

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Cálculo de Barramentos em Subestações

Hélder Jorge Duarte Faria

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Doutor. António Machado e Moura

Junho de 2009

Resumo

O dimensionamento de barramentos em condutores rígidos para subestações é um procedimento que, para além assumir contornos de alguma complexidade, é também bastante moroso e trabalhoso. É um processo que implica a execução de numerosos cálculos, e a consulta de várias tabelas e ábacos, no sentido de verificar a adequação do barramento para a subestação em causa.

Surge então a necessidade de desenvolver uma aplicação informática, que agregue toda a informação necessária ao dimensionamento de barramentos e capaz de usar essa informação em conjunto com os dados relativos à subestação, para executar os cálculos de dimensionamento necessários, poupando assim tempo e trabalho ao seu utilizador. Neste documento está descrito o processo de elaboração de um programa com essas características.

Abstract

The process of dimensioning buses for substations is not only, a complex procedure, but it is also a very laborious and long one. It's a procedure that implies numerous calculations, and looking up values in tables and abacus, in order to verify if the bus is suitable for the substation.

So, here lies the need for a computer application that of gathers all the information needed for dimensioning buses and capable of using that information and the data from de substation, to carry out the necessary calculations for dimensioning the buses, saving time and work to the user.

In this paper it is described the process of the elaboration of a computer program with those features.

Agradecimentos

Ao Prof. Doutor António Machado e Moura que me deu a oportunidade de realizar este trabalho que em muito contribuiu para o meu crescimento profissional e académico.

Índice

Lista de figuras.....	xi
Lista de tabelas	xiii
Abreviaturas e Símbolos.....	xv
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 Descrição e Enquadramento do Problema.....	1
1.2 Estado da Arte.....	2
1.3 Objectivos.....	2
1.4 Estrutura	3
Capítulo 2	5
O Uso de Condutores Rígidos	5
Capítulo 3	9
Método de Cálculo	9
3.1 Descrição do Método	9
3.1.1 Dados da Rede Eléctrica e da Subestação	10
3.1.2 Condição de Aquecimento	13
3.1.3 Resistência Mecânica ao Curto-Circuito.....	13
3.1.4 Esforços Térmicos devidos ao Curto-Circuito	15
3.1.5 Condição de Ressonância	18
3.1.6 Considerações sobre o algoritmos de cálculo	21
3.2 Resumo das Grandezas em Jogo	23
3.3 Considerações sobre Curto-Circuitos / Rede Eléctrica.....	25
3.4 Considerações sobre Subestações.....	27
3.5 Exemplo de um Cálculo Manual	28
Capítulo 4	33
Base de Dados	33
4.1 Materiais Constituintes dos Perfis	34
4.2 Forma dos Perfis	34
4.3 Perfis Pintados/Nus	36
4.4 Parâmetros Necessários ao Cálculo.....	36
4.4.1 Massa Volúmica do material.....	37
4.4.2 Limite de Elasticidade (Módulo de Young).....	37

4.4.3 Secção.....	38
4.4.4 Módulo de Flexão	38
4.4.5 Momento de Inércia.....	38
4.4.6 Peso Linear	38
4.4.7 Factor K.....	39
Capítulo 5	41
Programa Informático.....	41
5.1 Funcionamento do Programa	42
5.1.1 Consulta da Base de Dados	42
5.1.2 Novo Item na Base de dados	43
5.1.3 Dimensionamento de barramentos.....	43
5.1.4 Apresentação de resultados ao utilizador	47
5.1.5 Software Escolhido.....	47
5.1.6 Programação	47
5.1.7 Interface com o Utilizador	48
Capítulo 6	51
Estudo de Caso	51
6.1 Exemplo de Cálculo Automático	51
6.1.1 Dados do problema	51
6.1.2 Análise de Resultados	53
Capítulo 7	55
Conclusões	55
Referências	59
ANEXO 1	61
ANEXO 2.....	62
ANEXO 3.....	63
ANEXO 4.....	64
ANEXO 5.....	65

Lista de figuras

Figura 2.1 - Condutores rígidos numa subestação	6
Figura 2.2- Condutores rígidos numa subestação	7
Figura 3.1 - Troço de uma subestação visto em corte	11
Figura 3.2 - Troço de uma subestação visto de cima	12
Figura 3.3 - Ábacos BBC 736966 (Retirado do MIEBBC)	17
Figura 3.4 - Algoritmo de cálculo de um barramento	22
Figura 3.5 - Corrente resultante de um curto-circuito longe dos alternadores (retirado do MIEBBC)	25
Figura 3.6 - Ábaco BBC 70668 (Retirado do MIEBBC)	26
Figura 3.7 - Implantação de uma pequena subestação	28
Figura 4.1 - Dimensões de um perfil tubular.....	35
Figura 5.1 - Formulário de pesquisa na base de dados.....	43
Figura 5.2 - Algoritmo de funcionamento do programa no modo de cálculo.....	45
Figura 5.3 - Algoritmos de funcionamento do programa no modo de Cálculo-Teste	46
Figura 5.4 - Exemplo de um formulário.....	48
Figura 5.5 - Formulário inicial do programa	49
Figura 5.6 - Formulário de consulta da base de dados	49
Figura 5.7 - Formulário de introdução de novo item	50
Figura 5.8 - Formulário de introdução de dados iniciais.....	50
Figura 6.1 - Introdução dos dados do problema no programa	52
Figura 6.2 - Seleccionar o tubo 40x28mm para teste	54

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Dados iniciais	10
Tabela 3.2 - Factor K.....	16
Tabela 3.3 - Limite de elasticidade (Módulo de Young)	18
Tabela 3.4 - Grandezas em jogo nos dados iniciais.....	23
Tabela 3.5 - Grandezas em jogo na condição de aquecimento.....	23
Tabela 3.6 - Grandezas em jogo no cálculo da resistência mecânica ao curto-circuito	24
Tabela 3.7 - Grandezas em jogo no cálculo dos esforços térmicos devidos ao curto-circuito .	24
Tabela 3.8 - Grandezas em jogo na condição de ressonância	24
Tabela 3.9 - Dados do problema	29
Tabela 4.1 - Perfis disponíveis no mercado	35
Tabela 4.2 - Massa volúmica dos materiais.....	37
Tabela 4.3 - Limite de elasticidade (Módulo de Young)	38
Tabela 5.1 - Secção e peso linear de dois perfis diferentes	41
Tabela 6.1 - Dados do problema	52
Tabela 6.2 - Características dos tubos dimensionados	53

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (Ordenadas por ordem alfabética)

AT	Alta tensão
MAT	Muito alta tensão
MIEBBC	Manual de Instalações Eléctricas da BBC BROWN BOVERI
MT	Média tensão

Capítulo 1

Introdução

1.1 Descrição e Enquadramento do Problema

Neste momento o autor encontra-se a trabalhar, como engenheiro electrotécnico, numa empresa dedicada às subestações. No desenvolvimento dessa função surgem alguns procedimentos que, embora não sendo completamente lineares, são morosos e acima de tudo trabalhosos, devido à quantidade de cálculos e consultas de ábacos e tabelas que exigem.

Um desses processos é o dimensionamento dos condutores rígidos que irão equipar a subestação, os chamados barramentos. Este processo, além de ser trabalhoso, pode ter que ser repetido para vários pontos da subestação, por não se saber, logo à partida, qual é o pior caso.

Como resposta a esse problema, o autor propõe-se desenvolver uma aplicação informática que possibilite ao utilizador efectuar o dimensionamento dos barramentos bastando para isso introduzir os dados correspondentes à instalação em questão e tendo apenas que actuar em situações de decisão que possam advir dos cálculos, e poupando assim tempo e trabalho.

Existe também o problema da “compatibilidade” entre o barramento calculado matematicamente, e aqueles que são disponibilizados pelos fornecedores em determinada altura. Assim sendo, outra das funcionalidades deste programa será a possibilidade de acrescentar novos itens à base de dados já existente, bem como a possibilidade de verificar a viabilidade de um barramento de uma determinada secção.

Sendo o projecto desenvolvido numa linha de pensamento empresarial, é importante que este permita, além de poupar tempo e trabalho, obter soluções o mais economicamente favoráveis que seja possível. Tudo isto obriga a que o algoritmo desenvolvido “procure” o barramento mais leve (logo mais barato) e que seja eléctrica e mecanicamente viável, ao invés de “procurar” o de menores dimensões.

Existe ainda outro problema: na memória descritiva referente à subestação em projecto, é necessária a apresentação da justificação e cálculos relativos aos elementos utilizados na mesma. Sendo assim, mesmo tendo um programa que dimensione o barramento, é depois necessário apresentar os cálculos justificativos da escolha desse mesmo barramento. Esta é mais uma das necessidades que a aplicação irá suprimir, no sentido que, após o dimensionamento, apresentará os cálculos que justificam a escolha do barramento em questão.

1.2 Estado da Arte

Existem actualmente programas informáticos que efectuem os procedimentos que o autor aqui se propõe a implementar. Porém os programas disponíveis neste momento na empresa em questão, tem apenas como objectivo, encontrar o barramento de menores dimensões, e não o mais barato. Além disso, sendo já programas antigos, possuem uma base de dados escassa e desactualizada, o que aliado à impossibilidade de introduzir novos itens, limita e muito a eficácia do dimensionamento de algo tão importante, utilizando os referidos programas.

As alternativas a estes programas já desactualizados são alternativas pagas, e sendo aplicações técnicas o seu preço é relativamente elevado. Além disso não disponibilizam a opção de apresentação dos resultados sob a forma de cálculos efectuados manualmente.

1.3 Objectivos

Os objectivos deste trabalho centram-se em desenvolver uma ferramenta computacional capaz de albergar informação vasta e actualizável, relativa aos barramentos disponíveis no mercado e capaz de a utilizar, em conjunto com os dados fornecidos pelo utilizador, para efectuar o dimensionamento de barramentos para subestações. Esta ferramenta deve colmatar as lacunas evidenciadas pelos programas actualmente ao dispor da empresa, e que se prendem mormente com:

- Escassez de informação nas bases de dados e a impossibilidade de a actualizar;
- Dimensionamento dos barramentos tendo em vista as suas dimensões e não a vertente económica;
- Modo de apresentação de resultados que obriga o utilizador a efectuar e confirmar os cálculos manualmente para que assim os possa apresentar na memória descritiva, pois estes não são apresentados automaticamente.

1.4 Estrutura

Este documento está dividido em oito capítulos. O presente capítulo, destina-se a fazer uma introdução aos problemas que serão discutidos a explicar o porquê deste projecto.

No Capítulo 2 é feita uma pequena introdução teórica sobre as subestações e o porquê que se usarem barramentos em condutores rígidos nas mesmas.

No Capítulo 3 é descrito o método utilizado para dimensionar os barramentos bem como as grandezas em jogo.

No Capítulo 4 é analisada a elaboração da base de dados do programa e seu funcionamento.

No Capítulo 5 é descrito todo o funcionamento do programa, a sua integração com a base de dados e interface com o utilizador.

No Capítulo 6 é feito um estudo de caso, onde utilizando um exemplo já anteriormente calculado no Capítulo 3, se utiliza agora o programa para efectuar o mesmo dimensionamento.

Finalmente o Capítulo 7 elabora um resumo dos objectivos do projecto e da sua pertinência, e descreve as conclusões retiradas da elaboração do mesmo.

Capítulo 2

O Uso de Condutores Rígidos

Este capítulo tem por finalidade esclarecer o conceito de barramento, e o porquê da sua utilização em subestações.

A energia eléctrica é transportada em Alta Tensão (AT) ou Muito Alta Tensão (MAT) até às subestações através de linhas aéreas de condutores nus, sendo a sua ligação feita directamente através de um pórtico de recepção presente na subestação, ou em alternativa através de cabos isolados. A partir daqui, a função de uma subestação é, grosso modo, converter a energia com níveis de tensão altos em energia com níveis de tensão mais baixos, por exemplo AT em MT (média tensão). O elemento da subestação que leva a cabo esta “tarefa”, e que pode ser entendido como o coração da subestação, é o transformador de potência, que recebe no seu primário a energia em AT (por exemplo) e no secundário debita a mesma energia mas com níveis de tensão mais baixos (MT). Porém, para que este processo se possa efectuar em segurança, a rede de AT ou MAT não pode ser directamente ligada ao transformador de potência. Primeiro tem que passar por uma panóplia de outros equipamentos, como seccionadores, disjuntores, transformadores de intensidade, transformadores de tensão, descarregadores de sobretensões (DST's), que garantem a protecção da instalação no caso de ocorrer algum defeito que possa colocar em causa a integridade da mesma.

Sendo assim, entre a chegada da energia à subestação e a sua chegada ao transformador de potência, passando pela diversa aparelhagem de protecção e medida acima mencionada, surge a necessidade de encontrar um meio que possa servir de ligação entre as diversas partes. Existem seguintes alternativas:

- ◆ Cabo isolado;
- ◆ Condutores nus;
 - Flexíveis;
 - Rígidos.

A alternativa de cabo isolado fica fora de questão logo à partida, devido ao seu elevado custo.

No que diz respeito a ligações feitas em condutores nus flexíveis, que quando efectuadas em subestações tem a designação de barramentos apoiados, são muitas vezes utilizadas principalmente nas subestações de grandes dimensões. Possuem no entanto alguns pontos negativos. Sendo constituídos por material maleável, estarão mais sujeitos a esforços electrodinâmicos e mesmo a oscilações provenientes do vento ou chuva o que fará com que seja necessário aumentar a distância entre fases de modo a garantir a segurança. Isto pode ser um problema complicado em situações onde o espaço destinado à subestação é limitado, situação que ocorre diversas vezes no que toca a subestações particulares (indústria por exemplo). A distância ao solo é outro ponto a ter em atenção quando se utilizam barramentos apoiados, devido às flechas. Além do já referido problema do espaço, este aumento de distâncias acarreta outras consequências: sendo os barramentos apoiados suportados por estruturas metálicas, o aumento da distância, quer entre fases quer ao solo, irá implicar o fabrico de estruturas metálicas de maiores dimensões, o que é obviamente mais caro. Por outro lado, tratando-se de subestações de grandes dimensões, estes condutores são em certos casos mais vantajosos, pois para situações em que são necessárias ligações que cubram “grandes” distâncias, a utilização de barramentos apoiados irá proporcionar o uso de um menor número de estruturas metálicas.

Restam então os condutores nus rígidos, que são baratos e não apresentam as limitações dos condutores nus flexíveis. São basicamente perfis fabricados em material condutor, podendo tomar várias formas, mas sendo o perfil tubular o utilizado nas subestações. Na Figura 2.1 e Figura 2.2 apresentam-se alguns exemplos de ligações feitas em condutores rígidos (tubo).



Figura 2.1 - Condutores rígidos numa subestação



Figura 2.2- Condutores rígidos numa subestação

Na Figura 2.2 é possível ver também barramentos apoiados, e verificar que as estruturas metálicas que os suportam são efectivamente de dimensão bastante maior que aquelas que suportam os condutores rígidos, e que podem ser vistas tanto na Figura 2.1 como na Figura 2.2.

Apesar das vantagens já referidas, o emprego de barramentos em condutores rígidos nas subestações não é tão simples como possa parecer. De modo a definir quais as dimensões dos perfis a utilizar, não basta consultar as suas características e garantir que este é adequado às tensões e correntes em jogo, como se de um cabo isolado se tratasse. É necessário um cálculo bastante complexo, no sentido de garantir um perfil adequado à subestação em causa. Porém esse aspecto faz parte do âmbito do capítulo seguinte e será discutido adiante.

Finalmente importa ainda referir que o uso do termo *Barramento*, como já aqui foi utilizado, é em certos casos um excesso de linguagem. O barramento propriamente dito é o conjunto de condutores (3 fases) que transportam a energia através da instalação. Porém entenda-se que *barramento* poderá significar apenas uma das fases, dependendo do contexto. Isto devido ao facto de que para dimensionar os perfis a serem utilizados no barramento, basta dimensionar um dos condutores (uma das fases) e os outros serão iguais.

Capítulo 3

Método de Cálculo

3.1 Descrição do Método

O método de dimensionamento de barramentos adoptado é o método sugerido na disciplina de “Distribuição de Energia I”- LEEC - 2006, sendo este retirado do “Manual de Instalações Eléctricas” da BBC - BROWN BOVERI [1], estando este por sua vez de acordo com a norma CEI865-1 [2], com algumas simplificações.

Para melhor se perceber o método, este pode ser dividido, após a definição inicial dos dados da instalação e da rede eléctrica, em quatro passos, que consistem na verificação de que um determinado barramento escolhido, é adequado ou não a uma determinada instalação eléctrica (subestação neste caso):

1. Em função da condição de aquecimento em regime permanente;
2. Em função da resistência mecânica ao curto-circuito;
3. Em função dos esforços térmicos devidos ao curto-circuito;
4. Em função da condição de ressonância.

O passo 1 é a simples verificação de que o barramento escolhido pode veicular, em regime permanente, a corrente de serviço da instalação.

Os passos 2, 3 e 4 são cálculos efectuados no sentido de verificar se o barramento pode suportar uma situação de curto-circuito sem comprometer a sua integridade.

Em seguida cada uma das fases do cálculo é explicada em detalhe.

3.1.1 Dados da Rede Eléctrica e da Subestação

Para que se possa iniciar o procedimento relativo ao dimensionamento do barramento, é necessário, como é óbvio, definir as características tanto da subestação em causa como da rede eléctrica.

Os dados necessários ao cálculo, e que devem portanto ser conhecidos *a priori*, pois não dependem do perfil escolhido, são enumerados na Tabela 3.1 e explicados adiante.

Tabela 3.1 - Dados iniciais

DADOS INICIAIS		
Grandeza	Símbolo	Unidades
Corrente de serviço	I_s	A
Corrente de curto-circuito	I_{cc}	A ou kA
Frequência	f	Hz
Factor χ (qui)	χ	[adimensional]
Factor I_{cc}''/I_p	I_{cc}''/I_p	[adimensional]
Distância entre apoios	l	m ou cm
Distância entre fases	a	m ou cm
Tempo de actuação das protecções	t	s
Material do barramento	[-]	[adimensional]
Carga de segurança à flexão	σ	kgf/cm ² ou N/mm ²
Módulo de elasticidade	E	kgf/cm ² ou N/mm ²

Corrente de serviço: é a máxima corrente que o barramento terá que transportar em regime permanente.

Corrente de curto-circuito: trata-se do valor eficaz da corrente que o barramento terá que suportar em caso de curto-circuito. Este valor é calculado tendo em vista as impedâncias de curto-circuito tanto da rede como da subestação.

Frequência: é a frequência eléctrica da instalação/rede. Normalmente 50Hz.

Factor χ : é um parâmetro da rede eléctrica. Um factor que traduz o decréscimo da componente contínua da corrente de curto-circuito. Mais adiante, na secção 2.3, são feitas mais considerações sobre este parâmetro.

Factor I_{cc}''/I_p : Este factor é também um parâmetro da rede, mais concretamente a razão entre a componente inicial da corrente de curto-circuito - I_{cc}'' e o valor eficaz da

corrente permanente de curto-circuito - I_p . I_{cc}''/I_p pode ser entendido como um factor análogo a χ , mas que por sua vez, quantifica o decréscimo da componente alternada da corrente de curto-circuito. Também relativamente a este item serão feitas considerações futuras mais adiante no documento.

Distância entre apoios: distância entre dois apoios consecutivos que suportem o barramento. Na Figura 3.1 pode ver-se a distância entre dois apoios consecutivos no desenho da implantação de parte de uma subestação.

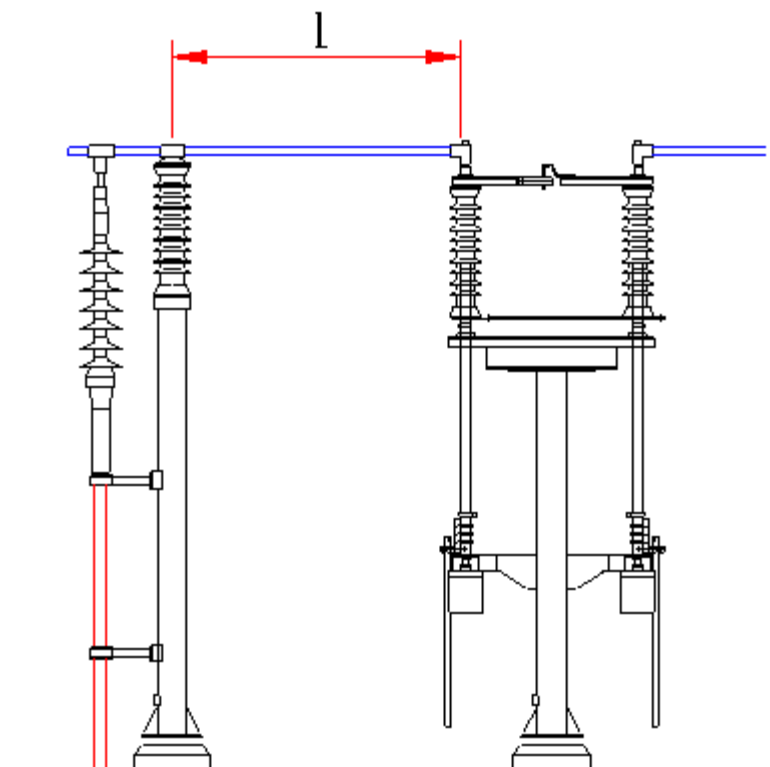


Figura 3.1 - Troço de uma subestação visto em corte

Distância entre fases: distância entre dois perfis de fases distintas. Na Figura 3.2 está representado o mesmo “troço” de subestação que na Figura 3.1, mas visto de cima, de modo a que se possa observar aquilo que é a distância entre fases.

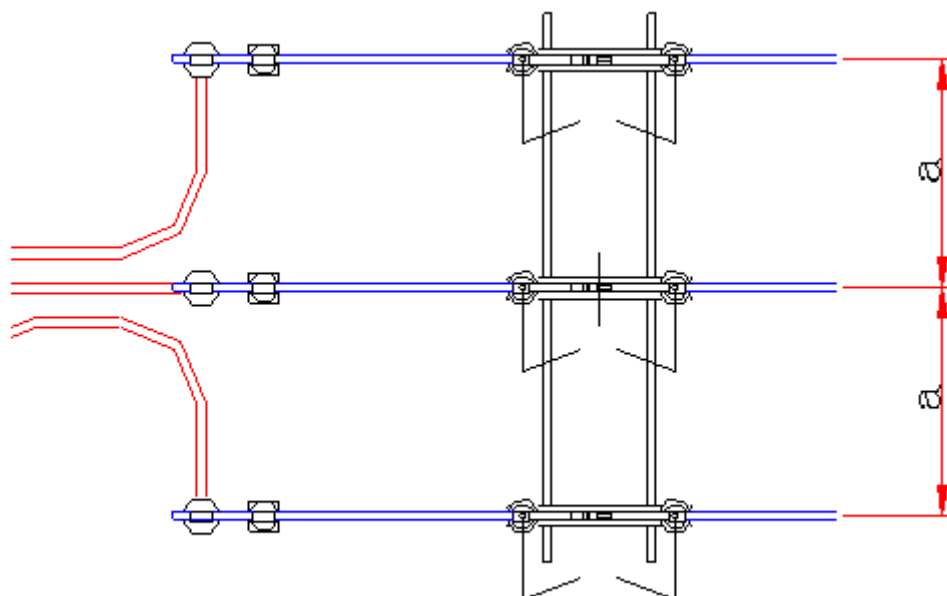


Figura 3.2 - Troço de uma subestação visto de cima

Tempo de actuação das protecções - t - tempo que as protecções da subestação demoram a actuar em caso de defeito, extinguindo-o. Este tempo vai desde que ocorre o defeito até que os transformadores de intensidade detectam uma corrente de curto-circuito, “enviam” essa informação para os relés de protecção da subestação, estes por sua vez enviam a ordem de abertura ao disjuntor, e por fim o disjuntor abre extinguindo o curto-circuito.

Material: Material escolhido para utilizar no barramento.

Carga de segurança à flexão: ou *resistência até ao ponto limite de elasticidade* é uma grandeza associada ao material escolhido para utilizar no barramento, que caracteriza o esforço de torção que determinado material pode suportar. Embora esteja associada ao material usado, este parâmetro não é fixo para um dado material, pois depende da dureza do mesmo, isto é, se se pretender dimensionar um barramento em cobre, por exemplo, este pode ser de cobre duro ou cobre macio, e possuirão cargas de segurança à flexão diferentes. Como tal é necessário definir este parâmetro antes do cálculo. Alguns valores da carga de segurança à flexão podem ser consultados na Tabela 6-30 do MIEBBC [3].

Uma vez definidos estes parâmetros, inicia-se o cálculo propriamente dito.

3.1.2 Condição de Aquecimento

A verificação da condição de aquecimento é feita através da simples comparação entre a corrente de serviço da instalação em questão, e a corrente máxima admissível pelo barramento escolhido. A corrente máxima admissível no barramento pode ser encontrada através da consulta das tabelas presentes no MIEBBC, como por exemplo a tabela 6-35 [4] do mesmo, presente neste documento no ANEXO 1, bem como através dos dados facultados pelos fornecedores.

Estes dados estão presentes na base de dados do programa, que os consulta automaticamente e verifica a sua viabilidade.

Neste ponto começa-se por escolher um barramento, dos disponíveis, que seja adequado à corrente da instalação em regime permanente, e prossegue-se para o passo seguinte.

3.1.3 Resistência Mecânica ao Curto-Circuito

Seguidamente procede-se à verificação de que o barramento escolhido consegue suportar os esforços electrodinâmicos a que poderá ser sujeito em caso de curto-circuito.

Para isso começa-se por calcular a *corrente de choque* - I_{ch} , que é a máxima corrente que o barramento terá que suportar em caso de curto-circuito. É portanto o valor máximo instantâneo da corrente de curto-circuito, e que ocorre na sua fase inicial. É aquando da ocorrência deste pico de corrente que o barramento será sujeito a um maior esforço electrodinâmico.

O cálculo de I_{ch} advém da expressão seguinte [5]:

$$I_{ch} = \chi \times \sqrt{2} \times I_{cc''} \quad (2.1)$$

Onde:

- I_{ch} - corrente de choque (A ou kA)
- χ - factor adimensional que traduz o decréscimo da componente contínua da corrente de curto-circuito;
- $I_{cc''}$ - Corrente de curto-circuito inicial (A ou kA)

Seguidamente calcula-se a *força electromagnética* - Fe exercida entre os perfis, percorridos pela corrente de choque aquando da ocorrência de um curto-circuito [6]:

$$Fe = \frac{\mu_0}{2\pi} \times \frac{I_1 \times I_2}{a} \times l = 0,2 \times Ich^2 \times \frac{l}{a} \quad (2.2)$$

Onde:

- Fe - força electromagnética (N)
- Ich - corrente de choque (kA)
- l - distância entre dois apoios (suporte dos barramentos) consecutivos (mesma unidade de a);
- a - distância entre fases adjacentes (mesma unidade de l).

Desta força resulta um *momento flector* - mf dado por [7]:

$$mf = \frac{Fe \times l}{16} \quad (2.3)$$

Onde:

- mf - momento flector (kgf/cm)
- Fe - módulo de flexão (kgf)
- l - distância entre dois apoios consecutivos (cm).

Por fim, consulta-se o *módulo de flexão* W referente ao perfil escolhido. O *módulo de flexão* pode ser entendido como o momento resistente à flexão, por parte do perfil. É o máximo momento que o perfil poderá “desenvolver”, estando fixo, para contrariar um movimento de rotação imposto por um factor exterior (*momento flector* neste caso). Esta grandeza depende apenas da morfologia do perfil e não do material pelo qual é constituído. É uma grandeza que pode ser calculada com base na forma e dimensões do perfil em causa. No capítulo seguinte, referente à base de dados da aplicação informática, será abordado o cálculo desta grandeza.

Sendo assim, o *momento flector* máximo admitido por um perfil de módulo de flexão= W é dado pela expressão [8]:

$$mf = W \times \sigma \quad (2.4)$$

Onde:

- mf - momento flector (kgf/cm)
- W - módulo de flexão (cm³)
- σ - carga de segurança à flexão do material escolhido (kgf/cm²).

O mesmo será dizer, uma vez que o *momento flector* que actuará sobre o perfil foi já calculado e o material do perfil está já definido, que deve ser escolhido um perfil que respeite a seguinte condição;

$$W \geq \frac{mf}{\sigma} \quad (2.5)$$

Onde:

- W - módulo de flexão (cm^3)
- mf - momento flector (kgf/cm)
- σ - carga de segurança à flexão do material escolhido (kgf/cm^2).

Caso esta condição não se verifique é necessário escolher outro tubo, que verifique a condição. Quando for encontrado um perfil que verifique a condição, está concluído o cálculo da resistência mecânica ao curto-circuito.

3.1.4 Esforços Térmicos devidos ao Curto-Circuito

O dimensionamento com vista aos esforços térmicos devidos ao curto-circuito é baseado no cálculo do tempo de fadiga térmica de um condutor, que é o tempo durante o qual o condutor pode suportar a corrente de curto-circuito. Esse valor é obtido através de [9]:

$$\sqrt{t} = k \times \frac{S}{I_{th}} \quad (2.6)$$

Onde:

- t - tempo de fadiga térmica do condutor (s);
- K - factor relativo às propriedades térmicas do condutor;
- S - Secção do condutor (mm^2);
- I_{th} - Corrente térmica (A);

No entanto, um dos dados do problema de dimensionamento de barramentos, que são conhecidos *a priori*, é o tempo de actuação das protecções da subestação, protecções essas que irão extinguir o curto-circuito. Sendo assim, opta-se por, assumir o tempo de fadiga térmica como sendo igual ao tempo de actuação das protecções e procura-se garantir que o condutor tem uma secção tal, que não entre em fadiga térmica antes de as protecções actuarem. Essa secção é facilmente encontrada resolvendo (2.6) em ordem a S :

$$S_{\min} = \frac{I_{th}}{k} \sqrt{t} \quad (2.7)$$

Em que t é agora o tempo de actuação das protecções e $S_{\min}$ é a secção mínima que o condutor deverá possuir para não entrar em fadiga térmica em caso de curto-circuito.

Porém, é necessário, ainda encontrar os parâmetros K e I_{th} .

K é um factor adimensional que quantifica a rapidez com que o condutor entra em fadiga térmica, e cujos valores utilizados se encontram na Tabela 3.2 [9].

Tabela 3.2 - Factor K

FACTOR K	
Condutores nus em cobre	159
Condutores nus em alumínio	104
Condutores nus em liga de alumínio	97

A corrente térmica I_{th} é o valor da corrente instantânea que produz a mesma quantidade de calor, que a corrente real de curto-circuito, de componentes contínua e alternada, desde que acontece o defeito até que este se extingue. Esta depende dos parâmetros da rede e pode ser obtida através de [10]:

$$I_{th} = I_{cc} \times \sqrt{m+n} \quad (2.8)$$

Onde

- I_{th} - corrente térmica (A)
- I_{cc} - corrente de curto-circuito (A);
- m - factor adimensional;
- n - factor adimensional;

Os valores m e n são factores que quantificam o efeito térmico da corrente de curto-circuito. O factor m traduz o efeito da componente contínua do curto-circuito e seu amortecimento. O factor n traduz o efeito da componente alternada da corrente de curto-circuito e seu amortecimento. Ambos os valores podem ser extraídos dos ábacos BBC736966 presentes no MIEBBC [11], ilustrados na Figura 3.3.

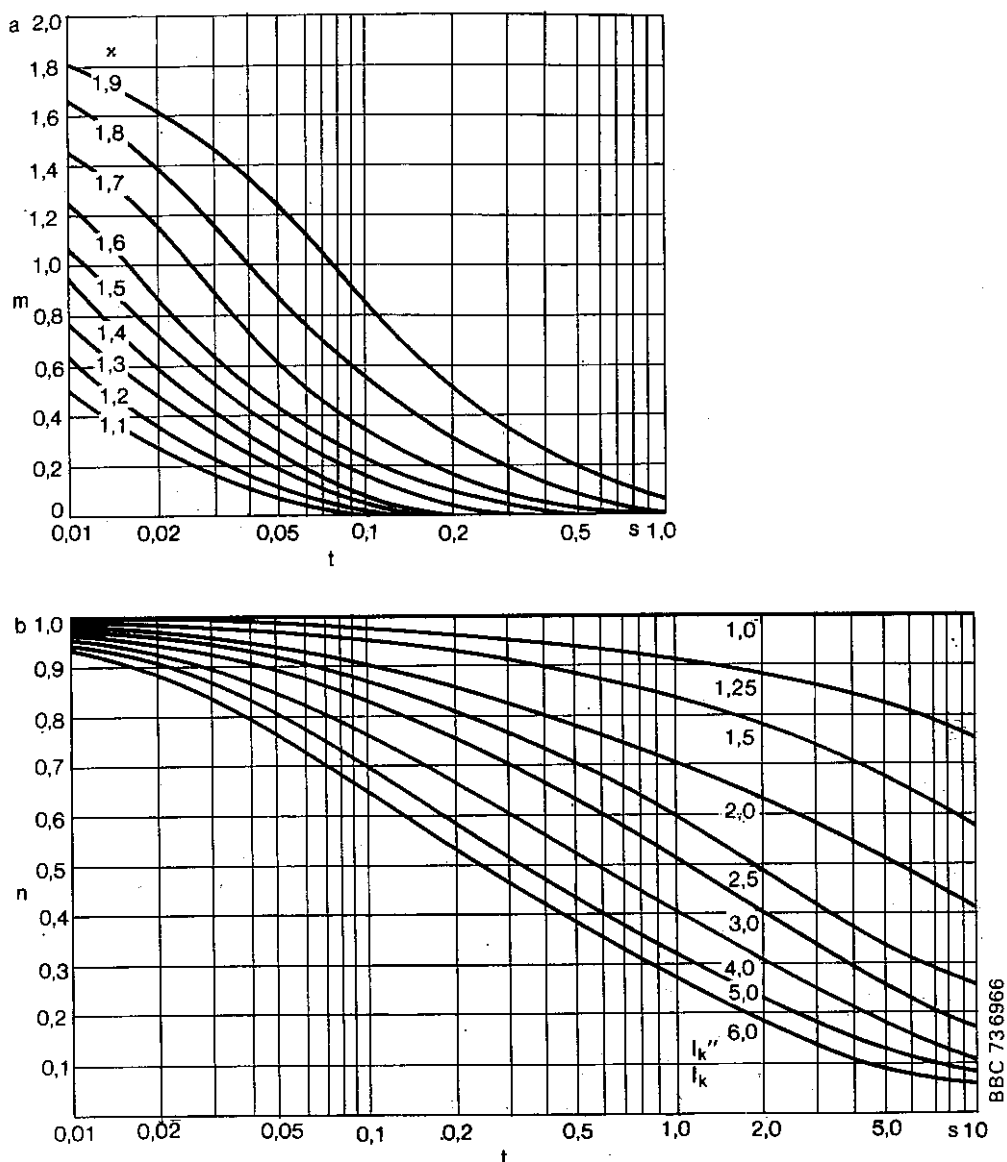


Figura 3.3 - Ábacos BBC 736966 (Retirado do MIEBBC)

Para consulta destes ábacos, é necessário, relativamente ao factor m , o conhecimento do factor χ , bem como do tempo de actuação das protecções. Ambos estes parâmetros foram já discutidos anteriormente.

No que diz respeito ao factor n , é necessário conhecer, além do tempo de actuação das protecções, o factor $I_{cc''}/I_p$. Este factor, é também um parâmetro da rede, análogo a χ , mas que por sua vez, quantifica o decréscimo da componente alternada da corrente de curto-circuito.

Uma vez definidos estes parâmetros, facilmente se pode encontrar a secção mínima que o condutor deverá ter, de forma a respeitar os requisitos acima referidos. Caso o perfil escolhido no momento possua uma secção inferior a S_{min} , dever-se-á escolher então um novo perfil, que respeite a condição, e prosseguir com o cálculo, agora com o novo barramento.

3.1.5 Condição de Ressonância

No passo 4 procura-se garantir que, aquando da ocorrência de um curto-circuito, a frequência de ressonância própria do barramento, não se encontra perigosamente próxima da frequência eléctrica da instalação.

Um condutor rígido, quando apoiado em dois pontos relativamente afastados, está sempre sujeito a oscilações e vibrações, causadas por vários factores, um dos quais, os esforços electrodinâmicos. Enquanto em regime permanente, estes esforços electrodinâmicos são de grandeza desprezável, porém, aquando da ocorrência de um curto-circuito, os esforços aumentam consideravelmente. No caso de a frequência própria de ressonância do barramento estar próxima da frequência eléctrica da instalação ou dos seus múltiplos, as oscilações poderão aumentar perigosamente. Convém portanto garantir que tal não acontece.

Para tal, começa-se por consultar três parâmetros inerentes ao barramento escolhido, até ao momento ainda não definidos:

- ♦ Módulo de Elasticidade - E ;
- ♦ Momento de Inércia - J ;
- ♦ Peso linear - p .

O *módulo de elasticidade*, ou *Módulo de Young*, representado pelo símbolo E , quantifica a rigidez de um material sólido. É, como é óbvio, dependente do material utilizado no barramento, e assume os valores presentes na Tabela 3.3, retirados do MIEBBC [3].

Tabela 3.3 - Limite de elasticidade (Módulo de Young)

LIMITE DE ELASTICIDADE	
Cobre	110 000 N/mm ²
Alumínio	65 000 N/mm ²
Pantal	70 000 N/mm ²

O *momento de inércia* é a grandeza que mede a distribuição da massa de um corpo em torno do seu eixo de rotação, bem como a tendência do mesmo para manter o movimento (ou ausência dele) que possui. Depende apenas da forma e dimensões do perfil escolhido.

O *peso linear* é o peso do perfil por unidade de comprimento e depende tanto da forma e dimensões do perfil escolhido como do material pelo qual é constituído, mais concretamente, da sua densidade

Estas duas últimas grandezas podem ser consultadas em tabelas próprias para o efeito, mas podem também ser calculadas, o que por vezes pode ser útil. Essa questão será melhor analisada no Capítulo 4.

Determinados estes valores, está-se agora em condições de proceder ao cálculo da frequência própria de oscilação do barramento, através da expressão [7]:

$$f_0 = 112 \sqrt{\frac{E \times J}{p \times l^4}} \quad (2.9)$$

Onde:

- f_0 - frequência de ressonância do barramento (Hz);
- E - Módulo de elasticidade do barramento (kg/cm²);
- J - Momento de inércia do barramento (cm⁴);
- p - peso linear do barramento (kg/cm);
- l - vão entre apoios consecutivos (cm).

O valor resultante do cálculo de f_0 deverá estar suficientemente afastado do valor da frequência eléctrica da instalação e seus múltiplos. Por suficiente entende-se 10% [7].

Por experiência, é sabido que para os valores praticados em subestações, a frequência de ressonância do barramento apenas se pode aproximar da frequência eléctrica ou do seu dobro. Como tal, f_0 , deve-se situar fora do intervalo:

$$[f - 0,1f; f + 0,1f] \cup [2f - 0,1 \times 2f; 2f + 0,1 \times 2f] \quad (2.10)$$

Onde:

- f - frequência eléctrica da instalação.

$$\text{Para } f=50\text{Hz} \Rightarrow [45;55] \cup [90;110]$$

Caso a frequência de ressonância se situe nesse intervalo “proibido” é necessário efectuar alterações, que passam normalmente por duas alternativas:

- ◆ Escolher um novo perfil;
- ◆ Definir um novo vão máximo entre apoios consecutivos.

No caso de se optar pela primeira hipótese, o novo perfil escolhido, deverá ter obrigatoriamente uma secção superior ao anteriormente escolhido, sob pena de os cálculos até aqui efectuados deixarem de ser válidos.

A escolha de um novo perfil é, normalmente, a opção mais aconselhada, uma vez que a alteração do vão vai provavelmente obrigar a um redesenho da subestação, podendo mesmo levar à necessidade da utilização de um maior número de estruturas metálicas pois, no caso de se definir um vão mais curto, isso poderá implicar a utilização de mais apoios. Isto é, obviamente, um problema do ponto de vista económico.

No caso de se definir um vão maior, deixa de existir o problema da utilização de mais estruturas metálicas. Porém, continua a existir o problema do redesenho da subestação, e

sendo o vão maior, isto poderá levar a problemas de espaço, pois muitas vezes, essencialmente no caso de subestações particulares, o espaço destinado às mesmas é reduzido, tendo o projectista que procurar reduzir ao máximo o espaço ocupado e tornando-se isto um problema. Além disso, e não menos importante, o alargamento do vão iria aumentar o *momento flector*, calculado anteriormente, podendo a condição (2.5) deixar de se verificar, e nesse caso volta-se ao mesmo: escolha de um outro perfil; com a agravante de neste caso, mesmo escolhendo um perfil de secção superior, haver a necessidade de repetição dos cálculos, devido à alteração do vão.

Mesmo assim, caso se opte por manter o perfil e redefinir o vão, é de grande utilidade definir quais os vãos que podem ser utilizados, para que não se volte a repetir a situação de ressonância. Para isso há que resolver (2.9) em ordem a l , obtendo-se assim:

$$l = \sqrt[4]{\frac{E \times J}{p \times \left(\frac{f_0}{112}\right)^2}} \quad (2.11)$$

A partir daqui obtêm-se facilmente as inequações seguintes:

$$l \leq \sqrt[4]{\frac{E \times J}{p \times \left(\frac{f_x + 0,1 \times f_x}{112}\right)^2}} \quad ; \quad l \geq \sqrt[4]{\frac{E \times J}{p \times \left(\frac{f_x - 0,1 \times f_x}{112}\right)^2}} \quad (2.12)$$

Onde:

- f_x - frequência eléctrica ou o seu dobro (Hz).

E por fim os intervalos aos quais o vão deve ou não pertencer:

$$l \notin \left[\sqrt[4]{\frac{E \times J}{p \times \left(\frac{f - 0,1 \times f}{112}\right)^2}} \quad ; \quad \sqrt[4]{\frac{E \times J}{p \times \left(\frac{f + 0,1 \times f}{112}\right)^2}} \right] \cup \left[\sqrt[4]{\frac{E \times J}{p \times \left(\frac{2f - 0,1 \times 2f}{112}\right)^2}} \quad ; \quad \sqrt[4]{\frac{E \times J}{p \times \left(\frac{2f + 0,1 \times 2f}{112}\right)^2}} \right] \quad (2.13)$$

Uma vez escolhido o novo vão há que repetir os cálculos anteriores de modo a verificar se a variação do vão não vai tornar inválido nenhum dos cálculos anteriormente efectuados.

3.1.6 Considerações sobre o algoritmos de cálculo

A verificação da condição de ressonância conclui o dimensionamento do barramento. O barramento escolhido no fim deste cálculo respeita por isso, todas as condições impostas nas fases de dimensionamentos devido: à condição de aquecimento em regime permanente, aos esforços mecânicos devidos ao curto-circuito, aos esforços térmicos devidos ao curto-circuito e à condição de ressonância. Uma vez encontrado um perfil que respeite todas estas condições está portanto encontrado um barramento adequado à subestação em causa.

Na Figura 3.4 está representado um diagrama onde é possível observar de uma forma sequencial o encadeamento dos cálculos explicados nas secções anteriores.

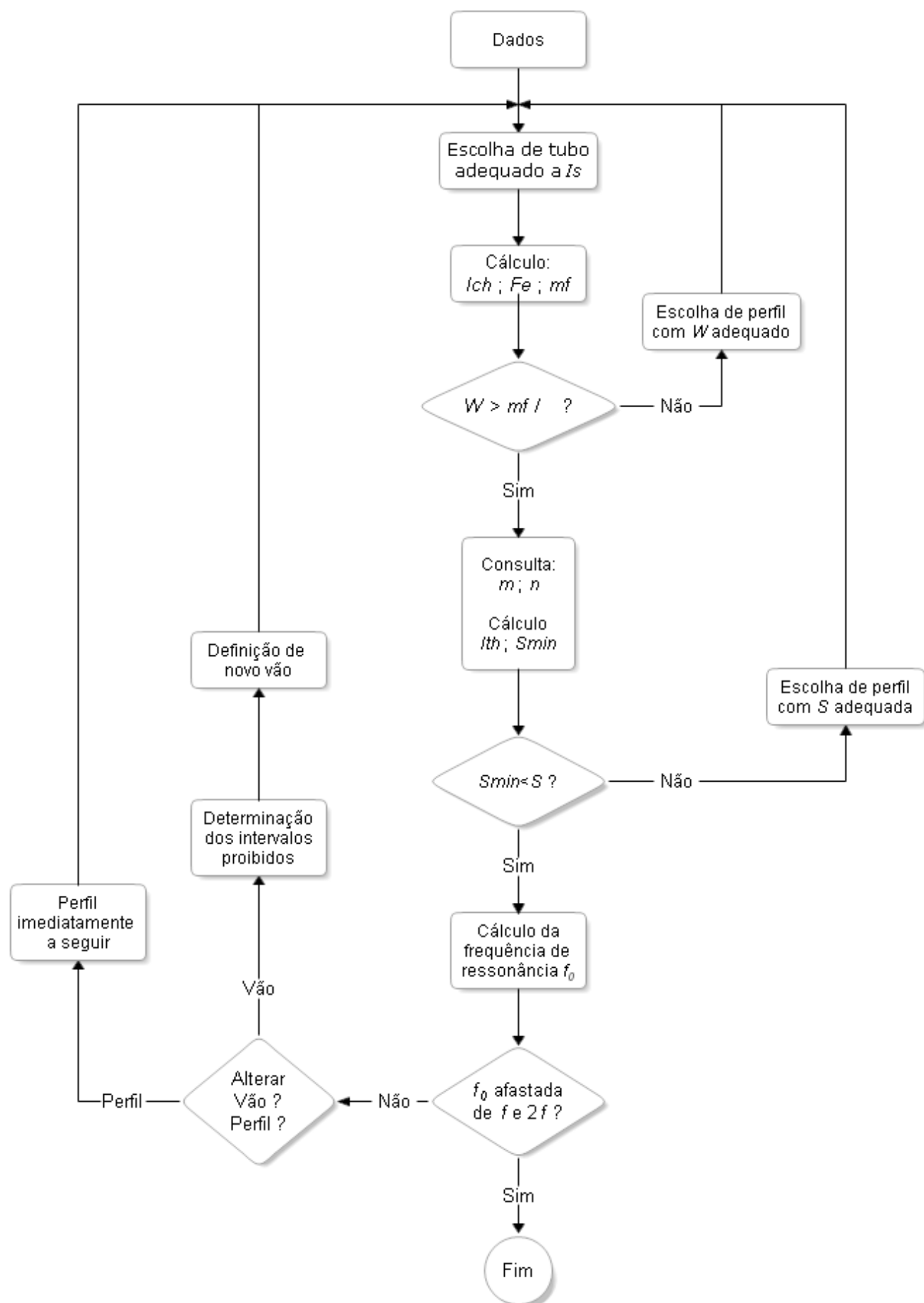


Figura 3.4 - Algoritmo de cálculo de um barramento

3.2 Resumo das Grandezas em Jogo

Como se pôde ver, os cálculos anteriores envolvem um elevado número de grandezas, tanto constantes como variáveis com o material, com a morfologia do perfil, com a rede eléctrica, ou mesmo com a própria subestação. Além disso, algumas das grandezas são obtidas através de cálculos e outras através da consulta de tabelas ou ábacos. De seguida, na Tabela 3.4, Tabela 3.5, Tabela 3.6, Tabela 3.7, e Tabela 3.8, faz-se um resumo, para cada fase do cálculo, das várias grandezas em jogo, bem como do seu modo de obtenção.

Tabela 3.4 - Grandezas em jogo nos dados iniciais

DADOS INICIAIS		
Grandeza	Símbolo	Obtenção
Corrente de serviço	I_s	Dado inicial
Corrente de curto-circuito	I_{cc}	Dado inicial
Frequência	f	Dado inicial
Factor χ (qui)	χ	Dado inicial
Factor I_{cc}''/I_p	I_{cc}''/I_p	Dado inicial
Distância entre apoios	l	Dado inicial
Distância entre fases	a	Dado inicial
Tempo de actuação das protecções	t	Dado inicial
Material do barramento	$[-]$	Dado inicial
Carga de segurança à flexão	σ	Dado inicial

Tabela 3.5 - Grandezas em jogo na condição de aquecimento

CONDIÇÃO DE AQUECIMENTO		
Grandeza	Símbolo	Obtenção
Corrente de serviço	I_s	Tabela

Tabela 3.6 - Grandezas em jogo no cálculo da resistência mecânica ao curto-circuito

RESISTÊNCIA MECÂNICA AO CURTO-CIRCUITO		
Grandeza	Símbolo	Obtenção
Corrente de choque	I_{ch}	Cálculo
Corrente de curto-circuito	I_{cc}	Dado inicial
Factor χ (qui)	χ	Dado inicial
Força electromagnética	F_e	Cálculo
Distância entre apoios	l	Dado inicial
Distância entre fases	a	Dado inicial
Momento flector	mf	Cálculo
Carga de segurança à flexão	σ	Dado inicial
Módulo de flexão	W	Cálculo

Tabela 3.7 - Grandezas em jogo no cálculo dos esforços térmicos devidos ao curto-circuito

ESFORÇOS TÉRMICOS DEVIDOS AO CURTO-CIRCUITO		
Grandeza	Símbolo	Obtenção
Secção mínima	S_{min}	Cálculo
Secção	S	Tabela/Cálculo
Corrente de térmica	I_{th}	Cálculo
Tempo de actuação das protecções	T	Dado inicial
Factor K	K	Tabela
Factor χ (qui)	χ	Dado inicial
Factor I_{cc}''/I_p	I_{cc}''/I_p	Dado inicial
Factor m	L	Ábaco
Factor n	a	Ábaco

Tabela 3.8 - Grandezas em jogo na condição de ressonância

CONDIÇÃO DE RESSONÂNCIA		
Grandeza	Símbolo	Obtenção
Frequência de ressonância	f_0	Cálculo
Frequência	F	Dado inicial
Limite de elasticidade	E	Tabela
Momento de inércia	J	Tabela/Cálculo
Peso linear	p	Tabela/Cálculo
Distância entre apoios	l	Dado inicial

3.3 Considerações sobre Curto-Circuitos / Rede Eléctrica

Falando-se de curto-circuitos em subestações, está-se a falar de algo que requer conhecimento das características não só da subestação mas também, e principalmente, da rede eléctrica à qual a subestação se ligará no futuro. As subestações são conectadas à rede eléctrica de alta tensão (AT) ou muito alta tensão (MAT). Partindo daqui existem certas características associadas a um eventual curto-circuito que possa ocorrer, que são conhecidas à partida, ou pelo menos os seus limites, isto é, até onde podem ir certos valores, o que ajuda a encontrar o pior caso.

Na Figura 3.5, retirada do MIEBBC [12] está representada a corrente de curto-circuito quando este ocorre numa rede de AT ou MAT, num ponto afastado dos alternadores.

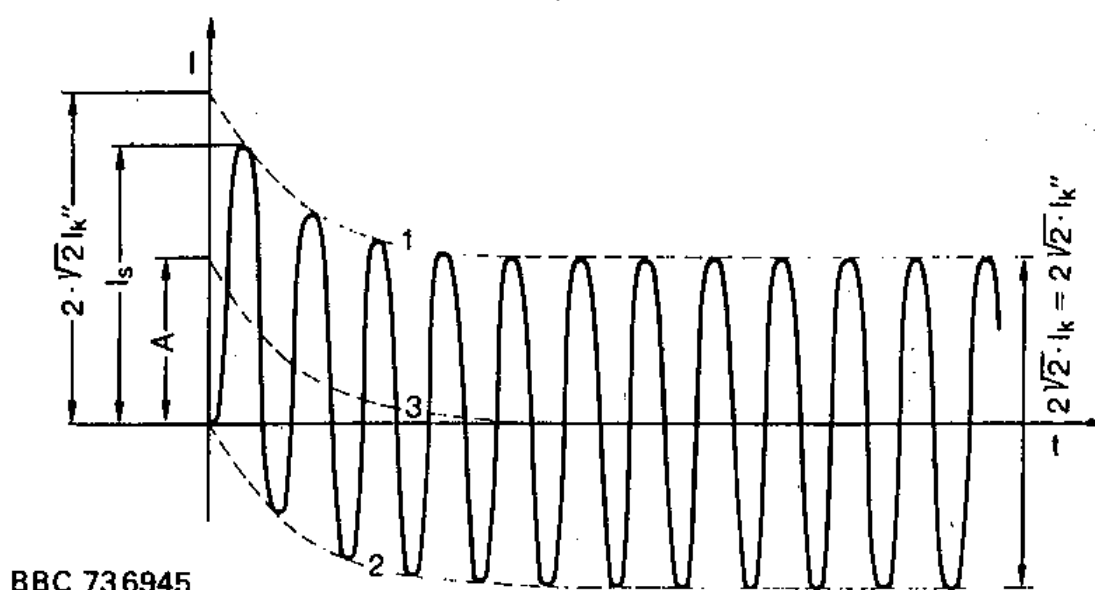


Figura 3.5 - Corrente resultante de um curto-circuito longe dos alternadores (retirado do MIEBBC)

É possível ver que a corrente de curto-circuito possui uma fase inicial, onde é mais elevada, possuindo uma componente contínua, estabilizando depois em valores mais baixos.

O valor I_s representado na figura corresponde à *corrente de choque* - I_{ch} , calculada na secção 3.1.3 através da expressão (2.1). É a amplitude, da corrente mais alta que irá existir em caso de curto-circuito, e que ocorre no início do mesmo, enquanto a componente contínua ainda é elevada.

A componente contínua, de valor inicial A , é representada na figura pelo tracejado 3, que como se pode ver, vai diminuindo até se extinguir. Este decréscimo na componente contínua da corrente de curto-circuito é traduzido pelo factor χ , já referido anteriormente. Para determinação de χ pode consultar-se o ábaco BBC70668 do MIEBBC [13], ilustrado na Figura 3.6.

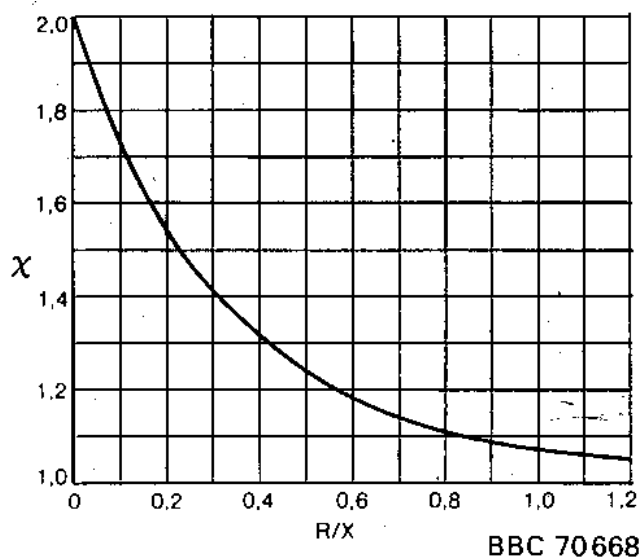


Figura 3.6 - Ábaco BBC 70668 (Retirado do MIEBBC)

Pela simples observação do ábaco depreende-se que χ depende apenas da razão R/X , sendo R a resistência da rede e X a reactância da mesma. R/X irá assumir valores baixos, pois é sabido que em redes de AT ou MAT $X \gg R$. Isto irá fazer com que χ tome valores altos, perto de 2. Porém é sabido por experiência que, para este tipo de redes, χ raramente ultrapassa 1,8 [14].

Ainda relativamente à Figura 3.5, é importante analisar o comportamento das envolventes 1 e 2. Onde I_k'' é a *corrente de curto-circuito inicial* - I_{cc}'' , e I_k corresponde à *corrente permanente de curto-circuito* - I_p . Como se pode ver, neste caso teórico, as duas envolventes permanecem paralelas o tempo todo, e assim sendo o factor I_{cc}''/I_p seria 1. Porém em situações reais a tendência das referidas envolventes é para se aproximarem, o que indica que I_{cc}'' será maior que I_p , ou seja, a componente alternada da corrente de curto-circuito sofrerá um decréscimo, implicando um factor I_{cc}''/I_p maior que 1. É sabido, também por experiência, que este factor, para redes AT e MAT, não deverá ultrapassar os 2,5 [7].

Estes factores (χ e I_{cc}''/I_p) influenciam directamente, como se viu na secção 3.1.4, nos ábacos BBC736966, os valores tomados pelos factores m e n .

O factor m , que quantifica o efeito térmico da componente contínua da corrente de curto-circuito é influenciado por χ , sendo que, quanto maior for χ maior será a componente contínua, o que se traduzirá numa maior importância do seu efeito térmico.

Por sua vez, o factor n , quantifica o efeito térmico da componente alternada da corrente de curto-circuito e é influenciado por I_{cc}''/I_p , na medida em que quanto maior I_{cc}''/I_p menor será n e o efeito térmico produzido pela componente alternada da corrente de curto-

circuito. Isto porque um maior valor de I_{cc}''/I_p significa que a corrente permanente de curto-circuito é pequena relativamente à corrente inicial, tendo assim menos “importância”.

Apesar de estas considerações serem verdadeiras para a maioria das situações, há que não esquecer que cada caso é um caso, daí a importância da definição dos parâmetros χ e I_{cc}''/I_p no início do dimensionamento dos barramentos.

3.4 Considerações sobre Subestações

Falando agora sobre a subestação propriamente dita, importa tecer algumas considerações acerca da estipulação de alguns parâmetros da mesma, nomeadamente a *distância entre apoios - l* e a *distância entre fases - a*.

O dimensionamento dos condutores rígidos a utilizar numa subestação não é feito para cada ponto da mesma. Ou seja, uma vez dimensionado um barramento, este será utilizado em toda a subestação, a não ser que se trate de uma subestação muito grande, onde compensa a utilização de perfis diferentes. Isto quer dizer que o dimensionamento dos barramentos deve ser feito para o pior caso.

Aqui reside um ponto importante, que é a definição daquilo que é o pior caso. O pior caso, é o ponto da subestação onde o barramento possui simultaneamente uma maior distância entre apoios consecutivos e uma menor distância entre fases adjacentes, pois desta forma tanto *força electromagnética* como o *momento flector* tomarão valores mais elevados.

Isto é válido no caso de o valor da corrente de serviço e curto-circuito ser o mesmo, pois numa subestação 60/15 kV por exemplo, o valor da corrente de serviço e de curto-circuito é obviamente diferente nos níveis de 60kV e 15kV, e como tal é necessário efectuar o dimensionamento para os dois casos. O mesmo pode acontecer no caso (frequente) de existirem paralelos de barramentos.

Observe-se o nível de AT de uma subestação simples representada na Figura 3.7.

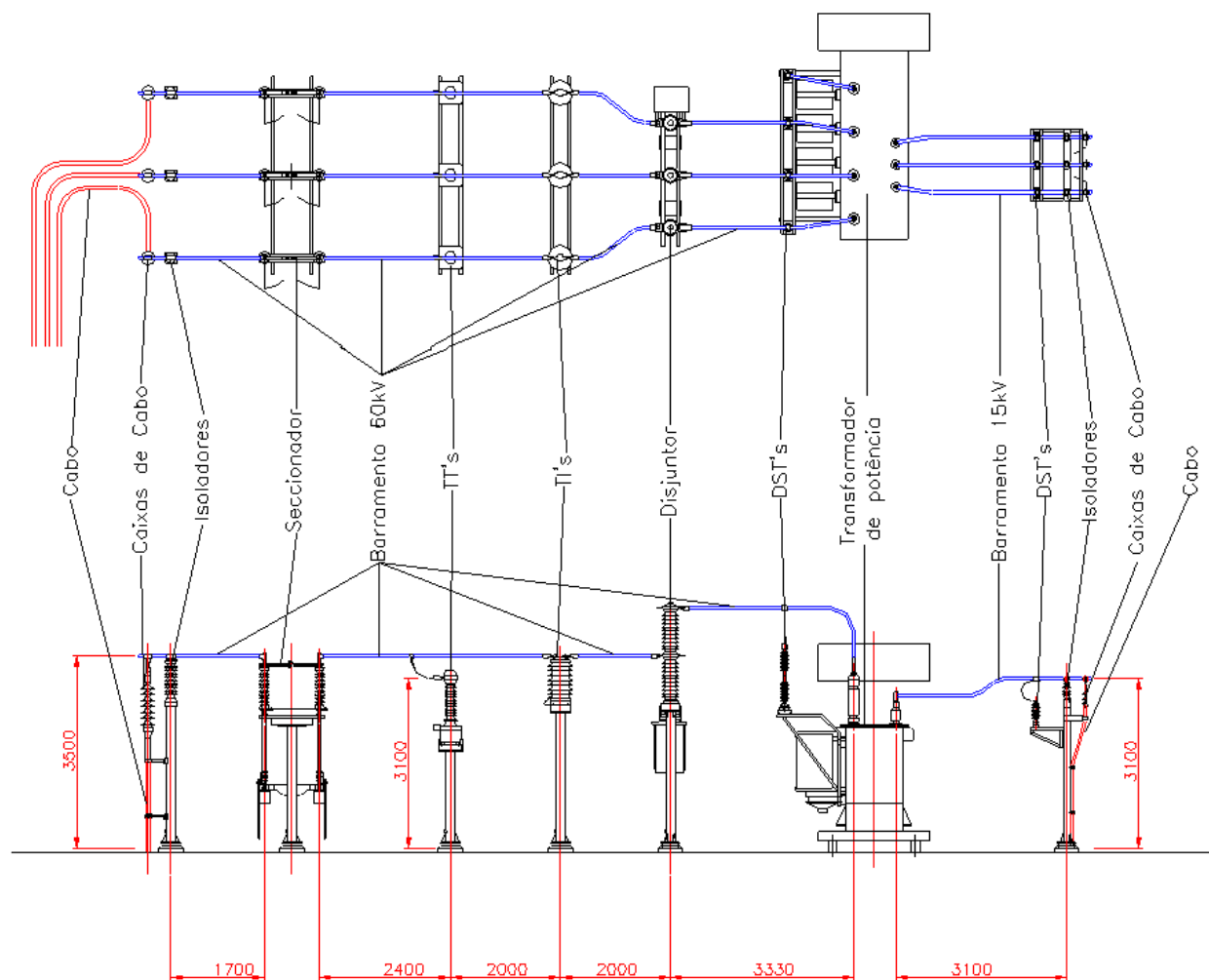


Figura 3.7 - Implantação de uma pequena subestação

Mesmo considerando a curva que o barramento faz entre o disjuntor e o transformador de potência, o ponto onde existe uma maior distância entre apoios consecutivos é entre o seccionador e os TI's. No entanto não se pode dizer, à primeira vista, que este é o pior caso, pois como se pode ver, na ligação entre o disjuntor e o transformador de potência a distância entre fases é inferior. Há então a necessidade de calcular os barramentos para as duas situações, assim como também para a média tensão.

3.5 Exemplo de um Cálculo Manual

De seguida é apresentado um exemplo do dimensionamento de um barramento de perfil tubular utilizando o método referido:

Pretende-se dimensionar um barramento nu para uma subestação exterior com as características apresentadas na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Dados do problema

Parâmetro	Símbolo	Valor
Corrente de serviço	I_s	96 A
Corrente de curto-circuito	I_{cc}	25000 A
Frequência eléctrica	f	50 Hz
Factor χ	χ	1,8
Factor I_{cc}/I_p	I_{cc}/I_p	2,5
Distância entre apoios	L	4 m
Distância entre fases	A	1,5 m
Tempo de actuação das protecções	T	0,5 s
Material do barramento	-	Cobre
Carga de segurança à flexão	σ	1200 kgf/cm ²

Sendo a corrente de serviço da instalação 96A consultando a tabela 6-35 do Manual BBC, (ANEXO 1), relativa às intensidades de corrente admissíveis em regime permanente para condutores de cobre de secção tubular, e escolhe-se o primeiro tubo que possa veicular essa corrente, nomeadamente o tubo 20 x 16 mm (corrente admissível = 449A).

Seguidamente calcula-se a corrente de choque, a força electromagnética e o momento flector.

$$I_{ch} = \chi \times \sqrt{2} \times I_{cc} = 1,8 \times \sqrt{2} \times 25000 = 63640A \Rightarrow 63,640kA$$

$$F_e = 0,2 \times I_{ch}^2 \times \frac{l}{a} = 0,2 \times 63,640^2 \times \frac{4}{1,5} = 2160N \Rightarrow 216kgf$$

$$mf = \frac{F_e \times l}{16} = \frac{216 \times 400}{16} = 5400kgf / cm$$

Verifica-se se o módulo de flexão é adequado, começando por consulta-lo em tabelas próprias para o efeito. Para o tubo 20 x 16 mm:

$$W = 0,464cm^3$$

Verificar a condição:

$$W \geq \frac{mf}{\sigma} \Leftrightarrow W \geq \frac{5400}{1200} \Leftrightarrow 0,464 \geq 4,5 \rightarrow \text{Falso}$$

A condição não se verifica, e assim sendo há que escolher outro tubo. O primeiro tubo da tabela que verifica a condição ($W \geq 4,5 \text{ cm}^3$) é o tubo $40 \times 28 \text{ mm}$, cujo módulo de flexão é $4,78 \text{ cm}^3$.

De seguida verificam-se os esforços térmicos devidos ao curto-circuito. Começando por calcular I_{th} e a secção mínima:

$$I_{th} = I_{cc} \times \sqrt{m+n}$$

Consultando os ábacos BBC 736966 do MIEBBC obtém-se:

$$\left. \begin{array}{l} \chi = 1,8 \\ t = 0,5 \end{array} \right\} m = 0,09$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{I_{cc}}{I_p} = 2,5 \\ t = 0,5 \end{array} \right\} n = 0,78$$

Assim vem:

$$I_{th} = 25000 \times \sqrt{0,09 + 0,78} = 23318 A$$

e

$$S_{\min} = \frac{I_{th}}{k} \sqrt{t} = \frac{23318}{159} \sqrt{0,5} = 103,7 \text{ mm}^2$$

Consultando a tabela 6-35 do MIEBBC (ANEXO 1) - $S=641 \text{ mm}^2$ - verifica-se que a secção do tubo escolhido é adequada.

O próximo passo é verificar a condição de ressonância, começando por consultar ou calcular o peso linear e o momento de inércia do tubo:

$$p = 5,72 \times 10^{-2} \text{ kg/cm}$$

$$J = 9,5492 \text{ cm}^4$$

e de seguida calculando a frequência de ressonância do tubo:

$$f_0 = 112 \sqrt{\frac{E \times J}{p \times l^4}} = 112 \sqrt{\frac{11 \times 10^5 \times 9,5492}{5,72 \times 10^{-2} \times 400^4}} = 9,5 \text{ Hz}$$

A frequência de ressonância do tubo não se encontra próxima da frequência eléctrica da instalação (50Hz) nem do seu dobro, isto é, está fora do intervalo

$$[f - 0,1f; f + 0,1f] \cup [2f - 0,1 \times 2f; 2f + 0,1 \times 2f] = [45;50] \cup [90;110]$$

e como tal está excluído o perigo de o barramento oscilar entrando em ressonância.

Isto conclui o dimensionamento do barramento; o tubo escolhido - *40x28mm* em Cobre - é adequado à instalação.

Capítulo 4

Base de Dados

As dimensões dos perfis a utilizar como barramento numa subestação ou outra instalação eléctrica são dimensões normalizadas. O cálculo de um barramento destina-se, como se viu no Capítulo 3, não a determinar as dimensões exactas que um perfil deverá ter para que seja adequado à instalação, mas sim a encontrar um perfil já com dimensões definidas que seja adequado para instalação em causa. No mercado existe então um rol de perfis de dimensões standardizadas, que se podem adquirir junto dos fornecedores, e o objectivo é saber qual desses perfis é o mais adequado para a subestação que se está projectar no momento. Como tal, é necessário construir uma base de dados contendo os vários perfis que poderão ser utilizados, de modo a que, na altura do cálculo o programa possa encontrar o mais adequado.

Além dos perfis existentes no mercado, há também que incluir na base de dados algumas das suas características mais importantes para o cálculo. Após o estudo do método de dimensionamento no Capítulo 3, pode-se facilmente verificar que grande parte das grandezas em jogo são parâmetros inerentes ao perfil escolhido no momento. Grandezas essas que implicam a constante consulta de tabelas e ábacos, sendo esse, como já foi dito, um dos principais motivos pelos quais este processo é tão moroso e trabalhoso quando efectuado manualmente. Desta forma, tendo em vista a simplificação destes processos, uma característica importante da base de dados seria conter todos esses parâmetros, de forma a que possam ser “consultados” pelo programa e não tenha que ser o utilizador a indicá-los.

Alguns destes dados, referentes aos perfis, poderiam ser facilmente calculados pelo programa, aquando da execução do dimensionamento, através de expressões adequadas, e apenas para o perfil seleccionado, em vez de todos os presentes na base de dados. Deste modo poupar-se-ia memória e não se fariam cálculos desnecessários. No entanto optou-se por determinar estes valores para todos os elementos da base de dados, de modo a que o

utilizador possa se quiser, consultar a base de dados e ter acesso aos valores dessas grandezas.

De seguida são apresentados e discutidos todos os parâmetros que farão parte da base de dados construída para esta aplicação.

4.1 Materiais Constituintes dos Perfis

Os condutores rígidos utilizados em subestações são em cobre ou alumínio, podendo também, por vezes, serem utilizadas ligas de alumínio, sendo a mais utilizada o Pantal (AlMgSi0,5).

Os barramentos de alumínio possuem a vantagem de, aquando da ocorrência de um arco de curto-circuito, se formarem resíduos apenas sob a forma de poeiras não condutoras de óxido de alumínio, não se depositando metal nos isoladores e aparelhagem vizinha [3].

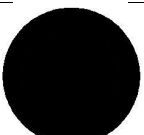
Porém o factor que usualmente faz a diferença, aquando da escolha entre alumínio ou cobre, para utilizar nos barramentos de uma subestação, é o factor económico. O cobre possui menor resistividade que o alumínio, e como tal, maior condutância, podendo um barramento de cobre com a mesma secção de um de alumínio veicular uma maior corrente. Por outro lado, o alumínio possui uma densidade mais baixa que o cobre. Ambos os factores irão afectar o peso do barramento, e assim sendo, aquando do projecto da subestação, há que efectuar uma consulta do mercado, de modo a definir qual a saída mais económica.

No programa desenvolvido a escolha Cobre/Alumínio/Pantal é deixada a cargo do utilizador. É utilizada esta solução, ao invés de o próprio programa efectuar um estudo económico, determinando qual a opção mais vantajosa, pois por vezes a empresa poderá já ter em stock perfis de um dado material, ou porque, por imposição do cliente se tenha que utilizar um ou outro.

4.2 Forma dos Perfis

Existem no mercado variados tipos de perfis constituídos por material condutor, que podem ser utilizados como condutores rígidos numa subestação, dos quais se podem ver os mais comuns na Tabela 4.1 - Perfis disponíveis no mercado. No entanto, na prática, os perfis aplicados em instalações eléctricas do tipo das subestações, são essencialmente de secção tubular. Como tal a aplicação desenvolvida irá incidir neste tipo de perfil, estando portanto apenas disponíveis na base de dados perfis deste tipo.

Tabela 4.1 - Perfis disponíveis no mercado

ALGUNS PERFIS DISPONÍVEIS NO MERCADO	
Barras	
Perfil em U	
Varão	
Tubo	

No caso dos perfis tubulares, as suas dimensões (sectoriais) podem ser definidas pelo seu diâmetro exterior (D) e diâmetro interior (d), tal como pode ser observado na Figura 4.1. Os tubos são habitualmente designados indicando as suas dimensões na forma: $D \times d$ [unidades], embora no MIEBBC sejam indicadas na forma: $D \times e$ [unidades], em que e é a espessura da parede. Na base de dados os tubos serão catalogados utilizando a primeira nomenclatura ($D \times d$), por ser a mais utilizada a nível de mercado.

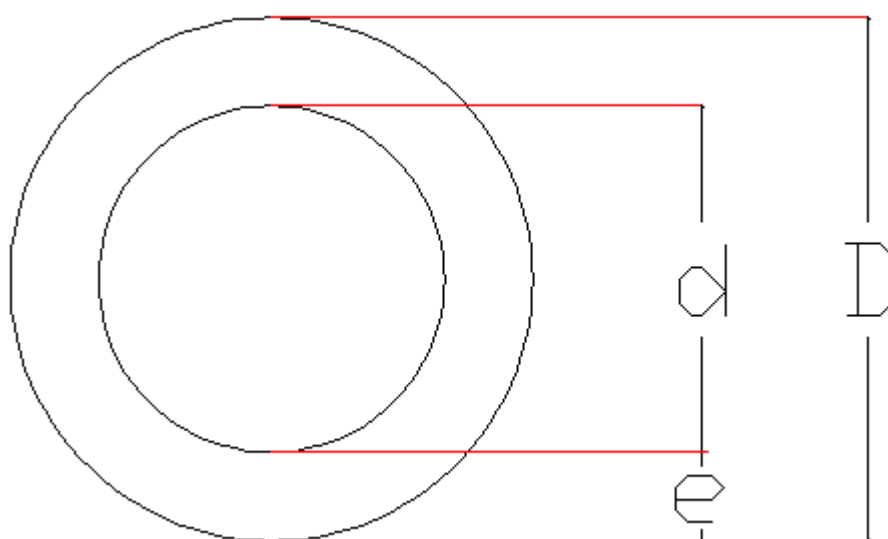


Figura 4.1 - Dimensões de um perfil tubular

4.3 Perfis Pintados/Nus

Outro factor de decisão aquando da escolha do barramento a utilizar é se este é pintado ou nu. A diferença fundamental entre uma e outra versão é que um barramento pintado pode veicular uma maior corrente em regime permanente, e sendo uma versão, naturalmente, mais cara. Porém, no projecto de subestações exteriores são utilizados os barramentos nus, devido ao facto de que, sendo uma instalação exterior, os barramentos irão estar, tal como os outros componentes da subestação, sujeitos à actuação de factores exteriores, como chuva, vento, granizo, neve, poluição, factores estes que com o tempo acabam por detiorar o tratamento (pintura) do barramento. Com essa detioração o barramento irá perder parte das suas propriedades e poderá deixar de ser adequado à instalação em causa.

Como as subestações exteriores são o principal foco da empresa e único neste momento, o programa contempla apenas a utilização de barramentos nus.

4.4 Parâmetros Necessários ao Cálculo

Existem certas características físicas inerentes aos perfis condutores que são, naturalmente, importantes para o cálculo eléctrico e mecânico de um barramento para uma dada instalação, e que podem depender ou não do material pelo qual o perfil é constituído. Quando se efectua uma consulta a um fornecedor, este disponibiliza, normalmente, além das dimensões dos perfis, a corrente que estes podem conduzir em regime permanente, ou o peso linear dos mesmos, pois este influencia directamente o preço. No ANEXO 2 pode ser observada a consulta a um fornecedor e os dados por este disponibilizados. Porém estes dados não são suficientes para levar a cabo todo o dimensionamento do barramento, e como tal é necessário requisitar os restantes dados ao fornecedor, ou calcula-los com base nos elementos disponíveis (dimensões dos perfis). Como a primeira hipótese é algo que poderá demorar o seu tempo, a opção recai em calcular esses dados com base nas dimensões do perfil. Também existem tabelas com os referidos valores que podem ser consultadas, mas poderão não conter os perfis com as dimensões desejadas, e deste modo, além de se ficar a dispor dos referidos parâmetros para um perfil com quaisquer dimensões, a base de dados assume automaticamente os valores, não sendo necessário introduzi-los.

As grandezas inerentes a um perfil tubular (ou outro), necessárias ao dimensionamento de um barramento para uma subestação, através do método utilizado neste trabalho, são as seguintes:

- ♦ Massa volúmica do material;
- ♦ Limite de elasticidade (Módulo de Young);
- ♦ Secção;
- ♦ Módulo de flexão;
- ♦ Momento de Inércia;
- ♦ Peso linear;
- ♦ Factor K

A massa volúmica e o limite de elasticidade são valores inerentes ao material, e são os mesmos para qualquer perfil escolhido independentemente da sua forma e dimensões. A secção, módulo de flexão e momento de inércia dependem apenas do perfil escolhido e suas dimensões, e o peso linear depende tanto do material do perfil como das suas dimensões.

De seguida analisa-se cada um destes parâmetros em maior detalhe.

4.4.1 Massa Volúmica do material

A massa volúmica de um material é a grandeza que traduz a massa do material por unidade de volume. Os valores da massa volúmica dos materiais que poderão ser utilizados nos barramentos encontram-se na Tabela 4.2, e foram retirados do MIEBBC [15].

Tabela 4.2 - Massa volúmica dos materiais

MASSA VOLÚMICA DOS MATERIAIS UTILIZADOS	
Cobre	8,9 kg/dm ³
Alumínio	2,7 kg/dm ³
Pantal	2,7 kg/dm ³

4.4.2 Limite de Elasticidade (Módulo de Young)

Esta grandeza, representada pelo símbolo E , e designada por Limite de elasticidade, Módulo de Young ou ainda módulo de elasticidade, quantifica a rigidez de um material sólido. É, como é óbvio, dependente do material utilizado no barramento, e assume os valores presentes na Tabela 4.3, retirados do MIEBBC [3].

Tabela 4.3 - Limite de elasticidade (Módulo de Young)

LIMITE DE ELESTICIDADE	
Cobre	110 000 N/mm ²
Alumínio	65 000 N/mm ²
Pantal	70 000 N/mm ²

4.4.3 Secção

A secção é a área transversal do perfil e, no caso dos perfis tubulares, pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$S = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 - \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (3.1)$$

4.4.4 Módulo de Flexão

O módulo de flexão é o momento resistente à flexão que o perfil pode desenvolver. Depende apenas da forma e dimensões do perfil e no caso dos tubos é dado pela expressão seguinte [16]:

$$W = \pi \times \frac{D^4 - d^4}{32 \times D} \quad (3.2)$$

4.4.5 Momento de Inércia

O momento de inércia é a grandeza que mede a distribuição da massa de um corpo em torno do seu eixo de rotação e para perfis tubulares é calculado da seguinte forma [16]:

$$J = \pi \times \frac{D^4 - d^4}{64} \quad (3.3)$$

4.4.6 Peso Linear

O peso linear é o peso do perfil por unidade de comprimento. O seu cálculo é basicamente a multiplicação da secção pela massa volúmica do material pelo qual o perfil é composto:

$$p = \left(\pi \times \left(\frac{D}{2} \right)^2 - \pi \times \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right) \times \text{massa volúmica} \quad (3.4)$$

Estes parâmetros são automaticamente calculados pela aplicação e incluídos na base de dados juntamente com as dimensões do tubo e corrente admissível.

A massa volúmica dos materiais a serem utilizados, encontram-se na Tabela 4.2, e estão como já foi dito, presentes na base de dados da aplicação, de forma a poderem ser utilizados para o cálculo do peso linear.

4.4.7 Factor K

O factor K é uma constante de fadiga térmica dos condutores e toma os valores contidos na Tabela 3.2 [9].

Capítulo 5

Programa Informático

Conforme já foi dito e se pode ver no Capítulo 3, o processo de dimensionamento de barramentos para instalações eléctricas, assume alguma complexidade e é bastante trabalhoso e moroso, daí a necessidade de um programa deste tipo. Além disso como é possível notar pela observação da tabela 6-35 do MIEBBC (ANEXO 1) referente às correntes admissíveis e outros parâmetros, os tubos estão ordenados pelas suas dimensões: primeiro por diâmetro exterior, e depois pela espessura da parede. Ora, é possível ter um perfil com diâmetro exterior inferior, mas que devido à espessura da sua parede, possua uma maior secção e consequente maior peso linear do que outro de diâmetro exterior superior e que surge mais tarde na tabela, mas que poderia ser suficiente para o problema em questão.

Um exemplo:

Tabela 5.1 - Secção e peso linear de dois perfis diferentes

SECÇÃO E PESO DE DOIS PERFIS DIFERENTES		
Tubo	Secção	Peso Linear
20x8mm	264mm ²	2,35kg/m
32x28mm	168mm ²	1,68kg/m

Na tabela 6-35 do MIEBBC (ANEXO 1) estes são dois itens consecutivos. Como se pode ver o tubo 32x28mm, apesar de surgir mais tarde na tabela do que o 20x8mm, é mais leve, e logo, mais barato. Num caso em que o tubo 32x28mm fosse suficiente para a instalação, o tubo 20x8mm seria escolhido antes, ficando-se assim com uma solução mais cara, além de que, sobredimensionada.

Para evitar situações destas há que consultar as tabelas tendo em vista as secções mais baixas ao invés de seguir a ordem da tabela. Como é óbvio, esta é uma tarefa extremamente trabalhosa para ser efectuada manualmente, o que complica ainda mais o dimensionamento.

Este é um dos problemas aos quais a aplicação desenvolvida responde, pois uma das suas funções é precisamente consultar os itens da base de dados por ordem crescente da sua secção/peso e não das suas dimensões, obtendo-se assim sempre a solução mais barata e nunca sobredimensionada.

5.1 Funcionamento do Programa

A aplicação possui três “modos de funcionamento” distintos:

- ◆ Consulta da base de dados;
- ◆ Adição de novos itens à base de dados;
- ◆ Cálculo de barramentos.

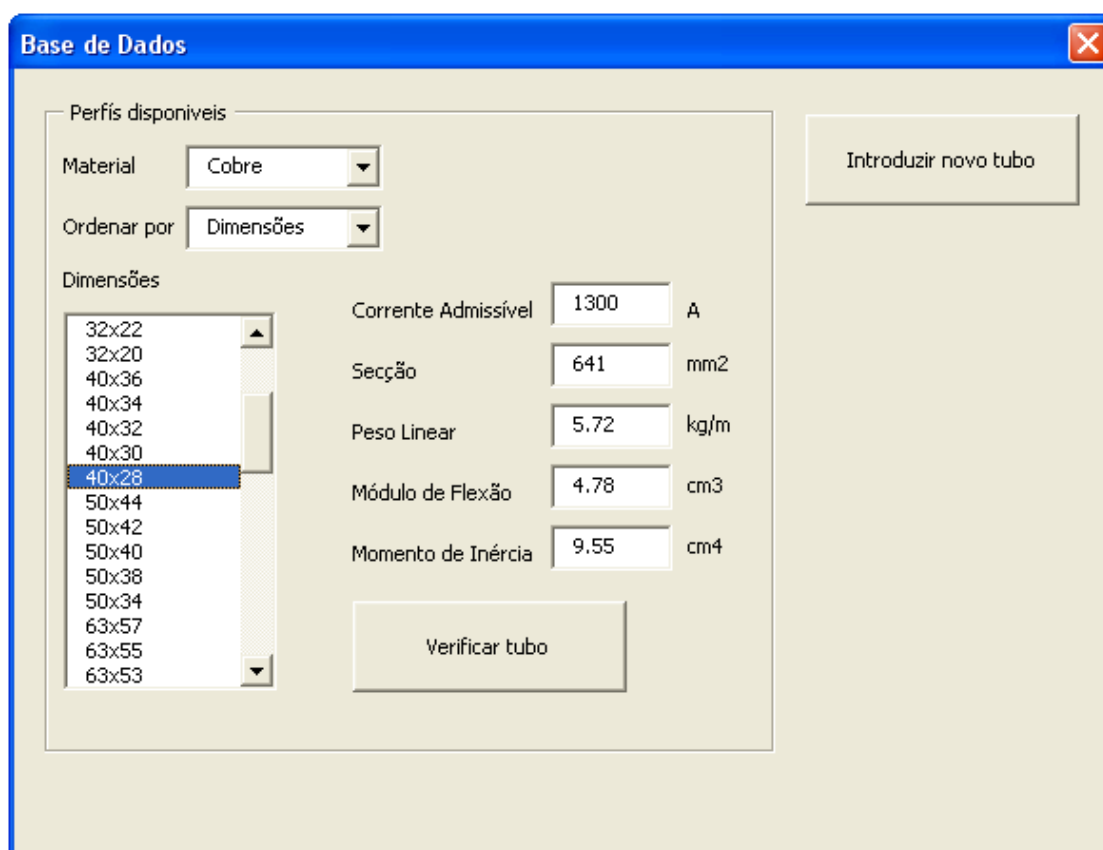
O utilizador tem oportunidade, assim que o programa é iniciado, de escolher qual das duas funcionalidades deseja utilizar. Todas as funcionalidades são a seguir analisadas com maior detalhe.

5.1.1 Consulta da Base de Dados

Esta funcionalidade resume-se a apresentar ao utilizador os perfis disponíveis na base de dados para o material por ele escolhido, assim como os seguintes parâmetros:

- ◆ Dimensões;
- ◆ Corrente admissível;
- ◆ Secção;
- ◆ Peso linear;
- ◆ Módulo de flexão;
- ◆ Momento de inércia.

Possui também a opção de escolher por qual destes parâmetros se deseja que os perfis sejam ordenados, e permite ainda passar directamente a partir da consulta, para a introdução de um novo item.



Base de Dados

Perfis disponíveis

Material: Cobre

Ordenar por: Dimensões

Dimensões:

- 32x22
- 32x20
- 40x36
- 40x34
- 40x32
- 40x30
- 40x28**
- 50x44
- 50x42
- 50x40
- 50x38
- 50x34
- 63x57
- 63x55
- 63x53

Corrente Admissível	1300	A
Secção	641	mm ²
Peso Linear	5.72	kg/m
Módulo de Flexão	4.78	cm ³
Momento de Inércia	9.55	cm ⁴

Introduzir novo tubo

Verificar tubo

Figura 5.1 - Formulário de pesquisa na base de dados

5.1.2 Novo Item na Base de dados

Caso o utilizador pretenda introduzir novos itens na base de dados o programa irá abrir uma janela onde o utilizador poderá introduzir os dados relativo ao novo item. Após a introdução o programa limitar-se-á então a recolher os dados fornecidos pelo utilizador e a adiciona-los aos já existentes. Isto sem levar em conta qualquer ordem, pois a ordenação dos itens por secção/peso linear é feita apenas aquando do dimensionamento dos barramentos ou da consulta da base de dados.

5.1.3 Dimensionamento de barramentos

No caso de o utilizador pretender dimensionar um barramento para uma instalação eléctrica, o programa disponibilizará duas opções:

- ♦ O utilizador pode dar instruções ao programa para que efectue os cálculos, com base nos dados iniciais por ele introduzidos, e escolha da base de dados a solução viável, mais barata; ou

- ♦ pode escolher ele próprio um dos tubos da base de dados e dar instruções ao programa para que este verifique se esse tubo é adequado à instalação em causa.

Esta segunda opção é particularmente útil, quando existem tubos em stock no armazém da empresa. Neste caso, não interessa encontrar a solução mais barata, mas sim verificar se os tubos já na posse da empresa são adequados à instalação, daí esta funcionalidade.

De forma a efectuar o dimensionamento dos barramentos o programa irá efectuar todos os cálculos e consultas indicados no Capítulo 3, aquando da explicação do método. Não é demais voltar a referir que na escolha dos tubos, estes irão ser primeiramente ordenados pela sua secção/peso linear de modo a obter-se sempre a solução mais barata.

O diagrama da Figura 5.2 ilustra o encadeamento de processos efectuados pela aplicação no sentido de calcular o barramento, assim como as fases em que o utilizador é chamado a intervir.

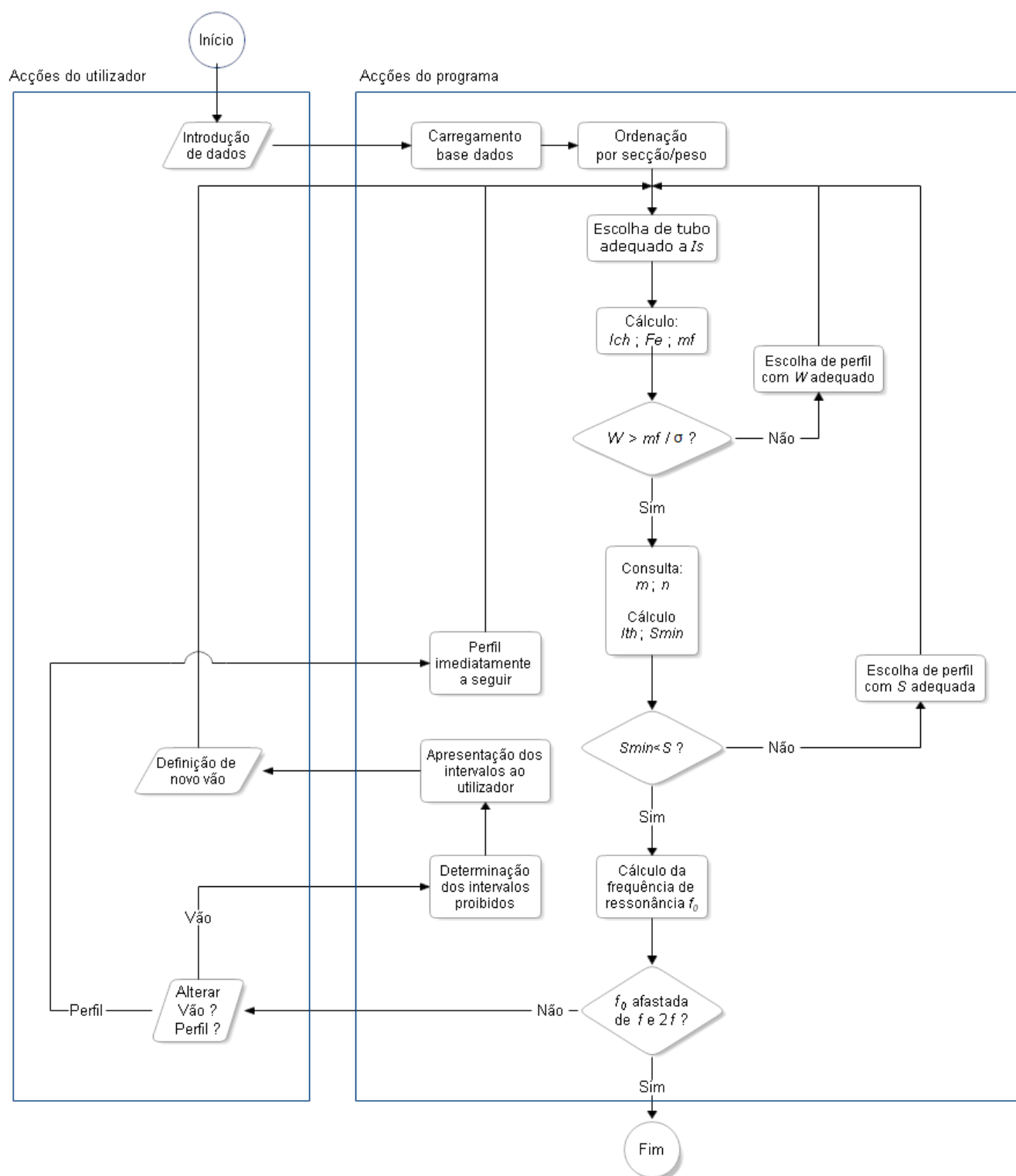


Figura 5.2 - Algoritmo de funcionamento do programa no modo de cálculo

Caso o utilizador pretenda verificar se um perfil predeterminado se adequa ou não à instalação, o encadeamento de processos será o ilustrado na Figura 5.3.

5.1.4 Apresentação de resultados ao utilizador

No fim do cálculo o programa apresenta os resultados ao utilizador e dá a este a possibilidade de os guardar ou imprimir. Os resultados são apresentados com base no modelo apresentado no ANEXO 3.

Como se pode ver no ANEXO 3, a informação contida nos resultados apresentados pelo programa não se resume a referir qual o tubo escolhido para a instalação. Esta comporta dados iniciais, tubo escolhido, e cálculos efectuados no sentido de verificar a viabilidade deste último. Deste modo, o utilizador tem acesso a todo o cálculo efectuado pelo programa no sentido de verificar a viabilidade do tubo escolhido, sob uma forma inteligível, tal como se fosse feito manualmente. Esta funcionalidade é extremamente importante, pois na elaboração do projecto de uma subestação, e escolha dos seus componentes, é naturalmente necessária a apresentação, na memória descritiva, dos cálculos efectuados para o dimensionamento desses componentes. Deste modo o utilizador do programa poderá apresentar os cálculos efectuados programa, caso contrário teria apenas a informação de que determinado perfil era viável e teria que efectuar os cálculos que o provam, de forma a poder apresenta-los.

5.1.5 Software Escolhido

O software escolhido para desenvolvimento da aplicação foi o Microsoft Excel + Visual Basic. A escolha recaiu neste software por o autor já possuir algum à vontade com as duas aplicações e pela facilidade que este proporciona a nível da criação de uma base de dados simples, e sua integração com os cálculos matemáticos necessários, bem como a facilidade na apresentação e impressão de resultados. Estas “tarefas” embora podendo ser também implementadas em outras linguagens, com as quais o autor não está tão familiarizado, iriam levar a dificuldades que não fazem parte do âmbito do projecto e que assim foram de certo modo contornadas.

A aplicação é constituída por um ficheiro .xls (ficheiro de Microsoft Excel 2003).

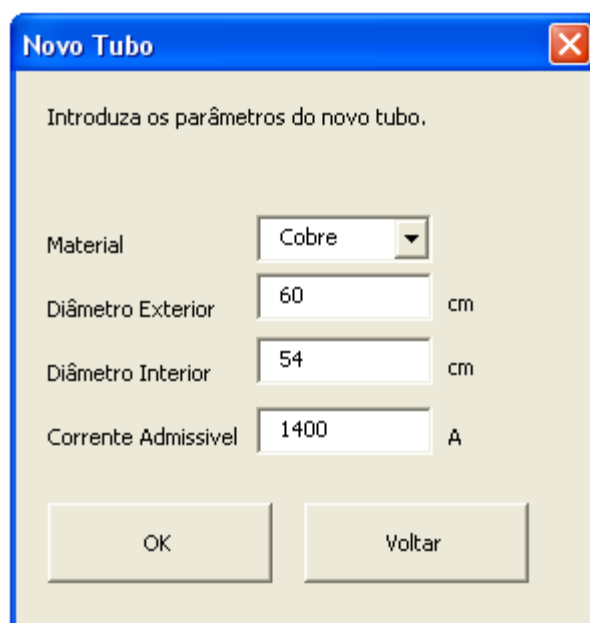
5.1.6 Programação

No que diz respeito a uma análise do código Visual Basic desenvolvido, de um ponto de vista computacional, é importante referir que o objectivo deste trabalho não foi criar uma aplicação computacionalmente eficiente. Com isto quer-se dizer que em certas partes do código, as operações em questão poderiam ser feitas de uma outra forma mais eficiente, efectuando menos ciclos ou utilizando menos variáveis, e consequentemente menos memória. Contudo, além de essas preocupações estarem fora do âmbito do projecto, sendo este um trabalho de carácter académico (embora também empresarial) houve uma certa preocupação

em conceber um código fonte o mais inteligível possível, para que este possa ser convenientemente analisado, não só academicamente, mas também para futuras modificações. Também com esse intuito, o código foi comentado nos pontos essenciais.

5.1.7 Interface com o Utilizador

A interface com o utilizador é feita através de formulários semelhantes ao apresentado na Figura 5.4, nos quais é pedida ao utilizador a introdução de dados ou a tomada de decisões que exijam a intervenção humana.



Novo Tubo

Introduza os parâmetros do novo tubo.

Material: Cobre

Diâmetro Exterior: 60 cm

Diâmetro Interior: 54 cm

Corrente Admissível: 1400 A

OK Voltar

Figura 5.4 - Exemplo de um formulário

Os formulários foram desenvolvidos de forma a privilegiar a simplicidade e poderem ser utilizados de forma intuitiva. Nas figuras seguintes serão apresentados alguns formulários de interação com o utilizador, para que se possa ter uma ideia geral do layout da aplicação.

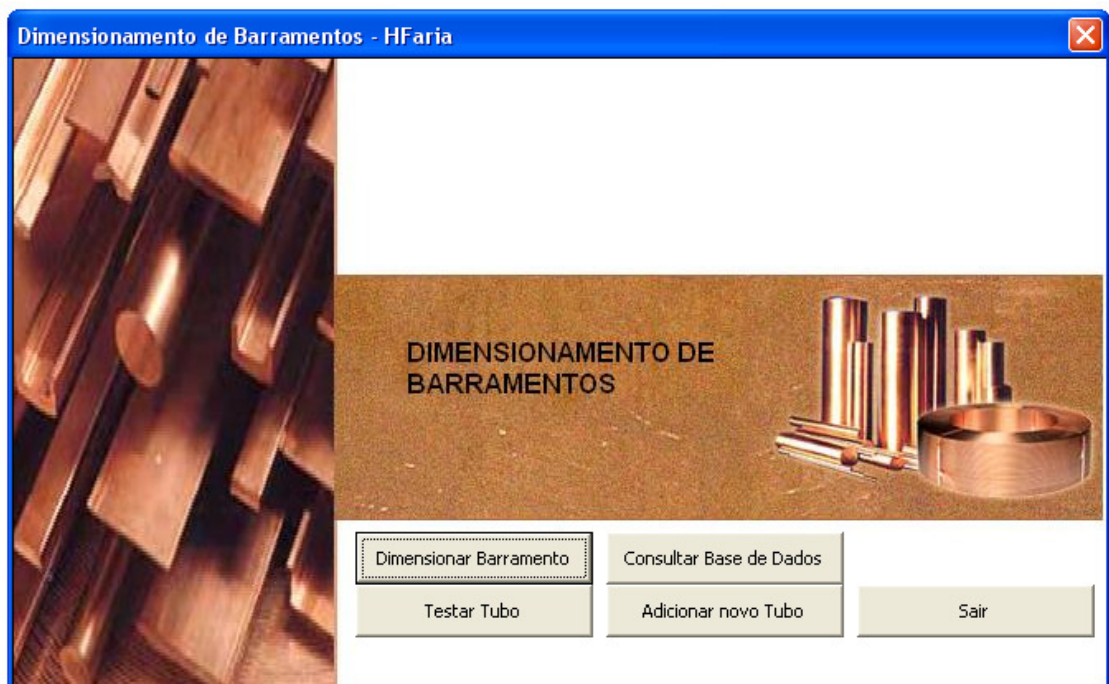


Figura 5.5 - Formulário inicial do programa

Perfis disponíveis		
Material	Cobre	
Ordenar por	Dimensões	
Dimensões	Corrente Admissível	1300 A
32x22	Secção	641 mm ²
32x20	Peso Linear	5.72 kg/m
40x36	Módulo de Flexão	4.78 cm ³
40x34	Momento de Inércia	9.55 cm ⁴
40x32		
40x30		
40x28		
50x44		
50x42		
50x40		
50x38		
50x34		
63x57		
63x55		
63x53		

Figura 5.6 - Formulário de consulta da base de dados

Novo Tubo ✖

Introduza os parâmetros do novo tubo.

Material

Diâmetro Exterior cm

Diâmetro Interior cm

Corrente Admissível A

Figura 5.7 - Formulário de introdução de novo item

Introdução de Dados ✖

Dados da Rede

Corrente de Serviço A

Corrente de curto-circuito kA

Frequência Hz

Valor de Qui (X)

Icc'/Ip

Dados da Instalação

Material do Barramento

Carga de segurança à flexão kgf/cm²

Distância entre apoios m

Distância entre fases m

Tempo de actuação das protecções s

Figura 5.8 - Formulário de introdução de dados iniciais

Capítulo 6

Estudo de Caso

Neste capítulo vai-se testar o programa e verificar se os resultados apresentados pelo mesmo são satisfatórios. Para isso, o procedimento ideal é utilizar o programa para dimensionar o barramento de um caso do qual já se conheça a solução. Sendo assim na secção seguinte utilizar-se-á o programa para efectuar o mesmo dimensionamento que foi efectuado manualmente na secção 3.5 deste documento e posteriormente comparar-se-ão os resultados, por forma a atestar a sua legitimidade.

6.1 Exemplo de Cálculo Automático

6.1.1 Dados do problema

Os dados iniciais do problema serão pois os mesmos que foram utilizados na secção 3.5, tal como se pode ver na Tabela 6.1 e na Figura 6.1.

Tabela 6.1 - Dados do problema

DADOS DO PROBLEMA		
Parâmetro	Símbolo	Valor
Corrente de serviço	I_s	96 A
Corrente de curto-circuito	I_{cc}	25000 A
Frequência eléctrica	f	50 Hz
Factor χ	χ	1,8
Factor I_{cc}/I_p	I_{cc}/I_p	2,5
Distância entre apoios	L	4 m
Distância entre fases	A	1,5 m
Tempo de actuação das protecções	T	0,5 s
Material do barramento	-	Cobre
Carga de segurança à flexão	σ	1200 kgf/cm ²

Introdução de Dados

Dados da Rede

Corrente de Serviço: 96 A

Corrente de curto-circuito: 25 kA

Frequência: 50 Hz

Valor de Qui (X): 1.8

Icc'/Ip: 2.5

Dados da Instalação

Material do Barramento: Cobre

Carga de segurança à flexão: 1200 kgf/cm2

Distância entre apoios: 4 m

Distância entre fases: 1.5 m

Tempo de actuação das protecções: 0.5 s

Seguinte Voltar

Figura 6.1 - Introdução dos dados do problema no programa

6.1.2 Análise de Resultados

Os resultados obtidos pelo programa podem ser observados no ANEXO 4.

Observando estes resultados desde logo se pode observar que o tubo dimensionado pelo programa é diferente do tubo dimensionado manualmente na secção 3.5. Os resultados apresentados pelo programa sugerem que a melhor opção a utilizar é o tubo *50x44mm*, enquanto que o do cálculo manual resultou o tubo *40x28mm*.

Na Tabela 6.2 podem ver-se as características de ambos os tubos.

Tabela 6.2 - Características dos tubos dimensionados

CARACTERÍSTICAS DOS TUBOS DIMENSIONADOS				
Tubo	Secção (mm ²)	Peso Linear (kg/m)	Corrente admissível (A)	Módulo de flexão (cm ³)
40x28mm	641	5,72	1300	4,78
50x44mm	443	3,95	1150	4,91

Como se pode ver o tubo *50x44mm* apesar de possuir um diâmetro exterior superior ao *40x28mm* possui uma secção e peso linear inferior. O que ocorreu no dimensionamento manual foi que, aquando do dimensionamento manual, foi necessário partir para um tubo com módulo de flexão superior a 4,5cm³, e sendo assim foi seleccionado o tubo *40x28mm* pois é o primeiro da tabela que respeita essa condição, apesar de ter secção superior ao tubo *50x44mm*. Porém o tubo *50x44mm* é mais leve e é também adequado a esta instalação, tal como é demonstrado nos cálculos fornecidos pelo programa e apresentados no ANEXO 4.

Com o cálculo manual estaria-se portanto a incorrer numa solução mais cara e sobredimensionada. Esta é a prova da grande utilidade que o programa pode assumir, fundamentalmente no aspecto económico.

Ainda assim, de modo a verificar que o tubo *40x28mm* também poderia ser aplicado, utiliza-se agora o programa para verificar se esse tubo é adequado ou não para esta subestação.

Selecciona-se então o tubo na base de dados, como ilustrado na Figura 6.2, e dá-se instruções ao programa para que este verifique a viabilidade do tubo *40x28mm* para esta instalação. Os resultados e cálculos efectuados neste procedimento podem ser consultados no ANEXO 5, e pela sua observação é possível verificar que o referido tubo é adequado, tal como já tinha sido demonstrado na secção 3.5.

Base de Dados

Perfis disponíveis

Material:

Ordenar por:

Dimensões

20x8	Corrente Admissível	1300	A
32x26	Secção	641	mm ²
40x34	Peso Linear	5.72	kg/m
32x24	Módulo de Flexão	4.78	cm ³
32x22	Momento de Inércia	9.55	cm ⁴
50x44			
40x32			
32x20			
40x30			
63x57			
50x42			
40x28			
50x40			
80x74			
63x55			

Introduzir novo tubo

Verificar tubo

Figura 6.2 - Seleccionar o tubo 40x28mm para teste

Capítulo 7

Conclusões

O presente projecto surgiu como uma necessidade empresarial, no sentido de otimizar um processo que, além de ser efectuado numerosas vezes no ramo de negócio da empresa, é bastante moroso e trabalhoso. Este processo, embora não sendo linear, é passível de ser executado por uma aplicação informática, com alguma interacção por parte do utilizador, nomeadamente em momentos em que é necessária a decisão humana.

O problema consiste no dimensionamento de condutores rígidos para emprego em barramentos de subestações. Existem no mercado, variados condutores rígidos de dimensões standardizadas, e o objectivo deste processo é encontrar entre esses perfis aquele que satisfaz as condições necessárias para ser empregue na subestação e é economicamente mais viável. O processo de cálculo consiste em começar por escolher o perfil mais barato e ir efectuando os cálculos, de modo a verificar se este é adequado ou não à subestação em causa. No caso de não se verificar alguma das condições, há que escolher outro perfil, de características mais adequadas e verificar se este cumpre todas as condições, e assim sucessivamente.

Estas condições de que se fala, consistem na verificação de que é viável o emprego do condutor em determinada subestação, tendo em vista os seguintes parâmetros:

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

Como é possível verificar no presente documento, o dimensionamento de condutores rígidos, ou seja, a verificação das condições acima referidas, implica não só a execução de um grande número de cálculos eléctricos e mecânicos, como também a constante consulta de tabelas e ábacos no sentido de extrair dados necessários ao cálculo. A consulta de tabelas prende-se maioritariamente com a pesquisa de valores relativos ao perfil escolhido no

momento e ao material pelo qual este é composto. A consulta de ábacos, por sua vez, está relacionada com a determinação de parâmetros da rede eléctrica à qual a subestação se encontra ligada, e da sua influência nas grandezas eléctricas da subestação.

A aplicação desenvolvida, efectuando todos estes processos automaticamente vem obviamente poupar tempo e dinheiro, pois desta forma não há necessidade de partir para aplicações informáticas pagas, uma vez que não existem versões freeware, e poupa-se tempo na medida em que torna o dimensionamento muito mais rápido, tendo o utilizador que fazer pouco mais do que introduzir os dados iniciais.

Por vezes pode também surgir a situação de a empresa possuir já perfis condutores em armazém, e o utilizador, aquando do projecto de uma subestação, desejar efectuar os cálculos de modo a verificar se aquele perfil específico é ou não adequado à subestação em causa. Esta situação foi também considerada, possibilitando ao utilizador escolher qual o perfil para o qual quer efectuar os cálculos.

Outra das características importantes da aplicação é a forma de apresentação de resultados. Quando está completo o cálculo, é encontrado o perfil mais adequado, a aplicação não se limita a informar o utilizador de qual o perfil dimensionado. Para além disso apresenta também ao utilizador, todos os cálculos como que se tivessem sido efectuados manualmente, e oferece a possibilidade de os imprimir ou guardar. Esta forma de apresentação dos resultados é extremamente importante pois no projecto de licenciamento de uma subestação, é obviamente obrigatória a apresentação de todos os cálculos efectuados para dimensionamento do equipamento utilizado. Deste modo os cálculos ficam no poder do utilizador, que os pode anexar na memória descritiva.

Para além do dimensionamento de barramentos, o programa possui outra vertente de funcionamento, sem a qual, aliás, a primeira não poderia funcionar. Trata-se da base de dados construída para a aplicação. Na base de dados, a nível de perfis, foi introduzida informação relativa apenas a perfis de secção tubular, ao invés dos vários perfis existentes no mercado, como inicialmente foi proposto. Isto deve-se ao facto de que em subestações os perfis utilizados se resumem a perfis tubulares, não fazendo sentido o programa conter informação relativa a outros perfis e que não seria utilizada. Relativamente aos materiais constituintes dos perfis condutores, os mais utilizados são o cobre, o alumínio, e o pantal. A informação disponível contempla estes três materiais.

Está também incluída informação relativa à determinação de certos parâmetros da rede eléctrica.

A base de dados permite portanto que o utilizador evite a consulta de tabelas e ábacos, caso contrário a aplicação seria apenas um programa que se limita a fazer cálculos.

Por fim convém salientar que quando se efectua um dimensionamento manual e se consultam as tabelas referentes aos perfis existentes, no caso dos tubos, estes vêm ordenados primeiramente, do diâmetro exterior menor para o maior, e seguidamente do diâmetro interior maior para o menor (sentido do aumento da secção para tubos com o mesmo diâmetro exterior). Porém, como foi explicado no Capítulo 5, esta ordenação não garante que os tubos estejam ordenados da menor secção para a maior. Ora sabendo que a secção influencia directamente o peso linear do perfil, e que os perfis são vendidos a peso, se nos guiarmos pela ordem das tabelas o perfil escolhido no fim do dimensionamento poderá não ser a solução viável mais barata. De forma a resolver esse problema, optimizando a vertente económica o programa, quando efectua o dimensionamento, ordena os perfis por secção e desta forma garante-se sempre a solução mais barata.

Relativamente a preços, foi encontrada junto dos fornecedores alguma resistência (compreensivelmente) no sentido de responderem a sucessivas consultas de preços, quando informados do objectivo das mesmas (manter os preços actualizado na base de dados, e não a compra de material). Deste modo não se elaborou a base de dados referente aos preços tanto dos perfis como dos isoladores como inicialmente era proposto. Porém tendo-se optado por organizar os perfis do mais leve para o mais pesado acaba por se garantir, ainda assim, a solução economicamente mais favorável.

Com excepção desta última contrariedade, pode dizer-se que os objectivos do trabalho foram atingidos. Foi ainda incluída a funcionalidade da apresentação do dimensionamento sob a forma de cálculos elaborados manualmente, que inicialmente não estava prevista.

Referências

1. CEI 865-1 INTERNATIONAL STANDARD. Short-circuit currents - Calculation of effects; Second Edition 1993-09
2. Guthmann, Otto and Pöhlmannm Rolf andSchmitt, Willi J. and Tettenborn, Wolfgang and Wittwer, Helmut, *Manual de Instalações Eléctricas*, BROWN BOVERI & CIE, ed. ORDEM DOS ENGENHEIROS-REGIÃO NORTE . 1982 Porto-Portugal.
3. Guthmann, Otto and Pöhlmannm Rolf andSchmitt, Willi J. and Tettenborn, Wolfgang and Wittwer, Helmut, *Manual de Instalações Eléctricas*, BROWN BOVERI & CIE, ed. ORDEM DOS ENGENHEIROS-REGIÃO NORTE . 1982 Porto-Portugal. p235.
4. Guthmann, Otto and Pöhlmannm Rolf andSchmitt, Willi J. and Tettenborn, Wolfgang and Wittwer, Helmut, *Manual de Instalações Eléctricas*, BROWN BOVERI & CIE, ed. ORDEM DOS ENGENHEIROS-REGIÃO NORTE . 1982 Porto-Portugal. pp234, 245.
5. Guthmann, Otto and Pöhlmannm Rolf andSchmitt, Willi J. and Tettenborn, Wolfgang and Wittwer, Helmut, *Manual de Instalações Eléctricas*, BROWN BOVERI & CIE, ed. ORDEM DOS ENGENHEIROS-REGIÃO NORTE . 1982 Porto-Portugal. p47.
6. Guthmann, Otto and Pöhlmannm Rolf andSchmitt, Willi J. and Tettenborn, Wolfgang and Wittwer, Helmut, *Manual de Instalações Eléctricas*, BROWN BOVERI & CIE, ed. ORDEM DOS ENGENHEIROS-REGIÃO NORTE . 1982 Porto-Portugal. p91.
7. Apontamentos da disciplina de Distribuição de Energia I 2006 - LEEC, Moura, António Machado; Dos Santos, José Neves.
8. Guthmann, Otto and Pöhlmannm Rolf andSchmitt, Willi J. and Tettenborn, Wolfgang and Wittwer, Helmut, *Manual de Instalações Eléctricas*, BROWN BOVERI & CIE, ed. ORDEM DOS ENGENHEIROS-REGIÃO NORTE . 1982 Porto-Portugal. p581.
9. Diário da República nº297 Série I de 26/12/1984, Decreto Regulamentar nº90/84 de 26/12/1984.
10. Guthmann, Otto and Pöhlmannm Rolf andSchmitt, Willi J. and Tettenborn, Wolfgang and Wittwer, Helmut, *Manual de Instalações Eléctricas*, BROWN BOVERI & CIE, ed. ORDEM DOS ENGENHEIROS-REGIÃO NORTE . 1982 Porto-Portugal. p102.
11. Guthmann, Otto and Pöhlmannm Rolf andSchmitt, Willi J. and Tettenborn, Wolfgang and Wittwer, Helmut, *Manual de Instalações Eléctricas*, BROWN BOVERI & CIE, ed. ORDEM DOS ENGENHEIROS-REGIÃO NORTE . 1982 Porto-Portugal. p103.
12. Guthmann, Otto and Pöhlmannm Rolf andSchmitt, Willi J. and Tettenborn, Wolfgang and Wittwer, Helmut, *Manual de Instalações Eléctricas*, BROWN BOVERI & CIE, ed. ORDEM DOS ENGENHEIROS-REGIÃO NORTE . 1982 Porto-Portugal. p46.
13. Guthmann, Otto and Pöhlmannm Rolf andSchmitt, Willi J. and Tettenborn, Wolfgang and Wittwer, Helmut, *Manual de Instalações Eléctricas*, BROWN BOVERI & CIE, ed. ORDEM DOS ENGENHEIROS-REGIÃO NORTE . 1982 Porto-Portugal. p47.
14. Guthmann, Otto and Pöhlmannm Rolf andSchmitt, Willi J. and Tettenborn, Wolfgang and Wittwer, Helmut, *Manual de Instalações Eléctricas*, BROWN BOVERI & CIE, ed. ORDEM DOS ENGENHEIROS-REGIÃO NORTE . 1982 Porto-Portugal. p55.

15. Guthmann, Otto and Pöhlmannm Rolf andSchmitt, Willi J. and Tettenborn, Wolfgang and Wittwer, Helmut, *Manual de Instalações Eléctricas*, BROWN BOVERI & CIE, ed. ORDEM DOS ENGENHEIROS-REGIÃO NORTE . 1982 Porto-Portugal. p236.
16. Resistência dos Materiais V30 - <http://www.mspc.eng.br/matr/resmat0530.shtml> - Consultado a 30/05/2009

ANEXO 1

Tabela 6-35

Condutores de cobre de secção tubular, temperatura ambiente de 35°C, temperatura do condutor 65°C; com corrente alternada, distância entre centros de fases $\geq 2,5 \times$ diâmetro exterior.

Diâmetro exterior mm	Espes- sura da parede mm	Secção mm ²	Peso ¹⁾ kg/m	Material ²⁾	Corrente permanente em A c.c. e c.a. até 60 Hz			
					no interior pintado	nú	no exterior pintado	nú
20	2	113	1.01	E-Cu F 37	384	329	460	449
	3	160	1.43	E-Cu F 37	457	392	548	535
	4	201	1.79	E-Cu F 30	512	438	613	599
	5	236	2.10	E-Cu F 30	554	475	664	648
	6	264	2.35	E-Cu F 25	591	506	708	691
32	2	188	1.68	E-Cu F 37	602	508	679	660
	3	273	2.44	E-Cu F 37	725	611	818	794
	4	352	3.14	E-Cu F 30	821	693	927	900
	5	424	3.78	E-Cu F 30	900	760	1020	987
	6	490	4.37	E-Cu F 25	973	821	1100	1070
40	2	239	2.13	E-Cu F 37	744	624	816	790
	3	349	3.11	E-Cu F 37	899	753	986	955
	4	452	4.04	E-Cu F 30	1020	857	1120	1090
	5	550	4.90	E-Cu F 30	1130	944	1240	1200
	6	641	5.72	E-Cu F 25	1220	1020	1340	1300
50	3	443	3.95	E-Cu F 37	1120	928	1190	1150
	4	578	5.16	E-Cu F 30	1270	1060	1360	1310
	5	707	6.31	E-Cu F 30	1410	1170	1500	1450
	6	829	7.40	E-Cu F 25	1530	1270	1630	1570
	8	1060	9.42	E-Cu F 25	1700	1420	1820	1750
63	3	565	5.04	E-Cu F 30	1390	1150	1440	1390
	4	741	6.61	E-Cu F 30	1590	1320	1650	1590
	5	911	8.13	E-Cu F 30	1760	1460	1820	1750
	6	1070	9.58	E-Cu F 25	1920	1590	1990	1910
	8	1380	12.3	E-Cu F 25	2150	1780	2230	2140
80	3	726	6.47	E-Cu F 30	1750	1440	1760	1690
	4	955	8.52	E-Cu F 30	2010	1650	2020	1930
	5	1180	10.5	E-Cu F 30	2230	1820	2230	2140
	6	1400	12.4	E-Cu F 25	2430	1990	2440	2340
	8	1810	16.1	E-Cu F 25	2730	2240	2740	2630
100	3	914	8.15	E-Cu F 30	2170	1770	2120	2020
	4	1210	10.8	E-Cu F 30	2490	2030	2430	2320
	5	1490	13.3	E-Cu F 30	2760	2250	2700	2580
	6	1770	15.8	E-Cu F 25	3020	2460	2950	2820
	8	2310	20.6	E-Cu F 25	3410	2780	3330	3180

ANEXO 2

EUROREDUTOR-Comércio de Máquinas e Ferramentas,
Lda

Rua Eugénio de Castro, Lote 699-Loja A
BRANDOA
2700 AMADORA

TEL:4760645

FAX:4760521

TUBO DE COBRE

LISTA DE PREÇOS

ØEXT/ØINT	PREÇO/m	
25/21	1.617\$00	
30/26	1.939\$00	
30/22	3.771\$00	
40/35	2.500\$00	
40/30	6.487\$00	
50/40	8.238\$00	
60/55	5.000\$00	
60/54	6.040\$00	
60/50	9.855\$00	
70/64	7.398\$00	
70/60	11.973\$00	
80/74	8.560\$00	
80/70	13.903\$00	
90/80	15.967\$00	
100/90	17.852\$00	
120/104	35.329\$00	

Obs: Os preços apresentados não incluem o I.V.A e, estarão sujeitos a alteração de acordo com a flutuação do preço do cobre.



EUROREDUTOR-Comércio de Máquinas e Ferramentas,
Lda

Rua Eugénio de Castro, Lote 699-Loja A
BRANDOA
2700 AMADORA

TEL:4760645

FAX:4760521

TUBO DE ALUMÍNIO

LISTA DE PREÇOS

ØEXT/ØINT	PREÇO/m	KG/m
25/21	280\$00	0,392
30/26	340\$00	0,475
30/23	563\$00	0,788
40/30	1.062\$00	1,485
50/40	1.363\$00	1.906
60/55	871\$00	1.218
60/50	1.669\$00	2.333
70/64	1.218\$00	1.704
70/60	1.554\$00	2.174
80/75	1.174\$00	1.642
80/70	2.274\$00	3.180
90/80	2.578\$00	3.605
100/90	2.880\$00	4.028
120/106	4.798\$00	6.710
120/104	5.434\$00	7.600

OBS: Os preços apresentados não incluem o I.V.A e, estarão sujeitos a alteração de acordo com a flutuação do preço do alumínio.

ANEXO 3

DADOS

Corrente de serviço - Is	A
Corrente de curto-circuito - Icc	kA
Frequência - f	Hz
Factor χ - χ	
Factor I_{cc}''/I_p - I_{cc}''/I_p	
Distância entre apoios - l	m
Distância entre fases - a	m
Tempo de actuação das protecções - t	s
Carga de segurança à flexão	kg/cm ²

TUBO ESCOLHIDO: xmm em

VERIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DE AQUECIMENTO

Corrente de serviço: A O tubo é adequado à corrente
 Corrente admissível no tubo: A de serviço da instalação.

**VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA AO CURTO-CIRCUITO
(ESFORÇOS ELECTRODINÂMICOS)**

Corrente de choque: $I_{ch} = \chi \times \sqrt{2} \times I_{cc} = \quad \times \sqrt{2} \times \quad = \quad A$

A força electromagnética entre condutores é dada por:

$$Fe = 0,2 \times I_{ch}^2 \times \frac{l}{a} = 0,2 \times \quad^2 \times \frac{\quad}{\quad} = \quad N \Rightarrow \quad kgf$$

(com I_{ch} em kA)

O que origina o seguinte momento flector:

$$mf = \frac{Fe \times l}{16} = \frac{\quad \times \quad}{16} = \quad kgf / cm$$

(com l em cm)

O módulo de flexão do tubo escolhido é:

$$W = \pi \times \frac{D^4 - d^4}{32 \times D} = \pi \times \frac{\quad^4 - \quad^4}{32 \times \quad} = \quad mm^3 \Rightarrow \quad cm^3$$

Para que a resistência mecânica do tubo seja superior aos esforços a que será sujeita em caso de curto-circuito, é necessário que se verifique a seguinte condição:

$$W \geq \frac{mf}{\sigma} \Leftrightarrow W \geq \frac{\quad}{\quad} \Leftrightarrow \quad \geq \quad \rightarrow OK$$

(admitindo uma carga de segurança à flexão (σ) de

VERIFICAÇÃO DOS ESFORÇOS TÉRMICOS DEVIDOS AO CURTO CIRCUITO

Consultando o ábaco BBC736966, tendo em conta os parâmetros: χ , t e I_{cc}/I_p definidos, obtêm-se os valores m e n , factores que levam em conta a componente contínua e alternada da corrente de curto-circuito.

$$\left. \begin{array}{l} \chi = \\ t = \end{array} \right\} m =$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{I_{cc}}{I_p} = \\ t = \end{array} \right\} n =$$

A partir daqui a corrente térmica pode ser calculada através de:

$$I_{th} = I_{cc} \times \sqrt{m + n} = \quad \times \sqrt{\quad + \quad} = \quad A$$

$$\text{A secção mínima é dada por: } S_{\min} = \frac{I_{th}}{k} \sqrt{t} = \frac{\quad}{\quad} \sqrt{\quad} = \quad mm^2$$

A secção do tubo escolhido é dada por:

$$S = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 - \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \times \left(\frac{\quad}{2}\right)^2 - \pi \times \left(\frac{\quad}{2}\right)^2 = \quad mm^2$$

Sendo portanto superior à secção mínima exigida.

VERIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DE RESSONÂNCIA

A distância entre apoios consecutivos é: $\quad$ cm

O peso linear do tubo, assumindo uma massa volúmica de $\quad \times 10^{-6} kg/mm^3$ para o $\quad$, é:

$$p = \text{Secção} \times \text{massa volúmica} = \quad \times \quad \times 10^{-6} = \quad kg/mm \Rightarrow \quad kg/cm$$

O momento de inércia do tubo em questão é dado por:

$$J = \pi \times \frac{D^4 - d^4}{64} = \pi \times \frac{\quad^4 - \quad^4}{64} = \quad mm^4 \Rightarrow \quad cm^4$$

(com D e d em cm)

Com Modulo de Young para o $\quad$, $E = \quad kgf/cm^2$

Finalmente, a frequência própria de oscilação do tubo é dada por:

$$f_0 = 112 \sqrt{\frac{E \times J}{p \times l^4}} = 112 \sqrt{\frac{\quad \times \quad}{\quad \times \quad^4}} = \quad Hz$$

(com l em cm)

Que está longe da frequência eléctrica da instalação, e do seu dobro, ou seja, está fora do intervalo:

$$[\quad ; \quad] \cup [\quad ; \quad]$$

ANEXO 4

DADOS

Corrente de serviço - Is	96 A
Corrente de curto-circuito - Icc	25 kA
Frequência - f	50 Hz
Factor χ - χ	1,8
Factor I_{cc}''/I_p - I_{cc}''/I_p	2,5
Distância entre apoios - l	4 m
Distância entre fases - a	1,5 m
Tempo de actuação das protecções - t	0,5 s
Carga de segurança à flexão	1200 kg/cm ²

TUBO ESCOLHIDO: **50x44mm em Cobre**

VERIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DE AQUECIMENTO

Corrente de serviço: 96 A

Corrente admissível no tubo: 1150 A

O tubo é adequado à corrente de serviço da instalação.

VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA AO CURTO-CIRCUITO (ESFORÇOS ELECTRODINÂMICOS)

Corrente de choque: $I_{ch} = \chi \times \sqrt{2} \times I_{cc} = 1,8 \times \sqrt{2} \times 25000 = 63640 \text{ A}$

A força electromagnética entre condutores é dada por:

$$F_e = 0,2 \times I_{ch}^2 \times \frac{l}{a} = 0,2 \times 63,6396^2 \times \frac{4}{1,5} = 2160 \text{ N} \Rightarrow 216 \text{ kgf}$$

(com I_{ch} em kA)

O que origina o seguinte momento flector:

$$mf = \frac{F_e \times l}{16} = \frac{216 \times 400}{16} = 5400 \text{ kgf / cm}$$

(com l em cm)

O módulo de flexão do tubo escolhido é:

$$W = \pi \times \frac{D^4 - d^4}{32 \times D} = \pi \times \frac{50^4 - 44^4}{32 \times 50} = 4912 \text{ mm}^3 \Rightarrow 4,912 \text{ cm}^3$$

Para que a resistência mecânica do tubo seja superior aos esforços a que será sujeita em caso de curto-circuito, é necessário que se verifique a seguinte condição:

$$W \geq \frac{mf}{\sigma} \Leftrightarrow W \geq \frac{5400}{1200} \Leftrightarrow 4,912 \geq 4,5 \rightarrow OK$$

(admitindo uma carga de segurança à flexão (σ) de

VERIFICAÇÃO DOS ESFORÇOS TÉRMICOS DEVIDOS AO CURTO CIRCUITO

Consultando o ábaco BBC736966, tendo em conta os parâmetros: χ , t e I_{cc}/I_p definidos, obtêm-se os valores m e n , factores que levam em conta a componente contínua e alternada da corrente de curto-circuito.

$$\left. \begin{array}{l} \chi = 1,8 \\ t = 0,5 \text{ s} \end{array} \right\} m = 0,09$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{I_{cc}}{I_p} = 2,5 \\ t = 0,5 \text{ s} \end{array} \right\} n = 0,78$$

A partir daqui a corrente térmica pode ser calculada através de:

$$I_{th} = I_{cc} \times \sqrt{m + n} = 25000 \times \sqrt{0,09 + 0,78} = 23318 \text{ A}$$

$$\text{A secção mínima é dada por: } S_{\min} = \frac{I_{th}}{k} \sqrt{t} = \frac{23318}{159} \sqrt{0,5} = 103,7 \text{ mm}^2$$

A secção do tubo escolhido é dada por:

$$S = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 - \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \times \left(\frac{50}{2}\right)^2 - \pi \times \left(\frac{44}{2}\right)^2 = 443 \text{ mm}^2$$

Sendo portanto superior à secção mínima exigida.

VERIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DE RESSONÂNCIA

A distância entre apoios consecutivos é: 400 cm

O peso linear do tubo, assumindo uma massa volúmica de $8,9 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ para o cobre, é:

$$p = \text{Secção} \times \text{massa volúmica} = 443 \times 8,9 \times 10^{-6} = 0,003942 \text{ kg/mm} \Rightarrow 0,03942 \text{ kg/cm}$$

O momento de inércia do tubo em questão é dado por:

$$J = \pi \times \frac{D^4 - d^4}{64} = \pi \times \frac{50^4 - 44^4}{64} = 122812 \text{ mm}^4 \Rightarrow 12,28 \text{ cm}^4$$

(com D e d em cm)

Com Modulo de Young para o cobre, $E = 1100000 \text{ kgf/cm}^2$

Finalmente, a frequência própria de oscilação do tubo é dada por:

$$f_0 = 112 \sqrt{\frac{E \times J}{p \times l^4}} = 112 \sqrt{\frac{1100000 \times 12,28}{0,03942 \times 400^4}} = 12,96 \text{ Hz}$$

(com l em cm)

Que está longe da frequência eléctrica da instalação, e do seu dobro, ou seja, está fora do intervalo:

$$[45 ; 55] \cup [90 ; 110]$$

ANEXO 5

DADOS

Corrente de serviço - Is	96 A
Corrente de curto-circuito - Icc	25 kA
Frequência - f	50 Hz
Factor χ - χ	1,8
Factor I_{cc}''/I_p - I_{cc}''/I_p	2,5
Distância entre apoios - l	4 m
Distância entre fases - a	1,5 m
Tempo de actuação das protecções - t	0,5 s
Carga de segurança à flexão	1200 kg/cm ²

TUBO ESCOLHIDO: 40x28mm em Cobre

VERIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DE AQUECIMENTO

Corrente de serviço: 96 A

Corrente admissível no tubo: 1300 A

O tubo é adequado à corrente de serviço da instalação.

VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA AO CURTO-CIRCUITO (ESFORÇOS ELECTRODINÂMICOS)

Corrente de choque: $I_{ch} = \chi \times \sqrt{2} \times I_{cc} = 1,8 \times \sqrt{2} \times 25000 = 63640 \text{ A}$

A força electromagnética entre condutores é dada por:

$$F_e = 0,2 \times I_{ch}^2 \times \frac{l}{a} = 0,2 \times 63,6396^2 \times \frac{4}{1,5} = 2160 \text{ N} \Rightarrow 216 \text{ kgf}$$

(com I_{ch} em kA)

O que origina o seguinte momento flector:

$$mf = \frac{F_e \times l}{16} = \frac{216 \times 400}{16} = 5400 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$$

(com l em cm)

O módulo de flexão do tubo escolhido é:

$$W = \pi \times \frac{D^4 - d^4}{32 \times D} = \pi \times \frac{40^4 - 28^4}{32 \times 40} = 4775 \text{ mm}^3 \Rightarrow 4,775 \text{ cm}^3$$

Para que a resistência mecânica do tubo seja superior aos esforços a que será sujeita em caso de curto-circuito, é necessário que se verifique a seguinte condição:

$$W \geq \frac{mf}{\sigma} \Leftrightarrow W \geq \frac{5400}{1200} \Leftrightarrow 4,775 \geq 4,5 \rightarrow OK$$

(admitindo uma carga de segurança à flexão (σ) de

VERIFICAÇÃO DOS ESFORÇOS TÉRMICOS DEVIDOS AO CURTO CIRCUITO

Consultando o ábaco BBC736966, tendo em conta os parâmetros: χ , t e I_{cc}/I_p definidos, obtêm-se os valores m e n , factores que levam em conta a componente contínua e alternada da corrente de curto-circuito.

$$\left. \begin{array}{l} \chi = 1,8 \\ t = 0,5 \text{ s} \end{array} \right\} m = 0,09$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{I_{cc}}{I_p} = 2,5 \\ t = 0,5 \text{ s} \end{array} \right\} n = 0,78$$

A partir daqui a corrente térmica pode ser calculada através de:

$$I_{th} = I_{cc} \times \sqrt{m + n} = 25000 \times \sqrt{0,09 + 0,78} = 23318 \text{ A}$$

$$\text{A secção mínima é dada por: } S_{\min} = \frac{I_{th}}{k} \sqrt{t} = \frac{23318}{159} \sqrt{0,5} = 103,7 \text{ mm}^2$$

A secção do tubo escolhido é dada por:

$$S = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 - \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \times \left(\frac{40}{2}\right)^2 - \pi \times \left(\frac{28}{2}\right)^2 = 641 \text{ mm}^2$$

Sendo portanto superior à secção mínima exigida.

VERIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DE RESSONÂNCIA

A distância entre apoios consecutivos é: 400 cm

O peso linear do tubo, assumindo uma massa volúmica de $8,9 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ para o cobre, é:

$$p = \text{Secção} \times \text{massa volúmica} = 641 \times 8,9 \times 10^{-6} = 0,005704 \text{ kg/mm} \Rightarrow 0,05704 \text{ kg/cm}$$

O momento de inércia do tubo em questão é dado por:

$$J = \pi \times \frac{D^4 - d^4}{64} = \pi \times \frac{40^4 - 28^4}{64} = 95492 \text{ mm}^4 \Rightarrow 9,5492 \text{ cm}^4$$

(com D e d em cm)

Com Modulo de Young para o cobre, $E = 1100000 \text{ kgf/cm}^2$

Finalmente, a frequência própria de oscilação do tubo é dada por:

$$f_0 = 112 \sqrt{\frac{E \times J}{p \times l^4}} = 112 \sqrt{\frac{1100000 \times 9,5492}{0,05704 \times 400^4}} = 9,50 \text{ Hz}$$

(com l em cm)

Que está longe da frequência eléctrica da instalação, e do seu dobro, ou seja, está fora do intervalo:

$$[45 ; 55] \cup [90 ; 110]$$