



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação



Aplicação Informática para Dimensionamento de Barramentos em Subestações

FILIPE ANDRÉ MADURO TAVARES
(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica – ramo de Energia

Orientadores:

Prof^ª. Cristina Inês Camus

Assist. Eduardo Adelino Mateus Nunes Eusébio

Júri:

Presidente: Prof. Mário Augusto de Andrade Moreira

1º Vogal: Prof^ª. Cristina Inês Camus

2º Vogal: Prof. João Herminio Ninitas Lagarto

Setembro de 2015



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação



Aplicação Informática para Dimensionamento de Barramentos em Subestações

FILIPE ANDRÉ MADURO TAVARES
(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica – ramo de Energia

Orientadores:

Prof^ª. Cristina Inês Camus

Assist. Eduardo Adelino Mateus Nunes Eusébio

Júri:

Presidente: Prof. Mário Augusto de Andrade Moreira

1º Vogal: Prof^ª. Cristina Inês Camus

2º Vogal: Prof. João Herminio Ninitas Lagarto

Setembro de 2015

Dissertação realizada sob orientação de:

Professora Cristina Inês Camus

Professora Adjunta da Área Departamental
de Engenharia de Eletrotécnica de Energia e Automação

Assistente Eduardo Adelino Eusébio

Equiparado a Assistente 2º Triénio da Área Departamental
de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação

*“Let the future tell the truth,
and evaluate each one according to his work and accomplishments.
The present is theirs;
the future, for which I have really worked, is mine.”*

Nikola Tesla

Resumo

O conjunto de procedimentos necessários para o dimensionamento dos condutores que constituem os barramentos das subestações é um processo complexo, no qual devem, obrigatoriamente, ser considerados diversos cálculos e consultadas diversas tabelas em documentos normativos e catálogos de fabricantes, de forma a uma adequação correta do barramento às condições em que será instalado.

Por se tratar de um processo trabalhoso, que inclui a execução e comparação de inúmeros cálculos e parâmetros, surge a necessidade de agilizar este processo através da criação de uma aplicação informática para o efeito.

Esta aplicação será capaz de armazenar numa base de dados atualizável os diversos tipos de condutores elétricos existentes no mercado, bem como tabelas com parâmetros padrão que serão utilizados em algumas etapas dos cálculos. Posteriormente, será possível consultar a informação armazenada, assim como aplicá-la automaticamente na execução dos cálculos, onde a partir da introdução dos dados iniciais da subestação em projeto (características da rede, dos condutores e do local de instalação), a aplicação realizará os cálculos necessários para o dimensionamento dos barramentos e por fim disponibilizará ao utilizador a hipótese de imprimir os cálculos efetuados.

Palavra-chave: Subestações

Dimensionamento de Barramentos

Condutores Rígidos

Condutores Flexíveis

Aplicações Informáticas

Abstract

The necessary set of procedures to calculate the conductor size, which constitutes the substations busbar, is a complex process. Several calculations should be performed and, at the same time, several normative tables and manufactures catalogs must be consulted, in order to consider all the conditions to choose the correct busbar.

Since it is a laborious process, which includes execution and comparison of various calculus and parameters, there is the need to simplify this process by creating a computer application for the purpose.

This application will be able to store an upgradeable database, with the different existing electrical conductors in the market and tables with default parameters which will be used in some steps of the calculus. Posteriorly, it will be possible to consult the stored information, as well as apply it automatically in the calculus performing, where, after introducing the substation under project initial data (network characteristics, electrical conductors and site location), the application will run the necessary calculus for the busbar sizing and in the end it will allow the user the possibility to print a report with all the performed calculus.

Keywords: Electrical substations

Busbar sizing

Hard conductors

Flexible conductors

Computer applications

Agradecimentos

Ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa,

Pelo orgulho de pertencer a esta instituição.

Ao Diogo, ao Guilherme, ao Pedro e à Soraia,

Pela amizade, entajuda e convívio nesta caminhada pela vida académica.

Aos meus orientadores, Cristina e Eusébio,

Pela disponibilidade, apoio e esforço que despenderam para me orientar e levar este trabalho a bom porto.

A todos os meus colegas, professores e funcionários do instituto,

Que de uma forma ou de outra marcaram o meu percurso académico e contribuíram para que pudesse chegar aqui.

Aos meus pais,

Pelos valores que me inculcaram, pela educação e pelas oportunidades que me proporcionaram, o que se traduziu no que sou hoje.

Ao meu irmão,

Pela infinita paciência e por toda a ajuda que me deu durante a elaboração desta dissertação.

A toda a minha família,

Por serem o pilar que me suporta nos bons e maus momentos.

À Sílvia,

Por todo o apoio, compreensão e muita paciência.

Aos meus amigos,

Pelo apoio nos bons e maus momentos e também pelas críticas que me motivaram a dar sempre o meu melhor.

Índice

Índice de Tabelas	xi
Índice de Figuras	xiii
Lista de Acrónimos	xvii
Lista de Símbolos	xix
1 Introdução.....	3
1.1 Enquadramento / Estado da Arte	3
1.2 Motivação	4
1.3 Objeto de Estudo.....	5
1.3.1 Objetivo/Hipóteses	5
1.4 Estrutura do Documento	5
1.5 Notação	6
2 Equipamentos e Materiais de Alta Tensão	9
2.1 Subestações	9
2.2 Equipamentos das Subestações	10
2.2.1 Transformadores de Potência	10
2.2.2 Transformadores de Intensidade de Corrente	11
2.2.3 Transformadores de Tensão	11
2.2.4 Seccionadores de Linha	12
2.2.5 Seccionadores de Terra.....	13
2.2.6 Disjuntores.....	14
2.2.7 Descarregadores de Sobretensões.....	15
2.2.8 Reatâncias Limitadoras	16
2.2.9 Barramentos.....	17
2.3 Materiais	20
2.3.1 Isoladores.....	20
2.3.2 Ligadores	23

2.3.3	Condutores.....	24
3	Métodos de Dimensionamento.....	31
3.1	Regulamentação e Legislação.....	31
3.2	Condutores rígidos.....	32
3.2.1	Processo de cálculo pelo método IEC909 + Manual BBC.....	32
3.2.2	Processo de cálculo pelo método IEC909+IEC865-1.....	38
3.3	Condutores flexíveis.....	44
3.3.1	Processo de cálculo pelo método IEEE738+IEC909+865-1+826.....	44
4	Descrição da Aplicação.....	57
4.1	Objetivos.....	57
4.2	Ferramentas computacionais.....	57
4.3	Fluxograma.....	58
4.4	Base de dados.....	60
4.5	Interface.....	61
4.6	Funcionalidades.....	62
5	Casos de Estudo.....	67
5.1	Cálculo para barramento com condutor rígido a 60kV.....	67
5.2	Cálculo para barramento com condutor flexível a 60kV.....	73
6	Conclusões e Desenvolvimentos futuros.....	83
6.1	Conclusões.....	83
6.2	Desenvolvimentos futuros.....	85
	Referências Bibliográficas.....	89
	Anexo 1 – Fator m.....	95
	Anexo 2 – Fator n.....	99
	Anexo 3 – Fator ψ	103
	Anexo 4 – Valores máximos possíveis para $V_{\sigma}V_{r'}$, $V_{os}V_{rs'}$, e V_FV_r	107
	Anexo 5 – Fatores α , β e γ	111

Anexo 6 – Fator q	115
Anexo 7 – Catálogo de Cabos de Alumínio.....	119
Anexo 8 – Catálogo de Cabos de Cobre	123
Anexo 9 – Catálogo de Tubos de Alumínio.....	127
Anexo 10 – Catálogo de Tubos de Cobre	131
Apêndice 1 – Relatório de cálculos para cabos	135
Apêndice 2 – Relatório de cálculos para tubos	139

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades dos isoladores de porcelana	22
Tabela 2.2 - Propriedades dos isoladores de vidro	22
Tabela 3.1 - Dados iniciais.....	32
Tabela 3.2 – Valores do fator k padronizados para o alumínio e para o cobre	36
Tabela 3.3 - Valores padronizados do módulo de Young para o alumínio e cobre	37
Tabela 3.4 - Dados iniciais.....	38
Tabela 3.5 - Dados iniciais.....	44
Tabela 3.6 - Gama de valores do número de Reynolds	46
Tabela 3.7 - Intervalo de valores para o qual são válidas as equações enunciadas	47
Tabela 3.8 – Valores do fator k padronizados para o alumínio e para o cobre	52

Índice de Figuras

Figura 2.1- Transformador de Potência	10
Figura 2.2 - Transformador de Intensidade.....	11
Figura 2.3 - Tranformador de Tensão	12
Figura 2.4 - Seccionadores de Linha.....	13
Figura 2.5 - Seccionadores de Terra	13
Figura 2.6 - Disjuntor.....	14
Figura 2.7 - Níveis de tensão com e sem DST	15
Figura 2.8 - Descarregador de Sobretensões.....	16
Figura 2.9 - Reatâncias Limitadoras	17
Figura 2.10 - Barramentos	18
Figura 2.11 - Esquema de barramento simples	19
Figura 2.12 - Esquema de barramento simples seccionado	19
Figura 2.13 - Esquema barramento duplo	20
Figura 2.14 - Isolador em porcelana	21
Figura 2.15 - Isolador em vidro	21
Figura 2.16 - Isolador em polímero	21
Figura 2.17 - Condutores flexíveis.....	25
Figura 2.18 - Condutores rígidos	25
Figura 2.19 - Perfis em barra	26
Figura 2.20 - Perfis tubulares.....	26
Figura 3.1 - Relação entre o fator Chi e o coeficiente entre a resistência e a reatância da rede	33
Figura 3.2 - Fator m em função do parâmetro χ	35
Figura 3.3 - Fator n em função de I_k''/I_k	35
Figura 3.4 - Valores máximos possíveis de $V\sigma V_r$	40
Figura 3.5 - Fator β para diferentes disposições de suportes	40
Figura 3.6 - Fator q	41
Figura 3.7 - Valores máximos possíveis de $V_F V_r$	42
Figura 3.8 - Fator α para diferentes disposições de suportes	42
Figura 3.9 - Efeito Flecha verificado num condutor.....	43
Figura 3.10 - Relação entre o fator Chi e o coeficiente entre a resistência e a reatância da rede	50

Figura 3.11 - Fator ψ relativo à força de tensão a que estão sujeitos os condutores flexíveis	51
Figura 3.12 - Fator m em função do parâmetro χ	51
Figura 3.13 - Fator n em função de I_k''/I_k	52
Figura 3.14 - Densidade da corrente instantânea para condutores em cobre	53
Figura 3.15 - Densidade da corrente instantânea para condutores em alumínio	53
Figura 3.16 - Efeito Flecha verificado num condutor	54
Figura 4.1 - Fluxograma geral da aplicação.....	58
Figura 4.2 - Validações necessárias para o dimensionamento dos tubos	59
Figura 4.3 - Validações necessárias para o dimensionamento dos cabos	60
Figura 4.4 - Menu inicial	61
Figura 4.5 - Menu de iniciação de dimensionamento	62
Figura 4.6 - Menu para inserção das características do barramento	62
Figura 4.7 - Menu de inserção das características da subestação e submenu para determinação do fator m	63
Figura 5.1 - Características da rede.....	67
Figura 5.2 - Características do barramento	68
Figura 5.3 - Características da subestação	68
Figura 5.4 - Fator m	69
Figura 5.5 - Fator n	69
Figura 5.6 - Condição de resistência mecânica ao curto-circuito	70
Figura 5.7 - Condição de esforços térmicos devidos ao curto-circuito.....	70
Figura 5.8 - Condição de ressonância	71
Figura 5.9 - Distância máxima entre apoios	71
Figura 5.10 - Imprimir resumo de cálculos.....	72
Figura 5.11 - Características da rede.....	73
Figura 5.12 - Características do barramento	74
Figura 5.13 - Características da subestação	74
Figura 5.14 - Balanço térmico	75
Figura 5.15 - Fator ψ	75
Figura 5.16 – Esforços mecânicos devidos ao curto-circuito	76
Figura 5.17 - Fator m	76
Figura 5.18 - Fator n	77
Figura 5.19 - Condição de esforços térmicos devidos ao curto-circuito.....	77

Figura 5.20 – Cálculo do efeito de flecha	78
Figura 5.21 - Imprimir resumo de cálculos.....	79

Lista de Acrónimos

- ❖ ABB Asea Brown Boveri
- ❖ AT Alta Tensão
- ❖ BBC Brown Boveri Company
- ❖ BT Baixa Tensão
- ❖ DST Descarregador de Sobretensões
- ❖ EN European Standard
- ❖ EPDM Ethylene Propylene Diene Monomer
- ❖ IEC International Electrotechnical Commission
- ❖ IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers
- ❖ MAT Muito Alta Tensão
- ❖ MT Média Tensão
- ❖ ONAF Óleo Natural Ar Forçado
- ❖ ONAN Óleo Natural Ar Natural
- ❖ PDF Portable Document Format
- ❖ RSSPTS Regulamento de Segurança de Subestações e Postos de Transformação e de Seccionamento
- ❖ TI Transformador de Intensidade
- ❖ TP Transformador de Potência
- ❖ TT Transformador de Tensão
- ❖ SQL Structured Query Language
- ❖ VBA Visual Basic for Applications

Lista de Símbolos

A	Secção do condutor	mm ²
a	Distância entre fases	m
A _{min}	Secção mínima do condutor	mm ²
Al	Material do barramento (Alumínio)	-
Cu	Material do barramento (Cobre)	-
D	Diâmetro externo do condutor	mm
d	Diâmetro interno do condutor	mm
E	Módulo de elasticidade (Módulo de Young)	N/mm ²
f	Frequência da rede	Hz
F _d	Força de flexão sobre os suportes	N
F _e	Força eletromagnética	N
f _e	Efeito de flecha	m
f _l	Frequência limite para cálculo das distâncias entre apoios	Hz
f _{pp}	Força unitária por peso próprio	kg/m
f _r	Frequência de ressonância	Hz
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
H _c	Altitude do sol	°
H _e	Elevação acima do nível do mar	m
I _k	Corrente de curto-circuito	kA
I _k ^{''} /I _k	Decréscimo da componente alternada da corrente de curto-circuito	-
I _p	Corrente de pico	kA
I _s	Corrente de serviço	A
I _{st}	Corrente de serviço térmica	A
I _{th}	Corrente térmica	kA
I _z	Corrente máxima admissível	A
J	Momento de inércia	mm ⁴
k	Quantificador temporal para fadiga térmica do condutor	-
k _f	Condutividade térmica do ar	W/(m.°C)
k _s	Fator de correção da elevação do sol	W/(m.°C)
k _φ	Fator direção do vento	-
l	Distância entre apoios	m
m	Coefficiente térmico da componente contínua da corrente	-
m _c	Massa linear do condutor (cabos)	kg/m
mC _p	Capacidade total de aquecimento do condutor	J/kg-°C
m _f	Momento fletor	N.m
n	Coefficiente térmico da componente alternada da corrente	-
N _{Re}	Número de Reynolds	-
p	Massa linear do condutor (tubos)	kg/m
p _{ca}	Peso próprio unitário (cabos)	kg/m
p _h	Fator de peso do condutor em função do seu raio	kg/m
p _{pt}	Peso próprio unitário (tubos)	kg/m
q	Fator que define o tipo de perfil do condutor	-
q _c	Perdas por convecção	W/m
q _{cf}	Convecção forçada	W/m
q _{cn}	Convecção natural	W/m
q _r	Perdas por radiação	W/m
Q _s	Quantidade de calor recebido	W/m ²
q _s	Aquecimento solar	W/m

Q_{se}	Quantidade de calor recebido (valor corrigido)	W/m^2
r	Raio do condutor	mm
R	Resistência do condutor	Ω
$R_{p0,2}$	Limite de elasticidade	N/mm^2
s	Constante relativa à espessura do condutor	-
S_T	Potência do transformador	MVA
S_{th}	Densidade da corrente instantânea	A/mm^2
t	Tempo de atuação das proteções	s
T_a	Temperatura ambiente	$^{\circ}C$
T_{avg}	Valor interpolado da temperatura	$^{\circ}C$
T_f	Temperatura de fronteira	$^{\circ}C$
T_{high}	Valor superior da temperatura	$^{\circ}C$
T_{low}	Valor inferior da temperatura	$^{\circ}C$
T_s	Temperatura à superfície do condutor	$^{\circ}C$
U_c	Tensão composta	kV
$V_F V_r$	Fator de rearme após curto-circuito	-
V_w	Velocidade do vento	m/s
$V_{\sigma} V_r$	Fator de rearme após curto-circuito	-
W_d	Espessura da parede do condutor	mm
X	Reatância do condutor	Ω
Z	Módulo de flexão	cm^3
Z_0	Constante relative ao módulo de flexão	-
Z_c	Azimute do sol	$^{\circ}$
Z_l	Linha de azimute	$^{\circ}$
Z_{min}	Módulo de flexão mínimo	cm^3
Z_t	Esforço de tração do condutor	N
α	Fator apoio dos suportes	-
α_s	Coefficiente de absorção solar	-
β	Fator de tipo de apoio dos suportes	-
ε	Fator desgaste do condutor	-
θ	Ângulo de incidência dos raios solares	$^{\circ}$
μ_0	Permeabilidade do vácuo	H/m
μ_f	Viscosidade do ar	Pa.s
ξ	Fator cálculo da força caso os condutores entrem em contacto	-
ρ_f	Densidade do ar	kg/m^3
σ	Carga de segurança à flexão	N/mm^2
σ_m	Tensão de flexão	N/mm^2
φ	Valor relativo à força de tensão sobre o condutor	-
χ	Decréscimo da componente contínua da corrente de curto-circuito	-
ψ	Valor relativo à força de tensão sobre o condutor	-

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo realiza-se uma abordagem à temática da utilização de aplicações informáticas na simplificação dos processos de dimensionamento. Faz-se um enquadramento da problemática em estudo, enuncia-se os principais pontos que motivaram a análise desta temática e refere-se qual o objeto de estudo implícito na mesma. Especifica-se a organização, bem como a notação utilizadas na elaboração deste documento.

1 Introdução

1.1 Enquadramento / Estado da Arte

O recurso a ferramentas informáticas tem vindo a verificar-se cada vez mais uma constante no que diz respeito às áreas de projeto de instalações elétricas. Por se tratarem, na maior parte dos casos, de processos complexos e padronizados que implicam a execução de inúmeros cálculos e consulta de diversas tabelas de características, surge a necessidade de automatização dos mesmos.

Aliando a possibilidade de armazenamento de grandes quantidades de informação dos produtos existentes no mercado à capacidade de cálculo dos computadores, as aplicações informáticas tornam-se assim numa poderosa e útil ferramenta de apoio aos projetistas.

Atualmente diversos fabricantes de material elétrico já disponibilizam os seus próprios *softwares* de cálculo, embora na maior parte dos casos, com a desvantagem de serem pagos e apenas permitirem efetuar o dimensionamento com base nos seus próprios produtos.

Face a este panorama, emerge a necessidade de uma solução que possibilite a incorporação de qualquer alternativa disponível no mercado, permitindo assim ao utilizador personalizar a aplicação informática com os condutores elétricos à sua escolha.

Em suma, a utilização desta aplicação torna-se uma grande vantagem, pois a mesma é capaz de comportar qualquer tipo de condutor, bastando para isso o carregamento dos dados do mesmo na base de dados. Outra vantagem é o facto de ter como base o *Microsoft Access*, um *software* amplamente utilizado em todo o mundo, o que permite uma fácil utilização a qualquer pessoa e a compatibilidade com a maior parte dos sistemas operativos.

1.2 Motivação

Nos últimos anos tem-se vindo a assistir a uma crescente preocupação com o meio ambiente, associadas à evolução tecnológica do setor elétrico, as energias renováveis surgem assim como uma alternativa cada vez mais sustentável na produção de energia elétrica.

Aliando a problemática das fontes de produção de energia não renovável ao crescente aumento das necessidades de consumo torna-se imperativa a construção de novas centrais de geração de energia.

Desde a geração até ao consumo verifica-se a necessidade de transformação dos níveis de tensão elétrica. Após a geração de energia nas centrais, o nível de tensão desta é elevado para Alta Tensão, AT ou Muito Alta Tensão, MAT para a energia ser transportada até junto das zonas de consumo, esta necessidade de aumento do nível de tensão é justificada pela consequente diminuição do valor da corrente, que se traduz na diminuição das perdas e da secção dos condutores. Perto das zonas de consumo volta a ser preciso transformar o nível de tensão, desta vez baixando-o para Média Tensão, MT ou Baixa Tensão, BT para ser integrado na rede de distribuição onde seguirá até ao consumidor final.

Constata-se então que o aumento do número de centrais geradoras implica diretamente o aumento do número de subestações e, conseqüentemente, a necessidade de desenvolvimento e melhoramento dos métodos de dimensionamento dos vários componentes das mesmas.

No caso específico da presente dissertação serão abordados alguns métodos de dimensionamento de condutores rígidos e flexíveis que constituem os barramentos presentes nos vários troços de uma subestação e a adaptação desses métodos para construção duma aplicação informática.

1.3 Objeto de Estudo

Numa primeira fase serão analisados os métodos de cálculo manuais essenciais para a escolha e validação dos condutores que constituem o barramento, as suas vantagens e inconvenientes e será dado um exemplo prático de cálculo para o dimensionamento de condutores flexíveis (cabos de cobre e alumínio) e outro para condutores rígidos (perfis tubulares também em cobre ou alumínio).

Posteriormente será construída uma aplicação informática, na qual após introdução por parte do utilizador das características da rede, do barramento e da subestação, esta efetuará automaticamente os cálculos necessários à validação dos barramentos escolhidos.

1.3.1 Objetivo/Hipóteses

Este trabalho terá como principal objetivo resolver a problemática enunciada anteriormente, ou seja, analisar as vantagens e desvantagens da substituição do método de cálculo manual pelo método de cálculo com recurso a uma aplicação informática e apresentar os exemplos práticos para diferentes tipos de condutores.

1.4 Estrutura do Documento

A presente dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos metodicamente organizados, sendo iniciada com uma abordagem geral da problemática em estudo e do estado da arte, algumas definições teóricas, métodos e procedimentos de cálculo manual e informático, passando por exemplos práticos e finalizando com conclusões e possíveis desenvolvimentos futuros.

No primeiro capítulo é realizado um enquadramento do recurso aos meios informáticos no apoio ao dimensionamento dos barramentos, é referida a motivação e objeto de estudo que impulsionaram à realização da presente dissertação e, por fim, é exposta a notação utilizada neste documento.

No segundo capítulo é feita uma análise teórica ao conceito de subestação, são definidos os equipamentos que a constituem, dando especial ênfase aos barramentos na explicitação de algumas configurações e dos materiais em que são fabricados.

No terceiro capítulo são apresentadas a regulamentação e legislação que suportam os métodos de cálculo em estudo. Seguidamente são descritos três métodos de dimensionamento possíveis: Para condutores rígidos utilizam-se procedimentos baseados no Manual de Instalações Elétricas da BBC, e nas normas IEC 909 e IEC 865-1, para os condutores flexíveis utiliza-se um método que se baseia para além das normas referidas anteriormente, na IEC 826 e na IEEE *Std 738*.

No quarto capítulo são enunciados os objetivos a alcançar com a aplicação informática, apresenta-se a justificação para a escolha das ferramentas computacionais, por fim descreve-se a estrutura da aplicação e as suas funcionalidades.

No quinto capítulo são apresentados os casos práticos para os métodos em estudo, e elaborados cálculos exemplificativos para dimensionamento de barramentos em situações e locais distintos de uma subestação.

No último capítulo, o sexto, são apresentadas as conclusões decorrentes do estudo elaborado e indicados possíveis desenvolvimentos futuros para a aplicação informática.

1.5 Notação

No presente documento a identificação de referências bibliográficas será apresentada entre parêntesis retos [], a numeração de expressões é apresentada entre parêntesis curvos () e terá dois algarismos, o primeiro referente ao número do capítulo em que este se encontra e o segundo representa o número da equação em cada capítulo. Em relação às figuras e tabelas estas são apresentadas igualmente com dois algarismos com referência ao capítulo em que são apresentadas e numeradas de forma sequencial. A seguir ao índice de tabelas e figuras são apresentadas as listas de acrónimos e símbolos. Expressões em língua estrangeira são apresentadas em formato itálico.

As referências bibliográficas estão apresentadas de acordo com a norma do *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, IEEE.

Capítulo 2

Equipamentos e Materiais de Alta Tensão

Neste capítulo é feita uma abordagem teórica ao conceito de subestação, aos equipamentos que a constituem, dando uma maior ênfase aos barramentos na explicitação de algumas das suas configurações e dos materiais em que são fabricados.

2 Equipamentos e Materiais de Alta Tensão

2.1 Subestações

Vivemos num planeta cada vez mais dependente da energia elétrica, a crescente procura pela energia imprescindível para satisfazer as cada vez maiores necessidades de consumo converge na construção de cada vez mais e maiores centrais de geração de energia elétrica. Estas centrais de geração podem ser de vários tipos, tais como eólica, hídrica, solar, termoelétrica ou nuclear, dependendo dos recursos disponíveis.

As centrais de geração de energia nem sempre ficam situadas perto dos grandes centros de consumo. E a forma economicamente mais rentável de realizar o transporte de energia será elevando a tensão produzida nas centrais de geração para ser transportada por linhas de MAT ou AT até locais perto das zonas de consumo, ou quando perto das zonas de consumo baixar o nível de tensão, por exemplo para AT ou MT, para mais tarde integrar a rede de distribuição [3] [22] [23].

As subestações têm como principal função efetuar estas transformações dos níveis de tensão. Uma subestação elétrica é constituída essencialmente pelo parque de aparelhagem exterior, pelo edifício de comando e rede de terras. Sendo o parque exterior composto por um conjunto de equipamentos de manobra, transformação, proteção e monitorização, enquanto o edifício de comando é onde estão instalados os equipamentos de comando e controlo [3] [5] [15].

As subestações também se podem classificar de acordo com a sua função. Entre os principais tipos estão as subestações de manobra, que permitem efetuar alterações na configuração do sistema elétrico; as subestações de transformação, que têm como principal propósito a transformação do nível de tensão e as subestações de regulação, que permitem a regulação da tensão na rede [5] [23] [33].

Considerando que o sistema elétrico nacional tem vindo a tornar-se mais complexo, a subestação é cada vez mais um elemento de interligação e gestão do trânsito de energia, pois para além da transformação dos níveis de tensão, protege a rede em situações de curto-circuitos e sobrecargas, permite gerir falhas de energia e possibilita a gestão do fluxo de energia [23].

2.2 Equipamentos das Subestações

A transformação dos níveis de tensão é um processo com alguma complexidade, do qual faz parte um conjunto de equipamentos que agrupados formam um sistema capaz de elevar e diminuir os níveis da tensão gerada. De uma forma geral os equipamentos que constituem o sistema de transformação de energia são transformadores, seccionadores, disjuntores, descarregadores de sobretensões, reatâncias, isoladores, ligadores e condutores, entre outros [20] [25].

2.2.1 Transformadores de Potência

De todos os equipamentos constituintes de uma subestação, o transformador de potência, TP é consideravelmente o mais importante, pois é ao TP que cabe o principal processo, a transformação dos níveis de tensão sem que haja alteração dos valores da frequência.

As primeiras referências a transformadores datam do ano de 1880, mais tarde em 1950 foi introduzido na rede alta tensão a 400kV o primeiro transformador. Entre as décadas de 70 e 80 do século passado surgiram os primeiros transformadores com potência superior a 1100MVA.

Existem diversos tipos de transformadores, que podem ser classificados de acordo com os fins pretendidos. Concretamente no caso dos que são instalados nas subestações, estes situam-se no parque exterior, possuem enrolamentos normalmente em cobre, imersos em óleo mineral e o seu sistema de arrefecimento pode ser de dois tipos: ONAN (Óleo Natural Ar Natural) ou ONAF (Óleo Natural Ar Forçado) [15] [18] [25] [37].



Figura 2.1- Transformador de Potência

2.2.2 Transformadores de Intensidade de Corrente

Os transformadores de intensidade de corrente, TI tem como função produzir uma imagem da corrente que transita no circuito, nos casos em que os valores de corrente são demasiado elevados para permitirem a utilização de aparelhagem de medição direta.

A corrente que circula no enrolamento do primário é transformada numa corrente induzida no enrolamento do secundário segundo uma dada relação de transformação, possibilitando assim a utilização de dispositivos para monitorização de elevadas correntes no primário.

Em alguns casos os TI são complementados com diversos circuitos secundários de características adequadas às aplicações específicas a que se destinam, tais como medição, monitorização, proteção, entre outros.

Na altura da escolha de um TI devem ser considerados os seus principais atributos: tensão nominal primária, corrente nominal primária, corrente nominal secundária, classe de precisão e potência nominal [15] [29] [37].



Figura 2.2 - Transformador de Intensidade

2.2.3 Transformadores de Tensão

As funções do transformador de tensão, TT são idênticas às do TI, mas no caso do TT este tem como função efetuar a transformação da tensão do primário para uma tensão proporcionalmente mais baixa no enrolamento do secundário, possibilitando assim a utilização de dispositivos para monitorização de elevadas tensões no primário.

Em alguns casos os TT são complementados com diversos circuitos secundários, de características adequadas às aplicações específicas a que se destinam, tais como medição, monitorização, proteção, entre outras.

Os principais atributos a considerar relativamente aos TT são: tensão nominal primária, tensão nominal secundária, classe de precisão e potência nominal [15] [29] [37].



Figura 2.3 - Transformador de Tensão

2.2.4 Seccionadores de Linha

O Seccionador de Linha é um equipamento de interrupção do circuito. Pode ser do tipo de duas ou três colunas rotativas, com abertura central ou dupla lateral de polos separados, podendo possuir comando manual ou em alternativa comando motorizado. Os movimentos de abertura e fecho realizam-se pela rotação horizontal dos contactos instalados nos braços móveis.

Apesar de ser um equipamento para interrupção do circuito, este não possui poder de corte em carga. É utilizado, essencialmente, durante as ações de manutenção, pois sendo de “corte visível” confere uma maior segurança aos elementos das equipas de manutenção [25] [28] [29].



Figura 2.4 - Seccionadores de Linha

2.2.5 Seccionadores de Terra

São idênticos aos seccionadores de linha no que diz respeito ao modo de funcionamento, mas com funções diferentes. Os seccionadores de terra são utilizados também durante as ações de manutenção, mas neste caso têm como função ligar a linha em manutenção à rede de terras de forma prevenir acidentes caso a linha seja inadvertidamente energizada [25] [28] [29].



Figura 2.5 - Seccionadores de Terra

2.2.6 Disjuntores

Atualmente, as redes de transporte e distribuição de energia comportam um elevado número de equipamentos que em conjunto constituem complexos sistemas. Quando ocorre um defeito no circuito os equipamentos podem ficar sujeitos a correntes e tensões bastante elevadas, que caso não sejam rapidamente controladas podem dar origem a danos graves nos mesmos e colocar em risco a integridade física de quem estiver nas imediações. Após a interrupção de energia e regularização do problema segue-se a reposição em serviço do circuito, esta reposição poderá ser manual ou motorizada.

Na base de todo este processo estão os disjuntores. Contrariamente aos seccionadores, os disjuntores possuem poder de corte em carga, tendo como objetivo a proteção contra sobreintensidades originadas por curto-circuitos e sobrecargas.

Quanto ao seu método de atuação, em condições normais de operação, os contactos encontram-se fisicamente ligados possibilitando a normal circulação de corrente elétrica. Ao detetar a sobreintensidade os contactos do disjuntor abrem de forma a salvaguardar a integridade da instalação a jusante. Esta separação dos contactos irá provocar um arco elétrico e de forma a evitar as perigosas consequências da formação do arco os contactos estão situados numa câmara de corte, preenchida com um gás dielétrico, que possibilita a rápida extinção do arco e arrefecimento da temperatura [25] [28] [29].



Figura 2.6 - Disjuntor

2.2.7 Descarregadores de Sobretensões

O descarregador de sobretensões, DST constitui-se como uma proteção indispensável numa instalação elétrica exterior. Quando da ocorrência de um aumento brusco e elevado no valor da tensão, este atua conduzindo a elevada corrente gerada durante a sobretensão para o circuito de terras, evitando assim danos nos equipamentos.

Na figura seguinte é possível constatar em caso de sobretensão os níveis de tensão no circuito com e sem proteção.

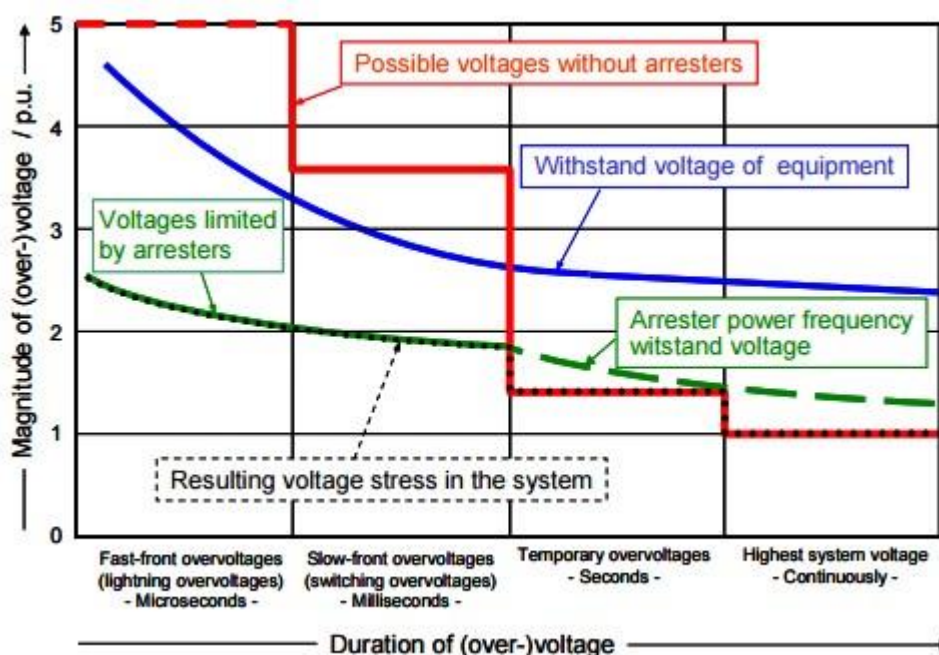


Figura 2.7 - Níveis de tensão com e sem DST [36]

Certos valores de sobretensão podem não implicar a entrada em funcionamento do descarregador, desde que os valores de tensão se mantenham abaixo dos níveis máximos de isolamento suportados pelos equipamentos. Quando esses valores limite são ultrapassados inicia-se a intervenção dos descarregadores. Uma vez em funcionamento, estes devem garantir uma margem de segurança para a tensão máxima suportada e assegurar que suportam continuamente uma elevada tensão sem perigo de causar danos nos equipamentos [36].



Figura 2.8 - Descarregador de Sobretensões

2.2.8 Reatâncias Limitadoras

As reatâncias limitadoras têm como principal função limitar a intensidade das correntes de curto-circuito. São equipamentos que possuem alguns aspectos de construção semelhantes aos transformadores, entre os quais o modo de aplicação dos enrolamentos e a possibilidade de serem imersas em óleo ou com isolamento seco. Os seus valores nominais habitualmente variam entre o 3 e os 125 MVA com tensões correspondente que variam desde os 4,6 aos 765kV.

Estes equipamentos dividem-se em duas categorias, as reatâncias série e as reatâncias *shunt*:

- **Reatâncias série**

A aplicação destas reatâncias em pontos específicos da rede pode ser fundamental para baixar a corrente originada por um defeito para valores admissíveis.

A utilização destes dispositivos pode também ser uma considerável vantagem do ponto de vista económico, pois sendo corretamente aplicados aquando do dimensionamento de uma rede possibilitam que se torne dispensável o investimento em aparelhagem mais complexa e conseqüentemente de elevado custo, tais como disjuntores de altas capacidades e condutores especiais.

No entanto, apresentam como desvantagem o aumento da necessidade de regulação do sistema elétrico, particularmente nos casos de alimentação de cargas com fatores de potência relativamente baixos. Ainda assim este problema pode ser atenuado através da aplicação de reguladores de tensão.

- **Reatâncias *shunt***

Este tipo de reatâncias utiliza-se frequentemente em situações em que é necessário compensar correntes capacitivas bastante elevadas.

Nestas situações em que as linhas são sobrecarregadas por elevadas componentes capacitivas a utilização de reatâncias *shunt* permitem introduzir correntes em atraso que vão compensar a componente reativa na rede. Dependendo do comprimento da linha, por vezes torna-se necessário o uso de controladores de tensão em ambos os terminais da linha, de modo a absorver a energia reativa capacitiva [24].



Figura 2.9 - Reatâncias Limitadoras

2.2.9 Barramentos

Os barramentos são constituídos por vários condutores elétricos, que podem ser rígidos no caso das barras e dos tubos ou flexíveis como os cabos. Têm como propósito efetuar as interligações entre os diversos aparelhos da subestação e servir como elemento de distribuição, ou seja, pontos a partir dos quais os circuitos divergem.

O seu dimensionamento deverá ter em conta os valores da corrente em serviço contínuo, os aquecimentos máximos provocados por sobreintensidades e os esforços eletromecânicos a que poderão estar sujeitos [4] [22] [25].

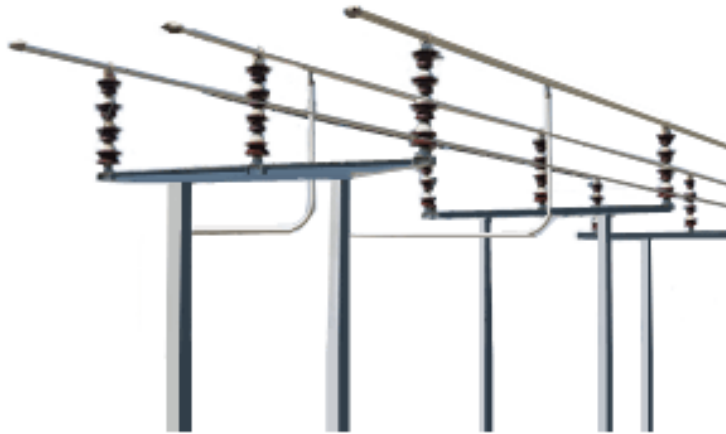


Figura 2.10 - Barramentos

Durante a execução de um projeto para uma subestação deverão ser considerados diversos requisitos técnicos, tais como disponibilidade de serviço, manutenibilidade, flexibilidade operacional e custos.

2.2.9.1 Configurações

Existem diversas configurações possíveis, sendo as principais o barramento simples, o duplo e em anel. As restantes configurações têm como base o modelo de barramento duplo e poderão ser com ligação em “U”, com *bypass*, com disjuntores, entre outros [6].

2.2.9.1.1 Simples

Esta configuração comporta apenas um barramento, é normalmente adequado a instalações de pequenas dimensões. Trata-se de uma solução mais econômica e de baixa complexidade, no entanto apresenta a desvantagem de ter que se interromper todo o circuito quando necessário efetuar ações de manutenção [6] [34].

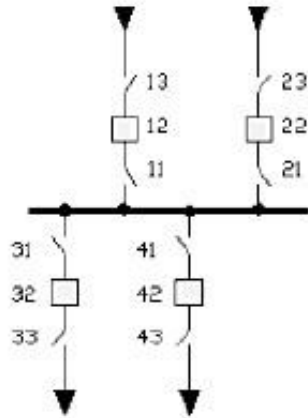


Figura 2.11 - Esquema de barramento simples [6]

2.2.9.1.1 Simples Seccionado

Esta derivação do barramento simples comporta um seccionador que divide o barramento simples em duas partes, permitindo assim quando necessário, interromper apenas uma parte do circuito para manutenção [6].

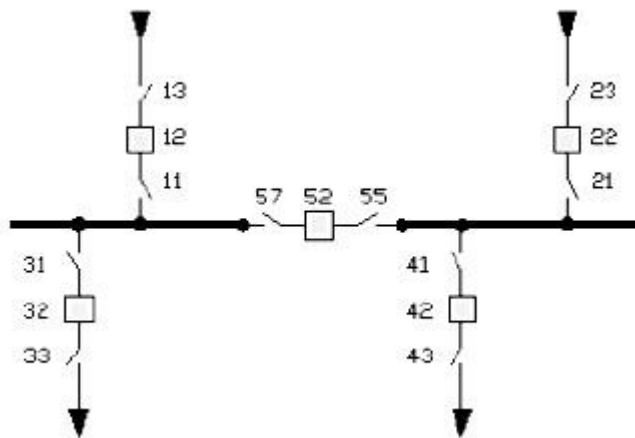


Figura 2.12 - Esquema de barramento simples seccionado [6]

2.2.9.1.2 Duplos

Trata-se da configuração mais utilizada em subestações pois confere uma maior flexibilidade e segurança à instalação. Permite a realização de manutenção sem interrupções no fornecimento de energia e possibilita a operação de manobras independentes nos vários setores da instalação.

É utilizada frequentemente em subestações de grandes dimensões [6] [34].

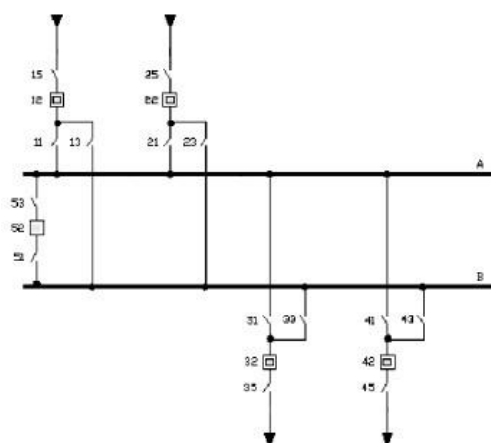


Figura 2.13 - Esquema barramento duplo [6]

2.3 Materiais

2.3.1 Isoladores

Os isoladores desempenham um papel fundamental na prevenção de contactos indirectos, ao impedirem a passagem para a terra de fluxo indesejado de corrente através dos pontos de apoio da instalação. A sua função consiste em realizar a separação física e eléctrica entre os equipamentos em tensão e as estruturas que os suportam.

Geralmente são fabricados em porcelana ou vidro temperado e destacam-se pela sua elevada capacidade de isolamento eléctrico e resistência mecânica.

No entanto elevadas correntes poderão dar origem a danos graves nos isoladores e até levar à sua perfuração. Assim sendo, torna-se fundamental um correcto dimensionamento com base nas suas propriedades. Desta forma, o material constituinte dos isoladores deverá garantir as seguintes propriedades:

- Robustez mecânica de forma a suportar o peso e tensão mecânica dos condutores;
- Elevada resistência eléctrica para permitir suportar continuamente elevados valores de tensão eléctrica;
- Elevada resistência de isolamento evitando assim fugas de corrente para a terra;
- O material deverá estar livre de impurezas na sua constituição;

- Não poderá ser poroso, nem conter cavidades de modo a não acumular humidade nem gases.

Com base nas propriedades anteriormente enunciadas é realizada a escolha do material de fabrico, sendo que a maioria dos isoladores é fabricada em porcelana, vidro ou polímero.



Figura 2.14 - Isolador em porcelana



Figura 2.15 - Isolador em vidro



Figura 2.16 - Isolador em polímero

Atualmente, a porcelana é o material mais utilizado no fabrico dos isoladores. Este material obtém-se através de um composto de silicato de alumínio, Kaolin, Feldspato e Quartzo, que juntos formam um isolador duro e de superfície envidraçada.

Tabela 2.1 - Propriedades dos isoladores de porcelana [17]

Propriedade	Valor (aproximado)
Rigidez dielétrica	60 KV / cm
Força à compressão	70,000 Kg / cm ²
Força à tração	500 Kg / cm ²

Nos últimos anos os isoladores em vidro têm vindo a ganhar espaço, principalmente nos sistemas de distribuição de energia. Trata-se de um material obtido através do recozimento do vidro e que apresenta algumas vantagens em relação aos tradicionais isoladores em porcelana, tais como:

- Resistência elétrica e de isolamento superior;
- Baixo coeficiente de expansão térmica;
- Maior resistência mecânica à tração dos condutores;
- Sendo transparente aquece menos por efeito do calor solar;
- A sua transparência permite também uma fácil deteção de bolhas e irregularidades no seu perfil;
- Apresenta um período de vida superior;
- Os custos de aquisição são menores.

Tabela 2.2 - Propriedades dos isoladores de vidro [17]

Propriedade	Valor (aproximado)
Rigidez dielétrica	140 KV / cm
Força à compressão	10,000 Kg / cm ²
Força à tração	35,000 Kg / cm ²

Um isolador polimérico é constituído por duas partes, uma de fibra de vidro reforçado por um núcleo em resina epóxi e outra por uma borracha de silicone também conhecida por EPDM (*Ethylene Propylene Diene Monomer*).

Em comparação com os perfis em porcelana e vidro, este apresenta as seguintes vantagens:

- Peso inferior;
- As suas propriedades flexíveis diminuem as possibilidades de quebra;
- Sendo mais leves e de menores dimensões o seu custo de instalação também é menor;
- Possui maior resistência à tração relativamente à porcelana;
- Apresenta um melhor desempenho em áreas poluídas;
- Menor necessidade de limpeza devido à sua natureza hidrofóbica [17] [31] [37].

2.3.1.1 Isoladores Suporte

Os isoladores de suporte têm como função, tal como o próprio nome indica, suportar os condutores que constituem os barramentos. Trata-se do tipo de isoladores mais simples, podendo assumir diversas formas, conforme a sua aplicação [37].

2.3.1.2 Isoladores Cadeia

Estes isoladores são utilizados em cadeias de amarração. Através da possibilidade de adicionar unidades em cadeia conforme os níveis de tensão da linha é possível garantir qualquer distância de contornamento.

São normalmente considerados à prova de perfuração, pois no caso de ocorrer uma descarga entre a haste e a campânula apenas a asa do isolador fica danificada, devendo no entanto ser posteriormente substituído de forma a evitar consequências numa segunda descarga na parte enfraquecida [37].

2.3.2 Ligadores

São os elementos responsáveis pelas junções entre os condutores elétricos e os restantes equipamentos. Podem ser fabricados em cobre ou alumínio, podendo ser fixos, elásticos ou deslizantes, consoante o tipo de aplicação.

Os ligadores deverão ser de simples montagem e ser dimensionados de forma a garantir que cumprem os requisitos elétricos e mecânicos adequados.

Do ponto de vista elétrico não deverão aumentar significativamente a resistência elétrica do circuito onde estão inseridos e deverão garantir uma repartição eficaz da corrente nos condutores a ligar.

Do ponto de vista mecânico deverão possuir os níveis de aperto adequados, ser resistentes à corrosão e aquecimentos e suportar o balanço e vibrações dos condutores [14] [37].

2.3.3 Condutores

Os condutores elétricos são os elementos responsáveis por realizar o transporte de energia de um ponto para outro. São na sua maioria fabricados em cobre, alumínio e por vezes ligas metálicas das quais fazem parte estes metais.

No caso do cobre, este é proveniente de minerais sulfurosos e purificado através de processos eletrolíticos, possui uma grande ductilidade o que possibilita a obtenção de fios bastante finos. Por outro lado, a sua flexibilidade tem algumas limitações devido ao endurecimento a que é sujeito durante o seu processo de fabrico.

Apesar de apresentar inúmeras qualidades a utilização do cobre ostenta algumas desvantagens, tais como uma alta densidade e um custo de produção elevado.

O alumínio possui uma película de óxido denominada por Alumina que em contacto com o ar protege o metal contra as corrosões. Possui, no entanto, algumas desvantagens, tal como o facto de quando em contacto com metais mais nobres juntamente com a presença de humidade gerar condições que conduzem lentamente à sua corrosão. Sendo que estes inconvenientes podem ser ultrapassados controladamente através das condições adequadas, o alumínio apresenta-se como o material preferencialmente utilizado em diversos campos de aplicação como, por exemplo, para condutores desde baixa a alta tensão.

Contrariamente ao cobre, o alumínio apresenta uma baixa densidade (cerca de 1/3 da densidade do cobre), o que possibilita que um condutor em cobre possa ser preterido a um condutor de alumínio com metade do seu peso, mantendo o mesmo valor de resistividade.

Existem dois tipos de configurações: designa-se por condutor nu quando este não exhibe qualquer tipo de isolamento e condutor isolado quando este é composto pela alma condutora revestida por uma ou mais camadas de material isolante. Podem ser classificados como condutores flexíveis no caso dos cabos e condutores rígidos no caso de tubos ou barras [4].

2.3.3.1 Flexíveis (Cabos)

Um condutor flexível caracteriza-se pelo número de fios que o constituem e pelo diâmetro que daí advém, estes parâmetros são definidos internacionalmente pelas normas IEC 60228 e EN 60228. Também o grau de flexibilidade / rigidez é estipulado pelas classes referidas nas normas, sendo que da classe 1 fazem parte os condutores unifilares e da classe 2 os

condutores multifilares, sendo ainda mencionado o número mínimo de fios para cada seção. Relativamente às classes 5 e 6 estas agrupam condutores para os quais a norma apenas limita o número máximo de fios que os constituem, deixando o número exato ao critério do fabricante, desde que este garanta os valores de resistência elétrica definida na norma

Particularizando ao caso da utilização em subestações, estes são habitualmente utilizados em subestações de grandes dimensões devido às maiores distâncias que é necessário cobrir. No entanto por serem flexíveis é necessário ter uma maior atenção a fatores tais como a distância entre fases, que deverá prever as oscilações provocadas pelo vento e a chuva e aos esforços eletromecânicos provocados pela passagem de energia [4] [7] [26].



Figura 2.17 - Condutores flexíveis

2.3.3.2 Rígidos (Barras e Tubos)

Trata-se de perfis rígidos fabricados em material condutor que podem assumir o formato de barras ou tubos, sendo o perfil tubular o mais utilizado.



Figura 2.18 - Condutores rígidos

Os condutores rígidos utilizam-se principalmente em subestações de menor dimensão quando existe necessidade de otimização de espaço e em alguns casos também por fatores estéticos.

A utilização destes condutores apresenta como principais vantagens em relação aos condutores flexíveis, a capacidade de melhor suportar intempéries, a fácil percepção visual do seu esquema de ligações e melhor acessibilidade aos equipamentos.

Os perfis em barra podem assumir secções circulares maciças para utilizações de correntes mais reduzidas em pequenas subestações ou secções retangulares e em “U” que por possuírem uma grande superfície têm uma maior capacidade de arrefecimento, o que lhes permite suportar elevadas correntes.

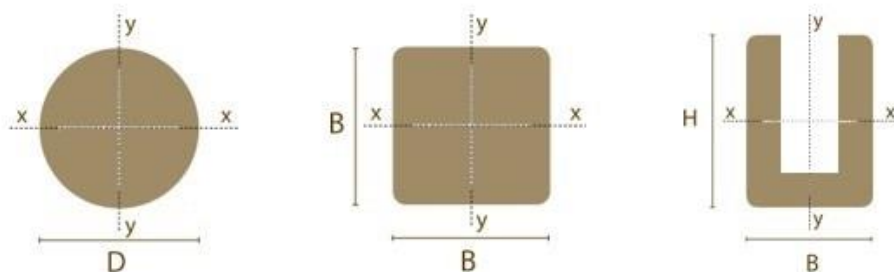


Figura 2.19 - Perfis em barra

Relativamente aos perfis tubulares a sua forma “oca” permite uma capacidade de arrefecimento ainda mais elevada devido à superfície disponível, o que proporciona um excelente comportamento eletromecânico e faz destes a principal escolha para subestações com elevados níveis de tensão.

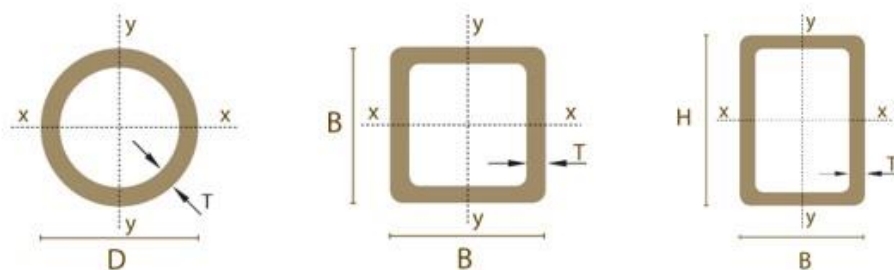


Figura 2.20 - Perfis tubulares

Devido às características enunciadas anteriormente, os perfis tubulares são na prática os mais utilizados em subestações. Estes designam-se habitualmente pelo seu diâmetro externo e interno, embora por vezes alguns fabricantes enunciem o diâmetro exterior e a espessura.

Outro fator a considerar é se o condutor está ou não pintado. Entre estas duas versões o fator determinante é no caso do condutor pintado a capacidade de suportar correntes mais elevadas. Porém, o seu custo também é mais elevado, pelo que nos casos das subestações exteriores, se opta normalmente por condutores nus, pois tal como os demais equipamentos, estes encontram-se expostos a intempéries tais como vento, chuva e granizo ou neve, fatores que acabam por ao longo do tempo atuar sobre o condutor, desgastando a pintura o que fará com que o mesmo perca os parâmetros para os quais a instalação foi inicialmente dimensionada [4] [34].

Capítulo 3

Processo de Dimensionamento

Neste capítulo serão descritos três métodos possíveis para o dimensionamento dos barramentos a instalar em subestações.

Será enunciada a regulamentação e legislação na qual foram baseados os procedimentos de cálculo e serão apresentados dois métodos de dimensionamento para condutores rígidos e um para condutores flexíveis.

3 Métodos de Dimensionamento

São inúmeros os fatores a considerar na altura da escolha do barramento a utilizar. Estes fatores poderão ser naturais, tais como o vento, a chuva, a temperatura ambiente, descargas atmosféricas ou elétricos tais como curto-circuitos e sobrecargas. Durante o dimensionamento dos barramentos deverão sempre ser considerados os parâmetros de acordo com a pior situação possível de acontecer, de forma a prever as várias condições adversas possíveis, entre as quais, o elevado aquecimento dos condutores, a sua resistência mecânica e os esforços térmicos devido ao curto-circuito. Deverão, também ser tidas em conta as frequências que podem provocar danos nos materiais caso estes entrem em ressonância e a distância máxima entre apoios com base nos efeitos de ressonância.

3.1 Regulamentação e Legislação

De seguida serão enumerados os principais documentos de regulamentação e legislação, nos quais foram baseados os métodos de dimensionamento a seguir apresentados.

- Manual de Instalações Elétricas, BBC, Edição da Ordem dos Engenheiros – Região Norte, Portugal;
- Norma IEC 909 - *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems*;
- Norma IEC 865-1 - *Short-Circuit Currents – Calculation of effects - Part 1 Definitions and Calculation Methods*;
- IEEE 738 *Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors*;
- Regulamento de Segurança de Subestações e Postos de Transformação e de Seccionamento (RSSPTS), de acordo com o Decreto-Lei 42895;
- DIT-C13-500/N - Instalações AT E MT. Subestações de Distribuição: Projeto-tipo – Memória descritiva

3.2 Condutores rígidos

3.2.1 Processo de cálculo pelo método IEC909 + Manual BBC

3.2.1.1 Dados iniciais

Antes de se dar início ao processo de cálculo existem dados que devem ser previamente conhecidos e devem ser definidas características tendo em conta as condições da rede e da subestação e o barramento escolhido. Assim sendo apresentam-se de seguida os parâmetros a considerar inicialmente:

Tabela 3.1 - Dados iniciais

Símbolo	Grandeza
f	Frequência da rede
U_c	Tensão composta
S_T	Potência do transformador
I_k	Corrente de curto-circuito
I_z	Corrente máxima admissível
σ	Carga de segurança à flexão
D	Diâmetro exterior do condutor
W_d	Espessura da parede do condutor
Z	Módulo de flexão
E	Módulo de elasticidade
A	Secção do condutor
m	Massa linear do condutor
l	Distância entre apoios
a	Distância entre fases
χ	Decréscimo da componente contínua da corrente de curto-circuito
I_k'/I_k	Decréscimo da componente alternada da corrente de curto-circuito
t	Tempo de atuação das proteções
k	Quantificador do tempo para fadiga térmica do condutor
μ₀	Permeabilidade do vácuo
Cu / Al	Material do barramento (Cobre e Alumínio, respetivamente)

3.2.1.2 Condição de aquecimento

O primeiro parâmetro a considerar na escolha de um barramento será a sua corrente máxima admissível, assim sendo, dá-se início ao dimensionamento com o cálculo da corrente de serviço da instalação a projetar, através da expressão (3.1).

Nesta fase é necessário conhecer o valor da potência do transformador e da tensão composta da rede.

$$I_s = \frac{S_T}{\sqrt{3} \times U_c} \quad [A] \quad (3.1)$$

É essencial garantir que o valor da corrente de serviço não ultrapassa o valor da corrente máxima admissível pelo barramento. Para que tal aconteça, deve-se selecionar um barramento que verifique essa condição, representada pela expressão (3.2).

$$I_z \geq I_s \quad (3.2)$$

Escolhido o barramento, procedesse à validação, comparando o valor calculado com o valor da corrente máxima admissível (I_z) fornecido pelo fabricante.

3.2.1.3 Condição de resistência mecânica ao curto-circuito

Validada a corrente máxima admissível do barramento, é essencial garantir a sua resistência mecânica aquando da ocorrência de um curto-circuito. Para que esta condição seja verificada é fundamental que o valor obtido para o módulo de flexão respeite a expressão (3.7). Para tal há que efetuar alguns cálculos intermédios, começando por aplicar a expressão (3.3) para determinar a corrente de pico (I_p), que representa o valor máximo instantâneo atingido pela corrente na fase inicial do defeito. Que será utilizada seguidamente no cálculo da força eletromagnética.

$$I_p = \chi \times \sqrt{2} \times I_k \quad [kA] \quad (3.3)$$

Para além do valor da corrente de curto-circuito (previamente conhecido), deve-se determinar através da consulta do gráfico da Figura 3.1 o valor de χ (*Chi*), que representa o decréscimo da componente contínua da corrente de curto-circuito.

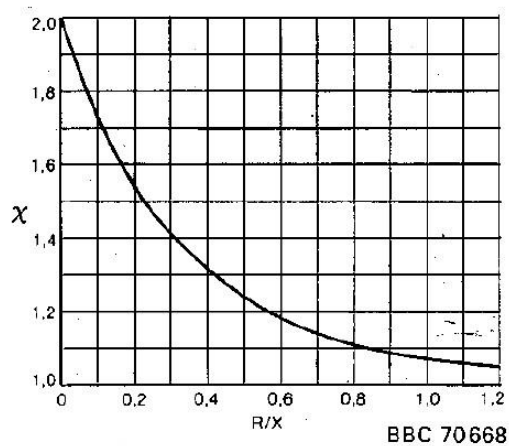


Figura 3.1 - Relação entre o fator Chi e o coeficiente entre a resistência e a reatância da rede [32]

Dado que na generalidade das redes de MT e AT o quociente $R/X = 0,07$, valor para a situação mais desfavorável, habitualmente considera-se $\chi=1,8$.

Existem agora condições para determinar a força eletromagnética, cujo valor será utilizado posteriormente para obter o momento fletor. O cálculo da força eletromagnética enunciado pela expressão (3.4) será em função da corrente de pico anteriormente calculada, da distância entre fases e da distância entre apoios.

$$F_e = \frac{\mu_0}{2\pi} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{l}{a} \times I_p^2 \quad [N] \quad (3.4)$$

Encontrado o valor da força eletromagnética, aplica-se o mesmo para calcular o momento fletor através da expressão (3.5):

$$m_f = \frac{F_e \times l}{16} \quad [N.m] \quad (3.5)$$

Estão agora reunidas as condições necessárias para determinar o valor do módulo de flexão (expressão (3.6)), esta variável pode ser descrita como o máximo momento que o perfil rígido do condutor estando fixo, poderá suportar, de forma a resistir ao movimento de rotação imposto pelo momento fletor:

$$Z = \frac{m_f}{\sigma} \quad [cm^3] \quad (3.6)$$

De forma a garantir que o barramento escolhido é o adequado à instalação deve-se verificar a expressão (3.7), comparando o valor obtido no cálculo anterior com o valor estabelecido pelo fabricante do barramento:

$$Z \geq Z_{min} \quad (3.7)$$

Caso esta condição não se verifique, torna-se necessário escolher outro perfil tubular e voltar a realizar o procedimento de verificação.

3.2.1.4 Condição de esforços térmicos devido ao curto-circuito

Esta etapa do dimensionamento foca-se na determinação do tempo que um condutor suporta a corrente de curto-circuito até atingir fadiga térmica e é quantificada fisicamente pela secção do condutor.

Para que existam condições para iniciar os cálculos que levam à obtenção da secção necessária para o condutor, começa-se por encontrar os valores dos fatores m e n , fatores

que traduzem o efeito da componente contínua da corrente de curto-circuito e o efeito da componente alternada, respetivamente.

Tal como mostra a Figura 3.2, o valor m está dependente do parâmetro χ (*Chi*) e do tempo de disparo das proteções presentes na instalação.

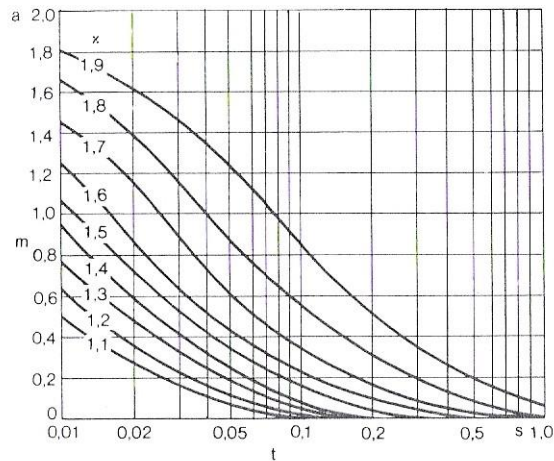


Figura 3.2 - Fator m em função do parâmetro χ [32]

No caso do fator n , o seu valor está sujeito ao tempo de disparo das proteções e ao quociente I_k''/I_k .

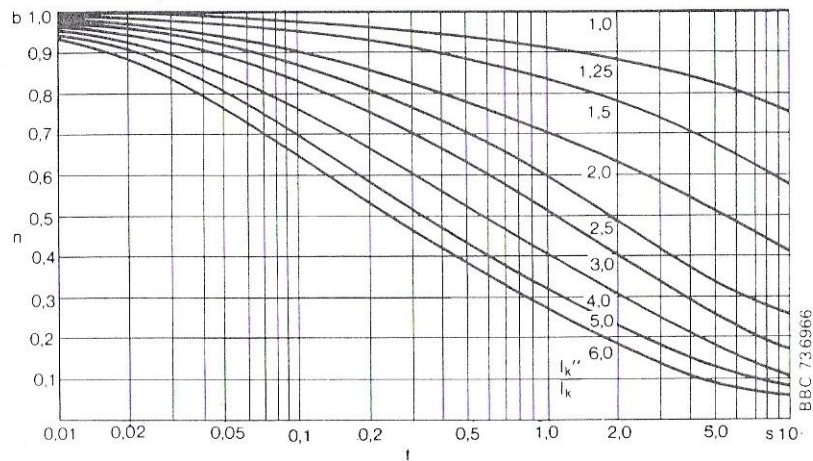


Figura 3.3 - Fator n em função de I_k''/I_k [32]

De acordo com a corrente de curto-circuito e os fatores anteriormente encontrados, calcula-se a corrente térmica recorrendo à expressão (3.8):

$$I_{th} = I_k \times \sqrt{m + n} \quad [kA] \quad (3.8)$$

Tal como exigido pela expressão (3.9), é preciso conhecer o valor da constante k , valor que quantifica a rapidez com que o condutor entra em fadiga térmica. O valor desta constante varia consoante o material de fabrico do condutor e cujos valores utilizados se encontram na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Valores do fator k padronizados para o alumínio e para o cobre [30]

Fator k	
Condutor nu em Alumínio	104
Condutor nu em Cobre	159

Existem agora condições para determinar a secção mínima do condutor, para tal aplica-se a expressão (3.9):

$$A_{min} = \frac{I_{th}}{k} \times \sqrt{t} \quad [mm^2] \quad (3.9)$$

De forma a verificar que a secção calculada suporta os esforços térmicos ocorridos durante um curto-circuito, efetua-se comparação a comparação do valor obtido com o valor do parâmetro da secção definido pelo fabricante, tal como indica a expressão (3.10):

$$A \geq A_{min} \quad (3.10)$$

Validada esta condição, chega o momento de verificar a condição de ressonância do barramento.

3.2.1.5 Condição de ressonância

Nesta fase o objetivo é garantir que a ressonância gerada no momento em que ocorre um curto-circuito se mantém distante do valor da frequência de ressonância da instalação, situação que a ocorrer poderia dar origem a estragos consideráveis. Sendo que qualquer perfil rígido apoiado entre dois pontos está sujeito a vibrações e oscilações, entre as quais os esforços eletrodinâmicos.

De forma a determinar o valor de frequência em que o barramento entra em ressonância começa-se por determinar o diâmetro interno do mesmo (expressão (3.11)), sabendo o diâmetro exterior e a espessura da parede do barramento:

$$d = D - (2 \times W_d) \quad [mm] \quad (3.11)$$

Encontrado o valor do diâmetro interior, calcula-se o momento de inércia do barramento através da expressão (3.12), que será usado depois na expressão (3.13).

$$J = \pi \times \frac{D^4 - d^4}{64} \quad [mm^4] \quad (3.12)$$

O cálculo da frequência de ressonância do barramento, exige que sejam conhecidos também parâmetros definidos pelo fabricante, tais como o seu módulo de elasticidade e peso linear

$$f_r = 112 \times \sqrt{\frac{E \times J}{p \times l^4}} \quad [Hz] \quad (3.13)$$

O módulo de elasticidade representado por E , também conhecido como módulo de *Young*. É geralmente definido por valores padronizados, os quais se encontram na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Valores padronizados do módulo de Young para o alumínio e cobre

Módulo de Young	
Material	Módulo de Young [N/mm ²]
Alumínio	70×10^3
Cobre	110×10^3

Com base no valor obtido pela expressão (3.13) e de forma a verificar a condição de ressonância, a frequência calculada deverá estar fora dos intervalos indicados na expressão (3.14) que têm por base a frequência da rede:

$$f_r \notin [f \pm 10\%] \cup [2.f \pm 10\%] \quad [Hz] \quad (3.14)$$

3.2.1.6 Cálculo da distância máxima entre apoios devido á ressonância

Por fim, é imperativo proceder-se à determinação das distâncias proibidas entre apoios, de acordo com o intervalo indicado na expressão (3.14), que diz respeito às frequências indicadas em (3.15):

$$\left\{ \begin{array}{l} f_l = f - 10\% \quad [Hz] \\ f_l = f + 10\% \quad [Hz] \\ f_l = 2.f - 10\% \quad [Hz] \\ f_l = 2.f + 10\% \quad [Hz] \end{array} \right. \quad (3.15)$$

Assim para cada uma das frequências indicadas anteriormente em (3.15), aplica-se o cálculo indicado na expressão (3.16):

$$l = \sqrt{\frac{112}{f_l}} \times \sqrt[4]{\frac{E \times J}{p}} \quad [m] \quad (3.16)$$

Encontradas as distâncias limite proibidas entre apoios, dá-se por terminado o dimensionamento.

3.2.2 Processo de cálculo pelo método IEC909+IEC865-1

3.2.2.1 Dados iniciais

Tal como o método de cálculo anterior, também este pressupõe que sejam conhecidos previamente alguns parâmetros da rede, do barramento e mais especificamente dos condutores, os quais se apresentam na seguinte tabela:

Tabela 3.4 - Dados iniciais

Símbolo	Grandeza
I_k	Corrente de curto-circuito
l	Distância entre apoios
a	Distância entre eixos dos condutores
σ_m	Tensão de flexão
V_σV_r	Fator rearme após curto-circuito
β	Fator apoio dos suportes
D	Diâmetro exterior do condutor
W_d	Espessura da parede do condutor
V_FV_r	Fator rearme após curto-circuito
α	Fator apoio dos suportes
m	Massa linear do condutor
E	Módulo de elasticidade
q	Fator que define o perfil do condutor
R_{p0,2}	Limite de elasticidade
μ₀	Permeabilidade do vácuo
χ	Decréscimo da componente contínua da corrente de curto-circuito

3.2.2.2 Força máxima sobre os condutores

De forma a determinar os valores necessários para o cálculo da força máxima exercida sobre os condutores, será preciso começar por encontrar os valores para a corrente de pico durante um curto-circuito e a distância entre condutores.

3.2.2.2.1 Corrente de pico de curto-circuito trifásico simétrico

O primeiro passo será calcular, através da expressão (3.17), a corrente de pico durante um curto-circuito trifásico simétrico, sendo que χ (*Chi*), tal como referido anteriormente, traduz o decréscimo da componente contínua da corrente de curto-circuito e para o qual é habitualmente considerado o valor de 1,8.

$$I_p = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_k \quad [kA] \quad (3.17)$$

3.2.2.2.2 Distância equivalente entre condutores

Seguidamente será definido o valor da distância entre eixos dos condutores.

$$a \quad [m] \quad (3.18)$$

3.2.2.2.3 Força máxima sobre o condutor

Após a obtenção dos valores da corrente de pico e da distância entre eixo, existem condições para determinar a força máxima suportada pelo condutor, para tal recorre-se à expressão (3.19):

$$F_e = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_p^2 \cdot \frac{l}{a} \quad [N] \quad (3.19)$$

3.2.2.3 Tensão nos condutores

3.2.2.3.1 Tensão de flexão devida às forças entre condutores

Para calcular a tensão exercida nos condutores começa-se por calcular a tensão de flexão consequente das forças entre condutores, através da expressão (3.20):

$$\sigma_m = V_\sigma V_r \cdot \beta \cdot \frac{F_e \cdot l}{8 \cdot Z} \quad [N/mm^2] \quad (3.20)$$

Em que $V_\sigma V_r$ será obtido consoante as condições da instalação, com base na Figura 3.4, cuja informação foi retirada do quadro 2 da norma IEC 865-1.

Type de court-circuit	Réseau	
	Sans réenclenchement automatique tripolaire	Avec réenclenchement automatique tripolaire
	$V_\sigma V_r, V_{\sigma s} V_{rs}$	$V_\sigma V_r, V_{\sigma s} V_{rs}$
Triphasé	1,0	1,8

Figura 3.4 - Valores máximos possíveis de $V_\sigma V_r$ [9]

Relativamente ao valor de β , este também será obtido com base na norma IEC 865-1, neste caso no quadro 3, do qual se pode ver um excerto na Figura 3.5.



Type de poutre et de support		Facteur β
Poutre continue avec supports simples équidistants	Deux portées 	0,73
	Trois portées et plus 	0,73

Figura 3.5 - Fator β para diferentes disposições de suportes [9]

Para determinar o parâmetro Z será necessário recorrer às expressões (3.21) e (3.22):

$$Z = \frac{J}{D/2} \quad [mm^3] \quad (3.21)$$

Em que o momento de inércia é dado por:

$$J = \frac{\pi}{64} \cdot [D^4 - (D - 2W_d)^4] \quad [mm^4] \quad (3.22)$$

Após determinar o valor de σ_m , procede-se à validação do valor obtido:

$$\sigma_m \leq q \cdot R_{p0,2} \quad (3.23)$$

Onde q se obtém através da Figura 3.6, consoante o tipo de condutor em estudo:

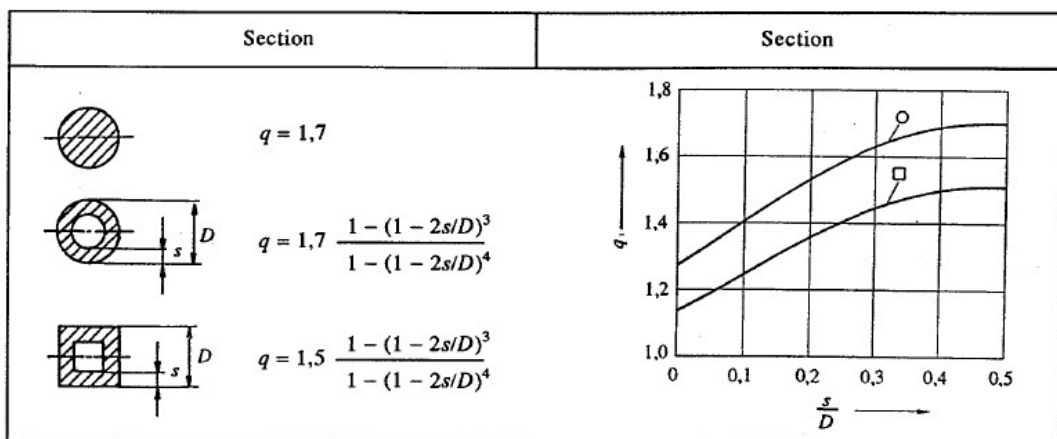


Figura 3.6 - Fator q [9]

3.2.2.3.2 Força de flexão sobre os suportes

Por fim, determina-se a flexão exercida sobre os suportes pela expressão (3.24):

$$F_d = V_F V_r \cdot \alpha \cdot F_e \quad [N] \quad (3.24)$$

O valor de $V_\sigma V_r$, este será obtido com base no quadro 2 da norma IEC 865-1, e aqui representado pela Figura 3.7.

Type de court-circuit	Réseau	
	Avec et sans réenclenchement automatique tripolaire	
	$V_F V_r$	
Triphasé	$2,7$ si $\frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 0,370$	gamme ①
	$\frac{0,8 R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ si $0,370 < \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 1,0$	gamme ②
	$1,0$ si $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}}$	gamme ③
	<p>The graph plots the product $V_F V_r$ on the y-axis against the ratio $\frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}}$ on the x-axis. The y-axis has marks at 0, 1, and 2.7. The x-axis has marks at 0, 0.37, 1, and 2. Three vertical dashed lines mark the boundaries of the ranges: 0.37, 1, and 2. The curve starts at a constant value of 2.7 for $x \leq 0.37$ (range 1), then decreases in a curve to 1.0 at $x = 1$ (range 2), and remains constant at 1.0 for $x \geq 1$ (range 3).</p>	

Figura 3.7 - Valores máximos possíveis de $V_F V_r$ [9]

E α será obtido com base no quadro 3 da IEC 865-1 consoante as condições da instalação (Figura 3.8).

Type de poutre et de support		Facteur α
Poutre continue avec supports simples équidistants	Deux portées	A: 0,375 B: 1,25
	Trois portées et plus	A: 0,4 B: 1,1

Figura 3.8 - Fator α para diferentes disposições de suportes [9]

3.2.2.4 Cálculo da flecha

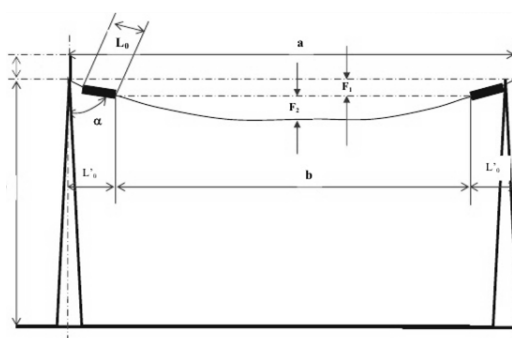


Figura 3.9 - Efeito Flecha verificado num condutor

Por fim há que considerar o efeito de flecha verificado nos condutores, principalmente nos flexíveis, que será maior quanto maior for o comprimento e o peso dos condutores, utilizando-se para isso a expressão (3.25):

$$f_e = \frac{f_{pp} \times l^4}{185 \times E \times J} \quad [m] \quad (3.25)$$

Na equação (3.26) f_{pp} é dado por:

$$f_{pp} = p_{pt} + p_{ca} + p_h \quad [kg/m] \quad (3.26)$$

Em que p_{pt} corresponde ao peso próprio unitário a utilizar em condutores de perfil tubular e p_{ca} a utilizar para condutores flexíveis, p_h que será determinado segundo a expressão (3.27).

$$p_h = 900 \times \pi \times ((r + 0,01)^2 - r^2) \quad [kg/m] \quad (3.27)$$

De formar a validar o valor obtido deve-se garantir a condição expressa em (3.28), ou seja, que este nunca seja superior a 1/300 do comprimento do condutor:

$$f_e < \frac{l}{300} \quad [m] \quad (3.28)$$

3.3 Condutores flexíveis

3.3.1 Processo de cálculo pelo método IEEE738+IEC909+865-1+826

3.3.1.1 Dados iniciais

O método *IEEE Standard 738 for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors* pressupõe a determinação de diversos tipos de perdas e ganhos térmicos no condutor que, juntamente com a sua resistência elétrica permitem verificar se o condutor em questão é adequado às condições da instalação.

De forma a complementar este método, visto o mesmo não considerar os esforços eletromecânicos a que os condutores estão sujeitos em caso de curto-circuito, recorre-se ao método anterior, baseado na *Norma IEC 865-1 Short-circuit currents – Calculation of effects, Part 1: Definitions and calculation methods*.

Tal como os métodos anteriores este prevê que sejam conhecidos alguns parâmetros:

Tabela 3.5 - Dados iniciais

Símbolo	Grandeza
U_c	Tensão composta
S_T	Potência do transformador
I_z	Corrente máxima admissível
T_a	Temperatura ambiente
T_s	Temperatura à superfície do condutor
H_e	Elevação acima do nível do mar
D	Diâmetro exterior do condutor
V_w	Velocidade do vento
k_ϕ	Fator direção do vento
ε	Fator desgaste do condutor
α	Coeficiente de absorção solar
θ	Ângulo de incidência dos raios solares
Q_s	Quantidade de calor recebido
k_s	Fator de correção da elevação do sol
χ	Decréscimo da componente contínua da corrente de curto-circuito
I_k	Corrente de curto-circuito
μ_0	Permeabilidade do vácuo
l	Distância entre apoios
a	Distância entre fases
m	Massa linear do condutor
E	Módulo de elasticidade
A	Secção do condutor
Cu / Al	Material do barramento (Cobre e Alumínio, respetivamente)

3.3.1.2 Balanço térmico

Este método de cálculo baseia-se na obtenção da corrente de serviço através da realização de um balanço térmico. Para tal serão consideradas condições de equilíbrio da corrente elétrica, temperatura, velocidade do vento, e radiação solar, através da expressão (3.29):

$$I_{st} = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_s)}} \quad [A] \quad (3.29)$$

Caso a situação de equilíbrio anteriormente mencionada não se verifique será necessário efetuar algumas alterações à expressão (3.30):

$$I_{st} = \sqrt{\frac{q_c + q_r + mC_p \frac{dT_s}{dt} - q_s}{R(T_s)}} \quad [A] \quad (3.30)$$

Para se validar o valor obtido recorre-se à expressão (3.31) onde é feita a comparação entre o valor obtido e o valor da corrente máxima admissível (I_z) indicada pelo fabricante do barramento.

$$I_z \geq I_{st} \quad (3.31)$$

Seguidamente, serão enunciados os procedimentos a realizar de modo a obter os valores necessários para a elaboração do balanço térmico.

De modo a possibilitar alguns cálculos intermédios deverão ser consideradas as expressões (3.32), (3.33), (3.34) e (3.35), obtidas em função da temperatura (T_f) e da elevação acima do nível do mar (H_e), valores esses que serão utilizados nos cálculos posteriores.

Temperatura fronteira:

$$T_f = \frac{T_a + T_s}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (3.32)$$

Viscosidade do ar:

$$\mu_f = \frac{1,458 \times 10^{-6} \cdot (T_f + 273)^{1,5}}{T_f + 383,4} \quad [Pa \cdot s] \quad (3.33)$$

Densidade do ar:

$$\rho_f = \frac{1,293 - 1,525 \times 10^{-4} \cdot H_e + 6,379 \times 10^{-9} \cdot H_e^2}{1 + 0,00367 \cdot T_f} \quad [kg/m^3] \quad (3.34)$$

Condutividade térmica do ar:

$$k_f = 2,424 \times 10^{-2} + 7,477 \times 10^{-5} \cdot T_f - 4,407 \times 10^{-9} \cdot T_f^2 \quad [W/(m \cdot ^\circ C)] \quad (3.35)$$

3.3.1.3 Transmissão de calor por convecção

A transmissão de calor por convecção divide-se normalmente em dois tipos: convecção forçada e convecção natural. Existem diversos ensaios científicos realizados e documentados acerca de transferência de calor. Neste método são utilizados formulações *standard* recomendadas em *McAdams, W. H., Heat Transmission*.

A convecção forçada ocorre quando o ar em movimento passa pelo condutor, transportando o ar aquecido que se encontra em redor deste.

A convecção natural consiste num processo contínuo em que o ar estático em redor do condutor é aquecido e sobe, sendo substituído por ar frio circundante.

Como se pode constatar, comparativamente à convecção forçada, a convecção natural apresenta um baixo poder de refrigeração.

A magnitude da transmissão de calor traduz-se geralmente em função de um fator adimensional, designado por número de *Reynolds* [12], o qual pode ser determinado através da expressão (3.36):

$$N_{Re} = \frac{D \cdot \rho_f V_w}{\mu_f} \quad (3.36)$$

Tabela 3.6 - Gama de valores do número de Reynolds

Gama de valores	
Fluxo Laminar	$N_{Re} < 2300$
Fluxo de Transição	$2300 \leq N_{Re} \leq 4000$
Fluxo Turbulento	$N_{Re} > 4000$

Para baixas velocidades é recomendável também o cálculo dos valores de convecção forçada e natural, considerando no final o maior dos dois valores obtidos.

3.3.1.3.1 Convecção forçada

Tal como referido anteriormente, a magnitude da transmissão de calor é calculada em função do número de *Reynolds*, assim sendo para valores baixos do número de *Reynolds* (consultar Tabela 3.6) utiliza-se a expressão (3.37):

$$q_{cf} = K_{\varphi} \cdot [1,01 + 1,35 \cdot N_{Re}^{0,52}] \cdot k_f \cdot (T_s - T_a) \quad [W/m] \quad (3.37)$$

Para valores elevados do número de *Reynolds*, utiliza-se a seguinte expressão (3.38):

$$q_{cf} = K_{\varphi} \cdot 0,754 \cdot N_{Re}^{0,6} \cdot k_f \cdot (T_s - T_a) \quad [W/m] \quad (3.38)$$

Segundo o *Sight Reduction Tables for Air Navigators* as equações anteriormente enunciadas são válidas na seguinte gama de valores:

Tabela 3.7 - Intervalo de valores para o qual são válidas as equações enunciadas

Variável	Unidade SI
Diâmetro	0,01 – 150 mm
Velocidade do ar	0 – 18,9 m/s
Temperatura do ar	15,6 – 260 °C
Temperatura do condutor	21 – 1004 °C
Pressão do ar	40,5 – 405 kPa

A seguir, os valores anteriormente calculados deverão ser multiplicados pelo fator direção do vento (K_{φ}), onde φ representa o ângulo entre a direção do vento e o eixo do condutor:

$$K_{\varphi} = 1,194 - \cos(\varphi) + 0,194 \cdot \cos(2\varphi) + 0,368 \cdot \sin(2\varphi) \quad (3.39)$$

3.3.1.3.2 Convecção natural

Quando não existe movimentação do ar, ocorre convecção natural. Nesses casos é recomendado o cálculo através da expressão (3.40):

$$q_{cn} = 3,645 \cdot \rho_f^{0,5} \cdot D^{0,75} \cdot (T_s - T_a)^{1,25} \quad [W/m] \quad (3.40)$$

Contudo, é recomendado o uso do valor mais alto de convecção forçada e natural

3.3.1.4 Perdas por radiação

Quando um condutor nu sobreaquece atingindo temperaturas superiores à do meio envolvente dá-se uma transmissão de calor para o meio envolvente por radiação.

A quantidade de calor transmitida por radiação depende numa primeira fase da diferença entre a temperatura do condutor e a do meio envolvente, também designada de temperatura ambiente. Do mesmo modo, a emissividade característica da superfície do condutor contribui para o nível de transmissão por radiação.

Em suma, a radiação é descrita pela lei de *Stefan-Boltzmann* como sendo a diferença entre a temperatura à superfície do condutor e a temperatura do meio envolvente, expressa em *Kelvin*, através da equação (3.41):

$$q_r = 17,8.D.\varepsilon.\left[\left(\frac{T_s + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100}\right)^4\right] \quad [W/m] \quad (3.41)$$

3.3.1.5 Aquecimento solar

A quantidade de energia transmitida pelo sol ao condutor depende de vários fatores, entre os quais a posição do sol, a Constante Solar (quantidade de energia por m² fora da atmosfera terrestre), a percentagem dessa energia através da atmosfera, a orientação do condutor e a condição de superfície do condutor. No caso dos condutores mais brilhantes estes possuem uma capacidade de reflexão elevada. Contrariamente os condutores com uma superfície escura absorvem grande parte do calor transmitido pelo sol.

De forma a determinar essa quantidade de calor transmitida pelo sol ao condutor utiliza-se a seguinte expressão (3.42), auxiliada pela expressão (3.43):

$$q_s = \alpha.Q_{se}.\sin(\theta).A \quad [W/m] \quad (3.42)$$

Onde o angulo efetivo da incidência dos raios solares é calculada por:

$$\theta = \cos^{-1}[\cos(H_c)\cos(Z_c - Z_1)] \quad (3.43)$$

3.3.1.6 Resistência elétrica do condutor

Qualquer condutor elétrico possui uma resistência elétrica característica. O valor desta resistência vai depender de diversos fatores, tais como, a frequência da rede, a secção transversal do condutor, a sua temperatura e a corrente que o atravessa e habitualmente fornecido pelo fabricante.

Caso o fabricante não indique, o método seguinte pressupõe que o valor da resistência elétrica seja ajustado linearmente de acordo com a temperatura à superfície do condutor, considerando-se assim os valores tabelados. Por exemplo, a resistência de um condutor a elevada temperatura (T_{high}) e a baixa temperatura (T_{low}) podem ser obtidos a partir dos valores tabelados ou podem ser fornecidos pelo fabricante. Caso não seja possível obter o valor pretendido pelos métodos descritos atrás, a temperatura (T_{avg}) era encontrada através de uma interpolação utilizando a expressão (3.44):

$$R(T_{avg}) = \left[\frac{R(T_{high}) - R(T_{low})}{T_{high} - T_{low}} \right] \cdot (T_{avg} - T_{low}) + R(T_{low}) \quad [\Omega] \quad (3.44)$$

A utilização deste método permite assim determinar qualquer valor. Não estando dependente se o mesmo consta em tabelas ou é fornecido pelo fabricante.

3.3.1.7 Esforços mecânicos devidos ao curto-circuito

Chegando a esta fase é essencial garantir a sua resistência mecânica aquando da ocorrência de um curto-circuito. Para que esta condição seja verificada é necessário determinar a corrente de pico (I_p) recorrendo à expressão (3.45), que será utilizada seguidamente no cálculo da força eletromagnética.

$$I_p = \chi \times \sqrt{2} \times I_k \quad [kA] \quad (3.45)$$

Conhecido previamente o valor da corrente de curto-circuito, determina-se o valor de χ (Chi) através da consulta do gráfico da Figura 3.10:

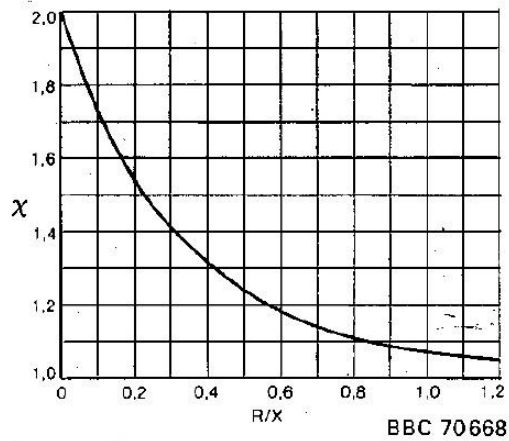


Figura 3.10 - Relação entre o fator Chi e o coeficiente entre a resistência e a reatância da rede [32]

Habitualmente considera-se o valor para a situação mais desfavorável $\chi=1,8$ pois na generalidade das redes de MT e AT o quociente $R/X = 0,07$.

O cálculo da força eletromagnética enunciado pela expressão (3.46) será em função da corrente de pico anteriormente calculada, da distância entre fases e da distância entre apoios.

$$F_e = \frac{\mu_0}{2\pi} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{l}{a} \times I_p^2 \quad [N] \quad (3.46)$$

De seguida será calculado o esforço de tração do condutor durante o curto-circuito através da expressão (3.47).

$$Z_t = Z_0 \times (1 + \varphi \times \psi) \quad [N] \quad (3.47)$$

Onde o fator φ será obtido através da expressão (3.48).

$$\varphi = 3 \times \left(\sqrt{1 + \left(\frac{F_e}{g \times m} \right)^2} - 1 \right) \quad (3.48)$$

No caso do fator ψ , este estará dependente φ , anteriormente calculado e do fator ξ , o qual se obtém pela expressão (3.49):

$$\xi = \frac{m \times l}{24 \times Z_0^3} \times \frac{1}{\frac{1}{s \times l} + \frac{1}{E \times A}} \quad (3.49)$$

E será obtido pela consulta da Figura 3.11.

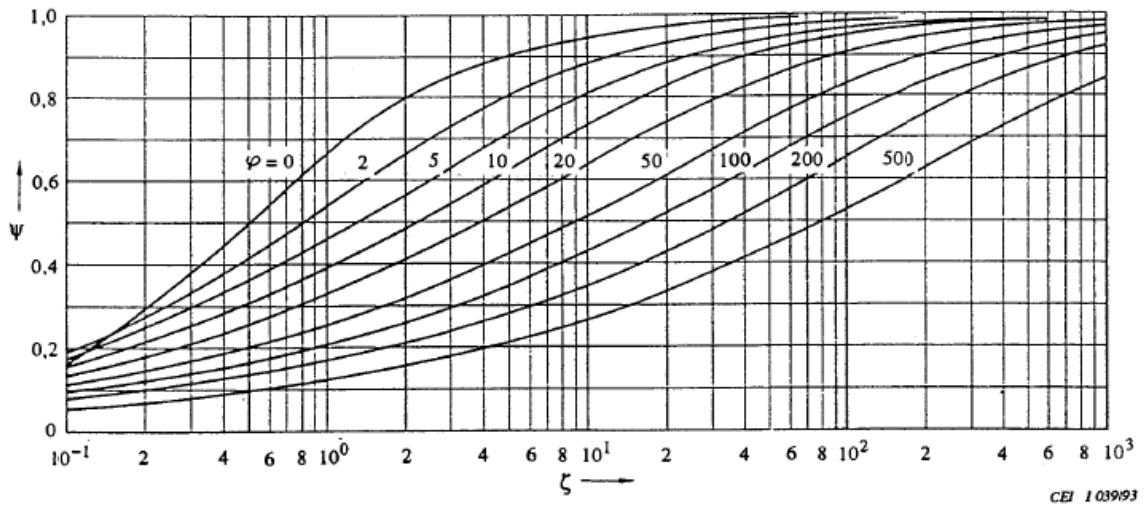


Figura 3.11 - Fator ψ relativo à força de tensão a que estão sujeitos os condutores flexíveis [9]

3.3.1.8 Esforços térmicos devidos ao curto-circuito

Chegando a esta etapa do dimensionamento, começa-se por encontrar os valores dos fatores m e n , fatores que traduzem o efeito da componente contínua da corrente de curto-circuito e o efeito da componente alternada, respetivamente.

Tal como mostra a Figura 3.12, o valor m está dependente do parâmetro χ (*Chi*) e do tempo de disparo das proteções presentes na instalação.

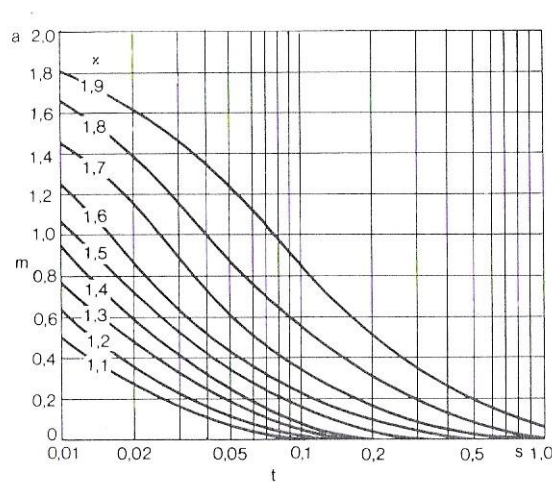


Figura 3.12 - Fator m em função do parâmetro χ [32]

No caso do fator n , o seu valor está sujeito ao tempo de disparo das proteções e ao quociente I_k''/I_k .

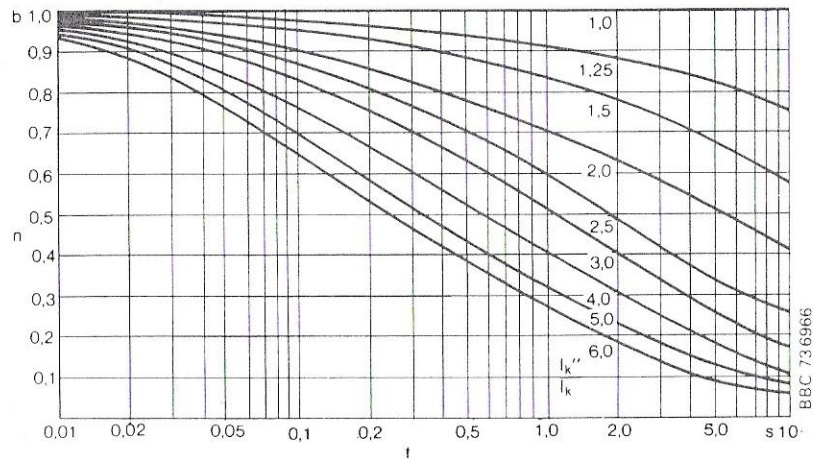


Figura 3.13 - Fator n em função de I_k''/I_k [32]

De acordo com a corrente de curto-circuito previamente conhecida e com os fatores anteriormente encontrados, calcula-se a corrente térmica recorrendo à expressão (3.50):

$$I_{th} = I_k \times \sqrt{m + n} \quad [kA] \quad (3.50)$$

Tal como enunciado na expressão (3.51), será necessário aplicar o valor da constante k, valor que quantifica a rapidez com que o condutor entra em fadiga térmica. Este valor varia consoante o material do condutor e cujos valores padronizados se encontram na Tabela 3.8 – Valores do fator k padronizados para o alumínio e para o cobre.

Tabela 3.8 – Valores do fator k padronizados para o alumínio e para o cobre [30]

Fator k	
Condutor nu em Alumínio	104
Condutor nu em Cobre	159

Para determinar a secção mínima do condutor, aplica-se a expressão (3.51):

$$A_{min} = \frac{I_{th}}{k} \times \sqrt{t} \quad [mm^2] \quad (3.51)$$

Para validar a secção recorre-se às tabelas da Figura 3.14 e Figura 3.15, de forma a encontrar o valor de S_{th} que será utilizado na expressão (3.52).

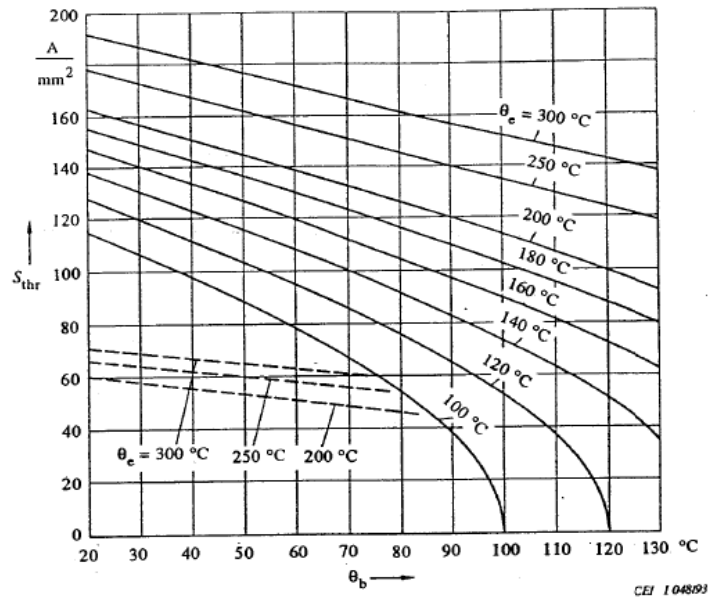


Figura 3.14 - Densidade da corrente instantânea para condutores em cobre [9]

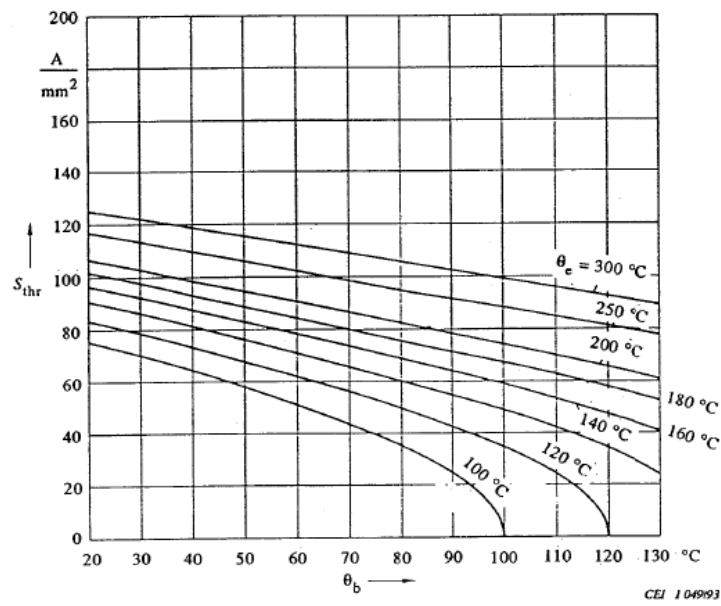


Figura 3.15 - Densidade da corrente instantânea para condutores em alumínio [9]

Encontrados os valores de S_{th} , verifica-se a condição enunciada pela expressão (3.52).

$$\frac{I_{th}}{A} \geq S_{th} \quad (3.52)$$

3.3.1.9 Cálculo da flecha

Finalmente, há que considerar o efeito de flecha verificado nos condutores.

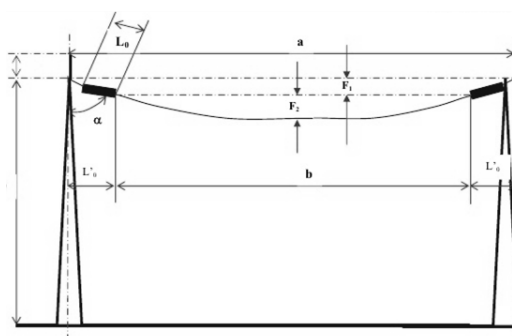


Figura 3.16 - Efeito Flecha verificado num condutor

O efeito flecha será maior quanto maior for o comprimento e o peso dos condutores e será obtido através da expressão (3.53):

$$f_e = \frac{f_{pp} \times l^4}{185 \times E \times J} \quad [m] \quad (3.53)$$

Onde f_{pp} é dado por:

$$f_{pp} = p_{pt} + p_{ca} + p_h \quad [kg/m] \quad (3.54)$$

Em que p_{pt} corresponde ao peso próprio unitário a utilizar em condutores de perfil tubular e p_{ca} a utilizar para condutores flexíveis, p_h que será determinado segundo a expressão (3.55).

$$p_h = 900 \times \pi \times ((r + 0,01)^2 - r^2) \quad [kg/m] \quad (3.55)$$

Para que o valor obtido seja aceitável deve-se garantir que este nunca seja superior a 1/300 do comprimento do condutor, como indica a condição expressa em (3.56):

$$f_e < \frac{l}{300} \quad [m] \quad (3.56)$$

Capítulo 4

Descrição da Aplicação

Neste capítulo será apresentada a aplicação computacional desenvolvida.

Serão expostos os objetivos a atingir pela aplicação, as ferramentas computacionais utilizadas para a sua construção. Através de fluxogramas serão mostrados os seus processos de funcionamento. Seguidamente serão explicadas as funções da base de dados, exibidos diversos passos do interface da aplicação e por fim enumeradas as funcionalidades da mesma.

4 Descrição da Aplicação

4.1 Objetivos

Pretende-se construir uma aplicação informática que seja capaz de armazenar uma base de dados atualizável, na qual estejam contidos os vários tipos de condutores elétricos disponíveis no mercado.

Esta aplicação terá um *interface* simples, onde o utilizador poderá optar por dimensionar condutores rígidos ou flexíveis. Após a escolha do tipo de condutor a utilizar, começa por determinar a corrente de serviço, com base no valor obtido para a corrente de serviço deverá consultar a base de dados para escolher o barramento adequado, e por fim inserir as condições iniciais da subestação a projetar.

Após inseridos todos os dados, a aplicação realizará os cálculos e validações necessários determinar o barramento adequado.

Por fim os resultados serão apresentados sob a forma de relatório, o qual o utilizador terá a possibilidade de imprimir.

4.2 Ferramentas computacionais

O *software* a utilizado para construção da aplicação de dimensionamento dos barramentos foi o *Microsoft Access*. Esta escolha deveu-se ao facto de as características do *software* irem exatamente ao encontro dos objetivos propostos para a aplicação, pois trata-se de um *software* de criação e gestão de bases de dados, amplamente utilizado no mercado, de fácil interação com o utilizador.

A configuração de formulários e programação de ações será realizada em linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA) e *Structured Query Language* (SQL).

4.3 Fluxograma

De forma a esquematizar de forma generalizada as etapas funcionais da aplicação apresenta-se na Figura 4.1 o fluxograma da aplicação:

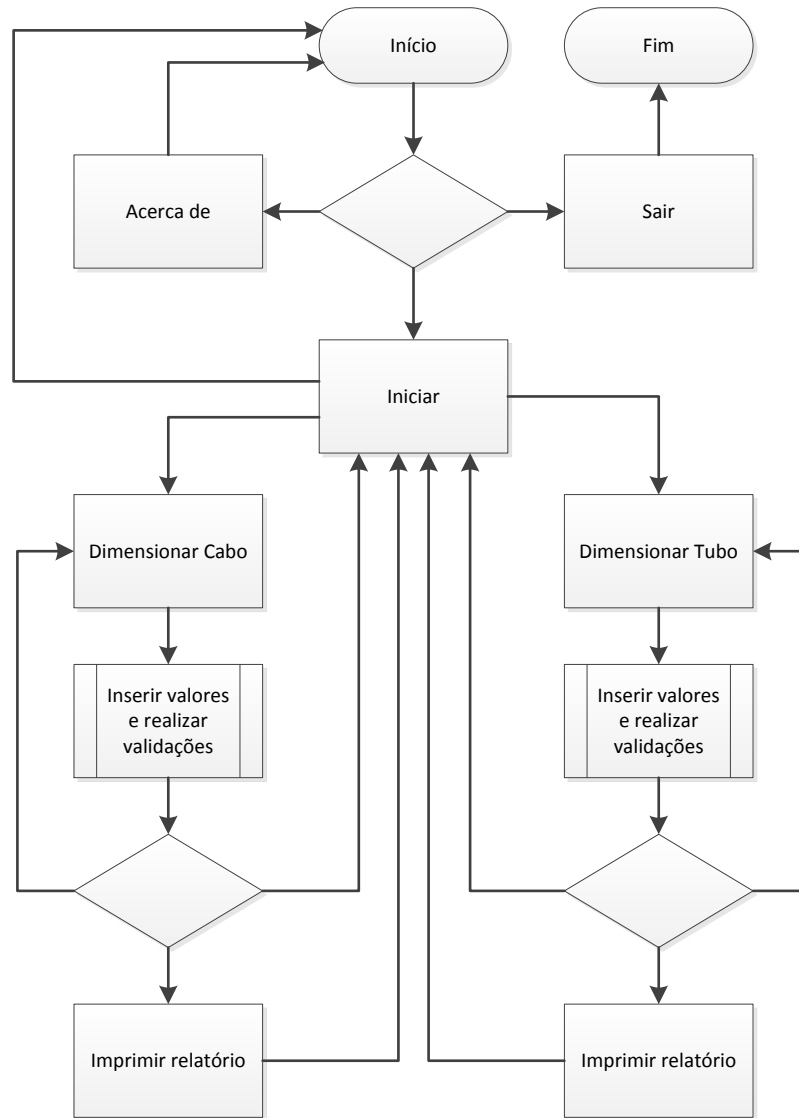


Figura 4.1 - Fluxograma geral da aplicação

Durante o processo de dimensionamento serão atribuídos valores e realizadas várias validações dos cálculos realizados, na Figura 4.2 pode observar-se esse processo relativamente ao dimensionamento de tubos:

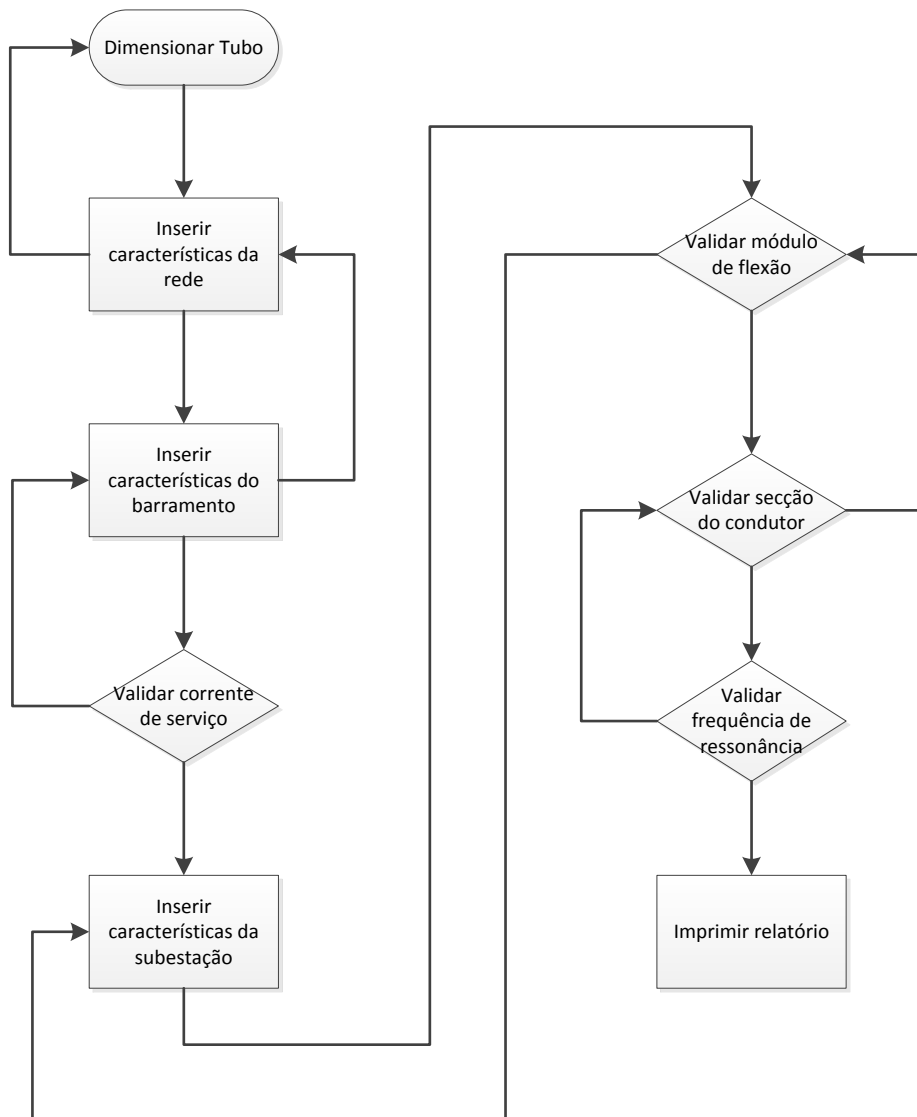


Figura 4.2 - Validações necessárias para o dimensionamento dos tubos

No que diz respeito ao dimensionamento de cabos, as validações necessárias apresentam-se de seguida na Figura 4.3:

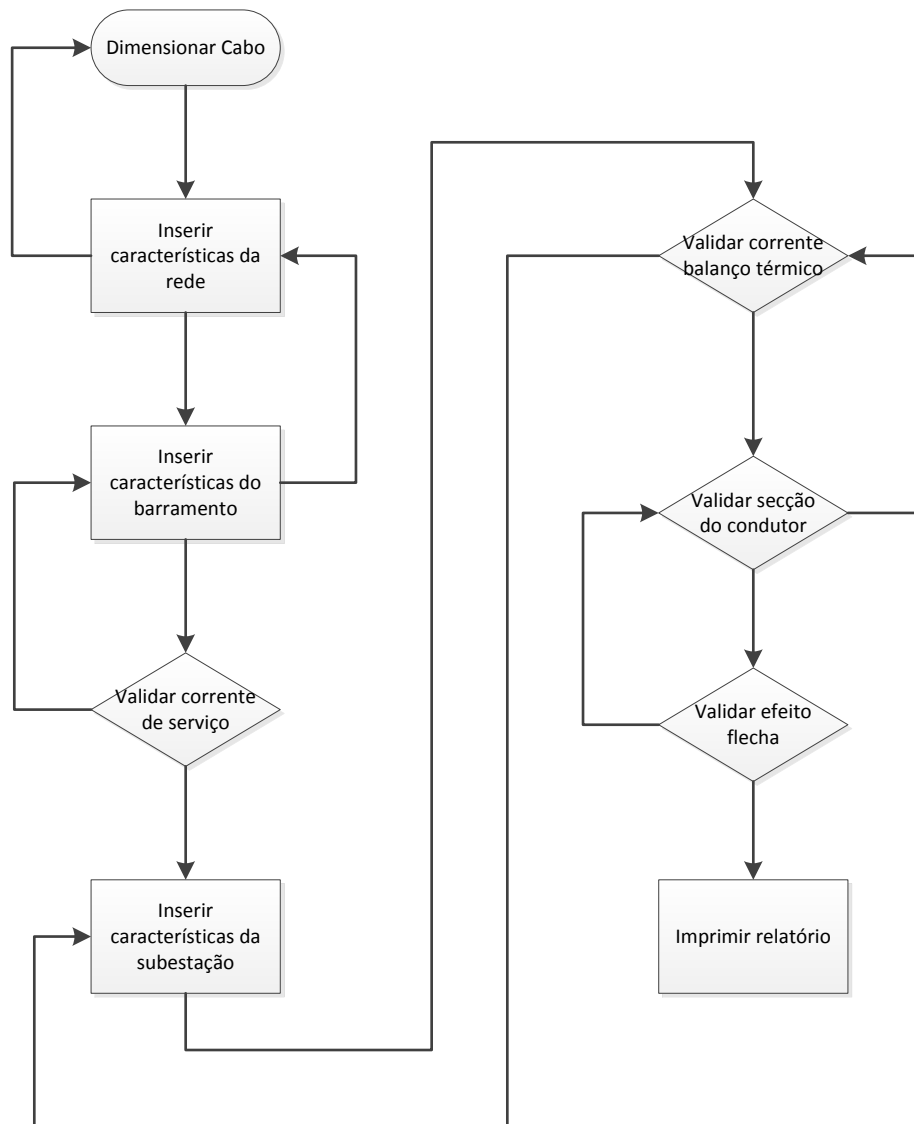


Figura 4.3 - Validações necessárias para o dimensionamento dos cabos

4.4 Base de dados

É na base de dados que estão armazenados os barramentos e as suas características técnicas. Esta estará em permanente interação com os formulários, de forma a fornecer informações necessárias durante o processo de cálculo.

O utilizador poderá editar a base de dados sempre que desejar, bastando para isso aceder ao modo de edição do Access e efetuar as alterações (quer seja adicionar condutor, eliminar condutor ou apenas alterar dados de um condutor existente).

4.5 Interface

A aplicação “*BusBarCalc*” apresenta uma interface simples e *user friendly*, para que possa ser utilizada de forma intuitiva, não necessitando por isso de manual de instruções.

A Figura 4.4 mostra o menu inicial apresentado ao utilizador após executar a aplicação:



Figura 4.4 - Menu inicial

Nesta fase o utilizador poderá consultar uma breve descrição da aplicação, seleccionando o botão ACERCA DO BUSBARCALC ou ir diretamente para o menu de iniciação do dimensionamento (Figura 4.5).



Figura 4.5 - Menu de iniciação de dimensionamento

É agora o momento de o utilizador escolher que tipo de condutor deseja aplicar e com isto dar inicio aos cálculos.

4.6 Funcionalidades

Apesar de se tratar de uma aplicação bastante simples, apresenta diversas funcionalidades que possibilitam um eficaz tratamento de dados.

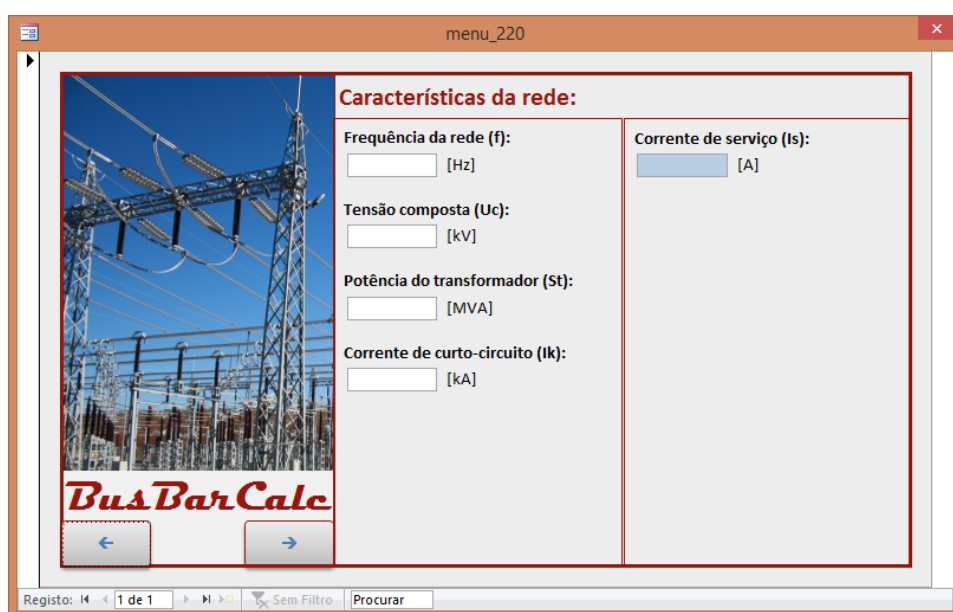


Figura 4.6 - Menu para inserção das características do barramento

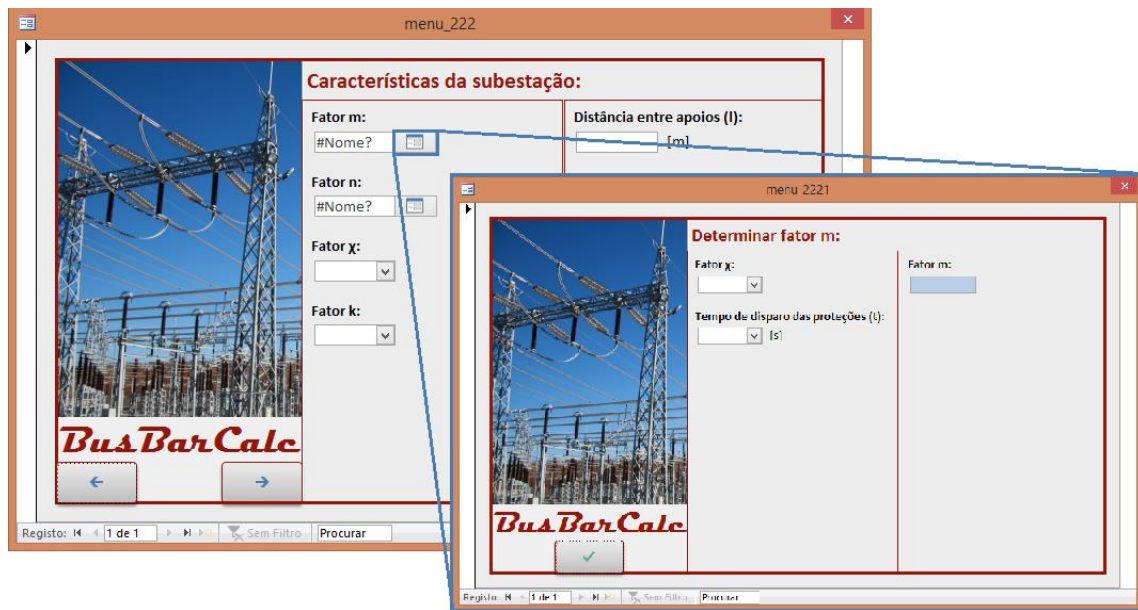


Figura 4.7 - Menu de inserção das características da subestação e submenu para determinação do fator m

No canto inferior esquerdo do formulário encontram-se normalmente botões que permitem ao utilizador avançar ou recuar entre as diversas etapas do dimensionamento (no caso dos formulários que requerem alguma validação, o botão para avançar só ficará ativo após ocorrer uma validação de resultados positiva), na etapa final podem também ser apresentados botões para imprimir um relatório e para sair do dimensionamento. A inserção de dados nos campos com fundo branco poderá realizar-se em alguns casos por inserção direta através do teclado e em outras situações selecionando o valor pretendido através de caixas de combinação. O fundo azul claro presente em alguns campos indica que os mesmos não são para inserção, mas sim para apresentação de dados. Em diversos formulários estão também presentes botões de validação seguidos de um campo de fundo branco, que após pressionar o botão de validação mudará de cor (ficando verde caso a condição seja válida e vermelho caso a mesma não se verifique). Existem também botões para aceder a sub-menus em situações em que seja necessário determinar constantes com base em outros fatores.

Capítulo 5

Casos de Estudo

Neste capítulo são apresentados dois casos de estudo, um para condutores rígidos e outro para condutores flexíveis, tendo sempre por base a teoria apresentada nos capítulos anteriores. São apresentados os processos de cálculo efetuados através da aplicação informática criada e realizadas algumas comparações entre os mesmos e o cálculo manual.

5 Casos de Estudo

5.1 Cálculo para barramento com condutor rígido a 60kV

De seguida, será apresentado um exemplo de dimensionamento a 60kV efetuado para um condutor rígido, utilizando a aplicação concebida.

Inicia-se o dimensionamento inserindo as características do local da rede onde será instalado barramento, obtendo-se nesta primeira fase o valor da corrente de serviço.

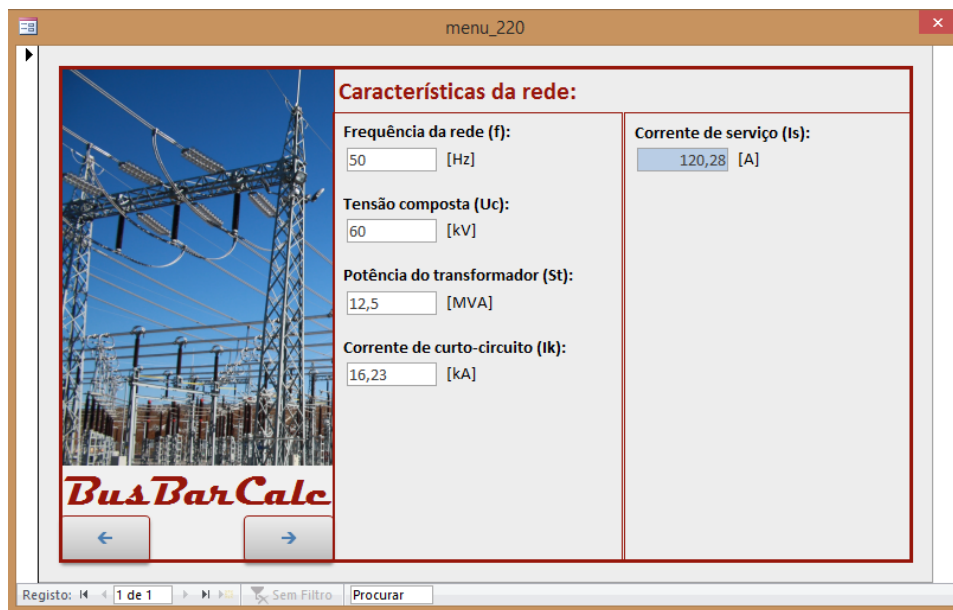


Figura 5.1 - Características da rede

De seguida, com base no valor da corrente de serviço obtido na Figura 5.1, será escolhido o barramento. Assim que o barramento é escolhido surgem as suas características técnicas, como se pode observar na Figura 5.2. Para terminar esta etapa, procede-se à validação da corrente máxima admissível pelo barramento.

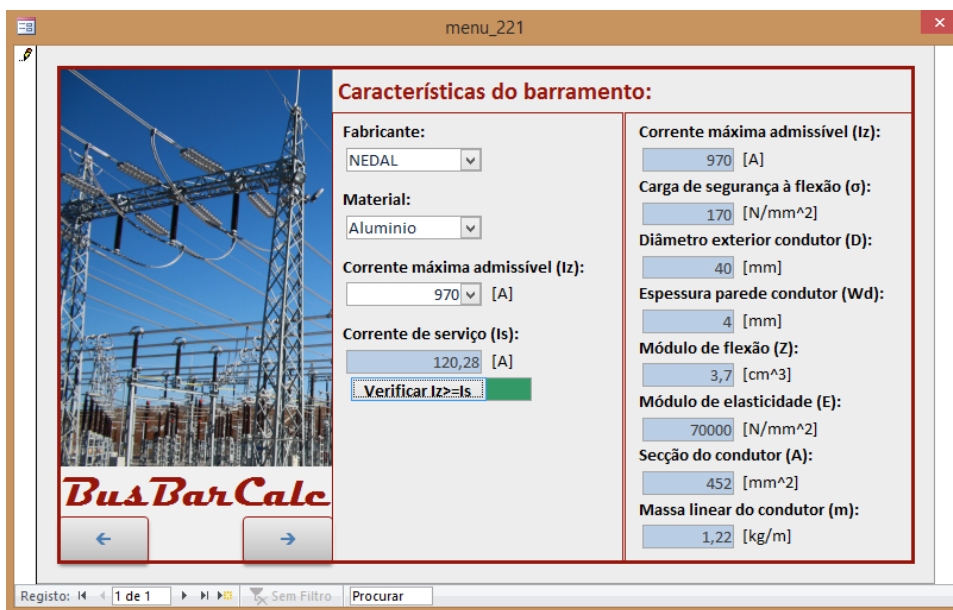


Figura 5.2 - Características do barramento

Tendo sido obtida validação positiva, chega agora o momento de inserir as características da subestação:

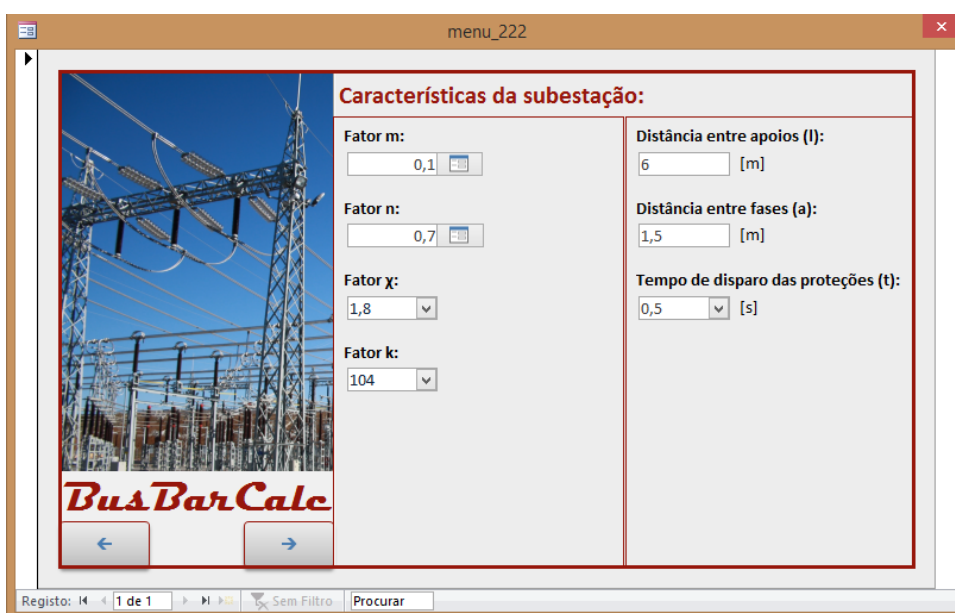


Figura 5.3 - Características da subestação

Estando o fator m e o fator n , também dependentes de características da subestação, é necessário abrir os submenus representados na Figura 5.4 e na Figura 5.5 respetivamente, de forma a determinar o valor dos mesmos.



Figura 5.4 - Fator m



Figura 5.5 - Fator n

Inseridos todos os parâmetros, a aplicação efetuará agora todos os cálculos, solicitando ao utilizador que realize validações dos resultados sempre que necessário.

A primeira condição a verificar será a resistência mecânica do barramento ao curto-circuito, na Figura 5.6 são apresentados os resultados dos cálculos intermédios, necessários para obter o valor do módulo de flexão, assim como a validação do mesmo.

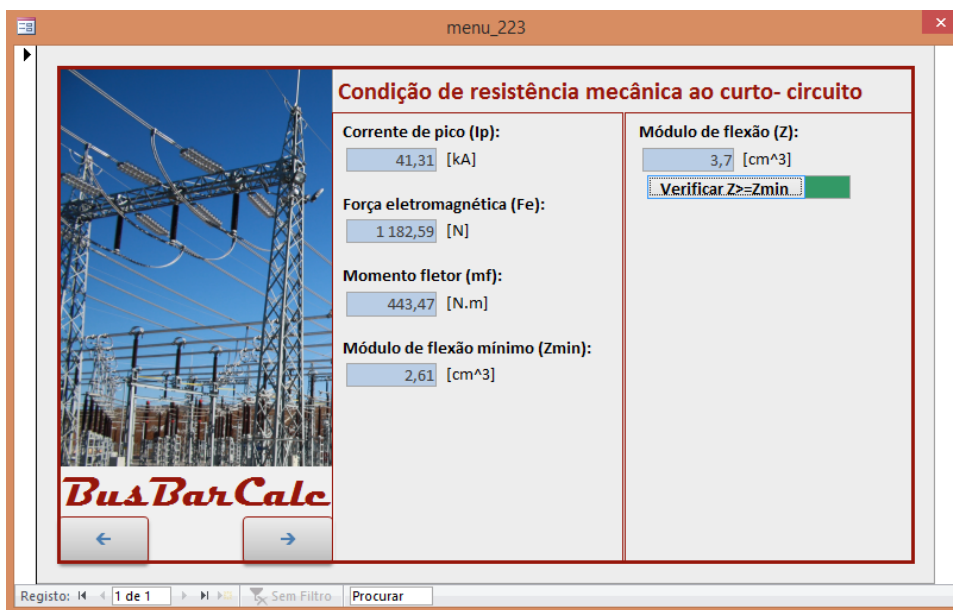


Figura 5.6 - Condição de resistência mecânica ao curto-circuito

Segue-se a condição de esforços térmicos devidos à ocorrência de curto-circuito, na qual é calculada e verificada a secção mínima necessária para o condutor.



Figura 5.7 - Condição de esforços térmicos devidos ao curto-circuito

Por fim, a Figura 5.8 mostra os resultados dos cálculos da condição de ressonância, na qual será determinada a frequência de ressonância. São também apresentados os valores limite

do intervalo para o qual será necessário verificar que a frequência de ressonância não está inserida.

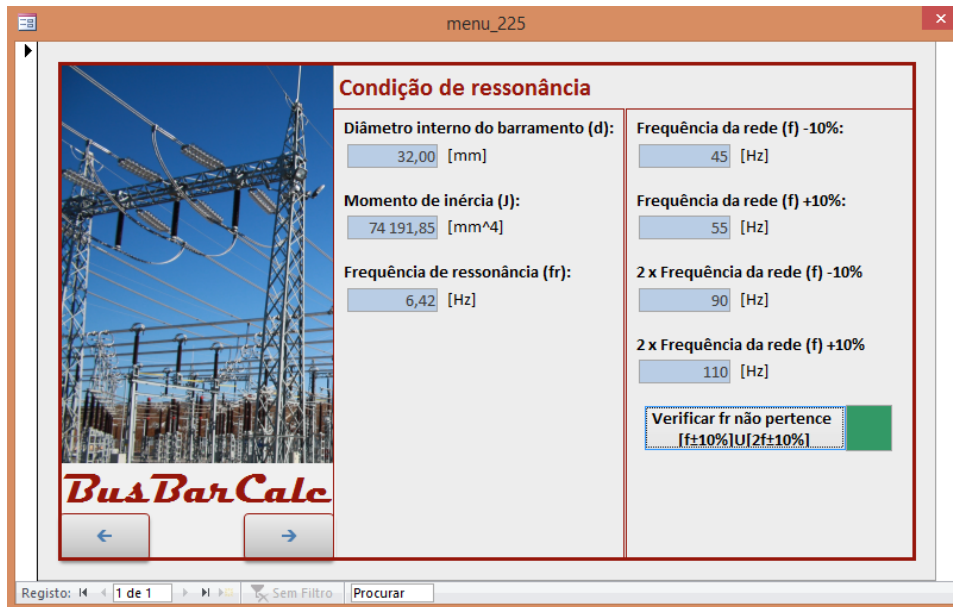


Figura 5.8 - Condição de ressonância

Validadas todas as condições, são apresentadas na Figura 5.9 as distâncias máximas entre apoios possíveis de implementar, sem que se corra o perigo de o barramento atingir a sua frequência de ressonância.

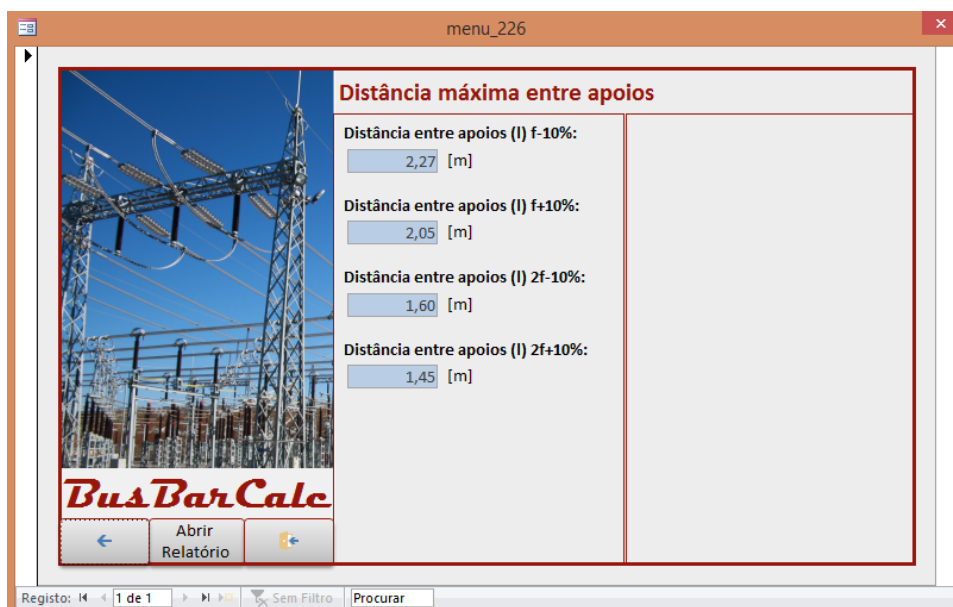


Figura 5.9 - Distância máxima entre apoios

Finalizado o dimensionamento, o utilizador terá agora hipótese de voltar ao menu inicial ou ordenar à aplicação que imprima um relatório com os resultados obtidos.

Caso o utilizador selecione “Abrir Relatório” será apresentada uma caixa com o resumo dos cálculos realizados e será possível ao utilizador efetuar a impressão dos mesmos tanto para papel, como para pdf.

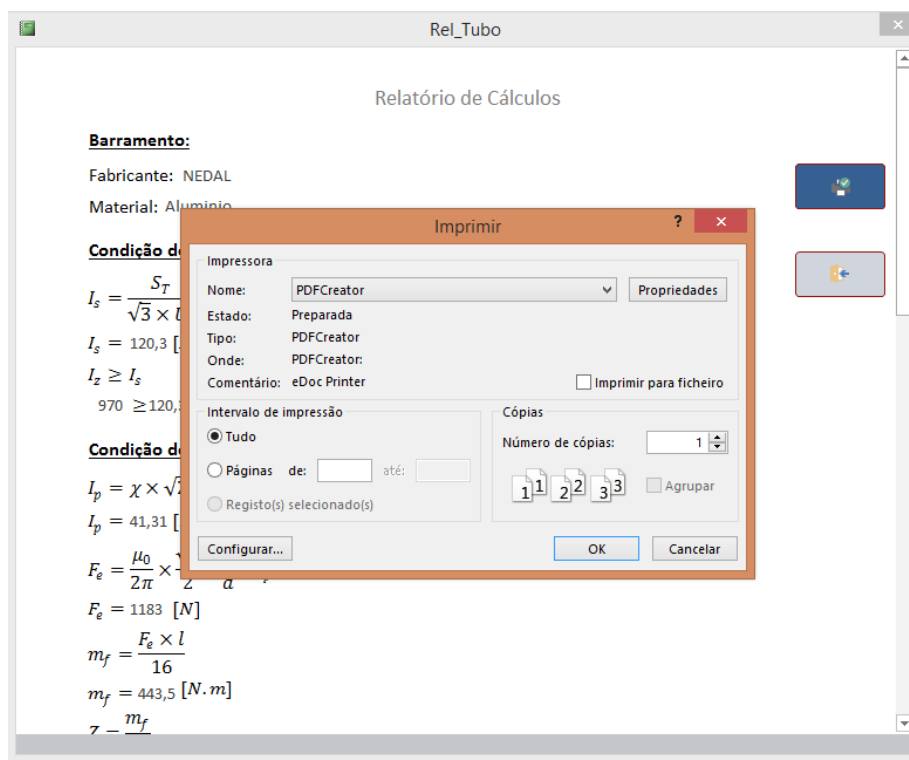
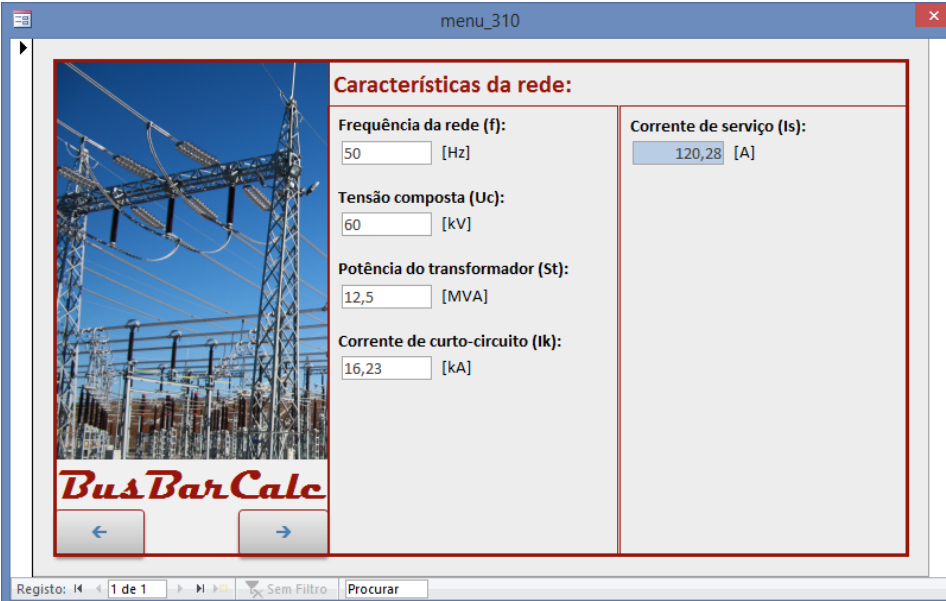


Figura 5.10 - Imprimir resumo de cálculos

5.2 Cálculo para barramento com condutor flexível a 60kV

Será agora apresentado um exemplo de dimensionamento efetuado para um condutor flexível a 60kV, através da aplicação desenvolvida.

O dimensionamento inicia-se inserindo as características do ponto da rede onde será instalado barramento, obtendo-se o valor da corrente de serviço.



The screenshot shows a software window titled 'menu_310' with a red border. On the left, there is a photograph of a high-voltage electrical substation with the text 'Bus Bar Calc' overlaid in a stylized font. Below the photo are two navigation buttons: a left arrow and a right arrow. On the right side, under the heading 'Características da rede:', there are several input fields and one highlighted output field:

Características da rede:	Corrente de serviço (Is):
Frequência da rede (f): 50 [Hz]	120,28 [A]
Tensão composta (Uc): 60 [kV]	
Potência do transformador (St): 12,5 [MVA]	
Corrente de curto-circuito (Ik): 16,23 [kA]	

At the bottom of the window, there is a status bar with the text 'Registo: 1 de 1', 'Sem Filtro', and a search box labeled 'Procurar'.

Figura 5.11 - Características da rede

Seguidamente, com base no valor da corrente de serviço obtido na Figura 5.11, será escolhido o barramento. Ao selecionar o barramento, surgem de imediato as suas características técnicas, como se pode observar na Figura 5.12. Procede-se de seguida à validação da corrente máxima admissível pelo barramento.

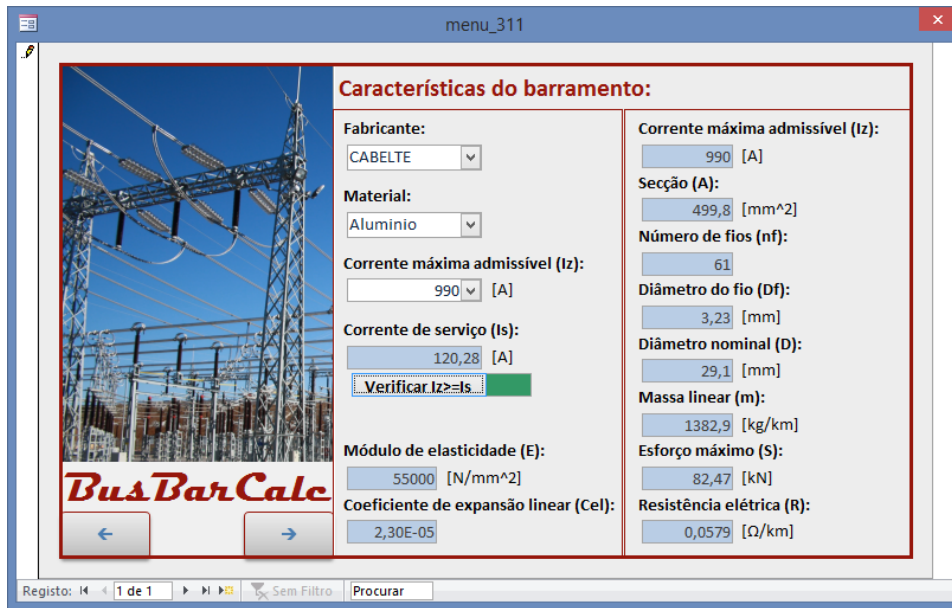


Figura 5.12 - Características do barramento

Obtido resultado positivo na validação, é agora o momento de inserir as características da subestação:

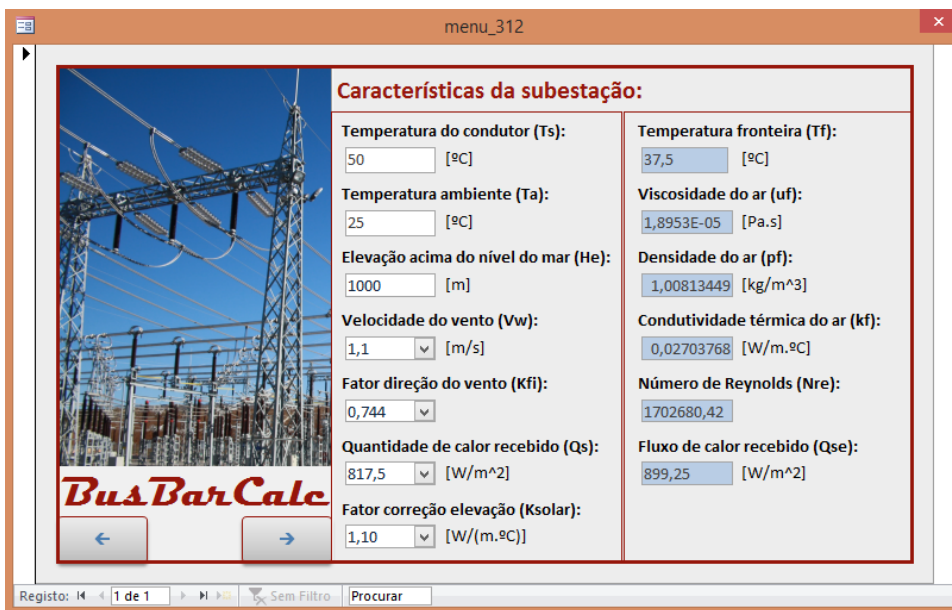


Figura 5.13 - Características da subestação

Inseridos todos os dados relativos às características climáticas do local onde será instalada a subestação, estão reunidas as condições para efetuar o balanço térmico de forma a obter

a corrente de serviço resultante das reações térmicas nos condutores tal como é apresentado na Figura 5.14.

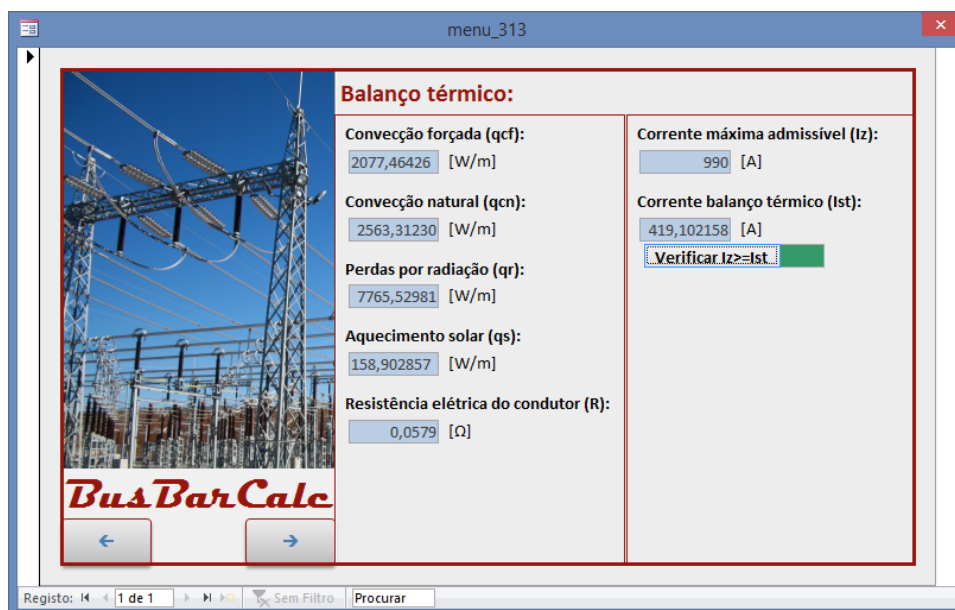


Figura 5.14 - Balanço térmico

Como mostra a Figura 5.16 é procede-se agora aos cálculos dos esforços mecânicos exercidos pelos condutores. Numa primeira fase será preciso encontrar os valores aproximados de ϕ e ξ de forma a determinar o fator ψ , como mostra a Figura 5.15.

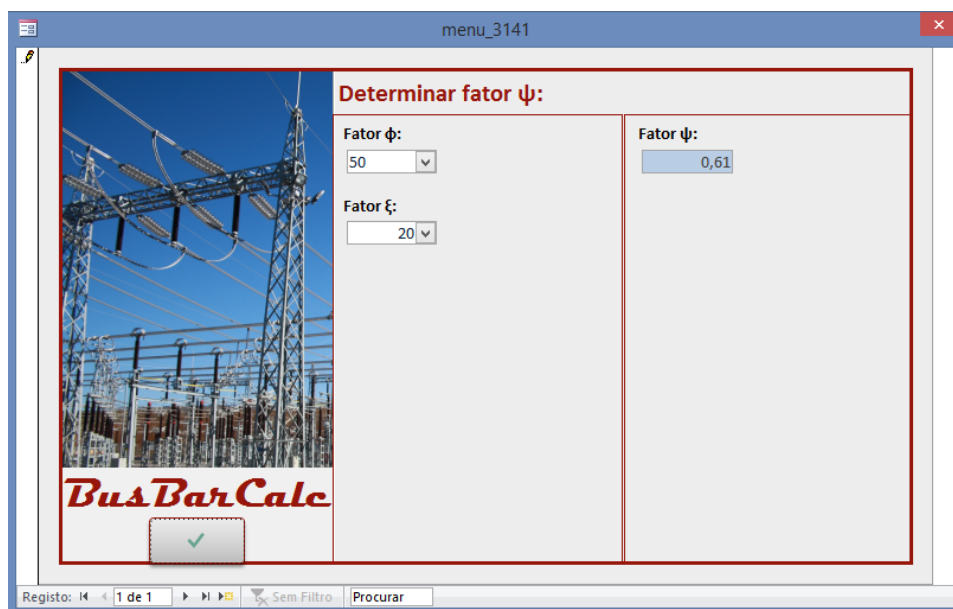


Figura 5.15 - Fator ψ

Determinado o fator ψ , os restantes resultados relativos aos esforços mecânicos serão disponibilizados como se pode observar na Figura 5.16.

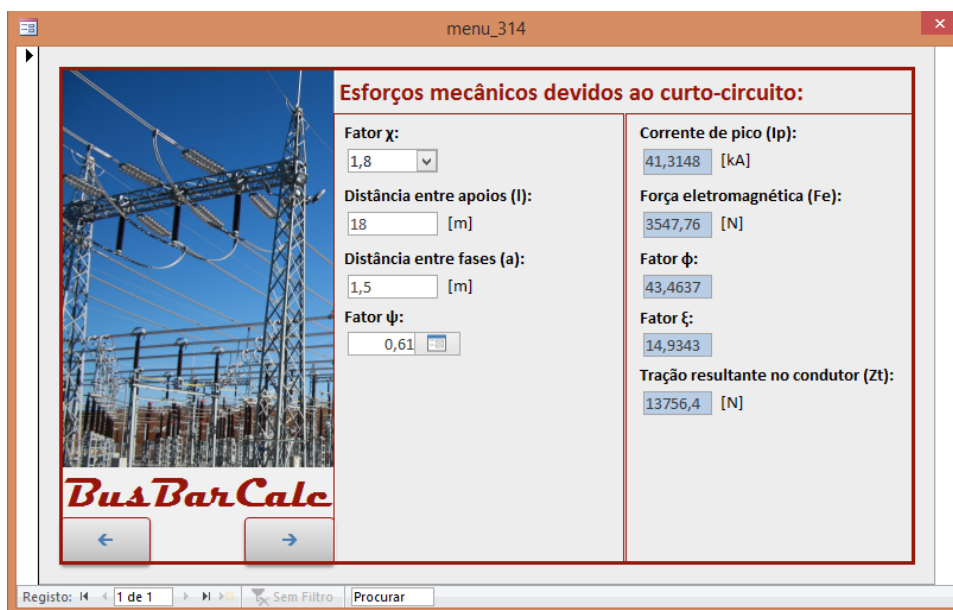


Figura 5.16 – Esforços mecânicos devidos ao curto-circuito

Estando o fator m e o fator n também dependentes de características da subestação, torna-se necessário abrir os submenus representados na Figura 5.17 e na Figura 5.18 respetivamente, de forma a determinar o valor dos mesmos.



Figura 5.17 - Fator m



Figura 5.18 - Fator n

De seguida tem-se a condição de esforços térmicos devidos à ocorrência de curto-circuito, onde é calculada e verificada a secção mínima necessária para o condutor.



Figura 5.19 - Condição de esforços térmicos devidos ao curto-circuito

Finalmente, os cálculos da condição do efeito de flecha, o qual terá que ser inferior tricentésima parte do comprimento total do condutor.

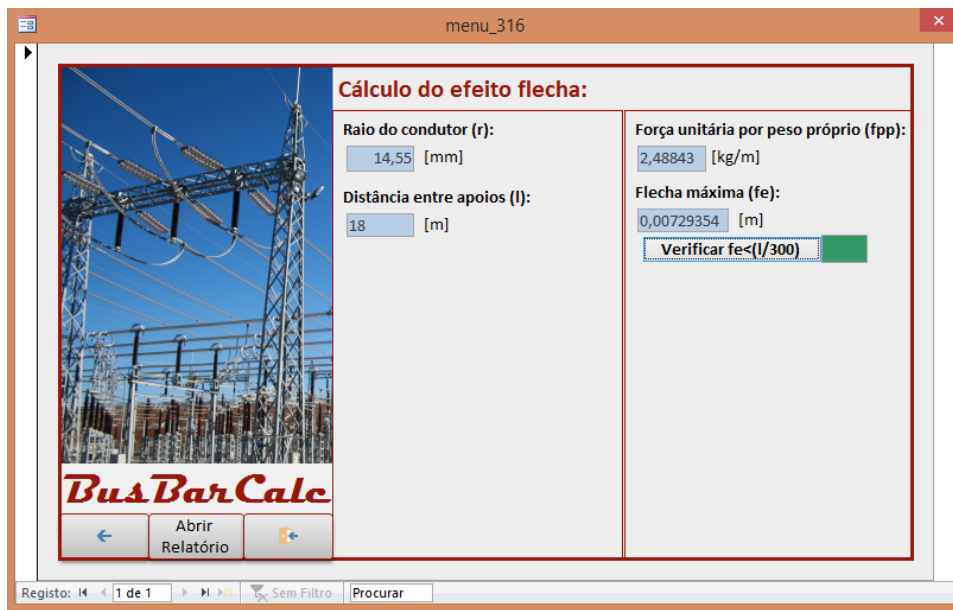


Figura 5.20 – Cálculo do efeito de flecha

Dado por finalizado o dimensionamento, o utilizador terá agora hipótese de voltar ao menu inicial ou imprimir um relatório com os resultados obtidos.

Caso o utilizador seleccione “Abrir Relatório” será apresentado um resumo dos cálculos realizados e será possível ao utilizador efetuar a impressão dos mesmos para papel ou pdf (dependendo das impressoras disponíveis).

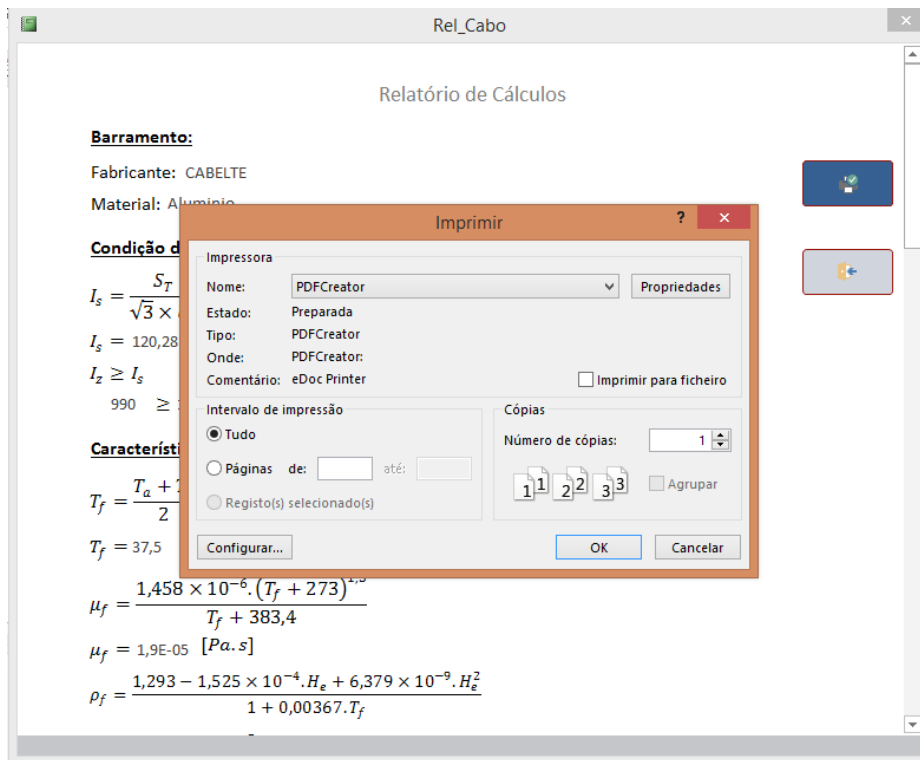


Figura 5.21 - Imprimir resumo de cálculos

Capítulo 6

Conclusões e desenvolvimentos futuros

Neste capítulo são enumeradas as conclusões obtidas através do estudo realizado nos capítulos anteriores, assim como apresentados possíveis desenvolvimentos futuros no âmbito estudo, nomeadamente os métodos de cálculo utilizando aplicações informáticas.

6 Conclusões e Desenvolvimentos futuros

6.1 Conclusões

Terminada a elaboração da presente dissertação, conclui-se que todos os objetivos inicialmente propostos foram atingidos, uma vez que após a realização de um estudo teórico sobre métodos de dimensionamento de barramentos em subestações, foi possível estruturar, desenvolver e implementar a aplicação informática *BusBarCal*, que permite a escolha e validação de barramentos a aplicar em subestações elétricas. Esta aplicação foi desenvolvida em ambiente *Microsoft Access*, uma ferramenta de acesso comum para a maioria dos utilizadores de ferramentas computacionais.

Este projeto surgiu com o objetivo de colmatar a necessidade de agilizar os processos manuais de dimensionamento, nos quais se tem que recorrer por diversas vezes a tabelas e gráficos de forma a recolher dados indispensáveis para os inúmeros cálculos a realizar, o que torna o processo bastante demorado e trabalhoso. E também como uma alternativa às aplicações disponibilizadas pelos fabricantes, cuja gama de barramentos se restringe exclusivamente aos artigos por si produzidos, além disso esta aplicação não terá quaisquer custos para os utilizadores.

A escolha do *software* recaiu sobre o *Microsoft Access* por se tratar de uma ferramenta integrante do *Microsoft Office*, que está disponível para a grande maioria dos utilizadores, principalmente em ambiente profissional. O desenvolvimento da aplicação foi feito, sempre tendo em consideração uma *interface* simples, *user friendly*, e que permita ao utilizador uma fácil adaptação e interação de forma a maximizar o seu rendimento e eficiência de trabalho.

Os métodos de cálculo analisados dividem-se em dois subgrupos, os métodos de cálculo para condutores rígidos e os métodos de cálculo para condutores flexíveis. Estes métodos foram compilados tendo em conta as principais normas da especialidade, entre as quais a IEC 909, a IEC 865-1 e a IEEE 738, foram também tidas em consideração diferentes interpretações das mesmas, obtidas através da consulta de inúmeros estudos presentes em dissertações de mestrados e outros documentos académicos.

A aplicação permite numa primeira fase que o utilizador escolha o tipo de condutor que pretende dimensionar, após essa escolha dá-se início à inserção dos dados iniciais: As características da rede elétrica no ponto onde será instalado o barramento, as características

ambientais/meteorológicas do local onde está situada a subestação e as características físicas da subestação. Com base nessas características será escolhido um barramento de entre os disponíveis na base de dados. Posteriormente serão realizadas várias validações para garantir que o barramento escolhido cumpre todos os requisitos necessários, entre os quais as condições térmicas e mecânicas em caso de curto-circuito.

Por fim, será disponibilizada ao utilizador a possibilidade de produzir um relatório com o resumo dos cálculos efetuados, relatório esse que poderá ser impresso em papel ou guardado em formato pdf.

Em síntese verificou-se, comparativamente ao método manual, que a utilização desta aplicação vem acrescentar grandes vantagens ao processo de dimensionamento de barramentos para subestações. Entre as quais a significativa diminuição do tempo necessário para efetuar todos os cálculos e consultas, a diminuição da probabilidade de erro e a possibilidade de conter uma grande quantidade de informação armazenada na sua base de dados acessível diretamente através da interface da aplicação.

6.2 Desenvolvimentos futuros

No que diz respeito a possíveis desenvolvimentos futuros da presente dissertação foi estabelecido um conjunto de ações de investigação e inovação, consideradas bastante pertinentes e de mais-valia no desenvolvimento do setor de projeto e manutenção de subestações elétricas, as quais serão de seguida apresentadas.

Na sequência do desenvolvimento deste trabalho, mais especificamente no que se refere aos métodos de dimensionamento de barramentos para subestações, poderá ser realizada uma pesquisa mais exaustiva dos métodos utilizados a nível mundial por fabricantes e projetistas no panorama atual. Posteriormente será efetuada uma análise dos mesmos, identificando a regulamentação e legislação em que se baseiam, a complexidade dos procedimentos que os compõem e a sua eficácia no resultado final. Com base nas informações decorrentes da análise anteriormente enunciada, será desenvolvido um novo método transversal a todos os tipos de condutores, no qual serão englobados todos os pontos fundamentais a um correto dimensionamento.

No âmbito da aplicação informática, para além das opções de dimensionamento de perfis tubulares e cabos, poder-se-á introduzir a possibilidade de dimensionamento de outras configurações de perfis.

Na perspetiva de minimizar a necessidade de interação do utilizador com o ambiente de desenvolvimento da aplicação seria útil a implementação de uma funcionalidade que permita o carregamento automático de informação na base de dados e possibilidade de consulta e edição dos vários parâmetros da mesma por parte do utilizador.

Outro aspeto de grande mais-valia seria a criação de uma plataforma de suporte online a partir da qual seria possível descarregar conteúdos atualizados, diretamente para a base de dados da aplicação. A construção e manutenção desta plataforma exigiria um constante contacto com os fabricantes de forma a manter a mesma continuamente atualizada com as mais recentes soluções disponíveis no mercado.

Na componente operacional será indispensável o melhoramento da interface gráfica e da dinâmica de processamento de ações da aplicação, de forma agilizar processos de cálculo e aumentar a velocidade e facilidade de interação pelo utilizador.

Por fim, seria muito interessante a adaptação da aplicação às plataformas Android e iOS de forma a que esta possa ser acedida através de telemóveis e tablets possibilitando assim a

sua utilização no local de construção da subestação, o que traria grandes vantagens na resolução de problemas urgentes que eventualmente possam surgir no dia-a-dia.

Referências

Bibliográficas

Referências Bibliográficas

- [1] A. J. A. d. Silva, A. J. V. d. Carvalho e A. I. R. L. Azevedo, Microsoft Access 2010, Famalicão - Portugal: Centro Atlântico, 2011.
- [2] A. Pina, Formulário para Elaboração de Projetos de Parques Eólicos, Gamesa Energia Portugal.
- [3] C. F. R. Queirós, Coordenação de isolamentos em subestações, Porto - Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [4] C. M. Fonseca, Dimensionamento de Barramentos em Subestações, Porto Alegre - Brasil: Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.
- [5] Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Subestações: Tipos, Equipamentos e Proteção, Rio de Janeiro - Brasil, 1999.
- [6] Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Esquemas Elétricos Básicos das Subestações Elétricas, Minas Gerais - Brasil.
- [7] Comissão Eletrotécnica Internacional, IEC 60228 - Conductors of insulated cables, IEC, 2004.
- [8] Comissão Eletrotécnica Internacional, IEC 60826 - Design criteria of overhead transmission lines, IEC, 2003.
- [9] Comissão Eletrotécnica Internacional, IEC 60865-1 Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 1: Definitions and calculation methods, IEC, 1993.
- [10] D. G. d. S. Elétricos, Regulamento de Segurança de Subestações e Postos de Transformação e de Seccionamento, Decreto-Lei n.º 42895, de 31/03/60, alterado pelo Dec. Regulamentar n.º 14/77, de 18 de Fevereiro.
- [11] Comissão Eletrotécnica Internacional, IEC 60909 - Short-circuit currents in three-phase a.c. systems, IEC, 2001.

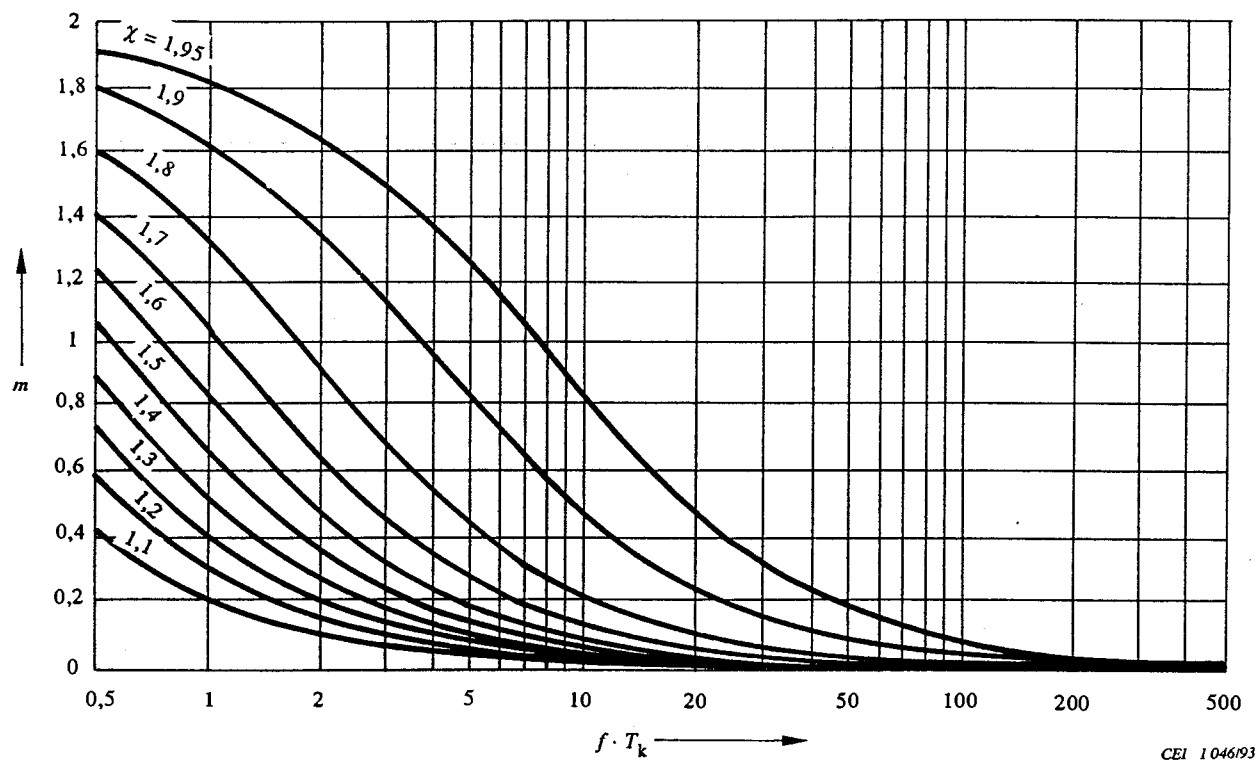
- [12] D. Douglass, J. Reding e et All, Standard 738 for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors, New York - USA: IEEE Power Energy Society, 2012.
- [13] J. M. D. d. Sousa, Dimensionamento de Subestações de Distribuição para esforços mecânicos e térmicos resultantes de curto-circuitos, Porto - Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [14] Direção de Normalização e Tecnologia, Instalações AT e MT. Subestações de Distribuição - Barramentos e Ligadores AT e MT - Características e ensaios, Coimbra - Portugal: EDP, 2007.
- [15] EDP, “EDP Subestação Virtual,” [Online]. Available: <http://www.edpdistribuicao.pt/pt/rede/Pages/subestacao.aspx>. [Acedido em 12 Junho 2015].
- [16] Direção de Normalização e Tecnologia, Instalações de AT e MT. Subestações de Distribuição - Projecto-tipo Memória descritiva, Coimbra - Portugal: EDP, 2007.
- [17] electrical4u.com, “electrical4u.com Online Electrical Engineering - Electrical Insulator | Insulating Material | Porcelain Glass Polymer Insulator,” [Online]. Available: <http://www.electrical4u.com/electrical-insulator-insulating-material-porcelain-glass-polymer-insulator/>. [Acedido em 20 Junho 2015].
- [18] electrical4u, “electrical4u.com Online Electrical Engineering - Electrical Power Transformer | Definition and Types of Transformer,” [Online]. Available: <http://www.electrical4u.com/electrical-power-transformer-definition-and-types-of-transformer/>. [Acedido em 14 Junho 2015].
- [19] Direção de Normalização e Tecnologia, Transformadores de Potência - Transformadores trifásicos, de 60kV/MT - Características e ensaios, Coimbra - Portugal: EDP, 2007.

- [20] E. S. M. Jesus, Desenvolvimento de "Software" Educativo para Dimensionamento de Subestações, Porto - Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [21] Efacec Engenharia, S.A. - Gestão da Qualidade, Instrução de Projecto - Esforços sobre Barramentos - Condutores Tubulares, EFACEC.
- [22] H. J. D. Faria, Cálculo de Barramentos em Subestações, Porto - Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [23] J. D. McDonald, Electric Power Substations Engineering, New York - USA: CRC Press, 2012.
- [24] J. E. M. d. Carvalho e M. Freitas, Métodos de Protecção de Reactâncias, Porto - Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.
- [25] J. F. M. D. Ramos, "FEUPowerTool" - Ferramenta Pedagógica para Manobras em Subestações, Porto - Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [26] J. N. d. Santos, Condutores e Cabos de Energia, Porto - Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.
- [27] L. S. Martins, Apontamentos para Projecto de Instalações Elétricas II, Setúbal - Portugal: Escola Superior de Tecnologia de Setúbal - Instituto Politécnico de Setúbal, 2005.
- [28] R. Leão, Distribuição de Energia Elétrica, Ceará - Brasil: Universidade Federal do Ceará.
- [29] M. Â. S. Folgado, Subestações de Tração e Postos de Catenária - Engenharia, Tomar - Portugal: Escola Superior de Tecnologia de Tomar - Instituto Politécnico de Tomar, 2013.
- [30] Ministério da Indústria e Energia e do Equipamento Social, Diário da República nº297 Série I de 26/12/1984, Decreto Regulamentar nº90/84 de 26/12/1984, 1984.

- [31] N. J. F. Sequeira, Projeto de Linha Aérea de Alta Tensão conforme a norma EN50341-1, Porto - Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [32] O. Guthmann, R. Pohlmann, W. J. Schmitt, W. Tettenborn e H. Wittwer, Manual de Instalações Elétricas, Ordem dos Engenheiros - Região Norte - Porto - Portugal: BBC Brown Boveri, 1982.
- [33] R. M. Gonçalves, Guia de projeto para subestações de alta tensão, São Paulo - Brasil: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2012.
- [34] S. H. d. M. e. Silva, Barramento de Subestações: Um Estudo de Caso com Condutores Rígidos, Recife - Brasil: Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, 2010.
- [35] S. Kaempfer e G. Kopatssch, Switchgear Manual, Berlim - Alemanha: ABB, 2012.
- [36] V. Hinrichsen, Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems, Berlim - Alemanha: Siemens AG, 2011.
- [37] “Guia Técnico - Subestações de Distribuição,” [Online]. Available: <http://paginas.fe.up.pt/~ee97153/>. [Acedido em 11 Julho 2015].

Anexos e Apêndices

Anexo 1 – Fator m



CEI 1046/93

Figure 12 a) – Facteur m , dissipation thermique correspondant à la composante continue dans les réseaux triphasés et monophasés

L'équation pour la programmation est donnée dans l'annexe A.

Anexo 2 – Fator n

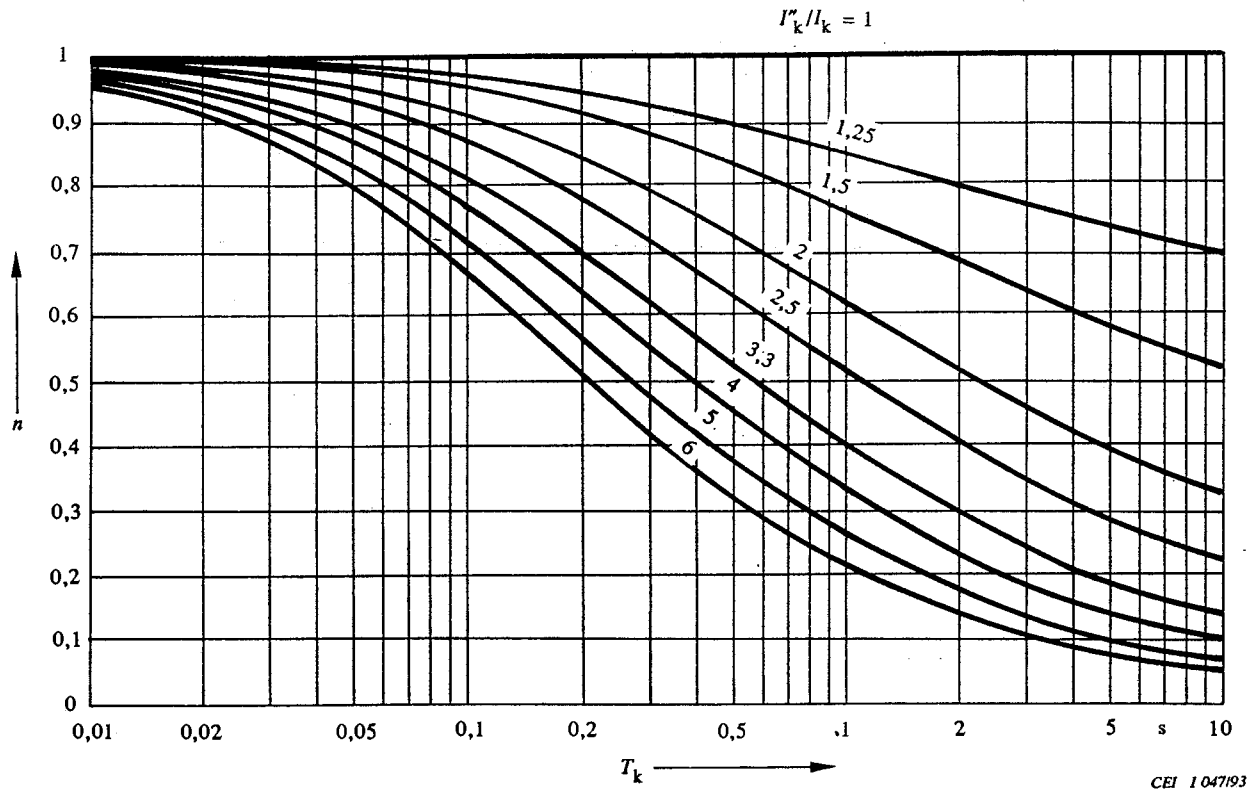


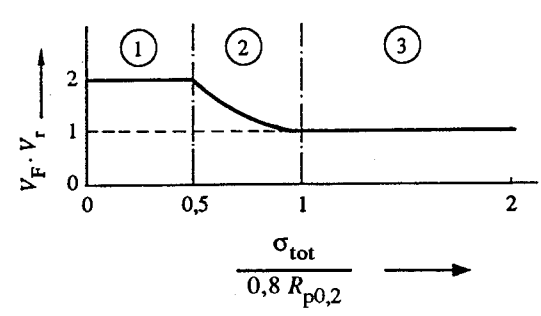
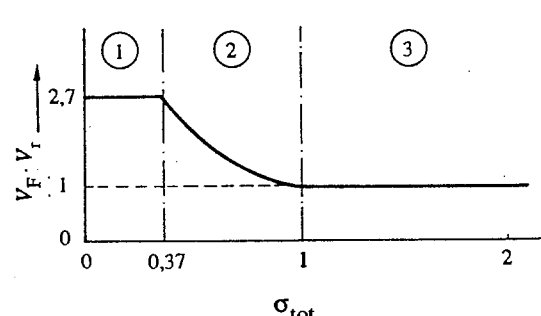
Figure 12 b) – Facteur n , dissipation thermique correspondant à la composante alternative dans les réseaux triphasés et, approximativement, dans les réseaux monophasés

L'équation pour la programmation est donnée dans l'annexe A.

Anexo 3 – Fator ψ


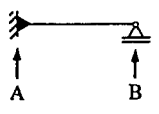
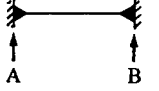
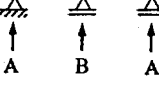
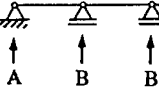
Anexo 4 – Valores máximos possíveis para $V_{\sigma}V_r$, $V_{\sigma s}V_{rs}$, e V_FV_r

Tableau 2 - Valeurs maximales possibles de $V_{\sigma} V_r$, $V_{\sigma_s} V_{rs}$, $V_F V_r$

Type de court-circuit	Réseau		
	Sans réenclenchement automatique tripolaire	Avec réenclenchement automatique tripolaire	Avec et sans réenclenchement automatique tripolaire
	$V_{\sigma} V_r, V_{\sigma_s} V_{rs}$	$V_{\sigma} V_r, V_{\sigma_s} V_{rs}$	$V_F V_r$
Biphasé	1,0	1,8	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 80%;"> <p>2,0 si $\frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 0,5$</p> <p>$\frac{0,8 R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ si $0,5 < \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 1,0$</p> <p>1,0 si $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}}$</p> </div> <div style="width: 15%; text-align: center;"> <p>gamme</p> <p>①</p> <p>②</p> <p>③</p> </div> </div> 
Triphasé	1,0	1,8	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 80%;"> <p>2,7 si $\frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 0,370$</p> <p>$\frac{0,8 R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ si $0,370 < \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 1,0$</p> <p>1,0 si $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}}$</p> </div> <div style="width: 15%; text-align: center;"> <p>gamme</p> <p>①</p> <p>②</p> <p>③</p> </div> </div> 

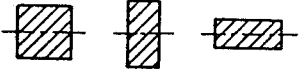
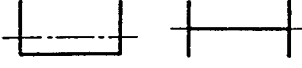


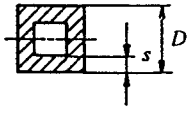

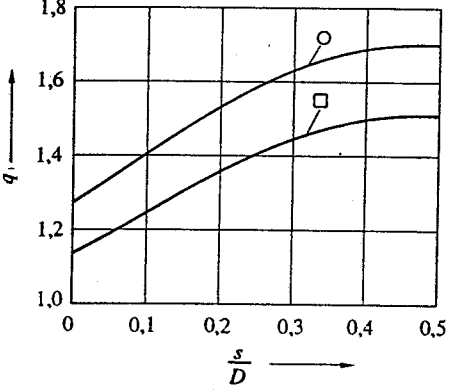
Anexo 5 – Fatores α , β e γ

Tableau 3 - Facteurs α , β , et γ pour différentes dispositions de supports de jeux de barres

Type de poutre et de support		Facteur α	Facteur β^*	Facteur γ
Poutre à une seule portée	A et B: supports simples 	A: 0,5 B: 0,5	1,0	1,57
	A: support encastré B: support simple 	A: 0,625 B: 0,375	0,73	2,45
	A et B: supports encastrés 	A: 0,5 B: 0,5	0,5	3,56
Poutre continue avec supports simples équidistants	Deux portées 	A: 0,375 B: 1,25	0,73	2,45
	Trois portées et plus 	A: 0,4 B: 1,1	0,73	3,56
* Y compris les effets de la plasticité				

Anexo 6 – Fator q

Tableau 4 - Facteur q

Section	Section
 <p style="text-align: right;">$q = 1,5$</p>	 <p style="text-align: right;">$q = 1,83$</p>
 <p style="text-align: right;">$q = 1,7$</p>  <p style="text-align: right;">$q = 1,7 \frac{1 - (1 - 2s/D)^3}{1 - (1 - 2s/D)^4}$</p>  <p style="text-align: right;">$q = 1,5 \frac{1 - (1 - 2s/D)^3}{1 - (1 - 2s/D)^4}$</p>	 <p style="text-align: right;">$q = 1,19$</p> 
<p>q correspond à l'axe de flexion en pointillé. Les forces sont perpendiculaires à cet axe.</p>	

Anexo 7 – Catálogo de Cabos de Alumínio

CENELEC EN50182:2001 standard

Characteristics of aluminium conductors – Type AL 1 – Germany

Code	Old code	Conductor area (mm ²)	N.º of wires	Wire diameter (mm)	Nominal diameter (mm)	Linear mass (Kg/km)	Rated strength (kN)	Electrical resist. d.c. 20°C (Ω/km)	Final modulus of elasticity (N/mm ²)	Final coefficient of linear expansion (1/K)	Current carrying capacity A (1)
16-AL1	16	15,9	7	1,70	5,10	43,4	3,02	1,798 6	60 000	2,30E-05	110
24-AL1	25	24,2	7	2,10	6,30	66,3	4,36	1,178 7	60 000	2,30E-05	145
34-AL1	35	34,4	7	2,50	7,50	93,9	6,01	0,831 7	60 000	2,30E-05	180
49-AL1	50	49,5	7	3,00	9,00	135,2	8,41	0,577 6	60 000	2,30E-05	225
48-AL1	50	48,3	19	1,80	9,00	132,9	8,94	0,594 4	57 000	2,30E-05	225
66-AL1	70	65,8	19	2,10	10,5	180,9	11,85	0,436 7	57 000	2,30E-05	270
93-AL1	95	93,3	19	2,50	12,5	256,3	16,32	0,308 1	57 000	2,30E-05	340
117-AL1	120	117,0	19	2,80	14,0	321,5	19,89	0,245 6	57 000	2,30E-05	390
147-AL1	150	147,1	37	2,25	15,8	405,7	26,48	0,196 0	57 000	2,30E-05	455
182-AL1	185	181,6	37	2,50	17,5	500,9	31,78	0,158 8	57 000	2,30E-05	520
243-AL1	240	242,5	61	2,25	20,3	671,1	43,66	0,119 3	55 000	2,30E-05	625
299-AL1	300	299,4	61	2,50	22,5	828,5	52,40	0,096 6	55 000	2,30E-05	710
400-AL1	400	400,1	61	2,89	26,0	1 107,1	68,02	0,072 3	55 000	2,30E-05	855
500-AL1	500	499,8	61	3,23	29,1	1 382,9	82,47	0,057 9	55 000	2,30E-05	990
626-AL1	625	626,2	91	2,96	32,6	1 739,7	106,45	0,046 4	55 000	2,30E-05	1 140
802-AL1	800	802,1	91	3,35	36,9	2 228,3	132,34	0,036 2	55 000	2,30E-05	1 340
1000-AL1	1 000	999,7	91	3,74	41,1	2 777,3	159,95	0,029 1	55 000	2,30E-05	1 540

Note 1 – (1) Guideline values of current carrying capacity are valid up to a frequency of 60 Hz, assuming a wind velocity of 0,6 m/s, the effect of solar radiation for Germany, an initial ambient temperature of 35° C and a conductor temperature of 80° C. For special applications, when there is no air turbulence, the values should be reduced by 30 %.

Note 2 – Values of final modulus of elasticity and coefficient of linear expansion for the conductor sizes listed in the Table are used in Germany. Values for other conductor constructions may be calculated using the method given in IEC 61597.

Note 3 – Outer layer stranding direction: Right-hand (Z).

Anexo 8 – Catálogo de Cabos de Cobre

Bare Copper Class 2 Conductor BS EN 13602



Eland Product Group: **A2B**

APPLICATION

For use in electrical grounding systems and on insulators for overhead transmission and distribution applications. Stranded conductors offer greater flexibility than solid.

CABLE STANDARDS

BS EN 13602, BS EN 60228



The electrical and dimensional properties of this product are measured by the Technical and Quality Assurance department at the Eland Cables laboratory. Cable performance in respect of conductor resistance, construction quality (workmanship), dimensional consistency, and other parameters are verified to published standards and approved product drawings. Conformance to RoHS (Restriction of the use of Hazardous Substances) is determined and confirmed.

CONSTRUCTION

Conductor

Class 2 annealed stranded copper conductor according to BS EN 60228 (previously BS 6360)

DIMENSIONS

ELAND PART NO.	NOMINAL CROSS SECTIONAL AREA mm ²	NO. OF WIRES	DIAMETER OF WIRES mm	DIAMETER OF CONDUCTORS mm	MECHANICAL PROPERTIES OF PLAIN COPPER WIRE		NOMINAL WEIGHT kg/km	MAXIMUM DC RESISTANCE AT 20°C ohms/km
					Minimum Elongation %	Minimum Tensile Strength N/mm ²		
A2B10015	1.5	7	0.53	1.59	24	200	13	12.1
A2B10025	2.5	7	0.67	2.01	24	200	21	7.41
A2B10040	4	7	0.85	2.55	24	200	35	4.61
A2B10060	6	7	1.05	3.15	26	200	52	3.08
A2B1010	10	7	1.35	3.85	26	200	87	1.83
A2B1016	16	7	1.74	4.8	28	200	137	1.15
A2B1025	25	7	2.19	5.8	28	200	215	0.727
A2B1035	35	7	2.62	6.9	28	200	300	0.524
A2B1050	50	10	2.62	8.2	28	200	410	0.387
A2B1070	70	14	2.62	9.7	28	200	595	0.268
A2B1095	95	19	2.62	11.4	28	200	820	0.193
A2B1120	120	24	2.62	13.1	28	200	1040	0.153
A2B1150	150	30	2.62	14.2	28	200	1280	0.124
A2B1185	185	37	2.62	15.8	28	200	1600	0.0991
A2B1240	240	48	2.62	18.6	28	200	2100	0.0754
A2B1300	300	58	2.62	20.4	28	200	2700	0.0601
A2B1400	400	55	3	26	33	200	3400	0.047
A2B1500	500	70	3	30	33	200	4400	0.0366

The information contained within this datasheet is for guidance only and is subject to change without notice or liability. All the information is provided in good faith and is believed to be correct at the time of publication. When selecting cable accessories, please note that actual cable dimensions may vary due to manufacturing tolerances.

Anexo 9 – Catálogo de Tubos de Alumínio

Table 2 | Current Carrying Capacity of available Busbars (metric)

d_u [mm]	w_d [mm]	A [mm ²]	M [kg/m]	I cm ⁴	Z [cm ³]	I_n [A] 6101BT6	I_n [A] 6101BT7
30	3	254	0,7	2,3	1,6	660	682
30	4	327	0,9	2,8	1,9	748	773
30	5	393	1,1	3,2	2,1	821	847
30	6	452	1,2	3,5	2,3	881	910
40	4	452	1,2	7,4	3,7	953	985
40	5	550	1,5	8,6	4,3	1 051	1 085
40	6	641	1,7	9,5	4,8	1 135	1 172
50	4	578	1,6	15,4	6,2	1 147	1 184
50	5	707	1,9	18,1	7,2	1 268	1 310
50	6	829	2,2	20,4	8,2	1 374	1 419
50	8	1 056	2,9	24,1	9,6	1 550	1 600
60	3	537	1,5	21,9	7,3	1 163	1 201
60	4	704	1,9	27,7	9,2	1 331	1 375
60	5	864	2,3	32,9	11,0	1 475	1 524
60	7	1 166	3,1	41,6	13,9	1 713	1 770
63	3	565	1,5	25,5	8,1	1 210	1 250
63	4	741	2,0	32,4	10,3	1 385	1 431
63	5	911	2,5	38,6	12,3	1 536	1 586
63	7	1 232	3,3	49,0	15,6	1 786	1 844
70	5	1 021	2,8	54,2	15,5	1 675	1 730
70	6	1 206	3,3	62,3	17,8	1 820	1 880
70	8	1 558	4,2	76,1	21,7	2 069	2 137
70	10	1 885	5,1	87,2	24,9	2 276	2 350
80	4	955	2,6	69,1	17,3	1 682	1 737
80	5	1 178	3,2	83,2	20,8	1 868	1 929
80	6	1 395	3,8	96,1	24,0	2 033	2 099
80	8	1 810	4,9	118,7	29,7	2 315	2 391
80	10	2 199	5,9	137,4	34,4	2 552	2 636
90	6	1 583	4,3	140,4	31,2	2 239	2 312
90	8	2 061	5,6	174,9	38,9	2 554	2 638
90	10	2 513	6,8	204,2	45,4	2 821	2 913
100	5	1 492	4,0	168,8	33,8	2 240	2 313
100	6	1 772	4,8	196,5	39,3	2 440	2 521
100	8	2 312	6,2	246,5	49,3	2 788	2 879
100	10	2 827	7,6	289,8	58,0	3 083	3 184
120	4	1 458	3,9	245,5	40,9	2 332	2 408
120	5	1 806	4,9	299,2	49,9	2 595	2 681
120	6	2 149	5,8	350,0	58,3	2 831	2 924
120	8	2 815	7,6	443,6	73,9	3 240	3 346
120	10	3 456	9,3	527,0	87,8	3 590	3 708
120	12	4 072	11,0	601,0	100,2	3 897	4 024
120	15	4 948	13,4	695,8	116,0	4 015	4 146
140	5	2 121	5,7	483,8	69,1	2 939	3 035
140	6	2 526	6,8	568,1	81,2	3 207	3 312
140	8	3 318	9,0	725,2	103,6	3 676	3 796
140	10	4 084	11,0	867,9	124,0	4 078	4 212
140	12	4 825	13,0	996,9	142,4	4 433	4 578
140	15	5 890	15,9	1 167,1	166,7	4 578	4 728
150	5	2 278	6,1	599,3	79,9	3 106	3 208
150	6	2 714	7,3	704,8	94,0	3 391	3 502
150	7	3 145	8,5	805,8	107,4	3 650	3 770
150	8	3 569	9,6	902,4	120,3	3 889	4 016
150	10	4 398	11,9	1 083,1	144,4	4 317	4 458

Legend

- d_u = external diameter
- w_d = wall thickness
- A = cross section
- m = mass per unit length
- I = second moment
- Z = section modulus
- I_n = current carrying capacity

Anexo 10 – Catálogo de Tubos de Cobre

Table 14. Current ratings, moments of inertia and section moduli - tubes

a. Metric sizes

Outside Diameter	Wall Thickness	Cross sectional area	Approx weight	Moment of inertia of section	Modulus of section	Approx resistance per m 20°C	Approx. d.c.current rating (1)	
							A	A
mm	mm	mm ²	kg/m	mm ⁴	mm ³	μΩ	Indoor	Outdoor
12	1.0	34.56	0.307	527.0	87.83	502	185	250
12	1.5	49.48	0.440	695.8	116.0	351	220	300
12	2.0	62.83	0.559	816.8	136.1	276	250	340
15	1.0	43.98	0.391	1083	144.4	394	225	300
15	1.5	63.62	0.566	1467	195.6	273	275	360
15	2.0	81.68	0.726	1766	235.5	212	310	400
18	1.0	53.40	0.475	1936	215.1	325	265	350
18	1.5	77.75	0.691	2668	296.4	223	320	420
18	2.0	100.5	0.894	3267	363.0	172	365	480
18	2.5	121.7	1.08	3751	416.8	143	405	530
22	1.0	65.98	0.587	3645	331.4	263	320	410
22	1.5	96.61	0.859	5102	463.8	179	385	500
22	2.0	125.7	1.12	6346	576.9	138	440	570
22	2.5	154.1	1.37	7399	672.7	112	490	630
22	3.0	179.1	1.59	8282	752.9	97.0	525	680
28	1.5	124.9	1.11	11000	785.5	139	480	620
28	2.0	163.4	1.45	13890	991.8	106.3	550	700
28	2.5	200.3	1.78	16440	1157	86.7	605	780
28	3.0	235.6	2.10	18670	1334	73.7	660	850
35	1.5	157.9	1.40	22190	1268	110	585	750
35	2.0	207.4	1.84	28330	1619	83.7	670	850
35	2.5	255.3	2.27	33900	1937	68.0	740	950
35	3.0	301.6	2.68	38940	2225	57.5	805	1030
54	1.5	247.4	2.20	85300	3160	70.2	855	1090
54	2.0	326.7	2.91	110600	4096	53.1	980	1250
54	2.5	404.5	3.60	134400	4978	42.9	1090	1390
54	3.0	480.7	4.27	156800	5808	36.1	1190	1520
76.1	2.0	465.6	4.14	319800	8404	37.3	1330	1690
76.1	2.5	578.1	5.14	392000	10300	30.0	1480	1880
76.1	3.0	689.0	6.13	461000	12110	25.2	1610	2050
76.1	3.5	798.3	7.10	527200	13850	21.7	1740	2210
108	2.5	828.6	7.37	1.153x10 ⁶	21360	20.9	2010	2550
108	3.0	989.6	8.80	1.365x10 ⁶	25280	17.5	2190	2790
108	3.5	1149	10.2	1.570x10 ⁶	29080	15.1	2360	3010
133	3.0	1225	10.9	2.590x10 ⁶	38940	14.1	2630	3350
133	3.5	1424	12.7	2.987x10 ⁶	44920	12.1	2830	3610
159	3.0	1470	13.1	4.474x10 ⁶	56280	11.8	3070	2910
159	3.5	1710	15.2	5.171x10 ⁶	65040	10.1	3310	4420

1. Current ratings are for 50°C temperature rise and 40°C ambient

Apêndice 1 – Relatório de cálculos para cabos

Barramento:

Fabricante CABELTE

Material Alumínio

Condição de aquecimento:

$$I_s = \frac{S_T}{\sqrt{3} \times U_c}$$

$$I_s = 120,281 \text{ [A]}$$

$$I_z \geq I_s$$

$$990 \geq 120,281 \text{ [A]}$$

Características da subestação:

$$T_f = \frac{T_a + T_s}{2}$$

$$T_f = 37,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\mu_f = \frac{1,458 \times 10^{-6} \cdot (T_f + 273)^{1,5}}{T_f + 383,4}$$

$$\mu_f = 1,9\text{E-}05 \text{ [Pa.s]}$$

$$\rho_f = \frac{1,293 - 1,525 \times 10^{-4} \cdot H_e + 6,379 \times 10^{-9} \cdot H_e^2}{1 + 0,00367 \cdot T_f}$$

$$\rho_f = 1,00813 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$k_f = 2,424 \times 10^{-2} + 7,477 \times 10^{-5} \cdot T_f - 4,407 \times 10^{-9} \cdot T_f^2$$

$$k_f = 0,02704 \text{ [W/(m.}^\circ\text{C)}]}$$

$$N_{Re} = \frac{D \cdot \rho_f V_w}{\mu_f}$$

$$N_{Re} = 1702680$$

Balanco térmico:

$$q_{cf} = K_\varphi \cdot 0,754 \cdot N_{Re}^{0,6} \cdot k_f \cdot (T_s - T_a)$$

$$q_{cf} = 2077,46 \text{ [W/m]}$$

$$q_{cn} = 3,645 \cdot \rho_f^{0,5} \cdot D^{0,75} \cdot (T_s - T_a)^{1,25}$$

$$q_{cn} = 2563,31 \text{ [W/m]}$$

$$q_r = 17,8 \cdot D \cdot \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right]$$

$$q_r = 7765,53 \text{ [W/m]}$$

$$q_s = \alpha \cdot Q_{se} \cdot \sin(\theta) \cdot A$$

$$q_s = 158,903 \text{ [W/m]}$$

$$I_{st} = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_s)}}$$

$$I = 419,102 \text{ [A]}$$

$$I_z \geq I_{st}$$

$$990 \geq 419,102 \text{ [A]}$$

Esforços mecânicos devido ao curto-circuito:

$$I_p = \chi \times \sqrt{2} \times I_k$$

$$I_p = 41,3148 \text{ [kA]}$$

$$F_e = \frac{\mu_0}{2\pi} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{l}{a} \times I_p^2$$

$$F_e = 3547,76 \text{ [N]}$$

$$Z = Z_0 \times (1 + \varphi \times \psi)$$

$$Z = 13756,4 \text{ [N]}$$

Esforços térmicos devido ao curto-circuito:

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

$$I_{th} = 14,5166 \text{ [kA]}$$

$$A_{min} = \frac{I_{th}}{k} \times \sqrt{t}$$

$$A_{min} = 98,6996 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$A \geq A_{min}$$

$$499,8 \geq 98,6996 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Cálculo da flecha:

$$f_{pp} = p_{ca} + p_h$$

$$f_{pp} = 2,48843 \text{ [kg/m]}$$

$$f_e = \frac{f_{pp} \times l^4}{185 \times E \times J}$$

$$f = 0,00729 \text{ [m]}$$

$$f_e < \frac{l}{300}$$

$$0,00729 < 0,06 \text{ [m]}$$

Apêndice 2 – Relatório de cálculos para tubos

Barramento:

Fabricante NEDAL

Material Alumínio

Condição de Aquecimento:

$$I_s = \frac{S_T}{\sqrt{3} \times U_c}$$

$$I_s = 120 \text{ [A]}$$

$$I_z \geq I_s$$

$$970 \geq 120 \text{ [A]}$$

Condição de Resistência Mecânica ao Curto-Circuito:

$$I_p = \chi \times \sqrt{2} \times I_k$$

$$I_p = 41,3 \text{ [kA]}$$

$$F_e = \frac{\mu_0}{2\pi} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{l}{a} \times I_p^2$$

$$F_e = 1183 \text{ [N]}$$

$$m_f = \frac{F_e \times l}{16}$$

$$m_f = 443 \text{ [N.m]}$$

$$Z = \frac{m_f}{\sigma}$$

$$Z = 2,61 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$Z \geq Z_{min}$$

$$3,7 \geq 2,61 \text{ [cm}^3\text{]}$$

Condição de Esforços Térmicos devido ao Curto-Circuito:

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

$$I_{th} = 14,5 \text{ [kA]}$$

$$A_{min} = \frac{I_{th}}{k} \times \sqrt{t}$$

$$A_{min} = 98,7 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$A \geq A_{min}$$

$$452 \geq 98,7 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Condição de Ressonância:

$$d = D - (2 \times W_d)$$

$$d = 32 \text{ [mm]}$$

$$J = \pi \times \frac{D^4 - d^4}{64}$$

$$J = 74191,9 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$f_r = 112 \times \sqrt{\frac{E \times J}{p \times l^4}}$$

$$f_r = 6,42 \text{ [Hz]}$$

$$f_r \notin [f \pm 10\%] \cup [2 \cdot f \pm 10\%]$$

$$6,42 \notin [45 ; 55] \cup [90 ; 110] \text{ [Hz]}$$

Cálculo da distância Máxima entre Apoios devido à Ressonância:

$$l = \sqrt{\frac{112}{f_l}} \times \sqrt[4]{\frac{E \times J}{p}}$$

$$l(f - 10\%) = 2,27 \text{ [m]}$$

$$l(f + 10\%) = 2,05 \text{ [m]}$$

$$l(2f - 10\%) = 1,60 \text{ [m]}$$

$$l(2f + 10\%) = 1,45 \text{ [m]}$$