAÇÕES SUJEITAS A CORRENTES ELEVADAS	47
2.10.1 Força eletromagnética devido à corrente de curto-circuito, sendo um barramento por fase.....	47

2.10.2	Força eletromagnética devido à corrente de curto-circuito para n barras por fase.	48
2.10.3	Determinação do momento fletor na barra	49
2.10.4	Módulo de flexão do barramento	50
2.10.5	Cálculo da corrente térmica de curta duração	50
3	DESENVOLVIMENTO E ESTRUTURAÇÃO DO SOFTWARE.....	52
3.1	ALGORITMOS	52
3.1.1	Algoritmo para rotina “Dimensionar” do <i>software</i>	52
3.1.2	Algoritmo para rotina “Testar Dimensionamento” do <i>software</i>	56
3.2	TUTORIAL DO PROGRAMA	60
3.2.1	Tela inicial.....	60
3.2.2	Opção “Dimensionar”	61
3.2.3	Teste do dimensionamento do barramento	63
3.2.4	Dimensionamento do isolador.....	63
3.2.5	Opção “Testar Barramento”	64
4	ESTUDO DE CASO	69
4.1	CÁLCULOS MANUAIS	69
4.1.1	Dados de entrada para cálculos manuais.....	69
4.1.2	Cálculos esforços eletrodinâmicos.....	70
4.1.3	Cálculos esforços térmicos	72
4.2	VERIFICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DO PROJETO.....	73
4.3	DIMENSIONAMENTO INDICADO PELO SOFTWARE	76
4.4	COMPARAÇÕES DOS MÉTODOS	79
5	CONCLUSÕES.....	82
5.1	SUGESTÕES DE CONTINUIDADE DO TRABALHO	83
5.2	DIFICULDADES ENCONTRADAS	83
6	REFERÊNCIAS	85
	ANEXO A – PROJETO QGBT 300KVA	87

1 INTRODUÇÃO

De modo geral, painel elétrico de distribuição é uma estrutura normalmente metálica, destinada a receber energia elétrica e distribuí-la para os circuitos parciais. Um painel elétrico de distribuição deve conter dispositivos de proteções para cada um dos circuitos parciais, os quais são interligados por cabos e barramentos até a carga a ser alimentada. Existem diversas aplicações para quadros elétricos, como painel de distribuição, o qual é o foco deste trabalho, de acionamento de motores elétricos, de banco de capacitores e de controle e proteção de subestações.

Para dimensionar um painel deve-se levar em consideração sua corrente geral e a partir desta dimensionar disjuntores e barramentos. Outro componente que merece atenção é a corrente de curto-circuito, visto que por intermédio desta, são geradas as forças que irão flexionar (esforço mecânico) e aquecer (esforço térmico) os barramentos. Se mal dimensionado, poderá danificar isoladores, estrutura e componentes do painel.

“Para estudos de proteção, por exemplo, valores das correntes de curto-circuito deverão ser calculados. Portanto, cada componente do sistema deve ser modelado e representado sobre a ótica do seu comportamento frente às correntes de curto” (KINDERMANN, 1997, p. 1).

Quanto aos esforços mecânicos, os condutores em um sistema elétrico sofrem ação das forças de atração e de repulsão devido ao campo magnético, que por sua vez é produzido pela corrente que circula pelos mesmos. Quando há uma ocorrência de curto-circuito no sistema, essas forças são potencializadas pelo aumento do valor das correntes, e assim os condutores podem sofrer flexões com alta intensidade. “Os esforços mecânicos provenientes de correntes de curto-circuito devem ser motivo de apreensão para o projetista, pois se referem diretamente ao dimensionamento das estruturas para suportar essa condição adversa” (SUETA, et al., 2012).

Quanto aos esforços térmicos, segundo Schneider (2012), a corrente de curto-circuito se não for rapidamente suprimida por meio de equipamentos de atuação rápida de proteção, provocará o aquecimento dos condutores percorridos. Pois em uma situação de curto admite-se que o aquecimento é adiabático, isto é, todo calor é utilizado no aquecimento dos condutores.

Deste modo, é necessário o correto dimensionamento dos condutores para que esses possam suportar os esforços mecânicos e térmicos, em razão de um possível curto-circuito no sistema. O *software*, proposto por este presente trabalho, irá dimensionar os componentes (barramentos, isoladores) para painéis elétricos levando em consideração esses esforços. Tornando mais simplificado e confiável a etapa do dimensionamento, dentro de um projeto de um painel de distribuição.

1.1 TEMA

Software para dimensionamento de isoladores e barramentos para painéis de distribuição através da corrente de curto-circuito.

1.1.1 Delimitação do Tema

Dada à importância da análise de curto-circuito em painéis de baixa tensão, este trabalho de conclusão de curso versará sobre este tema.

Para valorizar tal estudo, pretende-se desenvolver um programa capaz de efetuar o dimensionamento de barramentos e isoladores de painéis de baixa tensão.

1.2 PROBLEMA E PREMISSAS

A economia foi sempre um fator de análise nas tomadas de decisão. Principalmente na atualidade, em que há uma preocupação maior com a eficiência, custos, lucro e viabilidade. Neste âmbito, grande parte das empresas, no intuito de cortar gastos, ignoram processos importantes do projeto como o dimensionamento adequado do conjunto de equipamentos elétricos.

Aliado ao fator econômico está a ausência de tempo, que muitas vezes retira a possibilidade de um estudo mais aprofundado sobre o assunto, ou até mesmo o desenvolvimento de um sistema seguro e confiável.

A escassez de mão de obra qualificada também dificulta o processo de desenvolvimento de um bom projeto. Muitas conclusões são feitas utilizando referências duvidosas e algumas vezes não verdadeiras (sem estudo). Muitos trabalhos são realizados sem um bom embasamento técnico/teórico. Isso talvez

ocorra devido à complexidade do estudo e dos assuntos, principalmente na área tecnológica que está em constante atualização e diversificação.

A falta de material sobre curto circuito que ocasionam o efeito dinâmico e térmico nos barramentos está incluída nas dificuldades que encontramos ao decorrer do trabalho de conclusão.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver um *software* capaz de efetuar o dimensionamento de barramentos e isoladores para painéis de distribuição, com a finalidade de simplificar e tornar mais confiável o dimensionamento desse conjunto de equipamentos elétricos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Compreender normas que envolvam curto-circuito em painéis de baixa-tensão;
- Compreender normas que envolvam curto-circuito em barramentos e isoladores;
- Efetuar um estudo sobre dimensionamentos;
- Formar um embasamento teórico;
- Estudar lógicas de programação;
- Estudar os cálculos que envolveram o desenvolvimento do software;
- Desenvolver algoritmos em *visual basic*;
- Verificar resistência mecânica e térmica dos principais materiais envolvidos;
- Elaborar a interface gráfica;
- Realizar uma comparação entre um caso real, onde não foi utilizado o *software* ou cálculo manual, e o resultado obtido pelo *software*.

1.4 JUSTIFICATIVA

Para fabricantes de painéis elétricos, o *software* poderá ser de grande utilidade na etapa do dimensionamento de barramentos e isoladores de painéis elétricos. Pois poucos são os painéis de baixa tensão não testados que levam em consideração os efeitos dinâmicos e térmicos do curto-circuito.

O trabalho envolve vários conhecimentos da engenharia aprendidos ao longo dos anos, destacando-se o eletromagnetismo, física, mecânica, resistência dos materiais, instalações elétricas prediais e industriais e algoritmos de programação.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Foi realizada inicialmente, uma revisão bibliográfica sobre a temática, selecionando livros e artigos técnicos especializados na área, a fim de agregar mais embasamento teórico a este trabalho de conclusão de curso.

O passo seguinte foi baseado na definição do funcionamento do *software*, através da utilização de algoritmos para cada situação a ser analisada pelo programa.

O próximo passo compreende a etapa da definição da linguagem de programação mais adequada ao *software* e a sua posterior programação, baseado nos conhecimentos levantados na revisão teórica e nos conhecimentos adquiridos ao longo do curso de engenharia.

Como passo final, o programa será testado nos projetos de painéis elétricos da empresa "Engerey" (fabricante de painéis de distribuição em Curitiba, empresa de baixo porte), a qual dará todo o suporte para os testes.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

No primeiro capítulo do trabalho, consta a definição, a delimitação do tema e dos objetivos.

O segundo capítulo será constituído de uma fundamentação teórica sobre a temática, onde será realizado todo o levantamento dos cálculos que serão utilizados para o desenvolvimento do *software*.

O capítulo seguinte irá abordar os procedimentos utilizados na realização do trabalho, desde a definição dos parâmetros considerados no desenvolvimento do *software* até a implementação do mesmo.

O quarto capítulo compreenderá os testes realizados, as simulações e os resultados obtidos ao término dos testes.

Por fim, o capítulo 5, tratará as conclusões abalizadas por meio dos resultados dos testes feitos com o *software*.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Com o intuito de embasar teoricamente este trabalho, evidencia-se a seguir os componentes, normas e demais itens ligados ao objeto de estudo deste trabalho facilitando o entendimento dos aspectos e características dos mesmos em relação a corrente de curto-circuito, que rege o desenvolvimento do *software* objeto deste trabalho.

2.1 NORMAS

As normas estabelecem parâmetros em relação a processos, problemas existentes ou potenciais, e tem como objetivo atingir um grau ótimo de operação de um equipamento ou serviço em um determinado meio, por todos os indivíduos envolvidos. Além de proporcionar a utilização ou análise igualitária dos processos em qualquer região do mundo, a fim de que os resultados se comuniquem.

Abaixo segue a relação de entidades de normas regionais e internacionais que foram utilizadas para o estudo e desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso:

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas)
- IEC (*Internacional Electrotechnical Commission*)
- DIN (*Deutsches Institut fur Normung*)
- EN (*Europaische Norm*)

As normas que regem os painéis de baixa tensão são:

- **NBR IEC 60439-1:** Conjuntos de manobra e controle de baixa tensão - Parte 1: Conjuntos com ensaio de tipo totalmente testados (TTA) e conjuntos com ensaio de tipo parcialmente testado (PTTA).

Aplica-se aos conjuntos de manobra e controle de baixa tensão em que a tensão nominal não exceda 1kA, a frequências que não excedam 1000 Hz ou 1500 VCC. Esses conjuntos são classificados de acordo com o nível de teste empregados aos painéis, sendo do tipo totalmente testado e do tipo parcialmente testados, denominados TTA e PTTA respectivamente.

- **NBR IEC 60439-2:** Requisitos particulares para linhas elétricas pré-fabricadas (sistemas de barramentos blindados).

Destinada aos sistemas de linhas elétricas montadas em fábrica e seus acessórios, com funções de alimentar e distribuir energia elétrica em edificações para uso residencial, comercial, público, agrícola e industrial.

- **IEC 62208:** Requisitos gerais para invólucros vazios para painéis de baixa tensão.

Aplica-se esta norma na comercialização de painéis de baixa tensão a vazio, ou seja, antes de serem propriamente ligados a um sistema, definindo para este segmento os requisitos técnicos.

2.2 PAINÉIS

Os painéis de distribuição segundo a NBR IEC 60050 (826) são pontos nodais destinados a receber energia elétrica através de uma ou mais fontes dentro de uma rede e prioritariamente distribuí-la. Além de possuir funções como unir ou separar as partes integrantes deste sistema, realizar manobras de seccionamento, comandar aparelhagem externa, medição de grandezas e proteger todos os componentes integrantes do painel.

Para Wanderley Dib (1979) a função de proteção dos painéis de distribuição engloba tanto proteger o ambiente interno em relação ao ambiente externo, quanto também no sentido contrário. Em relação ao interno, proteger os componentes que estão inseridos dentro do quadro de ações do meio ambiente e de contatos acidentais, seja por pessoas e animais. No que tange o ambiente externo, proteger em caso de avarias decorrentes de operação inadequada de uma chave ou por curto-circuito de algum dos componentes.

Quanto às características construtivas dos quadros variam de acordo com o trabalho e as instalações a que se destinam, como: ao ar livre ou abrigado, lugares úmidos ou secos, em áreas de risco de explosão, poeirentas ou contaminadas por agentes corrosivos.

Na escolha de equipamentos de manobra para constituírem um quadro de distribuição, se faz necessário levar em consideração os graus de proteção, as características elétricas de funcionamento, tipo de acionamento e da finalidade a que se destinam. A aparelhagem de manobra e suas combinações irão operar satisfatoriamente caso os graus de proteção estejam correspondentes às condições do ambiente de montagem.

2.2.1 Aplicações básicas de painéis de baixa tensão

A Figura 1 apresenta um diagrama de um quadro de baixa tensão com suas funções, a fim de proporcionar uma visão geral das suas aplicações básicas.

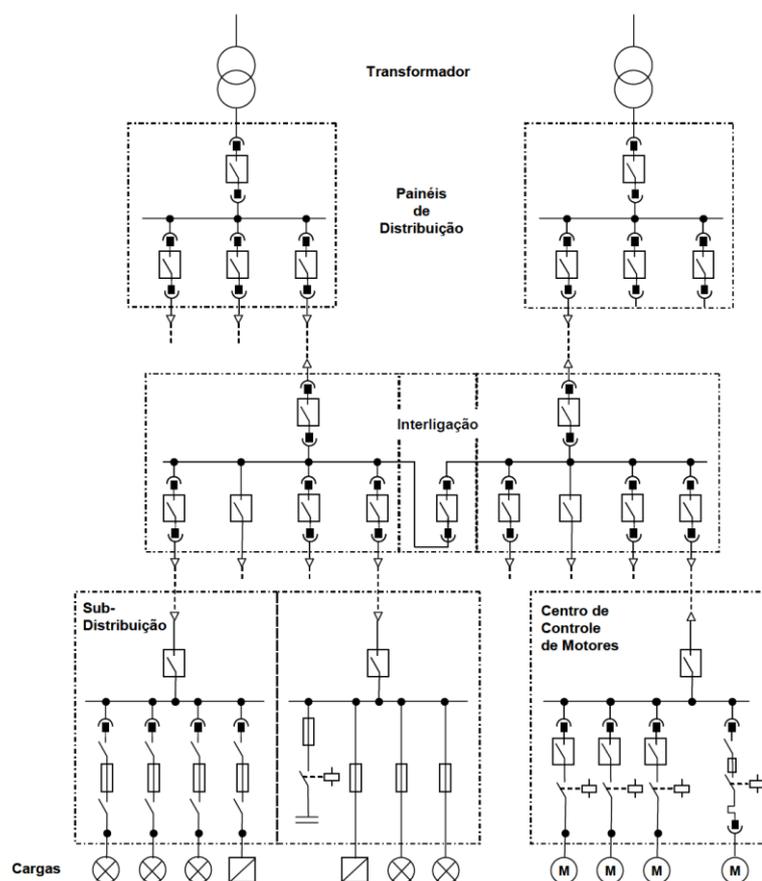


Figura 1 - Aplicações de painéis de baixa tensão.
Fonte: Lavill (2013)

2.3 CONJUNTOS DE MANOBRA E CONTROLE DE BAIXA TENSÃO

2.3.1 Definição

Definem-se conjuntos de manobra e controle de baixa tensão como a associação de um único dispositivo de manobra e controle ou mais, sendo todos estes montados e protegidos em um invólucro de metal, com funções de manobra, controle, medição, sinalização, proteção e regulação dentro do sistema elétrico em que estão inseridos.

Os conjuntos são divididos em dois tipos, segundo a NBR 6808 (1993), conforme a tensão de trabalho a qual se destinam. Conjunto de Manobra e Controle de Baixa Tensão Montados em Fábrica (CMF) são definidos para tensões inferiores a 1kV, os quais serão alvo do software desenvolvido neste trabalho. O segundo tipo é denominado de Conjunto de Manobra e Controle em Invólucro Metálico para tensões acima de 1kV até 36,2kV (reconhecida como Média Tensão).

Segundo Theodor Schmelcher (1988) a elaboração do projeto elétrico de um CMF deve-se seguir os pontos listados abaixo:

- Tensão e frequência da rede e dos circuitos auxiliares;
- Correntes de curto-circuito (valor eficaz e de crista);
- Tipo do sistema e tratamento do neutro;
- Regime de serviço e cálculo do barramento;
- Tipos e características elétricas dos dispositivos de manobra, controle e proteção.

Somando-se a esses passos a elaboração de uma lista de motores que estarão ligados a esse CMF e um fluxograma do processo completo ou uma descrição do funcionamento do mesmo, ou ainda esquemas unifilares e de comando, controle e proteção.

2.4 DISJUNTORES

O disjuntor é um equipamento elétrico de manobra e de proteção capaz de conduzir e interromper correntes em condições normais em relação à corrente e tensão do circuito. Em situação de curto-circuito, o disjuntor conduz a corrente por certo tempo especificado e após isto interrompe o circuito, sendo assim, ele deverá ser capaz de seccionar a corrente de falta antes que os efeitos térmicos e dinâmicos se tornem um perigo a própria instalação.

Segundo Siemens (2013) os disjuntores termomagnéticos são utilizados para proteger, contra os efeitos de sobrecargas e curto-circuitos, os cabos e condutores que compõem uma rede de distribuição de energia elétrica. Desta forma, também assumem a proteção contra tensões de contato perigosas originadas por defeitos de isolamento.

2.4.1 Princípio de funcionamento

Segundo Siemens (2013) os disjuntores termomagnéticos dispõem de um disparador térmico com atraso (bimetal), dependente de sua característica de intensidade tempo, que reage diante de sobrecargas moderadas, e um disparador eletromagnético que reage sem atraso diante de elevadas sobrecargas e curto-circuitos. Graças à alta velocidade de atuação dos contatos diante de uma corrente de falta e a uma rápida extinção do arco na câmara de extinção, a intensidade da corrente de curto-circuito se torna limitada com os disjuntores termomagnéticos, o que garante a maior distância entre contatos

2.5 ISOLADORES

Isolador como o próprio nome sugere, tem por finalidade isolar um corpo de outro qualquer para que não haja contato físico entre eles e também são responsáveis contra esforços mecânicos e servem como sustentação. Muitos aspectos deverão ser analisados em um projeto de painéis de distribuição. Devem ser avaliados em detalhes primários quanto a sua construção, operação e fixação.

A escolha das necessidades de isolamentos do barramento na estrutura em um quadro é ditada pelas condições mecânicas de fixação, bem como pela corrente de curto circuito que possa ocorrer no sistema, o projetista deve ter a ciência na hora de decidir na escolha entre a economia e o comportamento. Exige-se, que os isoladores possuam uma alta capacidade de se opor a passagem de corrente elétrica, ou seja, seja perfeitamente isolável, além de uma elevada resistência mecânica para isolar e sustentar todo o sistema de barramento. Então para o desempenho da ordenação de isolamento, é necessário um entendimento completo:

- Solicitação dielétrica, isto é, o módulo, a duração e a probabilidade de ocorrência de sobretensão no sistema advindas de surtos atmosféricos.
- Isolamento elétrico, isto é, isolar a parte viva do painel da estrutura metálica do painel.
- Esforços elétricos, isto é, a capacidade de resistir à alta corrente do barramento.
- Esforços mecânicos, isto é, a capacidade de resistir a esforços de tração, compressão, flexão, entre outros.

Os isoladores de baixa tensão podem ser classificados pelo seu material constituinte e formato. Fabricantes de isoladores geralmente costumam usar em sua composição poliéster reforçados com fibra de vidro, podendo alternar a composição de cada composto para reforçar suas propriedades mecânicas, para o nosso software utilizaremos somente isoladores com essa composição.

Abaixo a classificação de alguns modelos de isoladores que serão utilizados no trabalho:

Isoladores tipo “Bujão” unipolar, conforme apresentado na figura 2, são fabricados com um composto de poliéster reforçado com fibra de vidro. Os isoladores apresentam elevada rigidez dielétrica, alta resistência ao impacto, tração e flexão. Os isoladores do tipo “Bujão” serão utilizados para correntes menores que 200A.

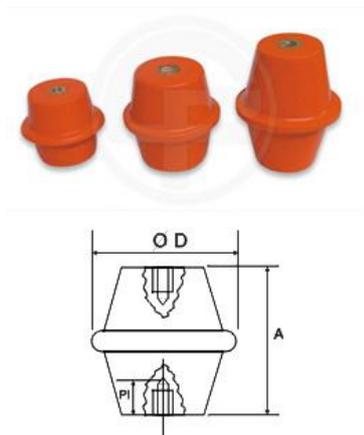


Figura 2 - Suporte barramentos individuais.

Fonte: Rittal (2013).

A figura 3 mostra o nível de curto circuito suportado pelo isolador unipolar "Bujão" em relação à distância entre eles.

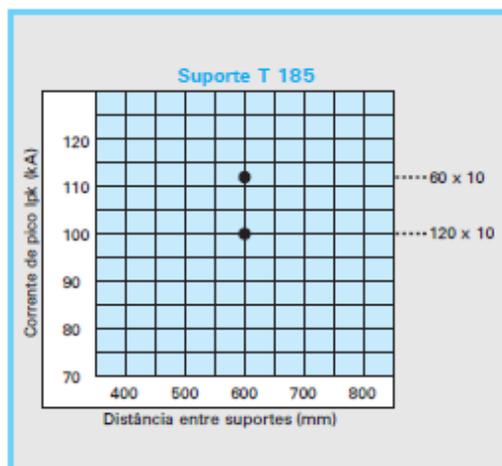


Figura 3 - Suporte barramentos individuais.

Fonte: Rittal (2013).

Suporte barramento, composto por três pólos, para corrente de 200A até 360A, conforme figura 4, composto por Poliéster termoplástico reforçado com fibra de vidro. Temperatura máxima de serviço de 140°C. Proteção contra incêndio segundo a norma UL 94-V0 (1993).

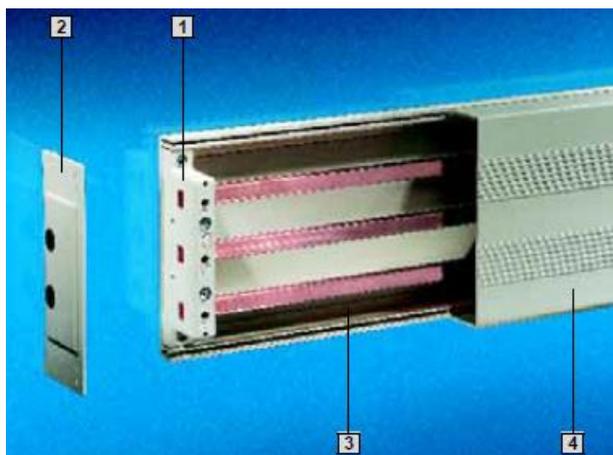


Figura 4 - Suporte barramentos 3pólos até 360 A.

Fonte: Rittal (2013).

A figura 5 mostra o nível de curto circuito suportado pelo suporte barramento para corrente de 200A até 360A, em relação à distância entre eles.

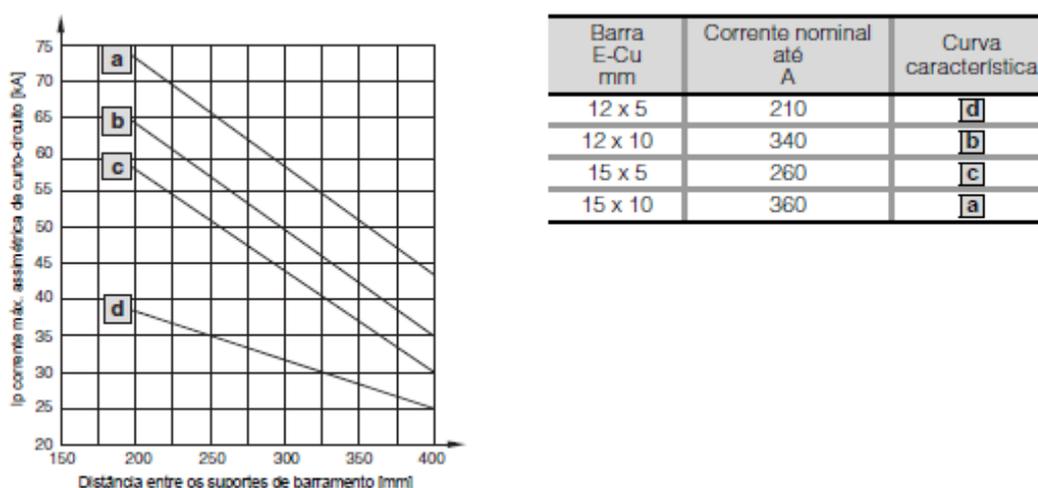


Figura 5 - Diagrama de resistência a curto-circuito suporte barramento 3pólos até 360A.

Fonte: Rittal (2013).

Suporte barramento, composto por três pólos, para corrente de 250A até 800A, conforme figura 6, composto por poliamida 25 % reforçada com fibra de vidro. Temperatura máxima de serviço de 130°C. Proteção contra incêndio segundo a norma UL 94-V0 (1993).

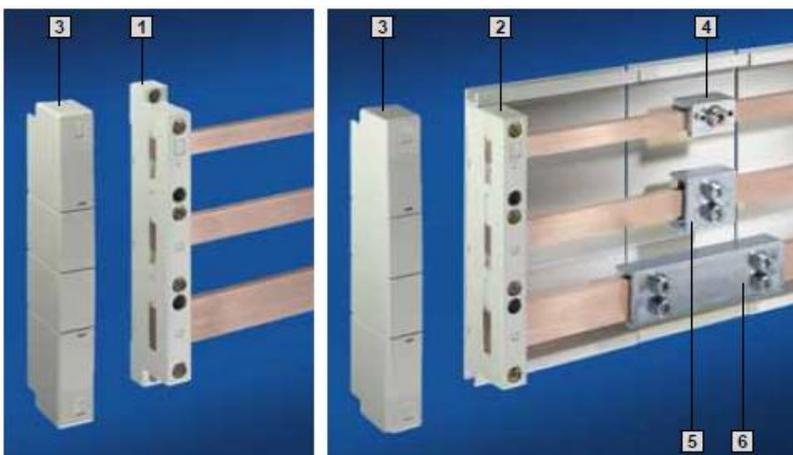


Figura 6 - Suporte barramento 3pólos até 800 A.

Fonte: Rittal (2013).

A figura 7 mostra o nível de curto circuito suportado pelo suporte barramento para corrente de 250A até 800A em relação à distância entre eles.

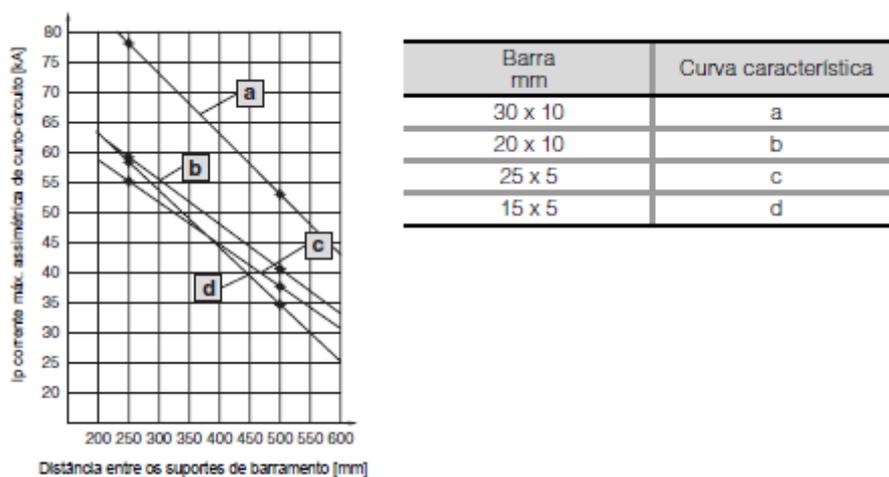


Figura 7 - Diagrama de resistência a curto-circuito suporte barramento 3 polos até 800 A.

Fonte: Rittal (2013).

Suporte barramento, composto por três pólos, para corrente de 800A até 1250A, conforme figura 8, composto por Poliéster termoplástico reforçado com fibra de vidro. Temperatura máxima de serviço de 140°C. Proteção contra incêndio segundo a norma UL 94-V0 (1993).

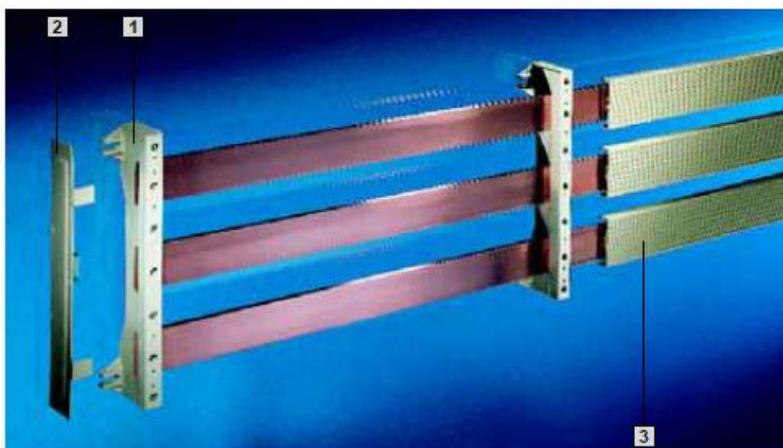
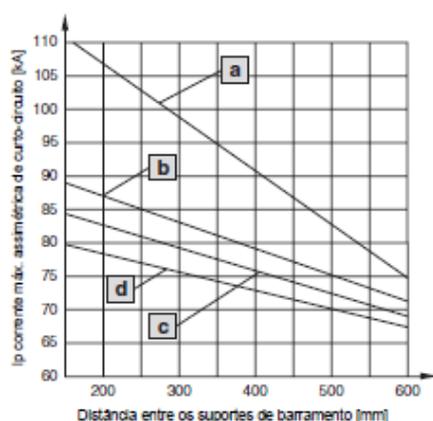


Figura 8 - Diagrama de resistência a curto-circuito suporte barramento para circuito de alimentação 3pólos até 1250 A.

Fonte: Rittal (2013).

A figura 9 mostra o nível de curto circuito suportado pelo suporte barramento para corrente de 800A até 1250A, em relação à distância entre eles.



Barra E-Cu mm	Corrente nominal até A	Curva característica
30 x 10	800	d
40 x 10	850	c
50 x 10	1000	b
60 x 10	1250	a

Figura 9 - Diagrama de resistência a curto-circuito suporte barramento para circuito de alimentação 3pólos até 1250 A.

Fonte: Rittal (2013).

Suporte barramento, composto por três pólos, para corrente de 1000A até 1600A, conforme figura 10, composto por poliéster termoplástico reforçado com fibra de vidro. Temperatura máxima de serviço de 140°C. Proteção contra incêndio segundo a norma UL 94-V0 (1993).

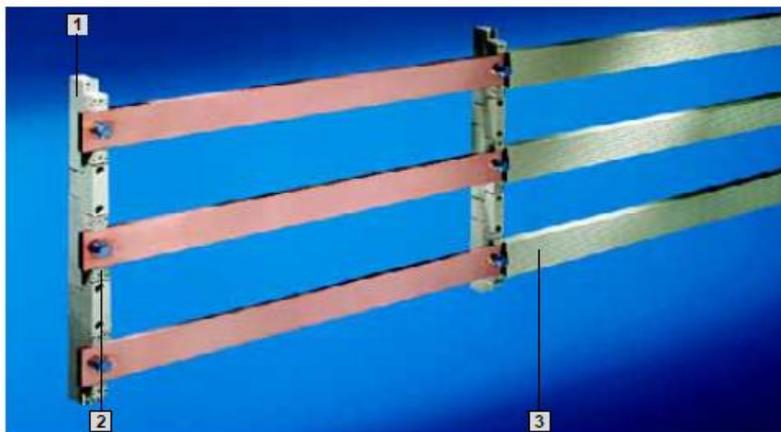
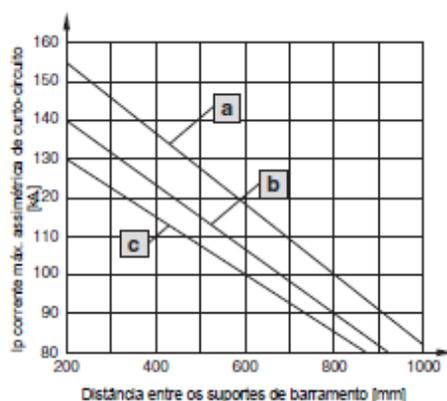


Figura 10 - Diagrama de resistência a curto-circuito suporte barramento para circuito de alimentação 3 polos até 1600 A.

Fonte: Rittal (2013).

A figura 11 mostra o nível de curto circuito suportado pelo suporte barramento para corrente de 1000A até 1600A, em relação à distância entre eles.



Barra E-Cu mm	Corrente nominal até A	Curva característica
50 x 10	1000	c
60 x 10	1250	b
80 x 10	1600	a

Figura 11 - Diagrama de resistência a curto-circuito suporte barramento para circuito de alimentação 3 polos até 1600 A.

Fonte: Rittal (2013).

2.6 BARRAMENTO

São produtos eletromecânicos dentro dos painéis elétricos responsáveis pela condução de grande densidade de corrente elétrica que alimentará os conjuntos de manobra e controle. São barras maciças, normalmente fabricadas em cobre eletrolítico, que dependendo de sua aplicação podem ser isolados ou recebem acabamento superficial específico como o nitrato de prata. Em caso de necessidade de dobras e

furações esses devem seguir as especificações dos fornecedores podendo interferir, caso sejam feitos incorretamente, negativamente na funcionalidade do sistema.

Conforme a NBR IEC 60439-1 (2003) o barramento é um condutor de baixa impedância que pode ser conectado a vários circuitos elétricos separadamente, podendo ser subclassificado em barramento principal e em barramentos de distribuição. Sendo que ao primeiro podem ser conectadas unidades de entrada e de saída e/ou barramentos pertencentes ao segundo grupo, e a partir desta conexão serão alimentados e fornecerão energia elétrica para um ou mais circuitos.

O dimensionamento da seção e a natureza do condutor do barramento principal devem ser determinados a fim de atender a soma das correntes nominais dos circuitos de saída multiplicados pelo fator de diversidade. Sendo este fator segundo a NBR 60439-1 (2003) a relação entre a soma máxima das correntes de operação dos circuitos principais do sistema e a soma das correntes nominais de todos os circuitos principais do sistema, em qualquer momento. A Tabela 1 mostra os valores do fator de diversidade de acordo com o número de circuitos.

Tabela 1 - Valores de valor nominal de diversidade

Número de circuitos	Coefficiente
2 e 3	0,9
4 e 5	0,8
6 e 9	0,7
10 ou mais	0,6

Fonte: IEC 60439-1 (2003).

O dimensionamento deve assegurar que o barramento suporte os efeitos mecânicos e térmicos originados devido as correntes de curto-circuito do sistema, além de evitar que o período de vibração próprio das barras não entre em ressonância elétrica.

Para se dimensionar um barramento de um CMF se faz necessário ainda o conhecimento de algumas características do sistema elétrico e das características físicas dos barramentos.

As Tabela 2 e Tabela 3 apresentam essas características.

Tabela 2 - Características elétricas do barramento.

Parâmetro	Descrição	Unidade
S_{CC}	Potência de curto-circuito da rede*	MVA
U_R	Tensão nominal	kV
U	Tensão de serviço	kV
I_R	Corrente nominal	A

Fonte: Própria

*Nota: Potência geralmente fornecida pelo cliente (ou concessionária), ou pode ser calculada, conhecendo-se a corrente de curto-circuito e a tensão de serviço, pela fórmula.

$$U = \sqrt{3} \cdot I_{cc} \cdot U_{serviço} \quad (1)$$

Tabela 3 - Características físicas do barramento.

Parâmetro	Descrição	Unidade
S	Seção de uma barra	cm ²
D	Distancia entre fases	cm
L	Distancia entre isoladores de uma mesma fase	cm
θ_n	Temperatura ambiente (40 °C)	°C

Fonte: Própria

Conforme a NBR 60439-1 (2003) o dimensionamento dos barramentos, as distâncias de isolamento, as linhas de fuga e a tensão suportada de impulso devem atender, no mínimo, as mesmas regras especificadas para os componentes associados.

2.7 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS E MECÂNICAS DE CONDUTORES DE COBRE

Desde 1913 a condutibilidade do cobre recozido é adotada como padrão pela Comissão Internacional de Eletrotécnica, isto é, para um mesmo diâmetro de fio os condutores de cobre são capazes de conduzir mais corrente elétrica em comparação com qualquer outro material utilizado usualmente como condutor.

Segundo César Junior (2013) em comparação com o alumínio, metal também utilizado na fabricação de condutores, o cobre leva vantagem. Os condutores feitos de cobre requerem menor diâmetro quando comparados aos de alumínio, pois o último possui menor condutibilidade elétrica. Além do fato do cobre também proporcionar uma condutividade térmica em média 60% superior ao alumínio, o que acarreta em uma economia de energia e dissipação facilitada de calor.

A combinação de resistência mecânica e ductilidade fazem do cobre o metal ideal para a utilização em condutores. Em regra geral quanto mais resistente é um metal, menor é a sua flexibilidade, porém o cobre é uma exceção o que facilita sua instalação e manuseio, reduzindo os custos de mão de obra associados.

César Junior (2013) afirma que a resistência à corrosão também é uma qualidade do cobre, este quando com grau de pureza 99,9%, como é utilizado para condutores elétricos, é um metal nobre e assim quando em contato com demais metais como o ferro e o aço, não está suscetível à corrosão galvânica. Além da galvânica os condutores de cobre ainda são resistentes à corrosão por umidade, poluição industrial e outras influências atmosféricas que possam causar danos ao sistema elétrico.

A Tabela 4 mostra as características principais do cobre eletrolítico, o qual é o mais utilizado para fins de condução de energia elétrica, e as características dos condutores de cobre com isolamento de PVC respectivamente.

Tabela 4 - Principais propriedades do cobre eletrolítico.

Densidade a 20°C (g/cm ³)	Coeficiente Médio de Expansão Térmica (20-300°C) (10 ⁻⁶ °C)	Condutibilidade Elétrica Volumétrica a 20°C (%I.A.C.S)		Condutibilidade Térmica a 20°C (cal / cm s °C)	Resistividade Elétrica (ohm mm ² / m)		Módulo de Elasticidade a 20°C (MPa)	Módulo de Rigidez (Torção) a 20°C (MPa)
		Recozido	Encruado		Recozido para 100-101% IACS (100-200°C)	Encruado para 97% IACS (0-100°C)		
8,89	17,7	100-101,5	97	0,93	0,017-0,01724	0,00178	115000	44000

Fonte: Coppermetal aços e metais.

Segundo César Junior (2013) a aplicação do cobre como matéria prima para a confecção de condutores de energia elétrica responde por cerca de 45% do consumo anual do mesmo. Entretanto, o cobre ainda tem como destinos a produção de tubos de condensadores, encanamentos, eletroímãs, motores elétricos, circuitos integrados, relés e inúmeras outras aplicações. Além do fato de que quando é associado a outros metais, forma materiais supercondutores.

Como na maioria das aplicações é utilizado cobre eletrolítico do tipo E-Cu F30 e E-Cu F37, as Tabela 5 e Tabela 6 mostram maiores informações sobre dimensionamento de barramento de cobre seção retangular e a capacidade de corrente em barramento com estes tipos de cobre como condutor.

Tabela 5 - Dimensionamento de barramento de cobre seção retangular.

SEÇÃO TRANSVERSAL (mm x mm)	CORRENTE MÁXIMA (A)
12,7 x 3,2 (1/2" x 1/8")	150
25,4 x 3,2 (1" x 1/8")	250
38,1 x 3,2 (1 1/2" x 1/8")	370
38,1 x 4,8 (1 1/2" x 3/16")	455
50,8 x 4,8 (2" x 3/16")	595
50,8 x 6,4 (2" x 1/4")	685
63,5 x 6,4 (2 1/2" x 1/4")	850

SEÇÃO TRANSVERSAL (mm x mm)	CORRENTE MÁXIMA (A)
76,2 x 6,4 (3" x 1/4")	1000
101,6 x 6,4 (4" x 1/4")	1250

Fonte: Elektro (2004).

Tabela 6 - Capacidade de Corrente em Barramento de Cobre.

Largura Permanente X Espessura (mm)	Secção (mm ²)	Cobre PINTADO Tipo E-CuF30 E-CuF37				Cobre NÚ Tipo E-CuF30 E-CuF37			
		█	█ █	█ █ █	█ █ █ █	█	█ █	█ █ █	█ █ █ █
12x2	23,5	123	202	228		108	182	216	
15x2	29,5	146	240	261		128	212	247	
15x3	44,5	187	316	381		162	282	361	
20x2	39,5	189	302	313		162	264	298	
20x3	59,5	237	394	454		204	348	431	
20x5	99,1	319	560	728		274	500	690	
20x10	199	497	924	1320		427	825	1180	
25x3	74,5	287	470	525		245	412	498	
25x5	124	384	662	839		327	586	795	
30x3	89,5	337	544	593		285	476	564	
30x5	140	447	760	944		379	627	896	
30x10	299	676	1200	1670		573	1060	1480	
40x3	119	435	692	725		366	600	690	
40x5	199	573	952	1140		482	836	1090	
40x10	399	850	1470	2000	2580	715	1290	1770	2280
50x5	249	697	1140	1330	2010	583	994	1260	1920
50x10	499	1020	1720	2320	2950	852	1510	2040	2600
60x5	299	826	1330	1510	2310	688	1150	1440	2210
60x10	599	1180	1960	2610	3290	989	1720	2300	2900
80x5	399	1070	1680	1830	2830	885	1450	1750	2720
80x10	799	1500	2410	3170	3930	1240	2110	2790	3450
100x5	499	1300	2010	2150	3300	1080	1730	2050	3190
100x10	988	1810	2850	3720	4530	1490	2480	3260	3980
120x10	1200	2110	3280	4270	5130	1740	2860	3740	4500
160x10	1600	2700	4130	5360	6320	2220	3590	4680	5530
200x10	2000	3290	4970	6430	7490	2690	4310	5610	6540

Fonte: Q e T equipamentos.

2.8 CURTO-CIRCUITO

Uma ligação de baixa impedância entre dois pontos a potenciais diferentes é a definição de um curto-circuito. Essa ligação pode ser metálica quando se diz por um arco elétrico, a qual é a situação mais comum nos sistemas em geral, e uma situação intermediária, os curtos causados por fatores externos como galhos de árvores ou outros objetos que caem sobre a linha. No instante da falha há uma rápida elevação da corrente atingindo valores geralmente superiores a 10 vezes a corrente nominal do circuito.

O curto-circuito é originado por uma falha de isolamento sólida, líquida ou gasosa que sustenta a tensão entre condutores ou entre condutores e terra. O curto também pode ser causado por uma redução da distância entre os mesmos. A falha de isolamento pode ser motivada por danos mecânicos nos aparelhos, uso exagerado dos mesmos, umidade no sistema, descargas parciais e sobretensão no sistema.

No curto-circuito o valor da corrente não depende das cargas instaladas na rede, mas somente da fonte de energia da mesma, sendo assim é possível que em uma indústria de pequeno porte que esteja instalada próxima a uma grande subestação ou usina, necessite conseqüentemente de disjuntores de maior capacidade de interromper com finalidade de proteger as instalações do local.

Um CMF é construído de modo a suportar os esforços térmicos e dinâmicos provenientes do curto-circuito. A seguir são exemplificados esses efeitos e suas conseqüências para o sistema.

2.8.1 Efeitos dinâmicos decorrentes da corrente de curto-circuito.

No sistema elétrico, dois ou mais condutores paralelos sofrem efeitos de atração e de repulsão mutuamente, em virtude das forças do campo magnético, produzido pela corrente que circula pelos mesmos. Essas forças serão de atração, caso as correntes estejam circulando no mesmo sentido, ou de repulsão, caso estejam em sentido opostos. Na ocorrência de curto-circuito no sistema essas forças são potencializadas pelo aumento do valor das correntes. A Figura 12 ilustra essas forças.

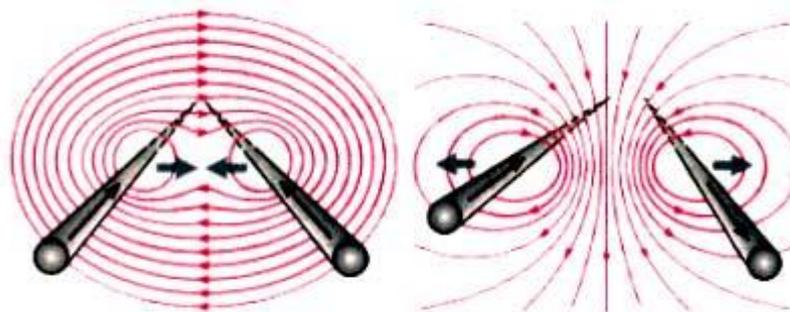


Figura 12 - Efeito da corrente de curto-circuito sobre condutores paralelos

Fonte: Silva (2008).

Em circuitos trifásicos em caso de curto-circuito tripolar, o condutor central, será o que sofre esforços mecânicos mais intensos, posto que cada condutor lateral irá produzir uma força de atração ou repulsão de acordo com o sentido da corrente.

Segundo Schmelcher (1990) a corrente alternada no tempo forma uma onda senoidal, e o valor da força de efeitos dinâmico varia com o quadrado desta onda. Assim se a falta, curto-circuito, tiver duração maior que meio período, os condutores serão submetidos a solicitações mecânicas com frequências da ordem do dobro da frequência da rede.

Os efeitos dinâmicos da corrente de curto-circuito evidenciam a necessidade do correto dimensionamento do barramento e de seus apoios em um projeto de CMF. Fica evidente que se devem considerar tais forças afins de que o sistema não seja subdimensionado, podendo acarretar a ruptura dos condutores e danos à aparelhagem.

2.8.2 Efeitos térmicos decorrentes da corrente de curto-circuito.

No momento em que o curto-circuito ocorre, a corrente aumenta rapidamente atingindo seu valor de crista, posteriormente se inicia o processo de diminuição da magnitude exponencialmente, atingindo valores de transitório e sub-transitório, para alcançar finalmente, após alguns ciclos, o valor de curto-circuito permanente.

No instante em que a corrente atinge seu valor de curto-circuito permanente têm início as ações do efeito térmico nos condutores e partes condutoras da aparelhagem do CMF, fazendo com que suas temperaturas aumentem. Essa elevação de temperatura pode acarretar na deformação da estrutura e/ou na deterioração da iso-

lação dos mesmos. No caso particular de barramentos, elevadas temperaturas fazem com que a resistividade do condutor aumente e segundo Beer e Johnston (1982) dependendo do grau dessa elevação às características mecânicas como ductibilidade e resistência a corrosão do material também podem sofrer alteração.

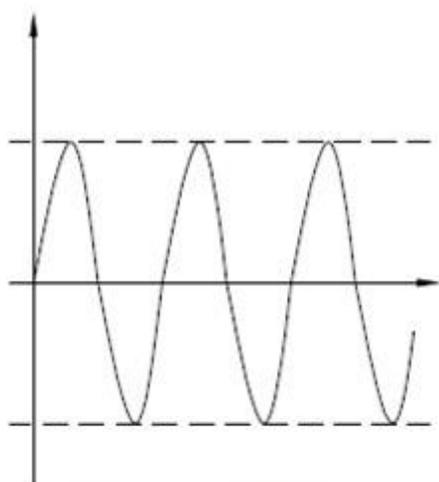
Os valores das correntes em regime permanente são determinados pela força eletromotriz dos geradores, as impedâncias dos equipamentos e dos condutores que estão localizados no sistema entre o gerador e o ponto do curto-circuito. Nesta situação, motores ligados na rede começam a funcionar como geradores, contribuindo para a elevação da corrente e os demais aparelhos como transformadores, condutores e reatores para diminuí-la.

2.8.3 Corrente de curto-circuito simétrica e assimétrica

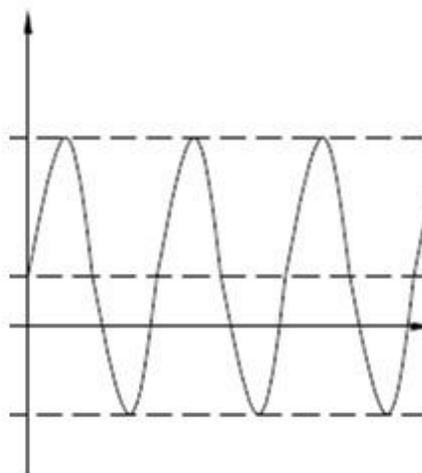
Para definir se as correntes de curto-circuito possuem simetria ou assimetria, necessita-se observar o comportamento das suas amplitudes em relação ao tempo.

A simetria de uma corrente alternada em relação ao eixo dos tempos é descrita pelos termos corrente simétrica e corrente assimétrica. Sendo que o primeiro caracteriza a situação onde os picos de correntes são simétricos ao eixo zero (eixo dos tempos) e a segunda caracteriza a situação contrária. Segundo Creder (1995), geralmente a corrente de curto-circuito tem máxima assimetria no instante do curto e gradativamente vai se tornando simétrica.

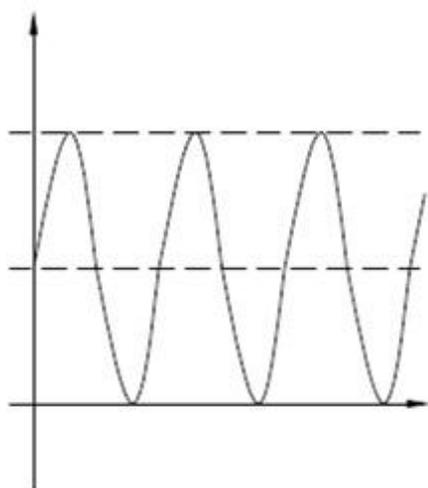
Tomando-se como base a situação em que uma instalação de fator de potência unitário e a ocorrência do curto-circuito no momento em que a tensão tem seu valor de pico, a corrente de curto-circuito será simétrica e se comporta segundo a Figura 13.



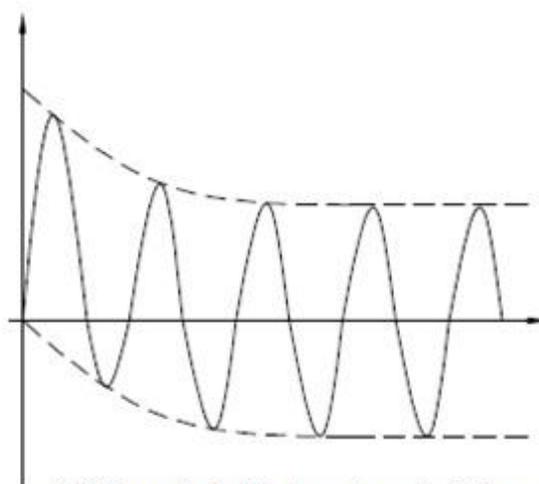
(a) Corrente simétrica



(b) Corrente parcialmente assimétrica



(c) Corrente totalmente assimétrica



(d) Corrente inicialmente assimétrica e após alguns ciclos, simétrica

Figura 13 - Possíveis comportamentos da corrente elétrica no curto-circuito

Fonte: Dib (1979)

Nos circuitos mais usuais, a resistência é desprezível em relação à reatância, e assim, a corrente de curto estará atrasada de 90° em relação à tensão interna do gerador como demonstrado na Figura 14.

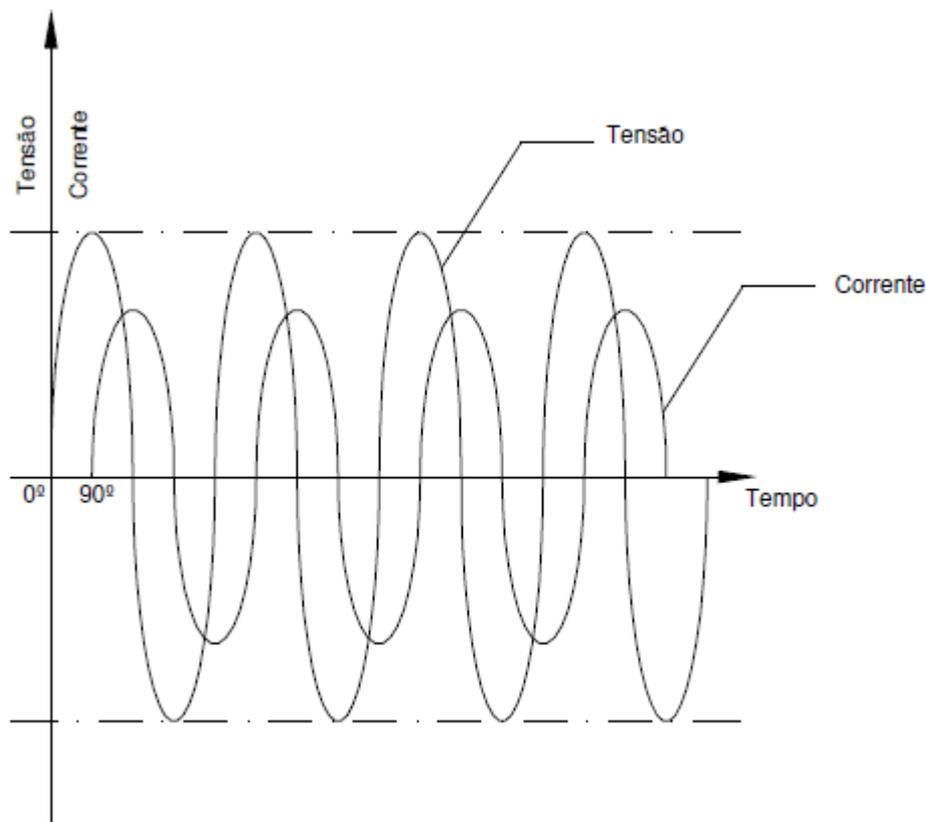


Figura 14 - Relação de fase da corrente e tensão num curto-circuito, desprezando a parte resistiva da impedância.

Fonte: Dib (1979)

Se considerarmos como exemplo um circuito em que, no instante anterior ao curto, o fator de potência é 1 (ângulo de defasagem Φ é igual a 180°) e no instante em que ocorre o curto a resistência é desprezível em face à reatância do circuito, a corrente começará de zero, defasada de 90° , e será simétrica em relação ao eixo zero caso a falta aconteça no momento em que a tensão passa por seu valor de pico. Caso o curto ocorra na ocasião que a tensão tem valor zero, a corrente irá também começar praticamente em zero, no entanto não poderá ser simétrica ao eixo dos tempos, pois deste modo estaria em fase com a tensão. Neste ponto o eixo de simetria da corrente deverá estar deslocado o máximo possível do eixo dos tempos e assim teremos a situação de corrente máxima assimétrica. Quando a corrente de falta ocorre em um instante intermediário, o deslocamento da mesma dependerá do valor da tensão, variando de zero (completa simetria) e um valor máximo (máxima assimetria). As três ocorrências são mostradas a seguir na Figura 15

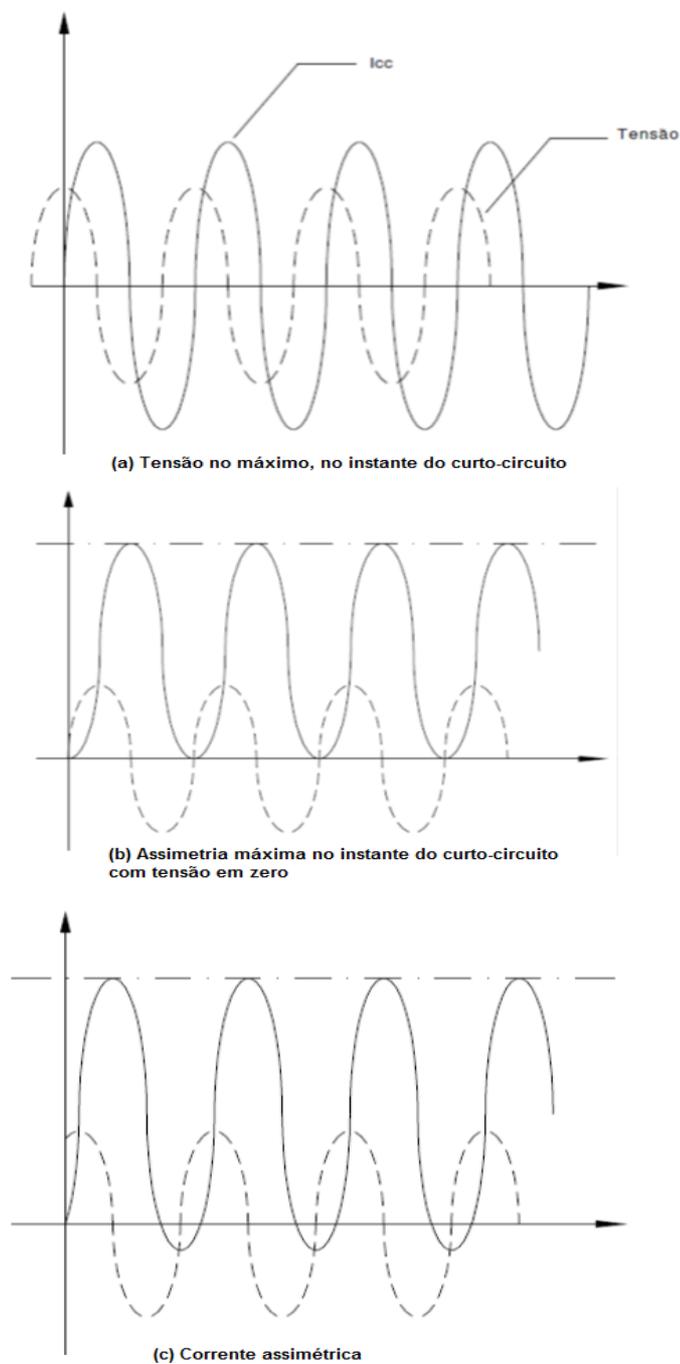


Figura 15 - Comportamento da corrente de curto-circuito em relação ao valor da tensão no instante da falta.

Fonte: Dib (1979)

A máxima simetria é obtida quando no instante do curto o valor de θ , medido a partir do ponto em que a tensão é nula, vale:

$$\theta = 90^\circ + \phi \quad (2)$$

onde:

$$\phi = \arctan \frac{X}{R} \quad (3)$$

Sendo assim a corrente de curto será simétrica quando a falta ocorrer em 90° deste ponto. Situação demonstrada na Figura 16.

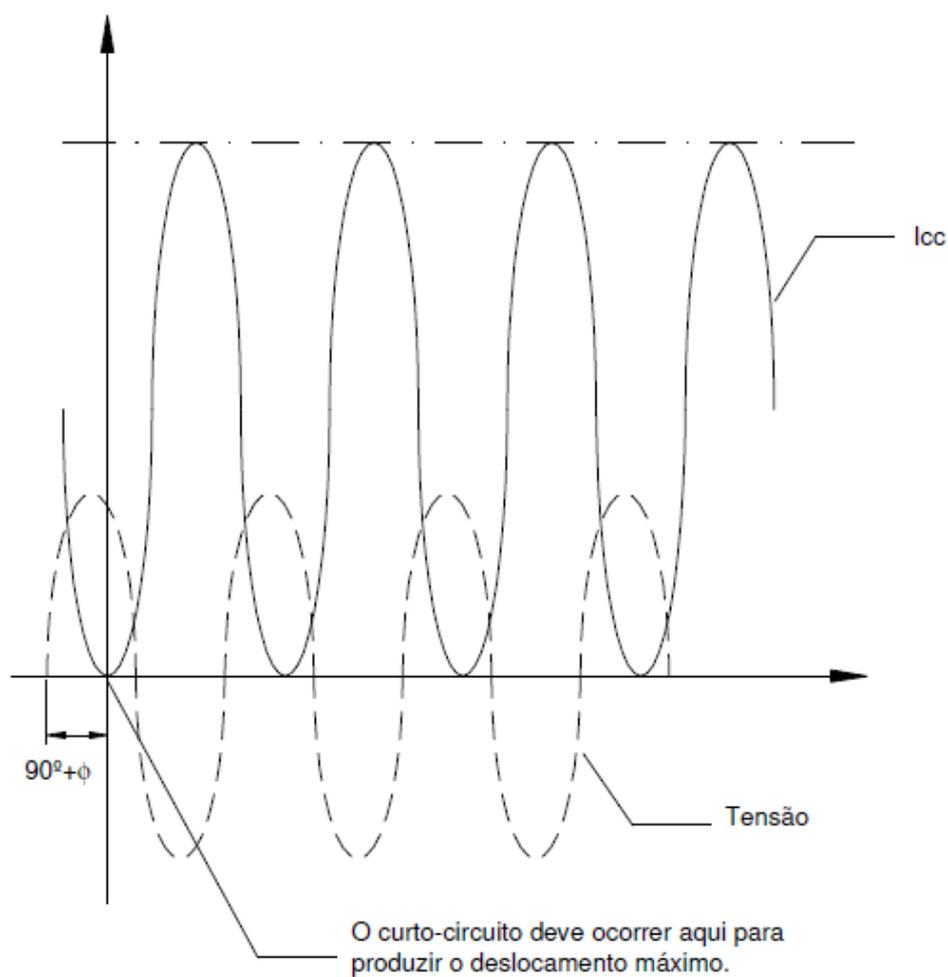


Figura 16 - Condições para obter a máxima assimetria na corrente de curto-circuito em um circuito com X e R.

Fonte: Dib (1979)

Na Figura 17 podemos verificar que uma corrente assimétrica é composta por uma componente de corrente alternada simétrica e outra componente contínua. A soma de ambas irá fornecer, em cada instante, o valor da corrente assimétrica.

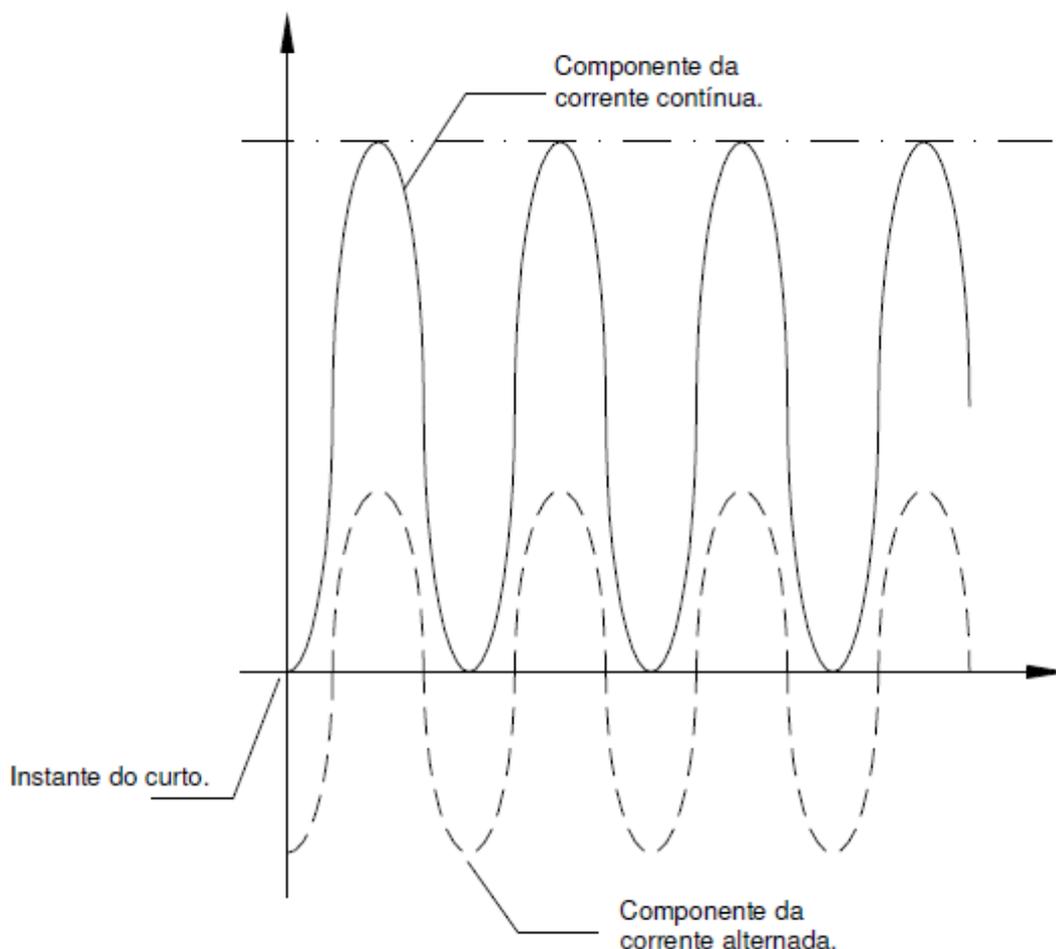


Figura 17 - Componentes da corrente assimétrica de falta

Fonte: Dib (1979)

A componente contínua da corrente assimétrica do curto não permanecerá com seu valor inicial, a menos que seja nula a resistência do circuito, contudo conforme Creder (1995), como em geral a maioria dos circuitos reais tem determinada resistência, a componente irá decrescer no tempo de um valor proporcional a relação X/R (reatância e resistência do circuito), conforme mostra a Figura 18. Assim se X/R , for infinito a componente contínua permanecerá com seu valor inicial e se X/R for igual à zero, o decrescimento será instantâneo. A combinação da componente simétrica com a componente decrescente irá fornecer uma corrente assimétrica que ao decorrer dos ciclos vai-se tornando simétrica.

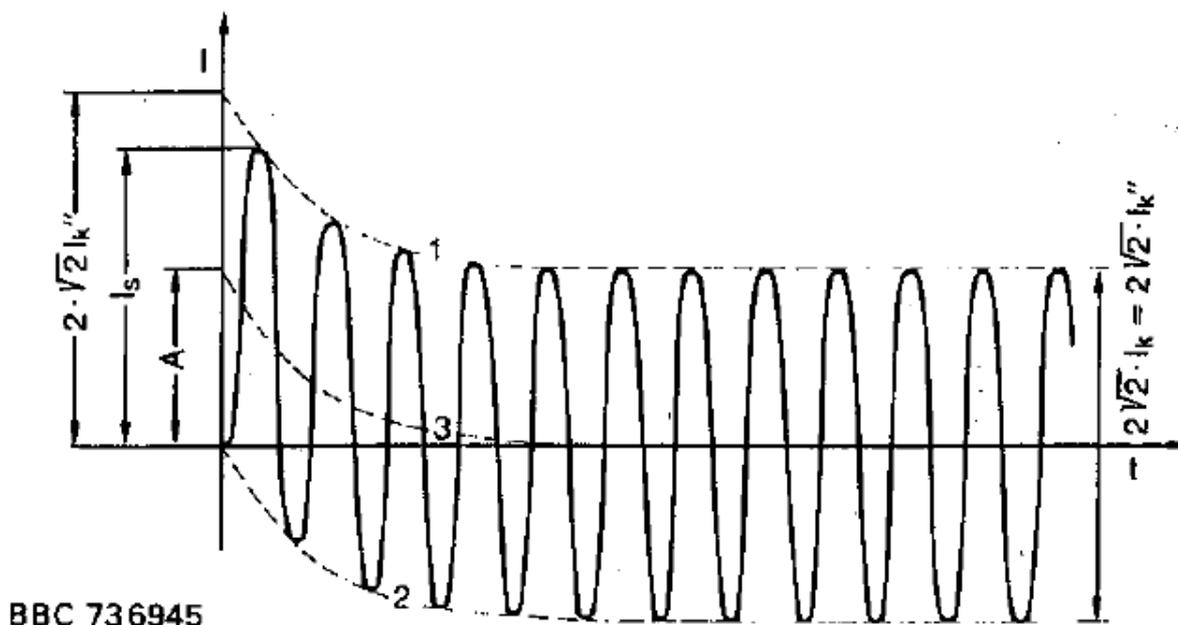


Figura 18 – Variação da corrente de curto-circuito.

Fonte: Dib (1979).

A Figura 18 mostra a fase inicial da corrente de curto-circuito, quando essa é mais elevada, representada pelo valor I_s , calculada na seção 2.10.1 pela Equação (9). Na fase inicial a componente contínua, representada por A na Figura 18, ainda é elevada, diminuindo após um tempo e em consequência estabilizando a corrente de curto-circuito em valores mais baixos.

Como elucida Wanderley Dib (1979) o cálculo do valor de crista da corrente assimétrica no primeiro semiciclo é bastante complexo, por isso foram desenvolvidos métodos mais simples, nos quais a componente contínua é envolvida por meio de um fator de multiplicação em relação a X/R , ver Figura 19. Esse fator vai converter o valor da crista simétrica em valor da crista assimétrica.

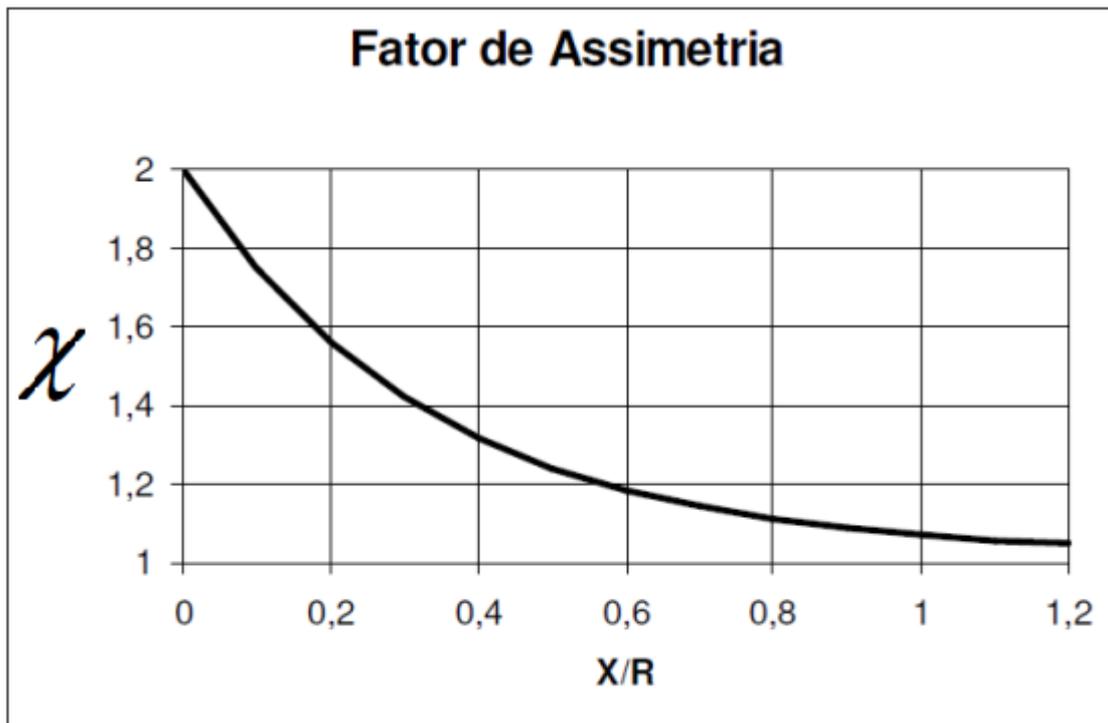


Figura 19 - O fator $\varphi(fi)$ de impulso ou de assimetria

Fonte: Dib (1979)

2.9 CONSIDERAÇÕES MECÂNICAS

No curto-circuito, além de sofrerem com esforços térmicos, barramentos e isoladores sofrem esforços mecânicos. Para isso aborda-se a seguir conceitos e princípios da mecânica vetorial e resistência dos materiais.

Considerando grandezas somente de natureza mecânica, é possível enquadrar o dimensionamento de barramentos como sendo o dimensionamento de barras prismáticas (com todas as seções transversais iguais), homogêneas e isotrópicas, inalterada ao longo do seu comprimento e que tenham comportamento linear-elástico.

Usar-se-á a definição de viga como sendo barra horizontal com carregamento vertical. O carregamento pode ser distribuído, concentrado, ou ainda uma combinação dos dois tipos.

De acordo com Beer e Johnston Jr. (1982) “uma viga de secção prismática sujeita à ação de cargas transversais pode apresentar tensões normais e de cisalhamento em qualquer secção transversal”.

Com relação ao projeto de uma viga, baseando-se na resistência, Hibbeler (2004) afirma que se deve “impedir que o esforço de flexão e a tensão de cisalhamento excedam os valores admissíveis para o material em questão”.

Considerando uma seção transversal de uma viga, a tensão que atua tangente a essa superfície é classificada como tensão de cisalhamento ou tensão cortante, conforme mostrado na figura abaixo o valor máximo dessa tensão encontra-se na linha neutra, que passa no centro de gravidade da seção transversal. Sendo V a força de cisalhamento e T a tensão de cisalhamento, conforme ilustra a Figura 20.

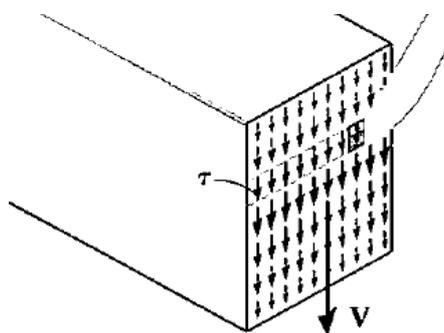


Figura 20– Cisalhamento

Fonte: Hibbeler (2004)

A tensão de cisalhamento é calculada pela equação:

$$\tau = \frac{VQ}{It} \quad (4)$$

Sendo:

τ = tensão de cisalhamento no ponto localizado a uma distância y' da linha neutra do elemento.

V = força cortante interna.

I = momento de inércia de toda a área da seção transversal.

t = largura da área da seção transversal do elemento.

$Q = \bar{y}'A'$, onde A' é a área da parte inferior ou superior da seção transversal do elemento, e \bar{y}' é a distância até o centroide de A' .

Sendo considerada uma viga com seção transversal retangular de largura b e altura h , conforme Figura 21 (a) e (b).

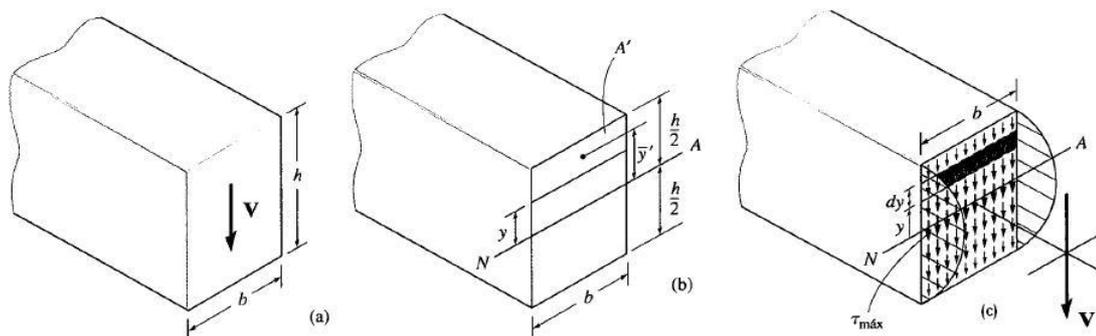


Figura 21 - Valor máximo de tensão

Fonte: Hibbeler (2004)

Conforme figura (c) o valor máximo de tensão ocorre em $y = 0$ e considerando $A = bh$, temos a equação da tensão de cisalhamento máxima em uma viga com seção transversal retangular como sendo:

$$\tau_{m\acute{a}x} = 1,5 \frac{V}{A} \quad (5)$$

Outro fator que precisa ser considerado no projeto de vigas é a deformação por flexão de um elemento. Conforme Beer e Johnston Jr. (1982) “uma barra submetida à ação de dois conjugados, que atuam em um mesmo plano longitudinal, está sujeita à flexão pura”. Esses conjugados são conhecidos como momento fletor, representado por M na Figura 22 (a).

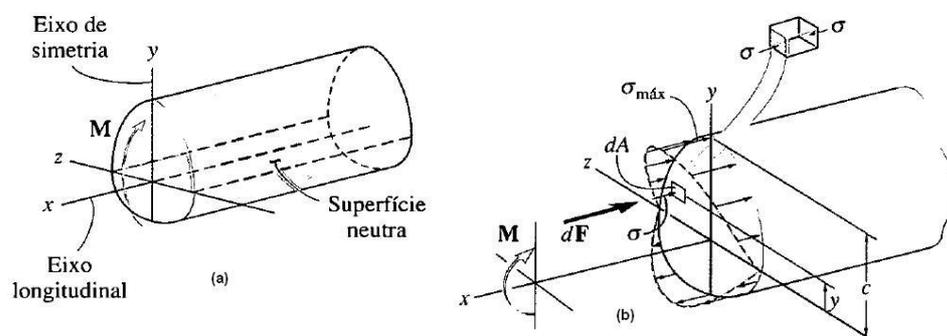


Figura 22 – Flexão

Fonte: Hibbeler (2004)

Como exposto na Figura 22 (b) o valor de tensão de flexão varia no plano da seção, tendo seu valor máximo na extremidade mais afastada da superfície neutra (distância essa indicada por c), representado por $\sigma_{máx}$ e calculado pela equação:

$$\sigma_{máx} = \frac{Mc}{I} \quad (6)$$

Sendo:

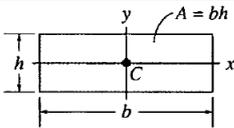
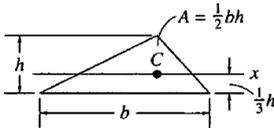
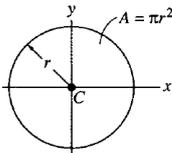
$\sigma_{máx}$ = tensão normal máxima no elemento.

M = momento interno resultante

c = distância perpendicular do eixo neutro ao ponto mais afastado desse eixo

I = momento de inércia da área de seção transversal calculado em torno do eixo neutro, para figuras planas temos os valores tabelados como mostra a Tabela 7.

Tabela 7 - Momento de inércia.

Seção	Figura	Momento de inércia
Retangular		$I_x = \frac{1}{12}bh^3$ $I_y = \frac{1}{12}hb^3$
Triangular		$I_x = \frac{1}{36}bh^3$
Circular		$I_x = \frac{1}{4}\pi r^4$ $I_y = \frac{1}{4}\pi r^4$

Fonte: Adaptado de Hibbeler

Os valores de esforços de flexão e tensão de cisalhamento admissível são definidos nas normas estruturais e mecânicas dos elementos. Os resultados encontrados nos cálculos deverão ser menos que os valores admissíveis, ou seja, $\tau_{máx} < \tau_{adm}$ e $\sigma_{máx} < \sigma_{adm}$. O cálculo ainda pode ser feito pelo módulo de resistên-

cia, que se define como relação entre I e c , ou seja, $S = \frac{I}{c}$. Aplicando juntamente a fórmula da flexão, $\sigma = \frac{Mc}{I}$, temos:

$$S_{nec} = \frac{M}{\sigma_{adm}} \quad (7)$$

Tendo a seção transversal uma forma simples, por exemplo, retângulo, círculo ou quadrado, suas dimensões serão definidas diretamente pela equação.

2.10 BASE PARA DIMENSIONAMENTO DE INSTALAÇÕES SUJEITAS A CORRENTES ELEVADAS

Nesta seção do trabalho, vamos analisar e demonstrar os cálculos que são necessários para que o *software* proposto cumpra sua função. As equações e aspectos apresentadas neste tópico foram baseados na norma IEC 865-1 (1993) e na obra do Wanderley Dib (1979).

2.10.1 Força eletromagnética devido à corrente de curto-circuito, sendo um barramento por fase.

Para início do cálculo da força se faz necessário o cálculo do fator χ , um fator que traduz o decréscimo da componente contínua da corrente de curto-circuito, sendo dependente dos valores de R (resistência) e X (reatância) do barramento. Esse fator pode ser retirado do gráfico como mostrado na Figura 19, ou também calculado pela equação (8).

$$\chi = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{R}{X}} \quad (8)$$

R = Resistencia do condutor []

X = Reatância do condutor []

Calculado o fator, seu resultado será usado no cálculo da máxima corrente que poderá ocorrer no barramento, chamada I_p , sendo esse o primeiro pico de corrente que atinge o barramento na fase de curto circuito, ou seja, é a corrente mais crítica que o barramento terá que suportar, corrente essa calculada pela equação (9).

$$I_s = \chi \sqrt{2} I_K'' \quad (9)$$

I_s = máximo valor da corrente de curto-circuito, em kA, é portanto o valor máximo de instantâneo que ocorre na fase inicial do curto-circuito, quando ocorre o máximo esforço eletromecânico.

I_K'' = corrente de curto circuito a qual o sistema estará sujeito.

Com o resultado da corrente máxima que o barramento estará sujeito, se calcula a maior força eletromagnética que o barramento poderá estar exposto. Essa força distribui-se uniformemente sobre o condutor e entre os isoladores e é calculada conforme equação (10)

$$F_E = 0,2 I_s^2 * \frac{l}{a} \quad (10)$$

l = distância entre os apoios do barramento, em metros.

a = distância entre os centros dos barramentos de cada fase, em metros.

2.10.2 Força eletromagnética devido à corrente de curto-circuito para n barras por fase.

Análogo ao que foi demonstrado no item anterior será mostrado nesse item. Com o diferencial de que agora será considerado o fato de existirem mais de uma barra por fase, valor esse indicado por “n”.

Primeiramente considera-se o valor de I_{K2}'' , que é calculado pela equação (11).

$$I_{K2}'' = \frac{\sqrt{3}}{2} I_K'' \quad (11)$$

Sendo:

I_K'' = Corrente de curto circuito a qual o sistema estará sujeito.

Com o novo valor de corrente de curto-circuito, calcula-se o valor de pico da corrente na fase inicial de um curto-circuito. Sendo esse valor indicado por i_{p2} e calculado pela equação (12).

$$I_{S2} = \chi \sqrt{2} I_{K2}'' \quad (12)$$

Finalmente o calculo da força eletromagnética devido à corrente de curto-circuito, considerando mais de uma barra por fase, é feito da forma indicada na equação(13).

$$F_E = 0,2 \left(\frac{I_{S2}}{n} \right) \frac{l}{a_s} \quad (13)$$

Sendo:

n = Número de barras por fase.

a_s = Distância efetiva entre as fases.

2.10.3 Determinação do momento fletor na barra

Tendo calculado a força, aplica-se o valor encontrado na equação (14) para o cálculo do momento fletor no condutor.

$$mf = \frac{F_E l}{16} \quad (14)$$

Sendo:

m_f = momento fletor do condutor, (kgf/cm).

2.10.4 Módulo de flexão do barramento

Módulo de flexão (W), também conhecido como momento resistente à flexão, sendo o máximo momento que pode ocorrer no perfil, esse estando fixo. Esta grandeza não depende do material usado, apenas da forma e dimensões do perfil, tendo como a unidade de medida cm^3 .

Valor encontrado pela resolução da equação(15).

$$W = \frac{h * b^2}{6} \quad (15)$$

Sendo:

h = Largura da barra [mm]

b = Espessura da barra [mm]

A escolha do perfil deve respeitar a equação (16).

$$W \geq \frac{m_f}{\sigma} \quad (16)$$

Sendo:

σ = Carga de segurança à flexão do material escolhido [kgf/cm²].

2.10.5 Cálculo da corrente térmica de curta duração

Segundo a norma IEC 865-1 (1993) para se calcular a corrente térmica de curta duração é necessário utilizar o valor em r.m.s (valor quadrático médio) da cor-

rente de curto-circuito e os fatores “m” e “n” dependentes do tempo dos efeitos térmicos dos componentes assimétrica e simétrica da corrente de curto-circuito.

Como mostrado por Wanderley Dib (1979) a equação (17) expressa o valor da seção mínima do condutor, para que esse suporte a corrente térmica em determinado instante de tempo.

$$q = \frac{I_K * 1000 * \sqrt{t}}{\sqrt{4,184 * \frac{c\rho d}{\rho_r \alpha} * \ln[1 + \alpha(V_{m\acute{a}x} - V_1)]}} \quad (17)$$

q = Seção em [mm²];

I_K = Corrente alternada de curto-circuito [kA];

t = Tempo de atuação da proteção [s];

c = Calor específico, para o cobre = 0,925 cal g⁻¹ °C⁻¹;

α = Coeficiente de temperatura, para o cobre 4,3x10⁻³ °C⁻¹;

ρd = Densidade, para o cobre 8,9g cm⁻³;

ρ_r = Resistividade, $\rho_r = \rho_{20}[1 + \alpha(V_{m\acute{a}x} - V_1)]$, para o cobre $\rho_{20} = 0,0178$ mm² m⁻¹;

V_1 = Temperatura inicial [°C];

$V_{m\acute{a}x}$ = [°C].

Conforme apresentado por Wanderley Dib (1979), para o caso de barramentos de cobre nu, temperatura inicial 50°C e temperatura máxima 200°C, será considerada a equação (18)

$$q = 7,0 I_K \sqrt{t} \quad (18)$$

3 DESENVOLVIMENTO E ESTRUTURAÇÃO DO SOFTWARE

3.1 ALGORITMOS

Empregando como base as metodologias evidenciadas nas seções anteriores e definindo uma sequência de procedimentos compatíveis a norma IEC 865-1 (1993) e a obra do Wanderley Dib (1979), desenvolveu-se a seguir sequências de raciocínios e operações (algoritmos) que proporcionam uma visão das ações que são executadas nas rotinas do software, produto deste trabalho, para alcançar os dimensionamentos propostos. O *software* possibilita duas opções ao usuário, sendo elas dimensionar e testar, apresentadas nas seções 3.1.1 e 3.2.2.

3.1.1 Algoritmo para rotina “Dimensionar” do software

Entrada de dados:

Corrente nominal do disjuntor escolhido, corrente de curto circuito nominal, frequência do sistema, distância entre condutores (usualmente utilizada a distância entre as saídas do disjuntor principal), tempo admissível do curto-circuito no condutor (tempo para ação das proteções), distância disponível para barramento;

Verificação 1:

Orientação do barramento, disposição 1 ou disposição 2?

Caso disposição 1:

Assumir:

Dimensões do barramento: Base menor
Altura maior

Caso disposição 2:

Assumir:

Dimensões do barramento: Base maior
Altura menor

Escolher:

Perfil adequado de barramento a corrente de serviço

Calcular:

Corrente de choque;

Força eletromagnética entre condutores;

Momento fletor

Módulo de flexão da barra

Verificação 2:

Resistência mecânica da barra é superior aos esforços a que será sujeita em caso de curto-circuito?

Caso não:

Escolher:

Próximo perfil de barramento

Diminuir pela metade a distância disponível para o barramento

Voltar a Verificação 2

Caso sim:

Calcular:

Corrente térmica;

Seção mínima;

Verificação 3:

Seção do barramento é maior que a Seção mínima?

Caso não:

Escolher:

Perfil de barramento adequado para Seção mínima

Caso sim:

Entrada de dados:

Tipo de isolador: Bujão ou Fixo?

Escolher:

Isolador adequado a força eletromagnética

Mostrar:

Parâmetros finais do dimensionamento Fim do dimensionamento no modo “Dimensionar”.

A Figura 23 demonstra o algoritmo do software para o modo “Dimensionar”.

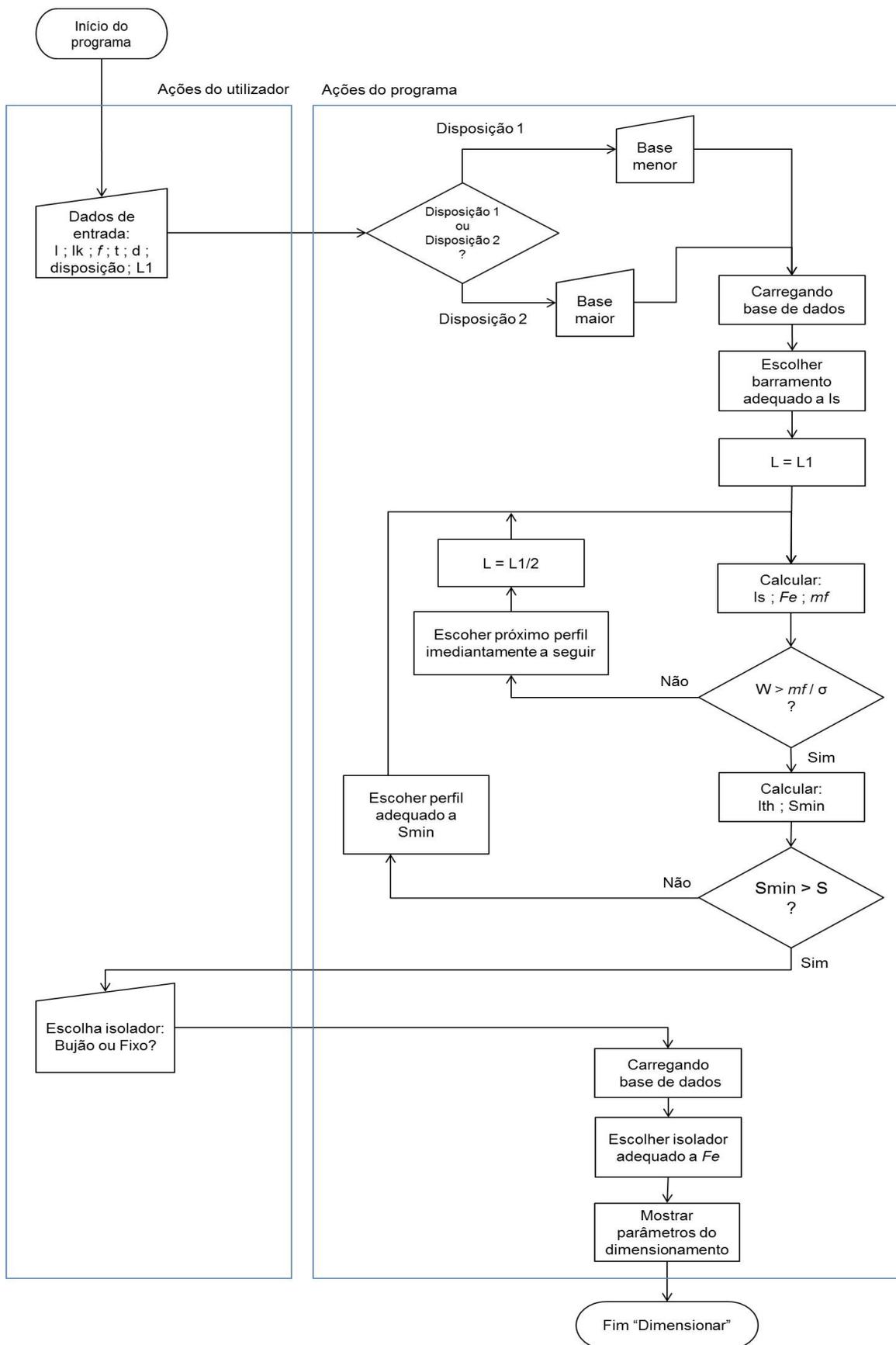


Figura 23 - Algoritmo de funcionamento do software no modo "Dimensionar"

Fonte: Própria

3.1.2 Algoritmo para rotina “Testar Dimensionamento” do software

Entrada de dados:

Perfil do Barramento (escolher perfil ao qual se deseja testar dimensionamento);
Corrente nominal do disjuntor escolhido, corrente de curto circuito nominal, frequência do sistema, distância entre condutores (usualmente utilizada a distância entre as saídas do disjuntor principal), distância entre apoios; tempo admissível do curto-circuito no condutor (tempo para ação das proteções);

Verificação 1:

Orientação do barramento, disposição 1 ou disposição 2?

Caso disposição 1:

Assumir:

Dimensões do barramento: Base menor
Altura maior

Caso disposição 2:

Assumir:

Dimensões do barramento: Base maior
Altura menor

Verificação 2:

O perfil do barramento de entrada é adequado a corrente de serviço?

Caso não:

Escolher:

Outro perfil de barramento para fazer teste ou terminar programa

Caso sim:

Calcular:

Corrente de choque;
Força eletromagnética entre condutores;
Momento fletor

Módulo de flexão da barra

Verificação 3:

Resistência mecânica da barra é superior aos esforços a que será sujeita em caso de curto-circuito?

Caso não:

Escolher:

Outro perfil de barramento para fazer teste ou terminar programa

Caso sim:

Calcular:

Corrente térmica;

Seção mínima;

Verificação 4:

Seção do barramento é maior que a Seção mínima?

Caso não:

Escolher:

Outro perfil de barramento para fazer teste ou terminar programa

Caso sim:

Entrada de dados:

Tipo de isolador

Verificação 5:

O isolador escolhido suportará a força eletromagnética ?

Caso não:

Escolher:

Outro isolador

Caso sim:

Mostrar:

Parâmetros finais do dimensionamento

Fim do dimensionamento no modo “Testar Dimensionamento”.

A Figura 24 demonstra o algoritmo do software para o modo “Testar Dimensionamento”.

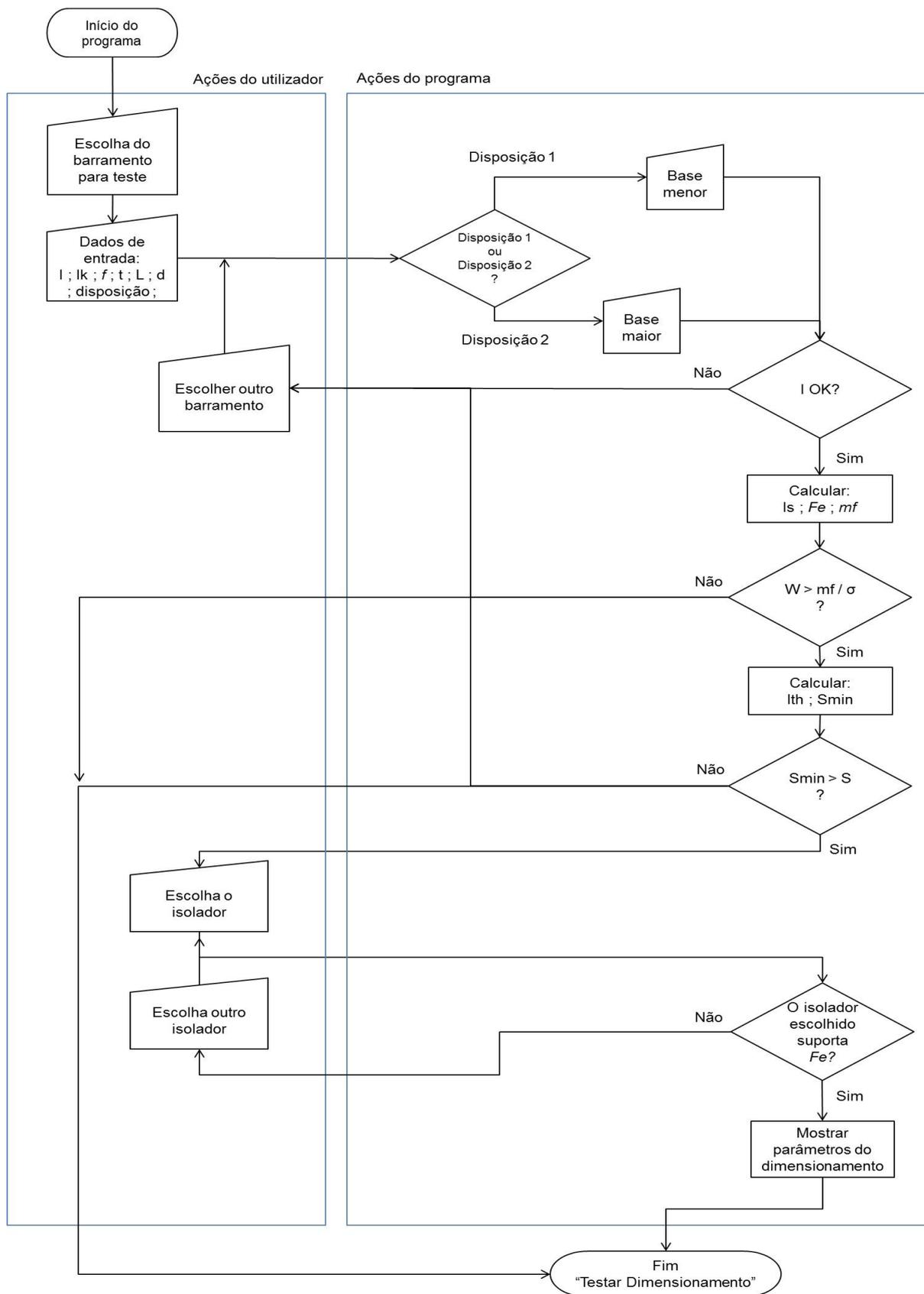


Figura 24 - Algoritmo de funcionamento do software no modo "Testar Dimensionamento"

Fonte: Própria

3.2 TUTORIAL DO PROGRAMA

O programa foi desenvolvido de forma a privilegiar a simplicidade e ser aproveitado de forma intuitiva pelo o usuário. Nas figuras seguintes serão apresentados passo a passo como utilizar o *software*.

3.2.1 Tela inicial

Assim que o usuário inicia o programa, ele é apresentado à tela inicial, como exemplifica a Figura 25. O mesmo terá duas opções na tela de entrada, a sua escolha:

- Dimensionar
- Testar Dimensionamento

Sabe-se que muito frequentemente as empresas que se destinam ao projeto e montagem de painéis de baixa tensão, como a Engerey, mantêm estoques de barramentos e isoladores, pois os mesmos são adquiridos em larga escala ou ainda são remanescentes de projetos anteriores. Assim nasceu a segunda opção de dimensionamento do *software* "Dimension" o modo "Testar Dimensionamento". O qual permite que o projetista escolha o barramento e isolador que possui mais fácil acesso e o programa realizará os cálculos a fim de determinar se os mesmos atendem ou não as necessidades do projeto. Esse recurso visa também mais economia para a empresa, pois gasta-se menos quando já possuímos os equipamentos em estoque.



Figura 25 - Tela inicial do Software de dimensionamento de isoladores e barramentos “Dimension” para painéis de B.T.

Fonte: Própria

3.2.2 Opção “Dimensionar”

Caso a opção escolhida seja “Dimensionar” o projetista deixa a cargo do programa a escolha do dimensionamento mais indicado. Assim primeiramente o menor e mais barato perfil do banco de dados é escolhido pelo programa e, em seguida, são efetuados os cálculos de modo a se determinar se o perfil está de acordo com as necessidades da situação. Se este perfil não for o mais adequado o próximo na tabela será escolhido e a mesma sequência de cálculos será refeita até que o perfil mais viável e acertado seja encontrado, levando em consideração:

- Condição de aquecimento em regime permanente;
- Resistência mecânica ao curto-circuito;
- Esforços térmicos devidos ao curto-circuito.

O mesmo processo de inserção dos dados de entrada para a opção “Testar Dimensionamento” irá ser requerido nesta opção, assim no item dados da rede, o usuário adicionará valores para a corrente nominal do sistema e a frequência da rede e nos dados da instalação, corrente de curto circuito, tempo de atuação da proteção e a distância entre as fases, porém diferencialmente da opção testa, nesta tela o projetista somente irá informar o tamanho da chapa na qual se destinará a fixação do barramento e o software irá indicar qual será a distância adequada entre os isoladores, como indicado na Figura 26.

O perfil indicado pelo programa irá aparecer no campo “Barramento indicado para Uso” e se o projetista quiser saber quais são os parâmetros que levaram o *software* a indicar esse barramento o botão “Testar Barramento” irá aparecer.

Figura 26 - Tela de inserção dos dados iniciais no modo "Indicar Dimensionamento".

Fonte: Própria

3.2.3 Teste do dimensionamento do barramento

Nesta fase o objetivo do software é fazer a verificação de todos os valores introduzidos e/ou indicados por ele anteriormente. Na primeira fase, o programa vai fazer a análise da condição de aquecimento em regime permanente segundo a corrente de serviço. Na segunda etapa, o programa vai efetuar a verificação dos esforços eletrodinâmicos desenvolvidos pela corrente de curto-circuito, ou seja, o software vai comparar os valores do momento de inércia e o momento resistente validando ou não o barramento. Por fim a análise dos esforços térmicos desenvolvidos pela corrente de curto-circuito verificando se o barramento escolhido está corretamente dimensionado. A tela do teste do barramento esta indicada na Figura 27.

Figura 27 - Tela de teste do dimensionamento do barramento.

Fonte: Própria

3.2.4 Dimensionamento do isolador

A próxima etapa do dimensionamento é em relação à determinação do isolador. Como apresentado na Figura 28 esta tela do *software* tem como objetivo averiguar e indicar qual o isolador que irá suportar todas as forças dinâmicas atuantes no sistema, devido a corrente de curto circuito. O “Dimension” possui uma rotina de

programação que irá indicar o menor e conseqüentemente mais barato isolador que possa ser implementado no sistema, tornando o mesmo ainda mais otimizado.

Figura 28 – Tela dimensionamento do isolador.

Fonte: Própria

3.2.5 Opção “Testar Barramento”

O “Dimension” conta com uma base de dados, que permite o funcionamento correto do programa. Trata-se de uma memória onde são inseridos os perfis padrões de barramentos retangulares de cobre e de isoladores, permitindo ainda ao utilizador que faça a inserção de novos barramentos, caracterizando a flexibilidade do *software* a fim de ser o mais amplo possível no campo a que se destina.

Assim o caso a opção escolhida seja a “Testar Dimensionamento”, o programa automaticamente retornará uma nova tela, Figura 29, em que será exibido o banco de dados de barramentos referenciados pela bitola. O usuário tem a liberdade de optar pelo tipo de barramento específico que será aplicado em seu projeto e automaticamente o *software* informa a corrente máxima e peso linear, cabe salientar que o usuário deverá escolher a quantidade de barras que serão usadas por fase (uma, duas ou três).

Base de Dados Barramento B.T. Cobre

Escolha uma bitola para iniciar dimensionamento ou cadastre uma nova barra.

Bitola

- 1/8" x 3/4"
- 3 x 20
- 1/8" x 1"
- 3 x 25
- 1/4" x 1"
- 5 x 25
- 3/16" x 1 1/4"
- 5 x 30
- 3/16" x 1 1/2"**
- 5 x 40
- 3/8" x 1 1/2"
- 10 x 40
- 3/8" x 2"
- 10 x 50
- 1/4" x 1 1/4"
- 5 x 60

Seção mm²

Peso Linear kg/m

Corrente Admissível

Barramento Sem Pintura

<input type="radio"/>	I	<input type="text" value="436"/> A	<input type="radio"/>	II	<input type="text" value="756"/> A	<input type="radio"/>	III	<input type="text" value="986"/> A
-----------------------	---	------------------------------------	-----------------------	----	------------------------------------	-----------------------	-----	------------------------------------

Barramento Com Pintura

<input type="radio"/>	I	<input type="text" value="518"/> A	<input type="radio"/>	II	<input type="text" value="861"/> A	<input type="radio"/>	III	<input type="text" value="1031"/> A
-----------------------	---	------------------------------------	-----------------------	----	------------------------------------	-----------------------	-----	-------------------------------------

Testar Barramento **Cadastrar Novo Barramento** **Sair**

Figura 29 – Tela base de dados do software.

Fonte: Própria

Caso o usuário não encontre o tipo de barramento desejado, ele terá a possibilidade de cadastrar novos barramentos no banco de dados do *Software* conforme está destacada a tela de cadastro na Figura 30.

The image shows a software window titled "Cadastrar Novo Barramento" with a close button (X) in the top right corner. The window contains the following fields and labels:

- Bitola**: A field for "mm x mm" with two sub-input boxes.
- Secção**: A field for "mm²".
- Peso Linear**: A field for "Kg/m".
- Corrente Admissível**: A section header.
- Barramento Sem Pintura**: A section header with three sub-headers: I, II, and III. Each has an input field followed by "A".
- Barramento Com Pintura**: A section header with three sub-headers: I, II, and III. Each has an input field followed by "A".
- At the bottom, there are two buttons: "Cadastrar" and "Sair".

Figura 30 – Cadastrar novos barramentos.

Fonte: Própria

Para se efetuar o cadastro de um novo modelo de barramento, terão que ser inseridos valores de medidas de secção em milímetros, área em milímetros quadrados, peso linear em quilograma por metro, corrente nominal máxima suportada considerando aplicação ou não de pintura e a quantidade de barramento por fase.

3.2.5.1 Dados de entrada no modo "Testar Dimensionamento"

Após eleger o barramento, o próximo passo é acrescentar valores nos dados da rede e nos dados da instalação, estes são de extrema importância para elaborar os cálculos de efeitos dos esforços dinâmicos e térmicos por meio da corrente de curto circuito. No item dados da rede, é essencial que o usuário adicione valores para a corrente nominal do sistema e a frequência da rede. Nos dados da instalação, devem ser colocados valores para corrente de curto circuito, tempo de atuação da proteção, distância entre isoladores e a distância entre as fases como demonstra a Figura 31.

The screenshot shows a software window titled "Introdução de Dados Iniciais" with a standard Windows-style title bar. The window is organized into several functional areas:

- Dados da Rede:** Contains three input fields: "Corrente de serviço (Is)" in Amperes (A), "Corrente de curto-circuito" in Amperes (A), and "Frequencia do sistema" in Hertz (Hz).
- Dados da Instalação:** Contains three input fields: "Tempo de atuação das proteções" in seconds (s), "Distância entre dois apoios" in meters (m), and "Distância entre fases" in meters (m).
- Dados do Barramento escolhido:** Contains four input fields: "Dimensões" in mm x mm, "Secção" in mm², "Peso Linear" in kg/m, and "Corrente Admissivel" in Amperes (A).
- Disposição do Barramento:** Features two radio buttons, "Disposição 1" and "Disposição 2". Below them are two diagrams showing the arrangement of three insulators. Diagram 1 shows vertical insulators with a horizontal distance 'b' between them and a height 'h'. Diagram 2 shows horizontal insulators with a horizontal distance 'b' between them and a height 'h'.
- Buttons:** On the right side, there are two buttons: "Testar Barramento" and "Sair".

Figura 31 - Tela de inserção dos dados iniciais no modo "Teste de Dimensionamento"

Fonte: Própria

3.2.5.2 Dimensionamento do isolador

Após realizar o dimensionamento do barramento o próximo passo é escolher o tipo do isolador conforme a

Figura 32. O objetivo desta etapa do programa é averiguar se o isolador irá suportar todas as forças dinâmicas atuantes nele, devido a corrente de curto circuito. Inicialmente o programa possibilita ao usuário escolher entre duas classes de isoladores: Isoladores tipo bujão e tipo do tipo fixo. O programa oferece uma gama de modelos para cada tipo de isoladores, proporcionando ao usuário uma ampla opção de escolha para seu projeto.

Figura 32 – Tela dimensionamento do isolador.

Fonte: Própria

4 ESTUDO DE CASO

Esta seção é dedicada a atestar o uso do *software* “*Dimension*” com a utilização do mesmo em um teste prático. Para esse teste é utilizado um projeto real de dimensionamento fornecido gentilmente pela empresa ENGEREY (Montagem de painéis elétricos) onde não foram utilizados cálculo ou *software*, para dimensionar os barramentos e isoladores, apenas a experiência do projetista como fator de decisão. O projeto é apresentado no ANEXO 1 deste trabalho

O teste foi dividido em três etapas, primeiramente foram efetuados cálculos manuais dos esforços dinâmicos e térmicos, atuantes nos barramentos e isoladores do projeto em questão. Na segunda etapa utilizamos o *software* no modo “Testar Dimensionamento” para simplesmente verificar se o dimensionamento do barramento e dos isoladores esta correto no projeto segundo a teoria levantado neste trabalho. Em seguida, na terceira etapa, utilizamos o *software* no modo “Dimensionar” para indicar quais seriam os parâmetros mínimos para o barramento e os isoladores garantindo o correto dimensionamento do projeto e o menor custo possível.

4.1 CALCULOS MANUAIS

Para obter resultados satisfatórios procedimento ideal é utilizar o programa para dimensionar barramento e isoladores e comparar com a solução elaborada manualmente. Sendo assim nesta secção utilizaremos cálculos manuais e posteriormente iremos comparar os resultados, por forma a atestar legitimidade do *software*.

4.1.1 Dados de entrada para cálculos manuais

Os dados iniciais do problema foram retirados de um caso real, onde não foi utilizados nenhum cálculo ou *software* para dimensionar os barramentos e isoladores. O objetivo é verificar se os isoladores e o barramento, para este caso, foram dimensionados corretamente.

Tabela 8 - Dados de entrada para os cálculos manuais.

Descrição	Tipo
Tipo Barramento	2"X 3/8"
Tipo Isolador	Bujão 80 x 65 mm
Distancia Total do Barramento (L)	1,380 metros
Distancia entre Isoladores (l)	0,46 metros
Distancia Total do Barramento (a)	0,047 metros
Corrente de serviço (I)	600 A
Frequência da Rede (f)	60 Hz
Tensão da Rede (U)	380 V
Corrente de Curto Circuito (I _{cc})	30 kA

Fonte: Própria

4.1.2 Cálculos esforços eletrodinâmicos

Neste tópico serão apresentados cálculos no intuito de obter valores para os esforços eletrodinâmicos desenvolvidos através da corrente de curto-circuito.

Considerando os dados apresentados na Tabela 8 deve-se obter o I_s (corrente assimétrica de curto circuito trifásico no primeiro ciclo) pela equação (9).

Analisando a equação (8), conclui-se que o valor do fator será entre 1,02 e 2. Para o software será considerado o maior valor, igual a 2, ou seja:

$$I_s = 2 \times \sqrt{2} \times 30.000$$

Obtemos o valor $I_s = 84,85$ (kA).

No segundo momento devemos obter o valor de F (Força de atração entre condutores através da corrente de curto circuito) pela equação (10). Substituindo valores de $I_s = 84,85$ A, $l = 46$ cm e $a = 4,7$ cm.

$$F = 2,04 \times 84,85^2 \frac{46}{4,7} \times 10^{-2} \text{ (kgf)}$$

$$F = 1437,54 \text{ (kgf)}$$

O próximo passo é obter o momento de flexão do sistema, para isso utilizamos a equação (14). Substituindo valores de $F = 1437,54 \text{ kgf}$ e $l = 46 \text{ cm}$.

$$mf = \frac{1437,54 \times 46}{16} \text{ (kgf} \times \text{cm)}$$

$$mf = 4132,95 \text{ (kgf} \times \text{cm)}$$

Após calcular o momento de flexão, o próximo passo é calcular o momento resistente, mostrada na equação (16). Sabendo que $M = 4132,95 \text{ kgf} \times \text{cm}$ e $\sigma = 1200 \text{ kgf/cm}^2$ pela Tabela 9, substitui-se os valores na equação.

Tabela 9 – Tabela de Carga de segurança à flexão.

Carga de segurança à flexão	σ (kgf/cm ²)
Cobre	1000 à 1200
Alumínio	400 à 600

Fonte: Dib (1979)

$$W \geq \frac{4132,95}{1200} \text{ (cm}^3\text{)}$$

$$W \geq 3,44 \text{ (cm}^3\text{)}$$

Sendo o momento de inércia calculado pela equação (15). Sabendo que $h = 9,52 \text{ mm}$ e $b = 50,8 \text{ mm}$, onde h e b são as dimensões do barramento obtidas pela Tabela 8, sendo assim os valores serão substituídos na equação.

$$W = \frac{0,952 \times 5,08^2}{6} \text{ (cm}^3\text{)}$$

$$W = 4,094 \text{ (cm}^3\text{)}$$

Voltando à equação (15) é obtida a seguinte condição:

$$3.44 \leq 4,094$$

A condição apresentada é verdadeira, ou seja, o momento resistente foi satisfaz o problema.

4.1.3 Cálculos esforços térmicos

Neste tópico serão apresentados cálculos para obtenção dos valores para os esforços térmicos desenvolvidos através da corrente de curto-circuito.

Substituindo os valores na Equação (17), obtém-se:

$$q = 7 \times 30x\sqrt{0,5} \text{ mm}^2$$

$$q = 148,49 \text{ mm}^2$$

Encontramos uma área mínima para este estudo caso de $q = 148,492 \text{ mm}^2$, agora se deve comparar esta secção calcula com secção do barramento $q_{\text{Barramento}} = 483,616 \text{ mm}^2$.

$$q_{\text{Min}} \leq q_{\text{Barramento}} \quad (19)$$

Substituindo:

$$148,492 \leq 483,616$$

Conclui-se que o barramento, utilizado no estudo de caso, atende a condição da secção mínima que o condutor deverá possuir para não entrar em fadiga térmica em caso de curto-circuito.

4.2 VERIFICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DO PROJETO

Como salientado anteriormente nesta etapa utilizamos o *software* no modo “Testar Dimensionamento” para averiguar se o dimensionamento executado no projeto “QGBT 300KVA” realizado pela empresa Engerey está correto e se o mesmo é análogo aos cálculos manuais. A Tabela 10 apresenta os dados iniciais.

Tabela 10 - Dados do projeto QGBT 300KVA.

Descrição	Tipo
Barramento utilizado	2"X 3/8"
Tipo Isolador	Bujão 80 x 65 mm
Distancia Total do Barramento (L)	1,380 metros
Distancia entre Isoladores (l)	0,46 metros
Distancia Total do Barramento (a)	0,047 metros
Corrente de serviço (I)	600 A
Frequência da Rede (f)	60 Hz
Tensão da Rede (U)	380 V
Corrente de Curto Circuito (Icc)	30 kA

Fonte: Própria.

A seguir é inserido no programa o barramento utilizado na execução do projeto, no caso o 2"X 3/8", e escolhido a corrente admissível para um condutor de cobre sem pintura e com um condutor por fase segundo a norma DIN 43671 para barramentos de baixa tensão, como utilizado no projeto. A Figura 33 mostra a inserção dos dados de entrada.

Base de Dados Barramento B.T. Cobre

Escolha uma bitola para iniciar dimensionamento ou cadastre uma nova barra.

Bitola

- 1/8" x 3/4"
- 3 x 20
- 1/8" x 1"
- 3 x 25
- 1/4" x 1"
- 5 x 25
- 3/16" x 1 1/4"
- 5 x 30
- 3/16" x 1 1/2"
- 5 x 40
- 3/8" x 1 1/2"
- 10 x 40
- 3/8" x 2"**
- 10 x 50
- 1/4" x 1 1/4"
- 5 x 60

Secção mm²

Peso Linear kg/m

Corrente Admissível

Barramento Sem Pintura

I A II A III A

Barramento Com Pintura

I A II A III A

Testar Barramento **Cadastrar Novo Barramento** **Sair**

Figura 33 - Entrada do barramento utilizado no projeto QGBT 300KVA.

Fonte: Própria.

A Figura 34 mostra o processo de inserção dos demais dados iniciais necessários para o dimensionamento.

Introdução de Dados Iniciais

Dados da Rede

Corrente de serviço (Is) A

Corrente de curto-circuito A

Frequencia do sistema Hz

Dados da Instalação

Tempo de atuação das proteções s

Distância entre dois apoios m

Distância entre fases m

Testar Barramento **Sair**

Dados do Barramento escolhido

Dimensões mm x mm

Peso Linear kg/m

Secção mm²

Corrente Admissível A

Disposição do Barramento

Disposição 1 Disposição 2

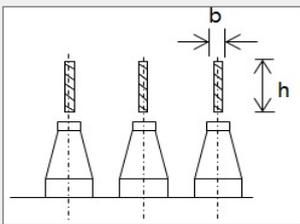
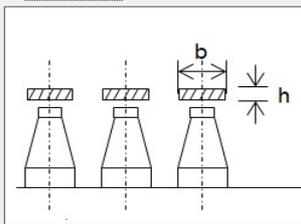



Figura 34 - Inserção dos dados de entrada do projeto no software.

Fonte: Própria.

A Figura 35 apresenta os resultados obtidos pelo programa.

DIMENSIONAMENTO DO BARRAMENTO

Verificação da condição de aquecimento

Corrente de serviço: 600 A

Corrente Admissível na barra: 824 A

Condição para dimensionamento: $I_{tubo} \geq I_s$

Resultado: **Testar**
Dimensionamento OK!

Verificação da resistência mecânica ao curto-circuito

Corrente de curto-circuito: 30000 A

Valor de Qui (x): 2

Distância entre dois apoios: 0.46 m

Distância entre fases: 0.047 m

Dimensões tubo: 9,52 | 50,8 mm

Carga de segurança a flexão: 1200 kg/cm²

Condição para dimensionamento: $W \geq W_i$

Força electromagnética: 1437,548936 kgf

Momento fletor (mf): 4132,953191 kgf/cm

Momento Resistente (Wi): 3,444127659 cm³

Módulo de flexão da barra (W): 4,094615466 cm³

Resultado: **Testar**
Dimensionamento OK!

Esforços térmicos devido ao curto-circuito

Tempo de atuação das proteções: 0.5 s

Fator $I_{cc} \cdot I_p$: 2.5

Condição para dimensionamento: $S \geq S_{min}$

Seção mínima (Smin): 148,49242404 mm²

Seção do tubo escolhido (S): 483 mm²

Resultado: **Testar**
Dimensionamento OK!

Banco Dados

Dimensionar Isolador

Sair

Figura 35 - Resultados do teste do dimensionamento do barramento

Fonte: Própria.

O próximo passo na verificação do dimensionamento do projeto “QGBT 300KVA” é o teste do isolador utilizado, mostrado na Figura 36.

Figura 36 - Teste de dimensionamento do isolador utilizado no projeto

Fonte: Própria.

Os resultados obtidos pelo *software*, como pode se analisar, são os mesmos encontrados pelo cálculo manual na seção 4.1 deste trabalho comprovando a legitimidade do programa. O “Dimension” indicou que o barramento e o isolador utilizados pelo projetista foram corretamente dimensionados para a situação a qual ele se destina, e assim, suportarão os efeitos que são originados devido a um curto-circuito na rede.

4.3 DIMENSIONAMENTO INDICADO PELO SOFTWARE

A seguir apresenta-se a sequencia de dimensionamento utilizando o *software* “Dimension” no modo “Dimensionar” para se indicar um dimensionamento otimizado do projeto “QGBT 300KVA”. Os dados de entrada são listados na Tabela 11.

Tabela 11- Dados iniciais do projeto QGBT 300KVA.

Descrição	Tipo
Distancia disponível no painel para o barramento (L)	1,380 metros
Distancia entre as fases (d)	0,047 metros
Corrente de serviço (I)	600 A
Freqüência da Rede (f)	60 Hz
Tensão da Rede (U)	380 V
Correte de Curto Circuito (Icc)	30 kA

Fonte: Própria.

A Figura 37 indica a ação de inserção dos dados de entrada e posteriormente, destacado no campo “Barramento Indicado para Uso”, o barramento de menor área e peso que atende perfeitamente as necessidades do sistema.

The screenshot shows a software window titled 'Introdução de dados' with the following sections:

- Dados da Rede:**
 - Corrente de serviço: 600 A
 - Corrente de curto-circuito: 30000 A
 - Frequência do sistema: 60 Hz
- Dados da Instalação:**
 - Tempo de atuação das proteções: 0.5 s
 - Distância entre fases: 0.047 m
- Quadro Escolhido:**
 - Você pretende fixar o barramento na chapa:
 - Traseira
 - Lateral
 - Dimensão disponível para barramento: Altura: 1.58 m
- Disposição do Barramento:**
 - Disposição 1
 - Disposição 2
- Barramento Indicado para Uso:**
 - Dimensões: 5 x 60 mm x mm
 - Secção: 299 mm²
 - Peso Linear: 2,66 kg/m
 - Corrente Admissível: 688 A
 - Distância entre dois apoios: 0,345 m

Buttons: Dimensionar Barramento, Testar Barramento, Sair.

Figura 37 - Inserção dos dados de entrada no software.

Fonte: Própria.

A Figura 38 apresenta os resultados obtidos pelo programa em relação ao barramento 60x5mm indicado para o projeto.

Figura 38- Resultados do dimensionamento.

Fonte: Própria.

Analisando os resultados apresentados pelo *software* evidencia-se que o barramento dimensionado pelo programa é diferente do barramento utilizado pelo projetista na situação real. No projeto foi utilizado um barramento 2"X 3/8" (polegadas), enquanto que o programa sugere que o barramento mínimo que atenderia as especificações do projeto é 60x5mm.

A Tabela 12 compara os dois barramentos:

Tabela 12 - Características dos barramentos dimensionados

Barramento	Secção (mm ²)	Peso Linear (kg/m)	Corrente admissível (A)	Módulo de flexão (cm ³)
60x5mm	299	2,66	824	3
2"X 3/8"	483	4,3	688	4,095

Fonte: Própria

Pode-se extrair da Tabela 12 que o barramento 60x5mm atende as exigências do sistema com parâmetros de secção, peso, corrente admissível e módulo de flexão inferiores a barra de 2"X 3/8" (polegadas). Conclui-se assim que o barramento

foi sobredimensionado pelo projetista, o que certamente acarretou em um custo mais elevado para o cliente final.

Como item final no processo de dimensionamento dos pontos propostos por esse trabalho tem-se a determinação do isolador mais adequado, identificado na Figura 39.

The screenshot shows a software window titled "UserForm6" with the following content:

- Header:** "DIMENSIONAMENTO DO ISOLADOR" with an image of red insulators.
- Form Fields:**
 - Escolha o tipo de isolador:
 - Força electromagnética: kgf
 - Momento fletor (mf): kgf/cm
 - Dimensões tubo: mm x mm
 - Corrente de curto-circuito: A
 - Corrente de serviço (Is): A
- Isoladores DO TIPO "BUJÃO":**
 - Dimensões do isolador: List with "80x65" selected.
 - Altura: Diâmetro: mm x mm
 - Tensão Nominal: V
 - Tração: N
 - Flexão: N
 - Parafuso:
 - Fornecedor:
 - Referência fornecedor:
- Buttons:** "Sair" and "Calcular".
- Status Bar:** "Isolador escolhido suportará as tensões de ruptura"

Figura 39 - Indicação do isolador mais adequado ao projeto.

Fonte: Própria

Como se pode averiguar, o *software* indicou o mesmo isolador utilizado pelo projetista 60x65 mm, o que dá credibilidade ao programa.

4.4 COMPARAÇÕES DOS MÉTODOS

A seguir estão apresentados, em tabelas comparativas, os valores provenientes dos cálculos manuais e do uso do *software* "Dimension" em relação ao projeto "QGBT 300KVA", apresentado anteriormente e integralmente mostrado no ANEXO A. As tabelas estão divididas em três situações (3 colunas), sendo que a primeira delas apresenta os resultados do cálculo manual, a segunda os resultados do *software* no modo "Testar Dimensionamento" e a terceira os resultados do programa no modo "Dimensionar".

A Tabela 13 mostra as comparações em relação ao cálculo dos esforços dinâmicos, Tabela 14 evidencia os resultados dos efeitos térmicos ambos em relação a corrente de curto-circuito. A Tabela 15 mostra as verificações de cada método.

Tabela 13 - Comparação resultados cálculo dinâmico.

Parâmetros	Calculo Manual	Software “Testar Dimensionamento”	Software “Dimensionar”
Barramento	2"x3/8"	2"x3/8"	60x5 (mm)
Distância entra apoios	0,46 (m)	0,46 (m)	0,345 (m)
Número de isoladores necessários	3	3	4
Força Eletrodinâmica	1437, 54 (kgf)	1432, 953 (kgf)	1078, 16 (kgf)
Momento flexão do sistema	4132,95 (kgfxcn)	4132,953 (kgfxcn)	2324,786 (kgfxcn)
Momento Resistente	3,44 (cm ³)	3,441 (cm ³)	1,937 (cm ³)
Momento de inércia do barramento	4,094 (cm ³)	3,094 (cm ³)	3 (cm ³)

Fonte: Própria

Tabela 14 - Comparação resultados cálculo térmico.

Parâmetros	Calculo Manual	Software “Testar Dimensionamento”	Software “Dimensionar”
Secção mínima	148,49 (mm ²)	148,49 (mm ²)	148,49 (mm ²)
Secção do barramento	483,61 (mm ²)	483 (mm ²)	299 (mm ²)

Fonte: Própria

Tabela 15 - Comparação entre as análises de verificações

Parâmetros	Análise das Verificações
Calculo Manual	As barras suportarão as forças e possuem suficiente resistência térmica devido ao curto-circuito.
<i>Software</i> “Testar Dimensionamento”	As barras suportarão as forças e possuem suficiente resistência térmica devido ao curto-circuito.
<i>Software</i> “Dimensionar”	As barras suportarão as forças e possuem suficiente resistência térmica devido ao curto-circuito.

Fonte: Própria

A Tabela 16 apresenta as comparações de resultados quanto ao isolador escolhido em cada método.

Tabela 16 - Comparação dos resultados do isolador.

Parâmetros	Calculo Manual	<i>Software</i> “Testar Dimensionamento”	<i>Software</i> “Dimensionar”
Isolador	80x65 (mm)	80x65 (mm)	80x65 (mm)

Fonte: Própria

Em função das tabelas mostradas previamente pode-se, finalmente, realizar a apuração das conclusões necessárias com relação aos resultados obtidos e suas divergências, métodos utilizados e demais aspectos de importância para a continuidade e aprimoramento deste trabalho.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve origem a partir da percepção da necessidade de se otimizar e ainda precisar o processo de dimensionamento de painéis elétricos não pertencentes ao grupo de painéis TTA e PTTA (conjuntos com ensaios de tipo totalmente testados e conjuntos com ensaio de tipo parcialmente testados, respectivamente) que, diariamente, é repetido inúmeras vezes pela empresa Engerey. Por se tratar de um processo moroso e trabalhoso, com frequência o dimensionamento desses painéis, dentro da Engerey, é realizado sem os devidos cálculos, somente baseando-se na experiência dos projetistas para se determinar os parâmetros que serão utilizados nos projetos. Todo esse processo é passível da aplicação de um programa que assume a função de realizar os cálculos e indicar um dimensionamento mais otimizado o que motivou a equipe desde o início do trabalho.

A transferência do processo manual para o automático leva obviamente a poupar o tempo e dinheiro das empresas especializadas nessa área, levando o projetista a somente inserir os dados iniciais e posteriormente avaliar os resultados finais indicados pelo programa e emprega-los no seu projeto, seguro de que aquele dimensionamento é o mais acertado para a sua necessidade.

A validação do *software* foi feita comparando-se os resultados com os cálculos manuais, e a fim de pôr à prova o programa foi feita a utilização do mesmo em uma situação real de um projeto fornecido gentilmente pela empresa ENGEREY (Montagem de painéis elétricos) e o mesmo fez duas indicações importantes. Confirmou que o dimensionamento do projeto estava correto, porém foi ainda além do esperado pela equipe, indicou que um barramento de área, peso e conseqüentemente preço menores poderia ter sido utilizado no projeto, economizando dinheiro e ainda sim garantindo a integridade da instalação.

Assim conclui-se que foi desenvolvida uma ferramenta que torna possível o dimensionamento de barramentos e isoladores para painéis de baixa tensão de maneira rápida e confiável com relação aos esforços dinâmicos e térmicos oriundos da corrente de curto-circuito, atendendo as expectativas iniciais deste trabalho de conclusão de curso.

5.1 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE DO TRABALHO

Futuros trabalhos de conclusão de curso podem ser sugeridos a partir deste, como se trata de uma primeira versão de *software*, esta é somente válida para o dimensionamento relacionado as solicitações advindas de curto-circuitos trifásicos em barramento coplanares de fases compostas por barra de cobre de perfil retangular e isoladores “bujão” ou fixos.

Assim o mesmo procedimento, salvas as suas diferenciações, pode ser implementado para o dimensionamento e verificação de painéis elétricos com perfis circulares, tubulares ou ainda do tipo “U” e do tipo “I”. Pode-se ainda expandir os cálculos de dimensionamento para disposição de barramentos não coplanares nos conjuntos de manobra e controle, as influências das derivações e conexões de barramentos secundários nos barramentos principais.

Outra implementação passível de ser realizada a partir desse trabalho é utilizar parte do embasamento teórico para proceder com os cálculos para o dimensionamento ou ainda verificação do dimensionamento de linhas de transmissão para subestações.

5.2 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Durante o desenvolvimento desse trabalho barreiras foram impostas e posteriormente transpostas para se chegar ao resultado final. Desde o início, no levantamento das referências bibliográficas, a relativa restrição do tema e do campo a que se destina esse trabalho dificultou a localização de literatura técnica especializada nesse assunto. O mesmo aconteceu na dificuldade de localização de corpo técnico especializado capaz de orientar e ainda direcionar o desenvolvimento do projeto.

A partir da conclusão do levantamento bibliográfico a questão do desenvolvimento do *software* mostrou possuir escalas ainda superiores de dificuldade em relação ao que já havíamos passado. A linguagem escolhida para desenvolver o programa foi o VBA, pois os integrantes da equipe já haviam tido contato com a linguagem e assim sugeria uma maior facilidade na programação. O que de fato não aconteceu, devido a complexidade e exigência do *software* proposto, o que nos levou a

aquisição de material bibliográfico para apoio na compreensão da linguagem e desenvolvimento do “Dimension”.

Vale salientar que apesar das dificuldades encontradas durante este trabalho, o espírito de equipe dos componentes e a integração com o orientador foi fundamental para se alcançar os objetivos propostos.

6 REFERÊNCIAS

BADRA, Antônio Ângelo. **Resistência mecânica de barramentos e curto-circuitos**. Revista Siemens II, São Paulo, 1982.

BEER, Pierre Ferdinand; JOHNSTON JR., E. Russel. **Resistência dos Materiais**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982.

COPPERMETAL AÇOS E METAIS. **Informações Técnicas do Cobre eletrolítico**. Disponível em:

<http://www.cimm.com.br/portal/catalogo/arquivo/215/infoteccopp_cobre_eletrolitico.pdf>.

Acesso em: 30 mar. 2013.

CREDER, Hélio, **Instalações Elétricas**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 13ª Edição, 1995.

DIB, Wanderley Mauro, **Projetos de Quadros de Baixa Tensão**, Informativo Técnico vol. XXII – Siemens, 1979.

ELEKTRO. **Fornecimento de Energia Elétrica a Edifícios de Uso Coletivo e Medição Agrupada**. Versão 02, ANEXO VIII, 2004.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

IEC 865-1, **Short-circuit currents – Calculations of effects**, 1993.

JÚNIOR, César. **Cobre e suas Ligas**. Disponível em:

<<http://www.eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/CesarCanata.pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

KINDERMANN, Geraldo. **Curto circuito**. 2. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.

LAVILL - **Painéis Elétricos e CCM's de Baixa Tensão**. p. 15. Disponível em:

<<http://www.lavill.com.br/catalogos/c2.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2013

NBR 6808, **Conjuntos de manobra e controle de baixa tensão montados em fábrica – CMF**, 1993.

_____. IEC 60050 – 826, **Vocabulário eletrotécnico internacional. Parte 426: Equipamentos para atmosferas explosivas**, 1997.

_____. IEC 60439-1, **Conjuntos de manobra e controle de baixa tensão - Parte 1: Conjuntos com ensaio de tipo totalmente testados (TTA) e conjuntos com ensaio de tipo parcialmente testados (PTTA)**, 2003.

Q E T EQUIPAMENTOS. **Capacidade de Corrente em Barramento de Cobre**. Disponível em: <<http://www.qtequipamentos.com.br/?sec=11&prod=226>>. Acesso em: 30 jun. 2013.

RITTAL. Disponível em: <http://www.rittal.com.br/> (2013). Acesso em: 01 mar. 2013.

SCHMELCHER, Theodor, **Manual de baixa tensão** vol. 2, 1988.

SCHMELCHER, Theodor, **Manual de baixa tensão** vol.1 - 2. Ed, 1990.

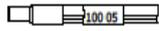
SCHNEIDER. Disponível em:http://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/tema2_efeitos.pdf. Acesso em: 21 abr 2012.

SIEMENS. **Guia do Eletricista**. Disponível em: www.siemens.com.br/templates. Acesso em: 21 abr 2012.

SILVA, João Freitas. **Condutores retilíneos e paralelos - regra da mão direita: Força atrativa e força repulsiva**. Disponível em:
<<http://educacao.uol.com.br/disciplinas/fisica/condutores-retilineos-e-paralelos---regra-da-mao-direita-forca-atrativa-e-forca-repulsiva.htm>>. Acesso em: 30 jan. 2013.

SUETA, HelioEijiet al., **Esforços mecânicos provenientes de correntes de curto-circuito em barramento de subestações**. Disponível em:
<<http://www.iee.usp.br/biblioteca/producao/2009/Trabalhos/suetaesforco.pdf>>. Acesso em: 21 abr 2012.

UL 94-V0, **Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Applications**, 1993.

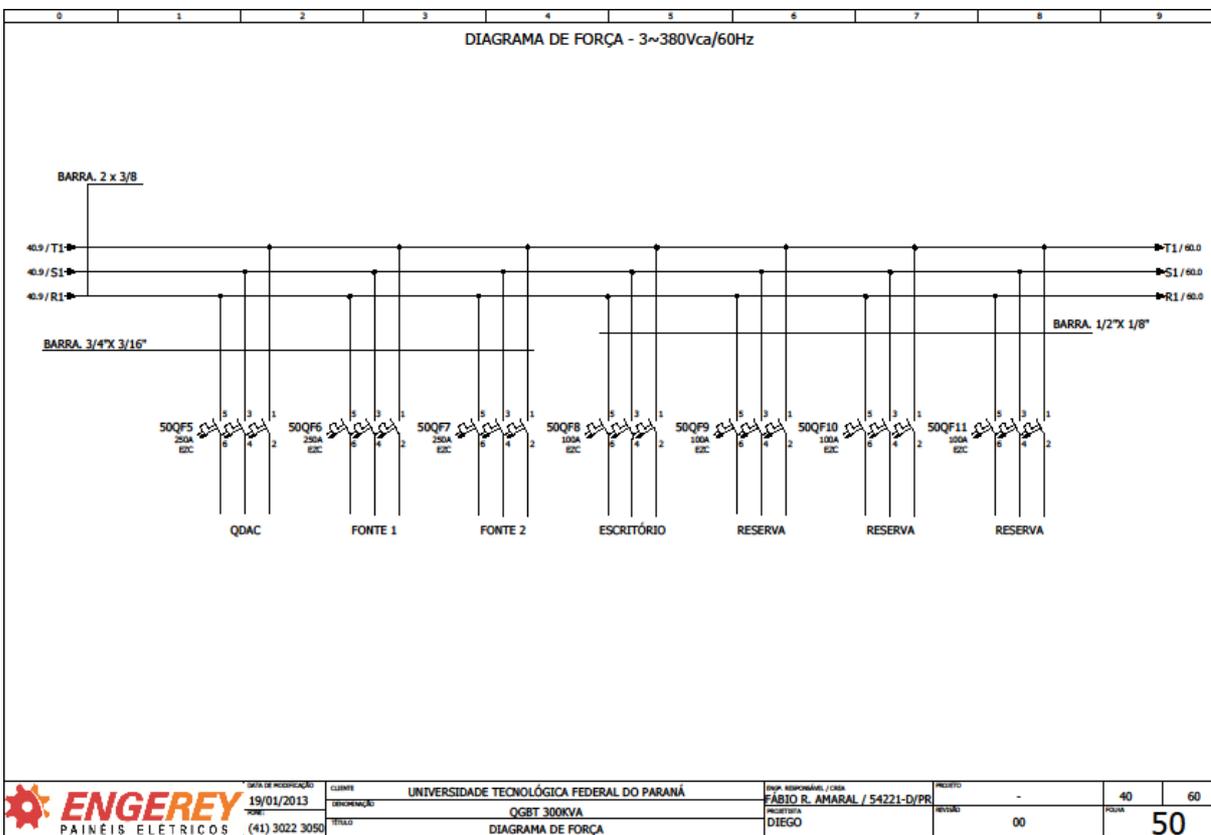
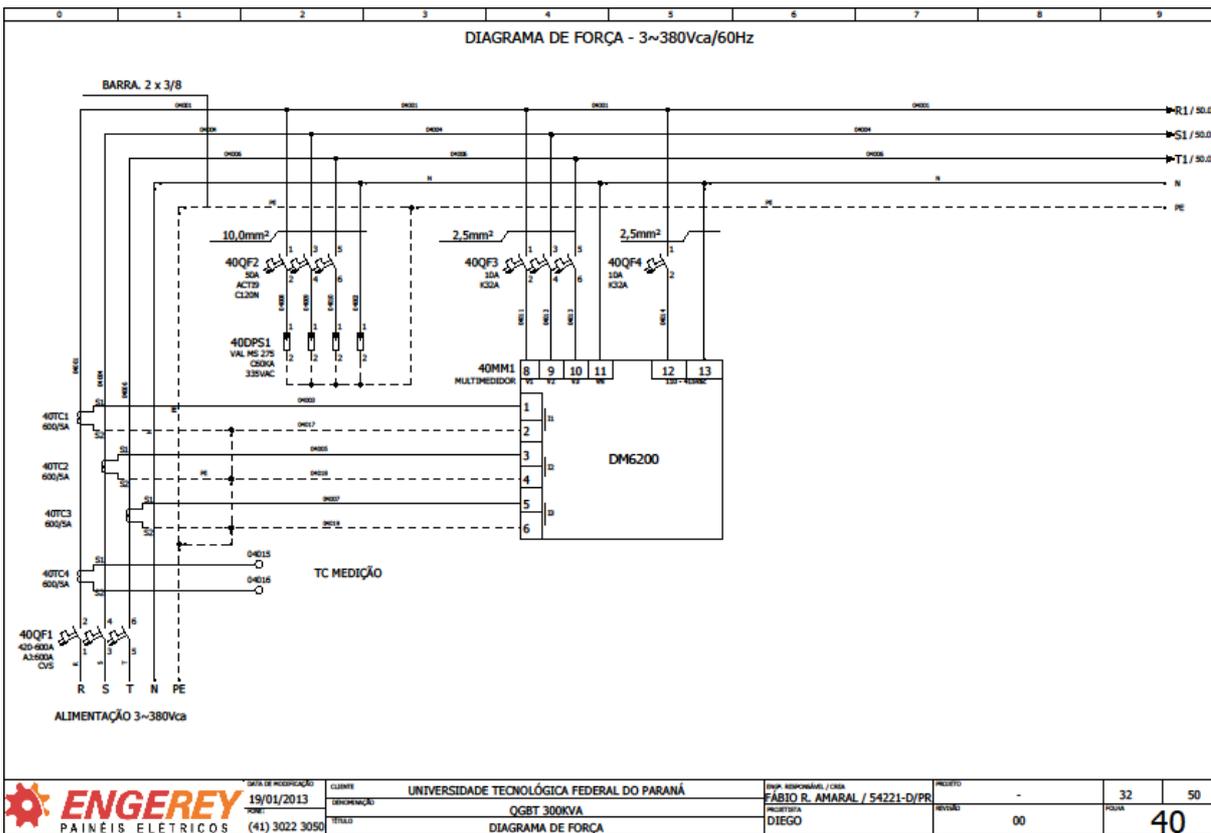
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9															
FOLHA DE DADOS PROJETO																								
Item 01 : Características Elétricas 1a - Tensão/Frequência : DIEGO 1b - Corrente da Proteção : 380 Vca / 60Hz 1c - Tensão Comando : 600 A			Item 04 : Características Construtivas do Painel 4a - Tipo de Painel : Fase S - Preta 4b - Cor Interna/Externa : Fase T - Preta 4c - Cor Placa de Montagem : Auto Portante 4d - Grau de Proteção (IP) : RAL 7032 4e - Espessura da Chapa do Painel : RAL 2004 4f - Tipo de Fecho : Cremona 4g - Entrada dos cabos : 4h - Saída dos Cabos : Inferior 4i - Espaço Reserva Físico : 4i - Espaço Reserva Polos : SIM SIM 4j - Segue tabela abaixo para painéis de distribuição em relação ao espaço reserva, segundo ABNT - NBR 5410 - 2004			Item 05 : Anilhamento de Cabos 6a - As numerações dos cabos elétricos devem obedecer a ordem de número da página e a sequência que cada cabo representa em sua página. 6b - Exemplo de anilhamento do cabo 10005 : Número 100 : Página 100 Número 05 : Sequência do cabo na Página.  6c - Anilhas plásticas de silicone com escrita preta.																		
Item 02 : Características do Barramento 2a - Tratamento : - 2b - Identificação : PRATEADO C/ TERMOCONTRATIL 2c - Cores do Barramento Vca : Fase R : NA Fase S : - Fase T : - Neutro : - Terra : - 2d - Cores do Barramento Vcc : Barramento ≥ 24Vcc : - Barramento < 24Vcc : -			Tabela 04 - Quantidade de Cabos - Espaço Reserva <table border="1"> <thead> <tr> <th>Quantidade de Cabos</th> <th>Reserva Física</th> <th>Reserva Polos</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>3</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>4</td> <td>4</td> </tr> </tbody> </table> Nota: A reserva física e polos deve ser calculada de acordo com a norma ABNT NBR 5410 - 2004.			Quantidade de Cabos	Reserva Física	Reserva Polos	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	Item 07 : Plaquetas Plaqueta Padrão : 00 Plaqueta de IDENTIFICAÇÃO : 7a - Cor : Branca 7b - Escrita : Preta 7c - Dimensões : 32x70mm  Plaqueta ATENÇÃO : 7d - Cor : Branca 7e - Escrita : Preta 7f - Dimensões : 50x80mm  Plaqueta PAINEL ENERGIZADO : 7g - Cor : Amarela 7h - Escrita : Preta 7i - Dimensões : 50x50mm  Plaqueta ADVERTÊNCIA : 7j - Cor : Branca 7l - Escrita : Preta 7m - Dimensões : 70x140mm  Identificação circuito, botões e lâmpadas : 7n - Cor : Preta 7o - Escrita : Branca 7p - Dimensões : 18x27mm  TAG Quadros : 7q - Cor : Preta 7r - Escrita : Branca 7s - Dimensões : 30x60mm 			
Quantidade de Cabos	Reserva Física	Reserva Polos																						
1	1	1																						
2	2	2																						
3	3	3																						
4	4	4																						
Item 03 : Características do Cabeamento 3a - Cores dos Cabos de Comando : Cabos C.A : - Cabos C.A Neutro : Vermelha Cabos Positivos : Azul Claro Cabos Negativos : - Cabos Amperímetro : Branca 3b - Cores dos Cabos de Força : Fase R :- Fase S :- Fase T : Fase R - Preta 3c - Bitolas Mínimas : Circuito de Força : 2,5mm ² Circuito de Comando : 0,75mm ²			5a - Iluminação Interna : Sim(acrílico) 5b - Ventilação Forçada : Não 5c - Tomada de Serviço : Sim(porta) 5d - Termostato : Não 5e - Resistência Interna : Não 5f - Dihal de Içamento : Não 5g - Base Soleira : Não 5h - Pedestal : Não 5i - Flange : SIM 5j - Assaolho : SIM 5l - Porta Documento : Não 5m - Contra porta : Não 5n - Bloqueio de porta : SIM 5o - Acrílico / policarbonato : SIM																					
<table border="1"> <tr> <td rowspan="2">  ENGEREY PAINÉIS ELÉTRICOS </td> <td>DATA DE REGISTRO: 19/01/2013</td> <td>CLIENTE: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ</td> <td>DEPT. RESPONSÁVEL / CREA: FÁBIO R. AMARAL / 54221-D/PR</td> <td>PROJETO: -</td> <td>20</td> <td>31</td> </tr> <tr> <td>PROJETO: (41) 3022 3050</td> <td>TÍTULO: OGBT 300KVA</td> <td>PROJETISTA: DIEGO</td> <td>REVISÃO: 00</td> <td colspan="2"> 30 </td> </tr> </table>										 ENGEREY PAINÉIS ELÉTRICOS	DATA DE REGISTRO: 19/01/2013	CLIENTE: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ	DEPT. RESPONSÁVEL / CREA: FÁBIO R. AMARAL / 54221-D/PR	PROJETO: -	20	31	PROJETO: (41) 3022 3050	TÍTULO: OGBT 300KVA	PROJETISTA: DIEGO	REVISÃO: 00	30			
 ENGEREY PAINÉIS ELÉTRICOS	DATA DE REGISTRO: 19/01/2013	CLIENTE: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ	DEPT. RESPONSÁVEL / CREA: FÁBIO R. AMARAL / 54221-D/PR	PROJETO: -	20	31																		
	PROJETO: (41) 3022 3050	TÍTULO: OGBT 300KVA	PROJETISTA: DIEGO	REVISÃO: 00	30																			

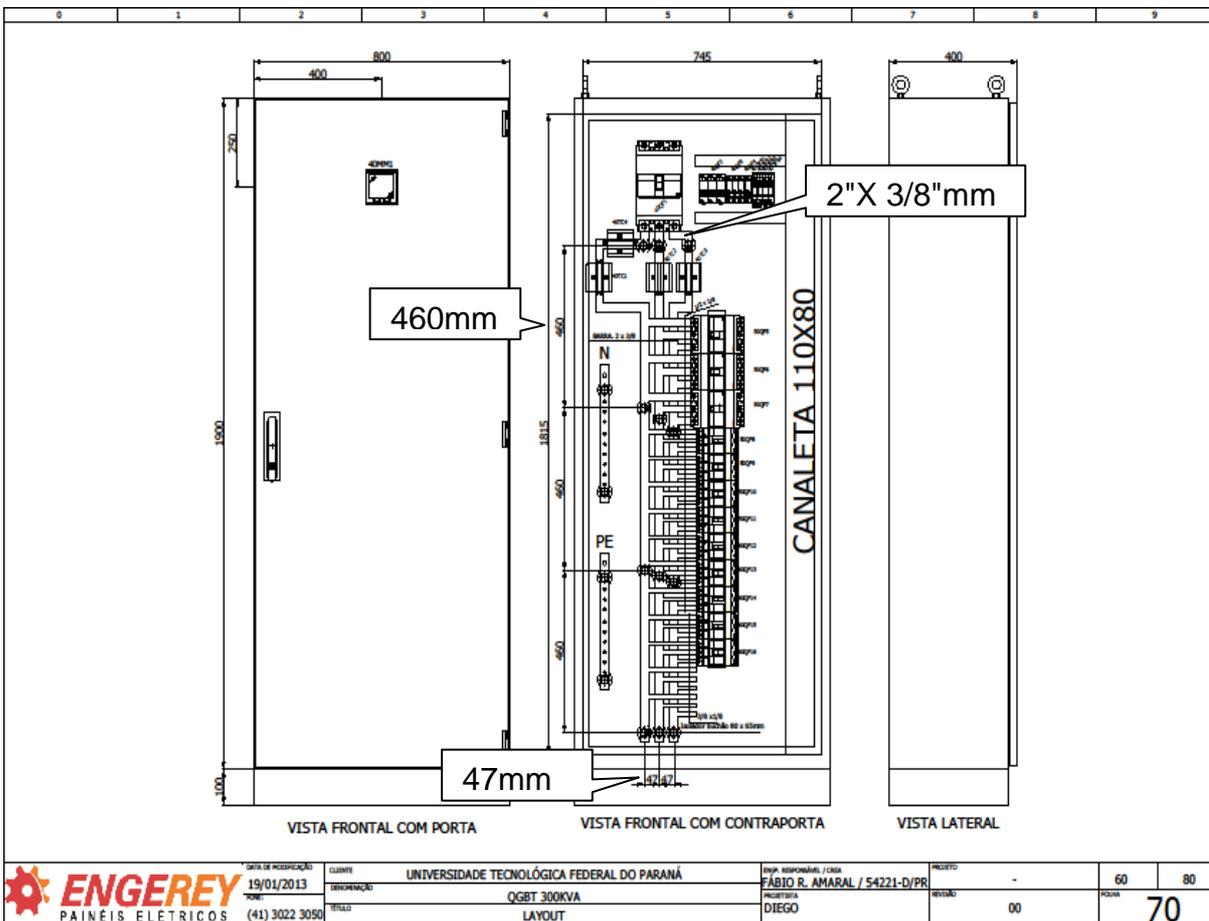
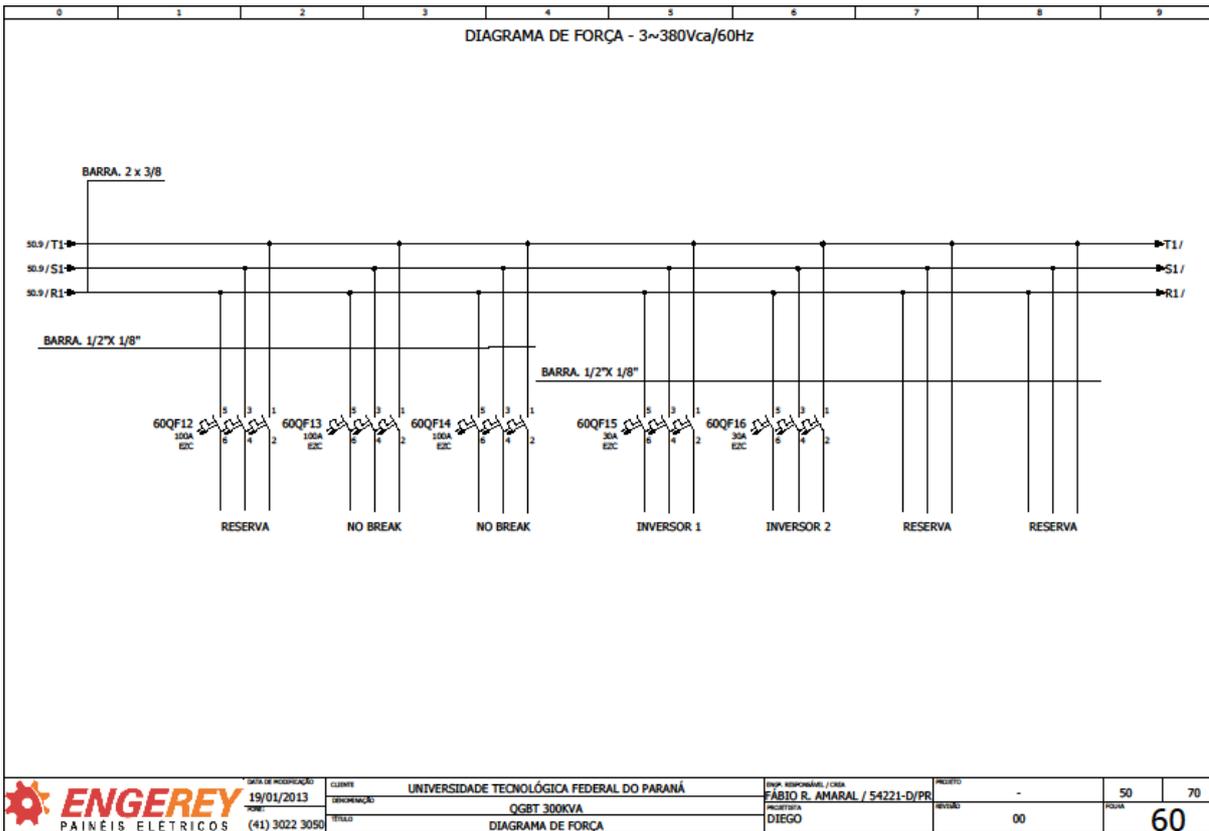
SIMBOLOGIA PADRÃO ENGEREY											
ITEM	NOMENCLATURA	DESCRIÇÃO DOS ITENS	SIMBOLOGIA	ITEM	NOMENCLATURA	DESCRIÇÃO DOS ITENS	SIMBOLOGIA	ITEM	NOMENCLATURA	DESCRIÇÃO DOS ITENS	SIMBOLOGIA
01	QF	DISJUNTOR		13	CS	SELETORA 2 POSIÇÕES FIXA		25	IH	INTERRUPTOR HORÁRIO	
02	DR	DISPOSITIVO DR		14	CS	SELETORA 3 POSIÇÕES FIXA		26	FTE	FORNE	
03	ILUM	ILUMINAÇÃO PARA PAINEL		15	S	BOTÃO DE IMPULSO		27	XTM	TOMADA	
04	Q	DISJUNTOR MOTOR		16	K	BOBINA CONTADOR DE FORÇA		28	T	TRANSFORMADOR MONOFÁSICO	
05	A	AMPERÍMETRO		17	KA	BOBINA CONTADOR AUXILIAR		29	SQ	SENSOR	
06	V	VOLTÍMETRO		18	K	CONTATO DE FORÇA		30	X	BORNE	
07	DPS	DISPOSITIVO PROTETOR DE SURTO		19	Y	VÁLVULA SOLENÓIDE		31	XF	BORNE FUSÍVEL	
08	SCC	CHAVE SECCIONADORA		20	PT	POTENCIÔMETRO		32	SQ	FIM DE CURSO	
09	SCC	CHAVE SECCIONADORA COM FUSÍVEL		21	KT	RELÉ DE TEMPO		33	SP	PRESSOSTATO	
10	F	FUSÍVEL		22	TC	TRANSFORMADOR DE CORRENTE		34	VT	VENTILADOR	
11	FT	RELÉ TÉRMICO		23	H	LÂMPADA SINALIZAÇÃO		35	M	MOTOR TRIFÁSICO	
12	S	BOTÃO DE EMERGÊNCIA		24	HS	SINALIZAÇÃO SONORA		36	KFF	RELÉ FALTA DE FASE	

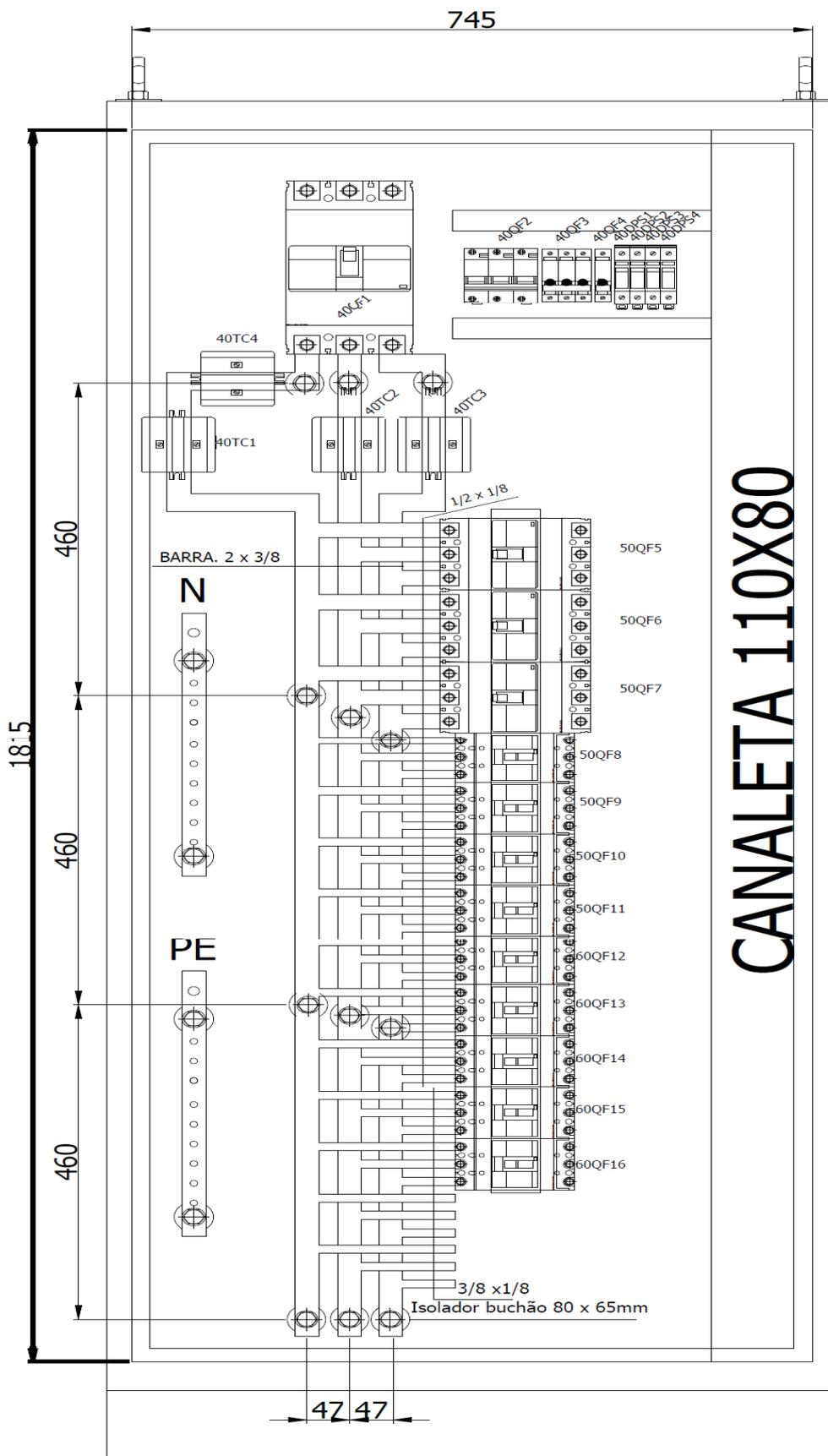
	DATA DE MODIFICAÇÃO	CLIENTE	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ	DEPT. RESPONSÁVEL / CREA	PROJETO	-	30	32
	19/01/2013	INDICAÇÃO	OGBT 300KVA	FÁBIO R. AMARAL / 54221-D/PR	REVISÃO	00	31	32
PAINÉIS ELÉTRICOS (41) 3022 3050		TÍTULO	SIMBOLOGIA	REVISOR	DIEGO			31

Instruções de montagem					
1- Uso de EPTS; 2- Verificar dimensões do quadro de acordo com Layout; 3- Verificar dimensões da placa de montagem de acordo com o Layout; 4- Verificar se os componentes do Layout existem no projeto; 5- Distribuir os componentes na placa de montagem conforme Layout; 6- Verificar as notas existentes no projeto antes de iniciar a fiação observando os padrões de montagem.					
Check list montagem					
Descrição	Observação	Descrição	Observação	Descrição	Observação
01 Anilhas.		06 Mecânica (Layout).			
02 Identificação dos componentes e do quadro.		07 Organização.			
03 Limpeza do painel.		08 Régua de bornes.			
04 Material de devolução da OM.		09 Ligações dos componentes.			
05 Material sobressalente ao quadro.		10 Caixa de papelão.			
Data de Início/Término da Obra: ___/___/___ à ___/___/___ Ass. montador: _____ Ass. Coordenador Montagem: _____					
Controle de revisão					
Rev.	Descrição	Data	Rev.	Descrição	Data
01			04		
02			05		
03			06		

	DATA DE MODIFICAÇÃO	CLIENTE	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ	DEPT. RESPONSÁVEL / CREA	PROJETO	-	31	40
	19/01/2013	INDICAÇÃO	OGBT 300KVA	FÁBIO R. AMARAL / 54221-D/PR	REVISÃO	00	31	40
PAINÉIS ELÉTRICOS (41) 3022 3050		TÍTULO	INSTRUÇÕES DE MONTAGEM	REVISOR	DIEGO			32







VISTA FRONTAL COM CONTRAPORTA

VISAO AMPLIADA DO PROJETO QGBT 300KVA

