

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Dimensionamento de cabos de alta tensão (até 150 kV) e elaboração de projecto de instalação eléctrica.

João Luís Santos Ribeiro da Silva.

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

Orientador: Prof. Doutor João Paulo Tomé Saraiva

Porto, Junho de 2008

© João Silva, 2008

A Dissertação intitulada

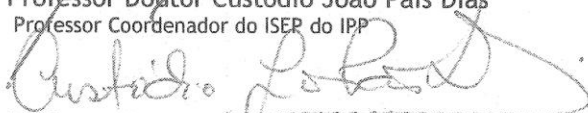
**“DIMENSIONAMENTO DE CABOS ELÉCTRICOS DE AT (ATÉ 150 Kv) E
ELABORAÇÃO DO PROJECTO ELÉCTRICO DE INSTALAÇÃO”**

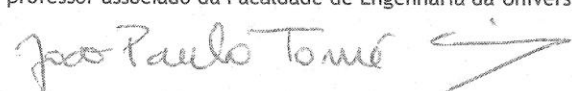
foi aprovada em provas realizadas em 22/Julho/2008

o júri

presidente Professor Doutor Artur Manuel Figueiredo Fernandes Costa
professor auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto


Professor Doutor Custódio João Pais Dias
Professor Coordenador do ISEP do IPP


Professor Doutor João Paulo Tomé Saraiva
professor associado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto


O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados.

Autor - João Luís Santos Ribeiro da Silva

João Luís Santos Ribeiro da Silva

Resumo

Actualmente o transporte de energia eléctrica para os grandes centros urbanos faz-se através de linhas de alta tensão. Contudo a construção de novas linhas aéreas está-se a tornar cada vez mais difícil devido às restrições ambientais e à proximidade das grandes áreas urbanas. Este factor está a contribuir para o aumento do uso de cabos subterrâneos em alta tensão.

Com o aumento do consumo de energia eléctrica nestes grandes centros urbanos e com a actual situação dos cabos de alta tensão fabricados com materiais extrudidos, torna-se necessário criar ferramentas de cálculo que ajudem ao seu dimensionamento de uma forma correcta e eficaz, no menor intervalo de tempo.

Desta forma surge a importância de criar uma aplicação capaz de efectuar cálculos eléctricos e térmicos dos cabos de alta tensão tendo em conta as várias condições de instalação.

A solução adoptada e descrita neste trabalho passou pela criação de uma base de dados que contém todas as características dos materiais usados nos cabos e, pela criação da aplicação que efectua o tratamento de dados, tendo em conta as condições de instalação impostas pelo utilizador da aplicação bem como de normas de construção do cabo impostas pelo cliente.

Nesta tese são descritas as características principais dos cabos de alta tensão, as condições de instalação usadas para o cálculo eléctrico e térmico, e as características da base de dados e da aplicação implementada.

No capítulo final são apresentados os resultados obtidos através de simulações efectuadas utilizando a aplicação referida considerando várias condições de instalação. Serão destacados os principais aspectos que contribuem para o valor da capacidade de transporte de um cabo e, será realizada uma análise aos valores de correntes de curto-circuitos e sobrecargas dos cabos.

Palavras-chave

Cabos alta tensão

Software

Dimensionamento

Cálculo térmico e eléctrico

Abstract

The supply of electricity to major urban areas is typically done through high voltage overhead lines. However, the construction of new overhead lines is getting increasingly difficult due to environmental constraints or due to the proximity of urban areas. This is determining the increasing use of high voltage underground cables.

With the increasing of the electrical demand in high urban centres it is necessary to create a tool to help the design of high voltage cables, in a simple and effective way, and in the shortest time possible.

In this way it is becoming necessary to create a software application that is capable of making electric and thermal calculations of high voltage cables, while taking into account the installation conditions.

The adopted solution corresponded to the creation of a data base that contains all the characteristics of the materials used in the cables, and then builds the application that manages the data and make its treatment, and finally uses the rules of fabrication imposed by the clients.

This thesis describes the main characteristics of underground cables, the conditions used to perform the electrical and thermal calculations, the characteristics of the referred database and of the software application.

At the final chapter, it will be presented the results obtained with several simulations considering various installations conditions, checking the most relevant aspects that contribute to the ampacity of high voltage cables, and at the end it will be made an analysis of the short circuit currents and emergency rating currents of cables.

Keywords

High Voltage Cables

Software

Dimensioning

Résumé

La fourniture d'électricité aux grands centres urbaine est réalisée a travers les lignes aériennes de haute tension. Toutefois, la construction de nouvelles lignes aériennes est de plus grande difficulté en raison de contraintes environnementales ou en raison de la proximité de zones urbaines. C'est la détermination de l'utilisation de câbles de haute tension souterrains.

Avec l'augmentation de la demande en électricité dans les centres urbains, il est nécessaire de créer un outil pour aider le dimensionnement des câbles à haute tension, dans une manière simple et effective, et dans le plus bref période de temps.

De cette manière, il devient nécessaire de créer une application de logiciel qui est capable de faire de calculs électrique et thermique de câbles de haute tension, tout en prenant en compte des conditions d'installation.

La solution retenue correspond à la création d'une base de données qui contient toutes les caractéristiques des matériaux utilisés dans les câbles, puis construire l'application qui gère les données et leur traitement, et enfin utilise les règles de fabrication imposées par les clients.

Dans cette thèse ils sont décrit les principales caractéristiques de câbles souterrains, les conditions utilisées pour effectuer les calculs électrique et thermique, les caractéristiques de la base de données visée et de logiciel d'application.

Au dernier chapitre, ils seront présentés les résultats obtenus avec plusieurs simulations de l'examen des conditions différentes installations. Ils seront aussi présentés les aspects les plus révélant qui contribuent à la maximum courant de lignes à haute tension, et à la fin les courts-circuits et courants d'urgence seront aussi analysés.

Mots-clés

Câbles de haute tension souterrains

Logiciel

Dimensionnement

Calculs électrique et thermique

Agradecimentos

Este trabalho foi proposto ao DEEC da FEUP pela Cabelte SA, sob a orientação local do Eng. Álvaro Quintela, a quem desde já se agradece todo o apoio concedido.

Ao Professor João Paulo Tomé Saraiva responsável pela orientação científica do trabalho desenvolvido, por todo o apoio, disponibilidade e, conselhos dados.

Quero também agradecer aos meus colegas de departamento, pelos conhecimentos transmitidos e pela disponibilidade que sempre tiveram para esclarecer as minhas dúvidas.

Por último quero agradecer aos meus pais, irmã e avó pelo apoio que deram durante todo o curso.

Índice

Resumo.....	v
Abstract	vii
Résumé.....	ix
Agradecimentos.....	xi
Lista de figuras.....	xvii
Lista de tabelas	xix
Lista de abreviaturas e símbolos	xxi
Glossário.....	xxv
Capítulo 1	
Introdução	
1.1. - Enquadramento.....	1
1.2. - Motivação e objectivos.....	2
1.3. - Estruturação do documento	3
Capítulo 2	
Cabos de alta tensão	
2.1. - Introdução.....	5
2.2. - Alma condutora.....	6
2.3. - Camada isolante	7
2.4. - Semicondutor (interno e externo).....	8
2.5. - Blindagem ou ecrã metálico.....	9
2.6. - Camada hidroexpansiva de bloqueio longitudinal	9
2.7. - Armação.....	10
2.8. - Bainha externa	10

Capítulo 3

Cálculo eléctrico

3.1. - Resistência	13
3.2. - Perdas óhmicas por efeito de Joule de um condutor.....	17
3.3. - Capacidade aparente de um condutor	17
3.4. - Perdas dieléctricas.....	18
3.5. - Indutância linear por unidade de comprimento	19
3.6. - Indutância mútua entre a alma e a blindagem	20
3.7. - Factor de perdas para a blindagem.....	22
3.8. - Factor de perdas para a armação.....	27

Capítulo 4

Cálculo térmico

4.1. - Dimensionamento térmico	29
4.2. - Resistência térmica das bainhas	31
4.3. - Resistência térmica do meio envolvente.....	33
4.4. - Corrente máxima admissível.....	42
4.5. - Curto-circuitos.....	45
4.6. - Sobrecargas.....	48

Capítulo 5

Desenvolvimento da aplicação

5.1. - Introdução.....	57
5.2. - Arquitectura da aplicação	58
5.3. - Base de dados	59
5.4. - Interface.....	61
5.5. - Módulo de cálculo	64

Capítulo 6

Caso de estudo e análise de resultados

6.1. - Introdução.....	77
6.2. - Descrição do sistema.....	77
6.3. - Descrição do cabo	80
6.4. - Análise e comparação de resultados.....	83
6.5. - Selecção do cabo	92

Capítulo 7

Conclusões e perspectivas de desenvolvimento	
7.1. - Conclusões principais	95
7.2. - Perspectivas de desenvolvimento.....	96
Bibliografia	99
Anexo A	101
Anexo B	103

Lista de figuras

Figura 2.1 - Estrutura base de um cabo de alta tensão	6
Figura 2.2 - Composição da alma condutora.....	6
Figura 2.3 - Forma da Alma Condutora	7
Figura 3.1 - Efeito Pelicular.....	15
Figura 3.2 - Efeito Proximidade.....	16
Figura 3.3 - Corte de um cabo de campo radial.	18
Figura 3.4 - Disposição dos cabos em trevo.....	19
Figura 3.5 - Disposição dos cabos em esteira.	20
Figura 3.6 - Esquema de ligação das blindagens - a) Ligação nas duas extremidades b) Transposição dos cabos; c) Ligação numa extremidade; d) Transposição das blindagens (<i>crossbonding</i>).	21
Figura 4.1 - Lei térmica	29
Figura 4.2 - Relação entre circuito eléctrico e térmico	30
Figura 4.3 - Forma das bainhas não metálicas.....	32
Figura 4.4 - Método das imagens para determinação da resistência térmica	35
Figura 4.5 - Circuito térmico equivalente reduzido.	50
Figura 4.6 - Circuito térmico para regimes de longa duração.	50
Figura 4.7 - Circuito térmico para regimes de duração curtos.....	53
Figura 5.1 - Arquitectura base da aplicação.	58
Figura 5.2 - Funcionamento em modo de rede.	59
Figura 5.3 - Funcionamento em modo isolado.	59
Figura 5.4 - Relações entre tabelas	61
Figura 5.5 - Formulário introdução de dados do cabo.	62
Figura 5.6 - Formulário introdução de dados das condições de instalação.	62

Figura 5.7 - Introdução de materiais.	62
Figura 5.8 - Introdução de dados de materiais usados na bainha exterior.	63
Figura 5.9 - Corrente máxima admissível.	63
Figura 5.10 - Processo de cálculo.	64
Figura 5.11 - Descrição do cálculo da resistência.	68
Figura 5.12 - Descrição do cálculo da capacidade.	69
Figura 5.13 - Descrição do cálculo da indutância.	69
Figura 5.14 - Descrição do cálculo das perdas.	70
Figura 5.15 - Descrição do cálculo das resistências térmicas.	71
Figura 5.16 - Descrição do cálculo das resistências térmicas (continuação).	72
Figura 5.17 - Descrição do cálculo da corrente máxima admissível e das temperaturas.	73
Figura 5.18 - Descrição do cálculo da corrente de curto-circuito.	74
Figura 5.19 - Descrição do cálculo da corrente de sobrecarga.	75
Figura 6.1 - Esquema de ligação da blindagem à terra.	80
Figura 6.2 - Corrente máxima admissível em função da secção e condições de instalação.	85
Figura 6.3 – Corrente máxima admissível em função da secção e ligação da blindagem.	86
Figura 6.4 - Corrente máxima admissível em função da resistividade térmica do solo.	86
Figura 6.5 - Corrente máxima admissível em função da temperatura ambiente.	87
Figura 6.6 - Corrente de curto-circuito máxima na alma condutora em função da duração e da temperatura inicial da alma condutora.	90
Figura 6.7 - Corrente de curto-circuito máxima na blindagem em função da duração e da temperatura inicial da alma condutora.	90
Figura 6.8 - Corrente de sobrecarga para cabo enterrado em função da duração da sobrecarga e carga inicial.	92

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Tensões nominais das camadas semicondutoras	9
Tabela 3.1 - Coeficientes do efeito de proximidade e pelicular.	16
Tabela 3.2 - Factores de perdas dieléctricas para alta tensão	19
Tabela 4.1 - Resistividades térmicas dos materiais para a camada isolante.....	33
Tabela 4.2 - Resistividades térmicas dos materiais para a bainha exterior	33
Tabela 4.3 - Resistividades térmicas do solo.....	34
Tabela 4.4 - Coeficientes de dissipação de calor para grupos de cabos ao ar livre.	39
Tabela 4.5 - Coeficientes de absorção solar	40
Tabela 4.6 - Constantes de instalação para tubos ou galerias.....	41
Tabela 4.7 - Características dos materiais para cálculo da corrente de curto- circuito.....	46
Tabela 4.8 - Temperaturas limite de curto-circuito num máximo de 5 segundos..	47
Tabela 4.9 - Unidade volumétrica de calor dos vários elementos do cabo.	49
Tabela 5.1 - Tabelas criadas e funções.....	60
Tabela 5.2 - Descrição das rotinas principais.	65
Tabela 5.3 – Descrição dos blocos de decisão.....	66
Tabela 6.1 - Distâncias entre grupos de cabos.....	79
Tabela 6.2 - Período de calor e frio.....	79
Tabela 6.3 - Características eléctricas da rede.....	80
Tabela 6.4 - Diâmetros mínimos e máximos do cabo.	81
Tabela 6.5 - Dimensionamento da blindagem.	82
Tabela 6.6 - Diâmetros médios da camada isolante e da bainha exterior.....	83

Tabela 6.7 - Correntes e temperaturas em regime permanente em cabos enterrados.	84
Tabela 6.8 - Correntes e temperaturas em regime permanente em cabos ao ar livre.	84
Tabela 6.9 – Resistências em cabos enterrados.	88
Tabela 6.10 - Resistências em cabos ao ar livre.....	88
Tabela 6.11 - Correntes de curto-circuito em função da secção.	89
Tabela 6.12 - Correntes de sobrecarga para cabos enterrados.	91
Tabela 6.13 - Correntes de sobrecargas para cabos ao ar livre.	92

Lista de abreviaturas e símbolos

AT	Alta tensão
MAT	Muito alta tensão
PVC	Policloreto de Vinilo
PE	Polietileno
HDPE	Polietileno de alta densidade
LDPE	Polietileno de baixa densidade
XLPE ou PEX	Polietileno reticulado
EPR	Borracha etil-propílica
Blindagem LDL	Blindagem ligada à terra dos dois lados
Blindagem LUL	Blindagem ligada à terra de um lado
CT	Cabos transpostos
BT	Blindagem transposta
Be	Bainha exterior
n_iter	Número de Iterações
Temp.	Temperatura
Max.	Máxima
CC	Curto-circuito
Calc.	Cálculo
Bainhas hidro. e semic.	Bainhas hidroexpansíveis e semicondutores
Semicondutores Int. e Ext.	Semicondutores Interno e externo
R_0	→ Resistência dc a 20 °C (Ω/m);
α_{20}	→ Constante de temperatura mássica a 20°C;
θ	→ Temperatura de operação da alma condutora (°C).
C	→ Capacidade por unidade de comprimento (F/m)
U_0	→ Tensão mínima simples (V);

L	→	Indutância linear para cada um dos condutores de fase de um sistema trifásico
m_0	→	Permeabilidade magnética do vazio $m_0 = 4\pi \times 10^{-4}$ (H/km);
a	→	Distância entre eixos dos cabos;
r	→	Raio da alma condutora de cada um dos condutores;
L_m	→	Indutância linear média;
a_m	→	Distância geométrica média;
d_{Mm}	→	Diâmetro médio da blindagem;
R_s	→	Resistência da blindagem à temperatura de operação;
R_{ac}	→	Resistência em corrente alternada da alma condutora;
X_s	→	Reactância por unidade de comprimento da blindagem;
X_m	→	Reactância mútua por unidade de comprimento entre a blindagem de um cabo externo e os outros dois cabos dispostos em esteira;
t_s	→	Espessura da blindagem;
T	→	Resistência Térmica do elemento considerado (K.m/W);
$\Delta\theta$	→	Diferença de Temperatura (K);
W	→	Potência calorífica (W/m ²);
l_1	→	Factor de perdas para a blindagem;
l_2	→	Factor de perdas para a armação;
$\Delta\theta$	→	Variação da temperatura acima da temperatura ambiente;
L	→	Distância da superfície ao eixo do cabo (mm);
D_e	→	Diâmetro externo do cabo (mm);
d'_{pk}	→	Distância do cabo p à imagem do cabo k ;
d_{pk}	→	Distância do cabo p ao cabo k ;
h	→	Coeficiente de dissipação de calor;
$\Delta\theta_s$	→	Temperatura acima da temperatura ambiente à superfície do cabo (K);
σ	→	Coeficiente de absorção solar da superfície do cabo;
H	→	Intensidade de radiação solar;
θ_m	→	Temperatura média entre o cabo e o tubo;
N	→	Número de cabos no tubo;
r_e	→	Resistividade térmica do terreno à volta do tubo (K.m/W);
r_c	→	Resistividade térmica do cimento (K.m/W);
L_G	→	Distância da superfície ao centro do tubo (m);
r_b	→	Raio externo do tubo (m);
T_1	→	Resistência térmica da camada isolante;
T_2	→	Resistência térmica das bainhas não metálicas entre a camada isolante e a armação;

T_3	→	Resistência térmica da bainha exterior;
T_4	→	Resistência térmica do meio envolvente ao cabo;
W_d	→	Perdas dieléctricas na camada isolante (W/m);
T_4^*	→	Resistência térmica exterior do cabo ao ar livre, ajustada de forma a ter em conta a radiação solar;
I_{AD}	→	Corrente de curto-circuito calculada com base num processo adiabático (A);
t	→	Duração do curto-circuito ou sobrecarga (s);
K	→	Constante que depende do material que suporta a corrente de curto-circuito;
S	→	Secção do componente que suporta a corrente de curto-circuito (mm ²);
θ_f	→	Temperatura final (°C);
θ_i	→	Temperatura inicial (°C);
b	→	Coeficiente de temperatura de resistência à corrente de curto-circuito a 0°C;
F	→	Factor que tem em conta o contacto imperfeito entre o condutor ou fios e o material que o rodeia;
A, B	→	Constantes baseadas nas propriedades térmicas do material não metálico adjacente e superior ao componente que suporta a corrente de curto-circuito;
δ	→	Espessura da blindagem (mm);
σ_c	→	Unidade volumétrica de calor do elemento do cabo (J/N.K.m ³);
D_2^2	→	Diâmetro externo do elemento do cabo (m);
D_1^2	→	Diâmetro interno do elemento do cabo (m);
Q_i	→	Capacidade térmica da camada isolante;
Q_c	→	Capacidade térmica da alma condutora;
Q_j	→	Capacidade térmica da bainha exterior;
Q_s	→	Capacidade térmica da blindagem;
p	→	Factor de divisão da camada isolante;
p'	→	Factor de divisão da bainha exterior;
q_s	→	Rácio das perdas por efeito de Joule na alma condutora mais as perdas por efeito de Joule na blindagem, pelas perdas por efeito de Joule na alma condutora;
Q_{i1}, Q_{i2}	→	Capacidades térmicas parciais da camada isolante;
I_R	→	Corrente máxima admissível;
I_1	→	Corrente que circula no cabo antes da aplicação da corrente de sobrecarga (A);

I_2	→	Corrente de sobrecarga aplicada ao cabo durante um certo intervalo de tempo;
R_1	→	Resistência ac da alma condutora antes da aplicação da sobrecarga;
R_{max}	→	Resistência ac da alma condutora no fim do período da aplicação da sobrecarga;
R_R	→	Resistência ac da alma condutora em regime permanente;
θ_{max}	→	Temperatura máxima acima da temperatura ambiente no fim da aplicação da sobrecarga;
$\theta_R(t)$	→	Temperatura da alma condutora depois da aplicação de I_R ;
$\theta_R(\infty)$	→	Temperatura máxima da alma condutora em regime permanente.

Glossário

Capacidade – Capacidade eléctrica associada à camada isolante

Capacidade térmica – Capacidade de um elemento do cabo armazenar calor.

Corrente máxima admissível – Corrente máxima na alma condutora de maneira a que nenhuma bainha não metálica ultrapasse a sua temperatura máxima de operação.

Corrente sobrecarga – Corrente máxima na alma condutora de forma a que possa ser ultrapassada a temperatura máxima de operação de uma bainha não metálica por um determinado intervalo de tempo.

Elastómeros e polímeros reticuláveis – Materiais que necessitam depois de extrudidos, de uma operação de vulcanização ou de reticulação com o fim de lhes estabelecer de uma forma irreversível, ligações entre cadeias moleculares, apresentando assim, um comportamento elástico importante, associado uma grande aptidão para a deformação. É o caso do XLPE.

Esteira – Cabos dispostos em linha horizontal ou vertical, sendo a distância dos cabos externos ao cabo de centro igual para os dois.

Esteira juntiva – Grupo de três cabos dispostos em linha horizontal ou vertical encostados.

Factor de perdas – Percentagem de perdas óhmicas de uma bainha metálica do cabo em relação à alma condutora.

Material dieléctrico – Material não condutor com características isolantes.

Material extrudido - Operação que consiste em forçar a saída por um orifício, sob a acção de forças de pressão, de um metal ou de um plástico sob a forma de fio (Santos, Novembro 2005).

Material termoplástico – Material no qual a temperatura provoca, de uma maneira, reversível, uma variação da plasticidade. É o caso do PVC e do PE.

Resistência – Resistência eléctrica associada a metais metálicos.

Resistência térmica – Resistência de um elemento do cabo que se opõem à propagação de calor, criando uma diferença de temperatura nas duas faces do elemento.

Trevo – Cabos dispostos em trevo ou triângulo, de maneira a que a distância entre os cabos seja igual entre todos.

Trevo juntivo – Grupos de três cabos dispostos em trevo ou triângulo encostados.

Tripla extrusão – Operação de extrusão realizada por máquinas denominadas extrusoras, que aplicam as três camadas, semicondutor interno, camada isolante, semicondutor externo, simultaneamente sobre a alma condutora.

Capítulo 1

Introdução

1.1. - Enquadramento

O sector da energia eléctrica enfrenta vários desafios em quase todos os países do mundo devido ao forte crescimento do consumo de energia eléctrica. Neste sentido, o abastecimento de electricidade tem sofrido fortes pressões por parte dos consumidores. Por isso é necessário desenvolver tecnologia que garanta esse serviço de uma forma eficaz, segura e amiga do ambiente. Os cabos subterrâneos têm a possibilidade de reduzir falhas, custos de manutenção, perdas de transmissão e apresentam um outro importante benefício uma vez que contribuem para minimizar os riscos de acidente para a vida humana.

Em muitas cidades da Europa onde se torna difícil a construção de linhas aéreas, a transmissão de energia por cabos subterrâneos de alta tensão é muito frequente, tornando-se estas infra-estruturas parte das redes mais modernas de transmissão de energia.

Com o aumento do consumo de energia eléctrica nos grandes centros urbanos torna-se necessário elevar a tensão da rede de maneira a transportar a energia eléctrica. Assim, a única forma de transportar a energia até grandes centros urbanos é através de cabos subterrâneos, sendo necessário produzir cabos subterrâneos que suportem tais tensões.

A transmissão de energia por cabos de alta tensão já está em uso há mais de meio século. Esta tecnologia está cada vez mais desenvolvida expandindo a sua investigação para tensões mais elevadas, tornando-se aos poucos mais eficiente e rentável comparativamente às linhas aéreas de alta tensão. Hoje em dia, a tensão de operação dos cabos extrudidos já chega aos 500 kV.

Os cabos subterrâneos de alta tensão apresentam características próprias para o transporte de energia. Encontram-se fora da visão, requerendo apenas uma vala no terreno para a sua instalação, e podem ser dimensionados de modo a emitirem campos electromagnéticos muito reduzidos. Por outro lado a nível de perdas apresentam melhores características que as linhas aéreas.

Actualmente, os fabricantes de cabos estão aptos para disponibilizar as mais diversas soluções inovadoras para a rede de transporte de energia. Cabos subterrâneos para enterrar directamente em terra são hoje fabricados por tripla extrusão, tirando lugar aos tradicionais cabos por isolamento a óleo e apresentam várias vantagens comparados a estes. Entre elas incluem-se a maior facilidade na instalação obtendo-se, assim, uma redução dos seus custos não só na instalação mas também no seu fabrico e, uma tecnologia mais amiga do ambiente e praticamente não requerendo manutenção.

1.2. - Motivação e objectivos

Os cabos de alta tensão são elementos vitais no sistema eléctrico uma vez que fazem parte da rede de transporte. São componentes caros e necessitam de manter elevados índices de fiabilidade e de operação para o seu uso.

Para isso torna-se necessário proceder ao seu correcto dimensionamento tendo em conta os diversos factores que condicionam a sua operação, de maneira a manter os índices anteriores elevados.

Devido à actual situação dos cabos de alta tensão torna-se necessário criar ferramentas de cálculo que ajudem ao seu correcto dimensionamento, tendo em conta as várias normas internacionais de fabrico, e de uma forma rápida e eficaz de maneira a que seja dada uma resposta ao cliente o mais rapidamente possível.

Tendo em conta estes aspectos, esta dissertação tem como objectivo o estudo do dimensionamento de cabos de alta tensão, e a criação de uma ferramenta de cálculo dos diversos parâmetros eléctricos de cabos de Alta Tensão (até 150 kV) isolados com materiais dieléctricos sólidos extrudidos.

A aplicação foi desenvolvida tendo como referências as recomendações e os critérios contidos nas normas nacionais e internacionais aplicáveis, que definem os requisitos construtivos e funcionais dos cabos de alta tensão e, que têm em conta as diversas situações de instalação. A versão final da aplicação permite realizar o estudo do comportamento do cabo em regime estacionário e em regime transitório, tendo em conta a sua construção e aplicação na rede. Por fim foi elaborado um manual contendo toda a informação associada aos parâmetros e cálculos da aplicação de maneira a que seja possível realizar simulações e proceder a eventuais alterações.

Este trabalho foi proposto ao DEEC da FEUP pela Cabelte SA, tendo sido realizado nas suas instalações industriais em Arcozelo, Vila Nova de Gaia, no departamento de desenvolvimento, entre Março e Junho de 2008 sob a orientação do Eng. Álvaro Quintela.

1.3. - Estruturação do documento

Este documento encontra-se estruturado em sete capítulos, sendo o primeiro capítulo o presente.

No segundo Capítulo descreve-se o estado de arte relativamente aos cabos de alta tensão, analisando-se as várias camadas da estrutura de um cabo e seus materiais.

No Capítulo 3 analisam-se diversos aspectos relativos ao cálculo eléctrico dos cabos, nomeadamente cálculo de resistências em corrente contínua e alternada, indutâncias, capacidades e perdas óhmicas e dieléctricas existentes nas várias bainhas.

No Capítulo 4 é estudado o cálculo térmico dos cabos de alta tensão, correntes máximas admissíveis e sobrecargas. Estes procedimentos de cálculo serão em seguida implementados na aplicação fazendo referência às respectivas normas.

No Capítulo 5 descreve-se a aplicação desenvolvida, e são discutidos os vários formulários existentes na aplicação para o cálculo dos vários parâmetros. Será também demonstrada a base de dados que foi implementada juntamente com a aplicação.

No sexto Capítulo é analisado um caso de estudo, onde será simulada a análise de uma consulta solicitada por um cliente usando a ferramenta de cálculo desenvolvida.

No sétimo e último Capítulo serão apresentadas as principais conclusões da dissertação e referidas perspectivas futuras para o trabalho desenvolvido.

Capítulo 2

Cabos de alta tensão

2.1. - Introdução

Os cabos de alta tensão são usados para transportar grandes quantidades de energia. Usam-se geralmente nas grandes cidades onde a construção de linhas aéreas por razões de segurança e estética não é viável e, em situações especiais tais como, centrais térmicas de grande importância e centrais hídricas que se encontram debaixo do solo.

O isolamento deste tipo de cabos com materiais termoplásticos extrudidos cuja utilização se generalizou na baixa e média tensão, começa a aparecer agora na gama da alta e muito alta tensão. Estes materiais apresentam várias vantagens relativamente aos cabos impregnados a óleo, entre as quais o baixo custo de fabrico comparados com os outros, a fácil manutenção, a possibilidade de atingir temperaturas em regime permanente mais elevadas e, o facto de serem materiais amigos do ambiente uma vez que as fugas de óleo são eliminadas.

Os cabos de alta tensão com materiais extrudidos são geralmente monopolares. Qualquer que seja a constituição deste tipo de cabo, este apresenta componentes essenciais para o seu correcto funcionamento, relativamente à condução de energia eléctrica, ao isolamento eléctrico, à garantia de não penetração da humidade e à protecção contra acções mecânicas e químicas. A este respeito, a Figura 2.1 ilustra a estrutura de um cabo monopolar usado em alta tensão. Nas secções seguintes são detalhados diversos aspectos relativos à estrutura de um cabo.

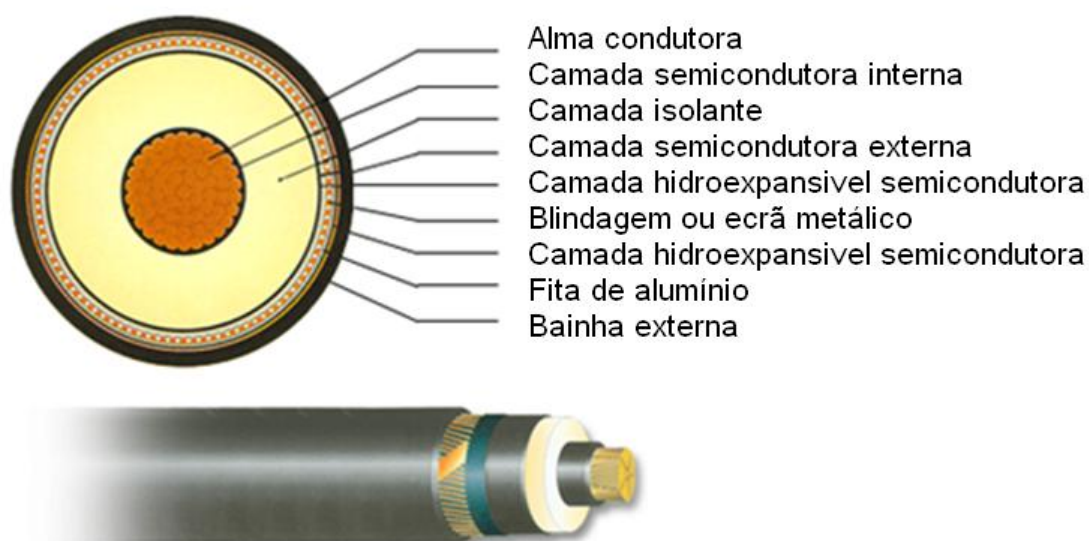


Figura 2.1 - Estrutura base de um cabo de alta tensão

2.2. - Alma condutora

A alma condutora é caracterizada pela natureza do metal condutor, secção nominal, composição ou classe e forma da alma.

Quanto à composição da alma esta é caracterizada em função da secção nominal e do grau de flexibilidade desejado podendo a alma condutora ser maciça, constituída apenas por um condutor, normalmente para secções não muito elevadas, ou multifilar, constituídas por vários fios cableados entre si, o que confere uma maior flexibilidade ao cabo. A Figura 2.2 ilustra estas duas possibilidades construtivas da alma condutora.

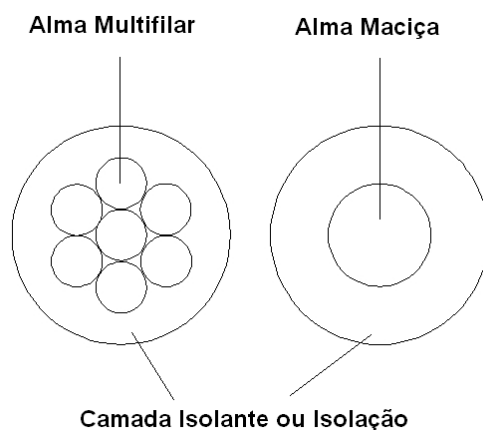


Figura 2.2 - Composição da alma condutora

Relativamente à forma, podem ocorrer almas circulares e sectoriais. As almas multifilares com secção circular são constituídas por camadas concêntricas de fios cableados entre si o que,

à partida, confere uma maior flexibilidade ao cabo. As almas sectoriais são usadas sobretudo em cabos com três ou quatro condutores permitindo uma melhor ocupação do espaço, ou seja, com este tipo de disposição podemos ter cabos monopolares ou tripolares (uma ou três fases no mesmo cabo). Os cabos de alta tensão são geralmente cabos monopolares devido à grande espessura da camada isolante que era necessária para ter os três condutores no mesmo cabo, piorando assim as características mecânicas do cabo. No entanto em cabos com secções elevadas a alma condutora poderá ser segmentada, isto é, composta por vários elementos cableados, com forma sectorial, podendo ser ligeiramente isolados entre eles. Este tipo de forma é adoptado com o objectivo, reduzir o efeito pelicular e de proximidade descritos no subcapítulo 3.1 e, por consequência, reduzir a resistência óhmica em corrente alternada, permitindo assim um maior aproveitamento da secção útil. Estas diferentes formas encontram-se ilustradas na Figura 2.3 (Santos, Novembro 2005, p.25).

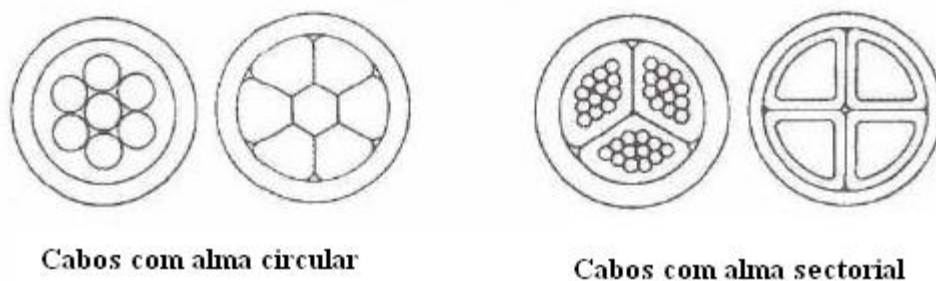


Figura 2.3 - Forma da Alma Condutora

Quanto à natureza da alma condutora, os materiais mais utilizados são o cobre e o alumínio, sendo a capacidade de transporte do cobre maior que a do alumínio devido à sua menor resistividade. Sendo assim, para garantir a mesma capacidade de transporte dos cabos de cobre, os condutores de cabos de alumínio têm que ter uma secção mais elevada.

De referir ainda que as almas condutoras na maioria dos casos podem ser sujeitas a uma operação de compactação, com o objectivo de reduzir ao espaço por elas ocupado.

2.3. - Camada isolante

A camada isolante é constituída por compostos dieléctricos sólidos, na maioria dos casos aplicados por extrusão. Os diversos materiais usados nesta camada limitam os valores das correntes máximas em regime permanente. A espessura da camada isolante cresce com a tensão de serviço, mas depende também dos meios utilizados para uniformizar o campo magnético. A boa qualidade e a correcta execução do isolamento de um cabo são essenciais para assegurar as boas características de funcionamento do cabo. Com efeito, este elemento do cabo suporta a tensão da rede, sobretensões atmosféricas e sobretensões de manobra.

Os diferentes isolantes sintéticos que se utilizam podem ser agrupados em duas famílias:

- os materiais termoplásticos, nos quais a temperatura provoca, de uma maneira reversível, uma variação da plasticidade. É o caso do Policloreto de Vinilo (PVC) e do Polietileno (PE);
- os elastómeros e polímeros reticuláveis. Estes materiais apresentam um grande domínio de elasticidade, obtendo um comportamento elástico importante, associado a uma grande adaptação à deformação. Este tipo de isolantes necessita, depois de extrudido, de uma operação de vulcanização ou de reticulação com o fim de lhe estabelecer, de forma irreversível, ligações transversais entre as cadeias moleculares. É o caso do Polietileno Reticulado (PEX ou XLPE), e dos copolímeros de etilenopropileno (EPR).

Quanto mais elevada for a tensão de funcionamento do cabo, mais importantes serão as exigências relativas à qualidade dielétrica da camada isolante. Para os cabos de AT e MAT, esta qualidade está directamente ligada à natureza do material isolante e à sua aplicação.

No Anexo B é apresentada uma tabela contendo as características dos isolantes usados na camada isolante e nas bainhas em alta tensão (Solidal, Outubro 2005, p.38), (IEC 60287-2-1, 2006, p.55). Como cada tecnologia de isolante apresenta as suas vantagens e desvantagens, a escolha do isolante baseia-se normalmente na tensão estipulada para o cabo e sua aplicação.

2.4. - Semicondutor (interno e externo)

Estas camadas são criadas para cabos a partir dos 10 kV, de modo a criar zonas de transição o mais perfeitas possível entre a alma condutora e a camada isolante. Pretende-se assim obter uma superfície lisa entre a alma condutora e a camada isolante, limitando e orientando o campo eléctrico existente entre a blindagem e a alma condutora.

O tipo de camada semicondutora a usar depende da camada isolante em causa. Uma camada isolante em XLPE ou PE é mais sensível a descargas parciais do que PVC e EPR, pelo que é necessário assegurar que estas camadas semicondutoras sejam bem aplicadas, de maneira a não existirem cavidades entre elas e a camada isolante. Por isso, estas três camadas são aplicadas simultaneamente por um processo de tripla extrusão.

A Tabela 2.1 apresenta as tensões simples mínimas a partir das quais os semicondutores interno e externo devem ser instalados dependendo da camada isolante, sendo U_0 a tensão simples mínima e U a tensão simples do sistema (Heinhold, 1990, p.45).

Tabela 2.1 - Tensões nominais das camadas semicondutoras

Camada isolante	Semicondutor interno	Semicondutor externo
	Tensão nominal acima de U_0 / U	
PVC EPR	6 / 10	6 / 10
PE XLPE	3,6 / 6	3,6 / 6

2.5. - Blindagem ou ecrã metálico

Esta camada tem várias funções uma vez que permite assegurar o escoamento das correntes capacitivas, bem como das correntes de curto-circuito, concretamente da componente homopolar da corrente de curto-circuito, protege contra as perturbações electromagnéticas no caso de cabos de telecomunicações, garante a protecção de pessoas, em caso de perfuração do cabo, já que este é colocado ao potencial da terra e, por fim, permite criar uma superfície equipotencial e orientar as linhas de força do campo eléctrico.

Esta componente é aplicada sobre uma camada semicondutora e pode apresentar-se de várias formas:

- uma ou várias fitas, enroladas em hélice, de maneira a que nenhum espaço livre seja visível do exterior;
- uma fita em alumínio ou cobre de fraca espessura, colocada ao comprimento e revestida numa das faces com um produto destinado a assegurar a sua aderência à bainha exterior. Este produto é do mesmo tipo que o da bainha externa;
- uma fita enrolada de cobre ou alumínio, eventualmente associada a uma fita de aço também enrolada, colocada a todo o comprimento do cabo;
- uma malha, em fios de cobre ou alumínio, enrolada em hélice, eventualmente com os fios reunidos entre si com uma fita da mesma natureza, disposta igualmente em hélice. No caso de cabos flexíveis usa-se uma trança de fios de pequeno diâmetro;
- uma fita de cobre ou alumínio corrogado.

2.6. - Camada hidroexpansiva de bloqueio longitudinal

Esta camada tem como função impedir a entrada de água. Esta camada tem um significado especial uma vez que a intrusão de água na camada isolante acelera o processo de envelhecimento dos materiais dieléctricos conduzindo assim a uma falha do cabo mais cedo que seria de esperar.

Esta camada é composta por materiais que, ao entrarem em contacto com a água, se expandem bloqueando assim ao longo do comprimento do cabo a entrada de água.

Estas bainhas devem ser aplicadas à volta da blindagem (bainha hidroexpansiva interior e exterior). A bainha hidroexpansiva interior deve ser semicondutora para orientar a linhas de campo para a blindagem. No caso de existir uma bainha metálica sobre a blindagem, a segunda fita hidroexpansiva deve também ser semicondutora.

2.7. - Armação

A armação assegura a protecção mecânica do cabo, quando este é submetido a esforços transversais ou longitudinais.

Os principais tipos de armaduras usadas são as seguintes:

- armadura em dupla fita de aço, aplicada helicoidalmente;
- armadura em fios de aço aplicados helicoidalmente;
- armadura em trança de fios de aço, a usar em situações em que se requer maior flexibilidade.

Nos cabos monopolares em alta tensão não são usadas armaduras em aço já que as características magnéticas deste tipo de armaduras desaconselham o seu uso em corrente alternada, por haver redução da capacidade de transporte. Como alternativa, podem ser usadas armaduras em dupla fita de alumínio aplicada helicoidalmente, ou utilizar uma protecção mecânica exterior (por exemplo, um tubo dentro do qual o cabo é instalado).

A dupla fita de alumínio é revestida por um material igual ao da bainha exterior. Assim obtém-se uma melhor aderência a esta ao ser extrudida, para se obter uma melhor estanquidade radial da água.

2.8. - Bainha externa

O emprego de polímeros sintéticos generalizou-se na protecção exterior dos cabos. A escolha desta bainha pode variar dependendo da sua aplicação, e deve ser escolhida de acordo com o seguinte:

- resistência mecânica, na colocação ou em exploração;
- resistência aos agentes químicos, calor, frio e à propagação da chama;
- fraca opacidade dos fumos, em caso de combustão;
- estanquidade;
- flexibilidade.

Os materiais mais utilizados para construir esta bainha são o PVC e o PE, estando o emprego de bainhas em PE generalizado para cabos de baixa, média e alta tensão.

Em certos casos, são aplicados materiais ignífugos sem halogéneos já que a sua principal qualidade reside no facto de, em caso de incêndio, libertarem pouco fumo e nenhum gás corrosivo, sendo os gases libertados de baixa toxicidade.

Capítulo 3

Cálculo eléctrico

O funcionamento eléctrico de um circuito é determinado pelas características lineares dos diferentes condutores: resistência, indutância, capacidade entre outros.

Estas características não dependem apenas da constituição do condutor mas também da disposição do circuito e condições de instalação. Estes diferentes aspectos serão analisados nas diversas secções deste capítulo.

3.1. - Resistência

O valor da resistência em corrente alternada da alma condutora é função de vários factores, entre eles o valor da resistência do condutor em corrente contínua, a frequência, o diâmetro, a natureza da alma e a distância entre os vários condutores.

De acordo com a norma (IEC 60228, 2004) a resistência em corrente contínua é dada pela expressão (3.1).

$$R_0 = \frac{4 \times A}{n \times \pi \times d^2} \times K_1 \times K_2 \times K_3 \quad (3.1)$$

Nesta expressão:

- A → Resistividade do material da alma condutora a 20 °C. Os dois materiais mais usados têm as seguintes resistividades:
- cobre; A = 17,241 (Ω.mm²/km);
 - alumínio; A = 28,264 (Ω.mm²/km);
- n → Número de fios na alma condutora, no caso da alma condutora ser maciça n=1;
- d → Diâmetro dos fios da alma condutora (mm);
- K₁ → Factor de fabrico do tratamento da superfície dos fios;
- K₂ → Factor de fabrico do cableamento para almas multifilares;

$K_3 \rightarrow$ Factor de fabrico do passo de hélice para almas multifilares.

Como geralmente as almas são compactadas e o cálculo da resistência se torna mais difícil, usam-se os valores máximos que se encontram no Anexo A (IEC 60228, 2004, p.17-23). Estes valores máximos da resistência variam de acordo com a forma da alma, composição ou classe da alma, secção e natureza da alma.

Uma vez que a resistência varia linearmente com a temperatura é necessário corrigir o valor da resistência para a temperatura de operação da alma condutora (IEC 60287-1-1, 2006, p.14) de acordo com a expressão (3.2).

$$R' = R_0 \times [1 + \alpha_{20} \times (\theta - 20)] \quad (3.2)$$

Nesta expressão:

$R_0 \rightarrow$ Resistência dc a 20 °C (Ω/m);

$\alpha_{20} \rightarrow$ Constante de temperatura mássica a 20°C;

- Cobre; $\alpha_{20} = 3,93 \times 10^{-3} \text{ (K}^{-1}\text{)}$;
- Alumínio; $\alpha_{20} = 4,03 \times 10^{-3} \text{ (K}^{-1}\text{)}$;

$\theta \rightarrow$ Temperatura de operação da alma condutora (°C).

O valor da temperatura de operação é dado de acordo com a temperatura máxima da camada isolante em uso (Anexo B).

Até agora, tem-se considerado apenas a resistência em corrente contínua. Em corrente alternada são considerados mais dois efeitos, ambos contribuindo para o aumento da resistência eléctrica.

O primeiro efeito está relacionado com o facto da densidade da corrente eléctrica não ser uniforme, pois é mais elevada na periferia do que no centro da secção, devido ao denominado Efeito Pelicular. Assim, ocorre uma modificação do fluxo de corrente eléctrica na alma condutora devido ao efeito do campo magnético interno. Este efeito encontra-se ilustrado na Figura 3.1 (Cables de Alta Tension, Alcatel).

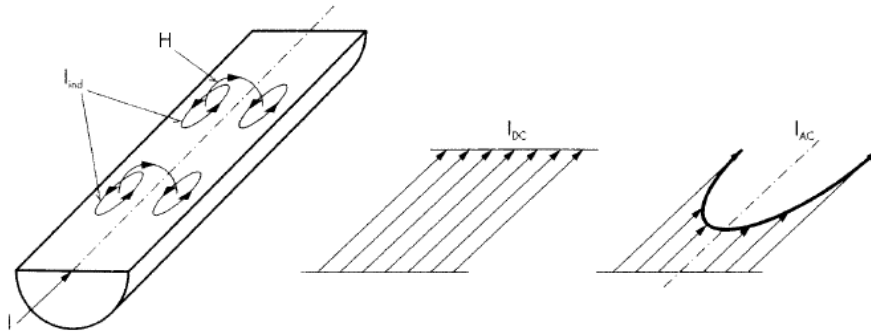


Figura 3.1 - Efeito Pelicular.

O factor pelicular, y_s , é calculado pelas expressões (3.3) e (3.4) e tem em conta a frequência da rede, e a resistência linear à temperatura de operação do cabo (3.2).

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8 \times x_s^4} \quad (3.3)$$

$$x_s^2 = \frac{8 \times \pi \times f \times k_s \times A \times 10^{-7}}{\rho \times [1 + \alpha (\theta - 20)]} \quad (3.4)$$

Este efeito não tem influência significativa no valor da resistência para secções inferiores a 185 mm². No entanto, para secções superiores a 1000 mm² tem um significado forte na variação da resistência. Por esta razão normalmente a alma condutora é segmentada para reduzir este efeito.

O segundo efeito a ter em conta é denominado efeito de proximidade e corresponde à deformação da distribuição da corrente eléctrica no interior da alma condutora devido à presença de correntes induzidas por campos magnéticos de outros cabos existentes nas proximidades do cabo em análise. Esta situação encontra-se ilustrada na Figura 3.2 (Cables de Alta Tension, Alcatel).

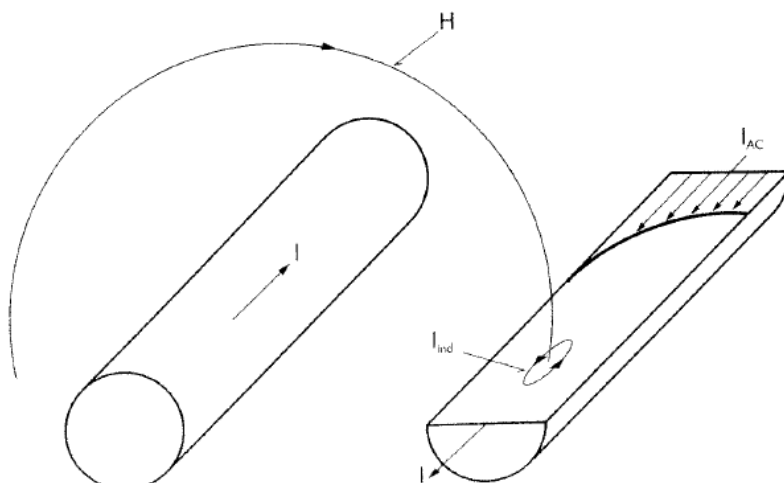


Figura 3.2 - Efeito Proximidade.

O factor de proximidade, y_p , para além de depender frequência do sistema, depende da resistência linear à temperatura de operação do cabo (3.2), da distância aos outros condutores e do diâmetro da alma condutora e é calculado considerando as expressões (3.5) e (3.6).

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8 \times x_p^4} \times \left\{ \frac{d_c}{s} \right\}^2 \times \left[0,312 \times \left\{ \frac{d_c}{s} \right\}^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8 \times x_p^4} + 0,27} \right] \quad (3.5)$$

$$x_p^2 = \frac{8 \times \pi \times f \times k_p \times A \times 10^{-7}}{\rho \times [1 + \alpha (\theta - 20)]} \quad (3.6)$$

Os coeficientes dos factores pelicular e proximidade, K_s e K_p , são obtidos experimentalmente e são dados na Tabela 3.1, de acordo com a norma (IEC 60287-1-1, 2006, p.31).

Tabela 3.1 - Coeficientes do efeito de proximidade e pelicular.

Tipo de Condutor	K_s	K_p
Cobre		
Circular, multifilar	1	0,8
Circular, segmentado	0,435	0,37
Alumínio		
Circular, multifilar	1	0,8
Circular, 4 segmentos	0,28	0,37
Circular, 5 segmentos	0,19	0,37
Circular, 6 segmentos	0,12	0,37

Uma vez determinado os valores dos factores y_s e y_p , o valor da resistência em corrente alternada é dado pela expressão (3.7) de acordo com (IEC 60287-1-1, 2006, p.13) sendo R' dado pela expressão (3.2).

$$R_{ac} = R' \times (1 + y_s + y_p) \quad (\Omega/m) \quad (3.7)$$

3.2. - Perdas óhmicas por efeito de Joule de um condutor

As perdas por efeito de Joule numa alma condutora que transmite uma corrente eficaz I (A) são dadas pela expressão (3.8) já conhecida.

$$W_j = R \times I^2 \quad (W/km) \quad (3.8)$$

Nesta expressão R é a resistência em corrente alternada determinada utilizando (3.7) na unidade (Ω/km) .

3.3. - Capacidade aparente de um condutor

Num sistema constituído por dois condutores separados por um material dieléctrico, a tensão aplicada entre os condutores vai variar no tempo, e circulará entre eles uma corrente dada por (3.9).

$$i = C \times \frac{dE}{dt} \quad (3.9)$$

Para cabos monopolares, a capacidade é calculada tendo em conta a alma condutora e, o elemento usado como referencial, neste caso, o ecrã metálico ou fita metálica, obtemos assim um cabo de campo radial como ilustra a Figura 3.3 (Santos, J. N, 2005).

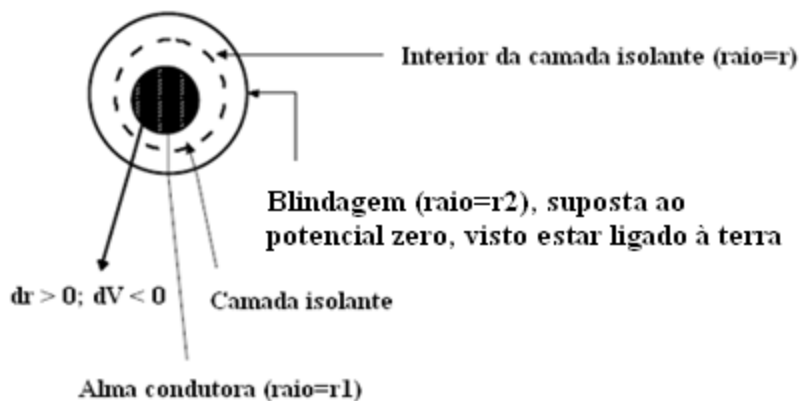


Figura 3.3 - Corte de um cabo de campo radial.

Nestas condições, a capacidade referida é dada por (3.10).

$$C = \frac{2\pi\epsilon'}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3.10)$$

Fazendo em (3.10) $\epsilon' = \epsilon \times \epsilon_0$, em que ϵ é a permissividade relativa do dielétrico e ϵ_0 a permissividade dielétrica do vazio ($\epsilon_0 = 8,8419 \times 10^{-9} (F/km)$) a capacidade determina-se por (3.11).

$$C = \frac{\epsilon}{18 \times \ln \frac{r_2}{r_1}} (\mu F/km) \quad (3.11)$$

Nesta expressão:

$r_1 \rightarrow$ Raio da alma condutora;

$r_2 \rightarrow$ Raio da camada isolante.

3.4. - Perdas dielétricas

As perdas dielétricas dependem da tensão, da frequência e da tangente de perdas ou factor de perdas. Este factor de perdas traduz a perda de energia provocada pelo aquecimento da camada isolante. Na Tabela 3.2 encontram-se os valores mais usuais para o factor de perdas nos isolantes baseados em alta tensão (IEC 60287-1-1, 2006, p.32).

Tabela 3.2 - Factores de perdas dieléctricas para alta tensão

Tipo Isolante	$\tan \delta$	U_0 (kV)
EPR	0,005	63,5
PVC	0,1	6
PE	0,001	127
XLPE	0,001	127
XLPE	0,005	63,5

O valor da tensão a usar no cálculo das perdas dieléctricas deve ser igual ou superior aos indicados na Tabela 3.2. Nestas condições as perdas são dadas por (3.12).

$$W_d = \omega \times C \times U_0^2 \times \tan \delta \quad (3.12)$$

$$\omega = 2 \times \pi \times f \text{ (rad/s)} \quad (3.13)$$

Nesta expressão:

$C \rightarrow$ Capacidade por unidade de comprimento (F/m) determinada em (3.11);

$U_0 \rightarrow$ Tensão mínima simples (V).

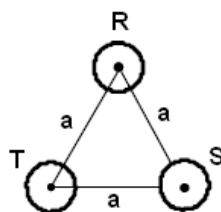
3.5. - Indutância linear por unidade de comprimento

A corrente que percorre a alma condutora, induz nas almas condutoras dos outros cabos uma força electromotriz dada por (3.14) em que L representa a indutância de um condutor circular sem blindagem por unidade de comprimento.

$$E = L \times \omega \times I \text{ (V/km)} \quad (3.14)$$

A indutância será calculada nas condições seguintes:

- Cabos instalados em trevo:

**Figura 3.4 - Disposição dos cabos em trevo.**

$$L_R = L_S = L_T = L \quad (3.15)$$

$$L = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{2 \times a}{r} \right) \quad (H/km) \quad (3.16)$$

- Cabos instalados em esteira:

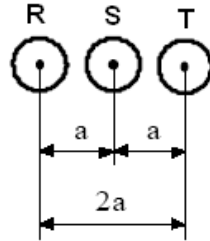


Figura 3.5 - Disposição dos cabos em esteira.

$$L_m = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{2 \times a_m}{r} \right) \quad (H/km) \quad (3.17)$$

$$a_m = \sqrt[3]{2} \times a \approx 1,26 \times a \quad (3.18)$$

Nestas expressões:

- L** → Indutância linear para cada um dos condutores de fase de um sistema trifásico;
- μ_0 → Permeabilidade magnética do vazio $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-4}$ (H/km);
- a** → Distância entre eixos dos cabos;
- r** → Raio da alma condutora de cada um dos condutores;
- L_m → Indutância linear média;
- a_m → Distância geométrica média.

3.6. - Indutância mútua entre a alma e a blindagem

Este fenómeno de auto-indução entre almas e blindagens será considerado no caso de cabos monopulares sem os transpor com a blindagem ligada à terra nas duas extremidades do cabo. Esta situação é relevante uma vez que a blindagem ao ser percorrida por uma corrente induzida de valor significativo liberta calor devido às perdas por efeito de Joule, diminuindo assim a capacidade de transporte do cabo. Este fenómeno é desprezado nas seguintes situações:

- quando a blindagem se encontra ligada à terra apenas numa extremidade;
- disposição dos cabos em esteira sendo esta transposta;
- blindagem é transposta ao longo do cabo (*crossbonding*).

Em blindagens ligadas apenas num ponto as correntes nelas induzidas são desprezadas. No entanto é induzida uma tensão ao longo do comprimento do cabo que aumenta com o seu comprimento. Assim, é necessário ter cuidado na escolha da camada isolante uma vez que esta irá estar sujeita a mais descargas parciais.

Uma maneira de minimizar estas tensões induzidas consiste em ligar a blindagem nas duas extremidades do cabo. Esta situação tem como desvantagem haver correntes induzidas na blindagem diminuindo a capacidade de transporte do cabo.

Transpor as bainhas ou os cabos corresponde a um método para diminuir as tensões e correntes induzidas na blindagem aumentando a capacidade de transporte. Este método requer a transposição dos cabos pelo menos três vezes e a blindagem é dividida ao longo do cabo duas vezes ficando assim a tensão em cada secção da blindagem esfasada 120° . A desvantagem deste método resulta de ser muito caro e, por isso, apenas é aplicado em alta tensão.

A Figura 3.6 ilustra diversas formas possíveis da ligação da blindagem à terra, referidas anteriormente.

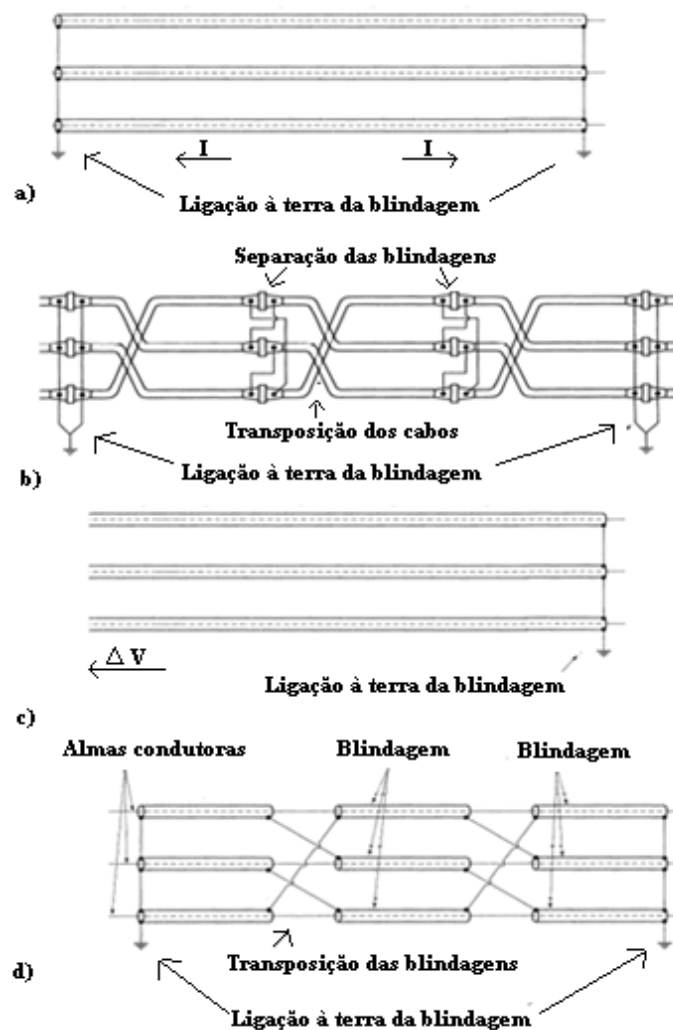


Figura 3.6 - Esquema de ligação das blindagens - a) Ligação nas duas extremidades b) Transposição dos cabos; c) Ligação numa extremidade; d) Transposição das blindagens (crossbonding).

Como o cálculo da indutância mútua entre a alma e a blindagem se torna complicado para os vários casos possíveis vamos apenas considerar valores médios, obtendo-se a indutância mútua através da expressão (3.19).

$$M = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \ln \frac{2 \times a}{d_{Mm}} \quad (3.19)$$

Nesta expressão:

- d_{Mm} → Diâmetro médio da blindagem;
- a → Distância média entre condutores. Se os condutores estiverem dispostos em esteira ($a = \sqrt[3]{2} \times a$) como em (3.18).

Como a corrente que percorre a blindagem cria um campo magnético que se opõe à corrente da alma condutora, a indutância da alma condutora será afectada por uma parcela que irá reduzir o seu valor e que é dada por (3.20).

$$\Delta L = M \times \frac{1}{\left(\frac{R_S}{X_S}\right)^2 + 1} \quad (3.20)$$

Nesta expressão R_S é a resistência da blindagem que é determinada da mesma maneira que a da alma condutora substituindo apenas a secção da alma pela secção da blindagem (3.7).

Por fim para obter a reactância mútua da blindagem, X_S , apenas se multiplica a indutância mútua pela frequência da rede através da expressão (3.21).

$$X_S = \omega \times M = f \times \mu_0 \times \ln \frac{2 \times a}{d_{Mm}} \quad (3.21)$$

3.7. - Factor de perdas para a blindagem

As perdas na blindagem são dependentes da corrente que percorre a alma condutora, e podem ser divididas em duas categorias:

- perdas por circulação de corrente na blindagem de cabos monopolares se a blindagem for ligada à terra nas duas extremidades;
- perdas por correntes *eddy*. Estas correntes derivam do efeito Pelicular e do efeito de proximidade já referidos na secção 3.1.

As correntes *eddy* ocorrem independentemente da ligação à terra da blindagem e são consideradas pequenas comparadas com as correntes de circulação, à excepção de cabos com almas segmentadas.

O factor de perdas é dado pela soma dos factores de perdas na blindagem por correntes de circulação e correntes *eddy* respectivamente (IEC 60287-1-1, 2006, p.16). Este factor corresponde à percentagem de perdas na blindagem comparadas com as perdas da alma condutora calculadas utilizando a expressão (3.8). Assim, o factor de perdas da blindagem em cabos monopolares dispostos em trevo com blindagem ligada à terra nas duas extremidades (Figura 3.6-a) é dado por (3.22).

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1 \quad (3.22)$$

Nesta expressão:

$$\lambda'_1 = \frac{R_S}{R_{ac}} \times \frac{1}{1 + \left(\frac{R_S}{X_S}\right)^2} \quad (3.23)$$

$$\lambda''_1 = 0 \quad (3.24)$$

$$R_S = R_{S0} \times [1 + \alpha_{20} \times (\theta_s - 20)] \quad (3.25)$$

Nestas expressões:

- $R_S \rightarrow$ Resistência da blindagem à temperatura de operação;
- $R_{ac} \rightarrow$ Resistência em corrente alternada da alma condutora dada por (3.7);
- $X_S \rightarrow$ Reactância por unidade de comprimento da blindagem dada por (3.21).

Como R_S depende da temperatura de operação da blindagem é necessário recorrer a um processo iterativo para calcular o seu valor. Assim arbitra-se um valor inicial para a temperatura de operação da blindagem e após determinada a corrente máxima admissível do cabo, é determinado o valor da temperatura de operação da blindagem através do cálculo térmico a abordar no Capítulo 4. Então, é recalculado o valor da corrente máxima admissível com o valor novo da temperatura de operação da blindagem. Este processo iterativo converge rapidamente uma vez que a temperatura da blindagem não afecta significativamente a corrente máxima admissível, sendo com frequência necessárias apenas duas iterações.

Se se tratar de cabos monopolares dispostos em esteira sem transposição com a blindagem ligada à terra nas duas extremidades (Figura 3.6-a), o factor de perdas λ'_1 e λ''_1 não é igual para os três cabos. O cabo que tem mais perdas é um dos cabos externos com a fase em atraso. Para esse cabo o factor λ'_1 é dado por (3.26).

$$\lambda'_{11} = \frac{R_S}{R_{ac}} \times \left[\frac{0,75 \times P^2}{R_S^2 + P^2} + \frac{0,25 \times Q^2}{R_S^2 + Q^2} + \frac{2 \times R_S \times P \times Q \times X_m}{\sqrt{3} \times (R_S^2 + Q^2) \times (R_S^2 + P^2)} \right] \quad (3.26)$$

No outro cabo externo o factor de perdas é dado pela expressão (3.27).

$$\lambda'_{12} = \frac{R_S}{R_{ac}} \times \left[\frac{0,75 \times P^2}{R_S^2 + P^2} + \frac{0,25 \times Q^2}{R_S^2 + Q^2} - \frac{2 \times R_S \times P \times Q \times X_m}{\sqrt{3} \times (R_S^2 + Q^2) \times (R_S^2 + P^2)} \right] \quad (3.27)$$

No cabo do meio o factor de perdas é dado por (3.28).

$$\lambda'_{1m} = \frac{R_S}{R_{ac}} \times \frac{Q^2}{R_S^2 + Q^2} \quad (3.28)$$

Nas três expressões anteriores (3.26), (3.27) e (3.28) verifica-se que:

$$P = X + X_m \quad (3.29)$$

$$Q = X - \frac{X_m}{3} \quad (3.30)$$

$$\lambda''_1 = 0 \quad (3.31)$$

$$X_m = 2 \times \omega \times 10^{-7} \times \ln(2) \quad (3.32)$$

- X_m → Reactância mútua por unidade de comprimento entre a blindagem de um cabo externo e os outros dois cabos dispostos em esteira.
- X → Reactância da blindagem dada pela expressão (3.21).

No cálculo da corrente máxima admissível deverá ser usado o factor de perdas para o cabo que apresenta mais perdas, correspondente portanto ao valor dado pela expressão (3.26).

Se se tratar de cabos monopolares dispostos em esteira com transposição regular, com blindagem ligada à terra a cada três transposições do cabo (Figura 3.6-b) o factor de perdas da blindagem é dado por (3.22) sendo os factores λ'_1 e λ''_1 dados por (3.33) e (3.34).

$$\lambda'_1 = \frac{R_S}{R_{ac}} \times \frac{1}{1 + \left(\frac{R_S}{X_{S2}}\right)^2} \quad (3.33)$$

$$\lambda''_1 = 0 \quad (3.34)$$

$$X_{S2} = \omega \times \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \ln \left(2 \times \sqrt[3]{2} \times \frac{a}{r} \right) \quad (3.35)$$

A reactância X_{S2} é obtida tal como em (3.19), mas como os cabos estão dispostos em esteira usa-se a distância média entre cabos dada pela expressão (3.18).

Como não sabemos a distância entre pontos de transposição o factor de perdas deve ser aumentado 25% de acordo com as indicações constantes em (IEC 60287-1-1, 2006, p.20).

Se se tratar de cabos monopolares com blindagem apenas ligada à terra numa extremidade (Figura 3.6-c) apenas existem perdas por correntes *eddy*. Nestas condições o factor de perdas é dado por (3.36).

$$\lambda''_1 = \frac{R_S}{R_{ac}} \times \left[g_s \times \lambda_0 \times (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 \times t_s)^4}{12} \times 10^{-12} \right] \quad (3.36)$$

Nesta expressão:

$$g_s = 1 + \left(\frac{t_s}{D_s} \right)^{1,74} \times (\beta_1 \times D_s \times 10^{-3} - 1,6) \quad (3.37)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4 \times \pi \times \omega}{10^{-7} \times \rho_s}} \quad (3.38)$$

$$m = \frac{\omega}{R_S} \times 10^{-7} \quad (3.39)$$

t_s → Espessura da blindagem (mm);

D_s → Diâmetro externo da blindagem.

- Para grupos de cabos dispostos em trevo os factores λ_0 , Δ_1 e Δ_2 usados em (3.36) são dados pelas expressões (3.40), (3.41) e (3.42).

$$\lambda_0 = 3 \times \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \times \left(\frac{d}{2 \times s} \right)^2 \quad (3.40)$$

$$\Delta_1 = (1,44 \times m^{2,45} + 0,33) \times \left(\frac{d}{2 \times s} \right)^{0,92 \times m + 1,66} \quad (3.41)$$

$$\Delta_2 = 0 \quad (3.42)$$

- Para grupos de cabos dispostos em esteira os factores λ_0 , Δ_1 e Δ_2 usados em (3.36) dependem da localização do cabo em estudo dados em a), b) e c).

a) Cabo do centro

$$\lambda_0 = 6 \times \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \times \left(\frac{d}{2 \times s} \right)^2 \quad (3.43)$$

$$\Delta_1 = 0,86 \times m^{3,08} \times \left(\frac{d}{2 \times s} \right)^{1,4 \times m + 0,7} \quad (3.44)$$

$$\Delta_2 = 0 \quad (3.45)$$

b) Cabo externo com a fase em avanço

$$\lambda_0 = 1,5 \times \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \times \left(\frac{d}{2 \times s} \right)^2 \quad (3.46)$$

$$\Delta_1 = 4,7 \times m^{0,7} \times \left(\frac{d}{2 \times s} \right)^{0,16 \times m + 2} \quad (3.47)$$

$$\Delta_2 = 21 \times m^{3,3} \times \left(\frac{d}{2 \times s} \right)^{1,47 \times m + 5,06} \quad (3.48)$$

c) Cabo externo com a fase em atraso

$$\lambda_0 = 1,5 \times \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \times \left(\frac{d}{2 \times s} \right)^2 \quad (3.49)$$

$$\Delta_1 = - \frac{0,74 \times (m + 2)}{2 + (m - 0,3)^2} \times m^{0,5} \times \left(\frac{d}{2 \times s} \right)^{m+1} \quad (3.50)$$

$$\Delta_2 = 0,92 \times m^{3,7} \times \left(\frac{d}{2 \times s} \right)^{m+2} \quad (3.51)$$

Se se tratar de cabos monopolares com a blindagem transposta (*crossbonding*) (Figura 3.6-d), o factor por correntes de circulação pode ser considerado nulo admitindo que a blindagem esteja transposta e se encontre dividida em três secções iguais.

Caso as três secções não sejam iguais e não se conheçam as distâncias a que são transpostas deve-se considerar para o factor de perdas por correntes de circulação os seguintes valores (IEC 60287-1-1, 2006, p.22):

- Para cabos directamente enterrados

$$\lambda'_1 = 0,03 \quad (3.52)$$

- Para cabos entubados

$$\lambda'_1 = 0,05 \quad (3.53)$$

3.8. - Factor de perdas para a armação

Se a armação for composta por material não ferro magnético, o procedimento para o cálculo do factor de perdas é igual ao descrito na secção 3.7. Nas expressões aí referidas deve-se substituir a resistência da blindagem pela resistência resultante do paralelo da resistência da blindagem com a resistência da armação (IEC 60287-1-1, 2006, p.25).

Capítulo 4

Cálculo térmico

4.1. - Dimensionamento térmico

Os diferentes elementos do cabo e meio envolvente opõem uma certa resistência à propagação do calor. A diferença de temperatura $\Delta\theta$, entre duas faces de um elemento, é proporcional à potência calorífica W , que o atravessa (Santos, Novembro 2005, p.27), de acordo com a expressão (4.1), e a Figura 4.1.

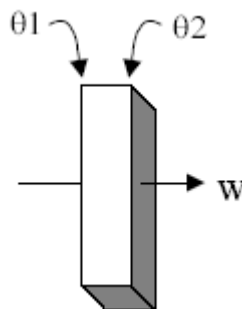


Figura 4.1 - Lei térmica

$$\Delta\theta = T \times W \quad (4.1)$$

- | | | |
|----------------|---|--|
| T | → | Resistência Térmica do elemento considerado (K.m/W). |
| $\Delta\theta$ | → | Diferença de Temperatura (K). |
| W | → | Potência calorífica (W/m). |

Esta relação sendo formalmente idêntica à lei de ohm, permite que os circuitos eléctricos e térmicos possam ser estudados da mesma maneira, mediante as analogias seguintes:

diferença de temperatura	↔	diferença de potencial
potência calorífica	↔	intensidade de corrente
resistência térmica	↔	resistência eléctrica

Na Figura 4.2 ilustra-se a relação anterior entre circuito eléctrico e térmico se considerarmos um cabo subterrâneo monopolar.

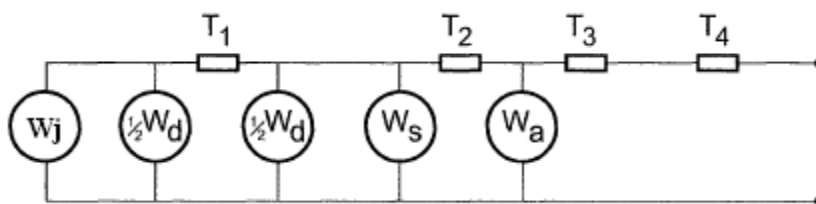


Figura 4.2 - Relação entre circuito eléctrico e térmico

Nesta figura:

- $T_1 \rightarrow$ Resistência térmica da camada isolante;
- $T_2 \rightarrow$ Resistência térmica das bainhas não metálicas entre a camada isolante e a armação;
- $T_3 \rightarrow$ Resistência térmica da bainha exterior;
- $T_4 \rightarrow$ Resistência térmica do meio envolvente ao cabo;
- $W_j \rightarrow$ Perdas na alma condutora;
- $W_s \rightarrow$ Perdas na blindagem;
- $W_a \rightarrow$ Perdas na armação;
- $W_d \rightarrow$ Perdas dieléctricas.

De acordo com a Figura 4.2 as perdas totais por efeito de Joule são dadas por (4.2).

$$W_T = W_j + W_s + W_a = W_j \times (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \quad (4.2)$$

Tendo em conta (4.2) e os factores de perdas descritos nos subcapítulos 3.7 e 3.8 obtemos a relação (4.3).

$$W_T = I^2 \times R \times (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \quad (4.3)$$

De uma maneira geral, a temperatura alcançada pelo cabo depende da corrente eléctrica que percorre o condutor e, é função das diferentes fontes de calor originadas pelas várias perdas ao longo das várias bainhas do cabo. Segundo a norma (IEC 60287-1-1, 2006, p.10) a variação da temperatura acima da temperatura ambiente é dada, para a maioria dos cabos monopolares, por (4.4).

$$\Delta\theta = (I^2 \times R + 0,5 \times W_d) \times T_1 + [I^2 \times R \times (1 + \lambda_1) + W_d] \times T_2 + [I^2 \times R \times (1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] \times (T_3 + T_4) \quad (4.4)$$

Nesta expressão:

- λ_1 → Factor de perdas para a blindagem;
- λ_2 → Factor de perdas para a armação;
- $\Delta\theta$ → Variação da temperatura acima da temperatura ambiente;
- R → Resistência em corrente alternada da alma condutora.

Através da expressão (4.4) podemos obter a corrente máxima admissível tendo em conta as temperaturas máximas permitidas pelos materiais das várias bainhas pertencentes ao cabo.

Na realidade a expressão (4.4) é mais complicada, porque é necessário ter em conta as condições de instalação do cabo e determinar também a resistência térmica do meio envolvente ao cabo (T_4).

Na secção 4.4 descrevemos as várias expressões para as correntes máximas admissíveis tendo em conta as condições de instalação, e na secção 4.3 as resistências térmicas do meio envolvente ao cabo tendo em conta também as condições de instalação.

4.2. - Resistência térmica das bainhas

Desde que o calor se propague por condução, a resistência térmica pode escrever-se sob a forma de (4.5).

$$T = \rho_t \times F \quad (4.5)$$

- ρ_t → Resistividade térmica do material constituinte (K.m/W);
- F → Factor que depende da forma e das dimensões do elemento considerado.

No caso dos cabos de alta tensão as bainhas são cilíndricas uma vez que os cabos são todos monopolares. Assim a expressão da resistência térmica é igual para todas as bainhas não metálicas, tal como ilustra a Figura 4.3, sendo o factor F que depende da forma cilíndrica obtido através da expressão (4.6).

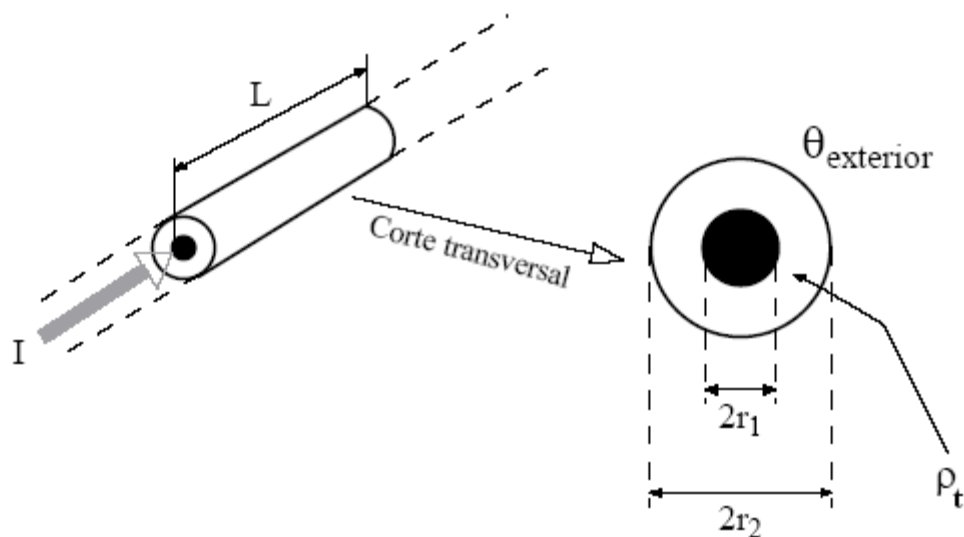


Figura 4.3 - Forma das bainhas não metálicas

$$F = \frac{1}{2 \times \pi} \times \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (4.6)$$

Usando (4.6), a expressão (4.5) toma a forma de (4.7).

$$T = \frac{\rho_t}{2 \times \pi} \times \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (4.7)$$

Como é mais habitual trabalhar com as espessuras das várias bainhas existentes nos cabos, a resistência térmica determina-se através de (4.8).

$$T = \frac{\rho_t}{2 \times \pi} \times \ln\left(1 + \frac{t}{r_1}\right) \quad (4.8)$$

- t → Espessura da bainha (mm);
r₁ → Raio interior da bainha (mm).

Na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2 apresentam-se os vários materiais extrudidos em cabos de alta tensão e respectivas resistividades térmicas usados para a camada isolante e para a bainha exterior (IEC 60287-2-1, 2006, p.55).

Tabela 4.1 - Resistividades térmicas dos materiais para a camada isolante

Materiais para a camada isolante	Resistividade térmica (K.m/W)
Polietileno (PE)	3,5
Polietileno Reticulado (XLPE)	3,5
Policloreto de Vinilo (PVC)	6
Etilenopropileno (EPR).	5

Tabela 4.2 - Resistividades térmicas dos materiais para a bainha exterior

Materiais para a bainha exterior	Resistividade térmica (K.m/W)
Polietileno (PE)	3,5
Policloreto de Vinilo (PVC)	6

Estes valores podem-se considerar constantes até atingirem a sua temperatura máxima de funcionamento, assim como a resistência térmica.

A expressão (4.8) como referindo anteriormente aplica-se à camada isolante, semicondutores interno e externo, bainhas de enchimento, bainhas hidroexpansíveis e bainhas exteriores.

4.3. - Resistência térmica do meio envolvente

A corrente máxima admissível de um cabo depende fortemente da resistência térmica externa. Para um cabo directamente enterrado, esta resistência térmica provoca cerca de 70% da subida de temperatura do cabo. Por isso é necessário ter uma especial atenção para o cálculo desta resistência térmica.

4.3.1. - Cabos enterrados

Para cabos enterrados a resistência térmica depende das características térmicas do solo, do diâmetro do cabo, da disposição dos cabos (Trevo ou Esteira), modo de instalação (directamente enterrados, entubados), e depende igualmente da existência ou não fontes de calor externas ao cabo (proximidade de paredes, outros cabos), estes são aspectos importantes para a determinação da resistência térmica de cabos enterrados.

Todo o calor gerado pelo cabo deve ser transmitido para a atmosfera e por isso mesmo a resistividade térmica do terreno é muito importante para a refrigeração do cabo. Na Tabela 4.3 são apresentados alguns valores da resistividade térmica de vários tipos de solo (Cables de Alta Tension, Alcatel).

Tabela 4.3 - Resistividades térmicas do solo

Tipo de Solo	Densidade (g/cm ³)	Percentagem de Água (%)	Resistividade	
			Estado Húmido (K.m/W)	Estado Seco (K.m/W)
Areia	1,7	10	0,45	1
	1,8	5	0,56	0,96
Terra	1,93	7	0,47	0,91
	1,82	11	0,45	0,88
Tudo Misturado	1,9	4	0,52	0,92
	1,77	9	0,60	1,33
	2,02	7	0,50	0,87

4.3.1.1. - Grupos de cabos enterrados separados entre si com cargas idênticas

Este tipo de casos é resolvido usando sobreposição, ou seja, assume-se que a fonte de calor de cada cabo não interfere com a radiação de calor dos outros cabos.

Considera-se que os cabos estão separados quando a distância entre os seus eixos é superior a duas vezes o diâmetro externo do cabo (IEC 60287-2-1, 2006, p.33).

Através da disposição dos cabos pode-se determinar qual o cabo que terá uma temperatura mais elevada, e calcula-se a resistência térmica para este cabo, sendo este o pior caso. Este método tem em conta o aquecimento mútuo do grupo e deixa assim inalterada a expressão que permite calcular a variação de temperatura (4.4).

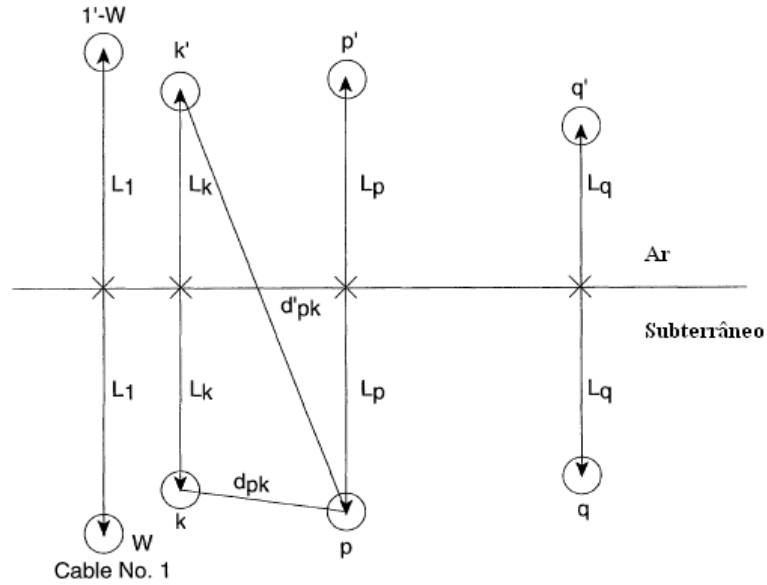


Figura 4.4 - Método das imagens para determinação da resistência térmica

A determinação da resistência térmica do meio envolvente, T_4 , usa o método das imagens e tem em conta as distâncias entre cabos e entre imagens tal como se observa na Figura 4.4 (IEC 60287-2-1, 2006, p.61). Nesta figura, k, p e q representam localizações possíveis de canalizações eléctricas subterrâneas e k', p' e q' as suas respectivas imagens. Nestas condições e considerando as distâncias indicadas, a expressão de T_4 é dada por (4.9).

$$T_4 = \frac{\rho_t}{2 \times \pi} \times \ln \left\{ \left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right) \times \left[\left(\frac{d'_{p1}}{d_{p1}} \right) \left(\frac{d'_{p2}}{d_{p2}} \right) \dots \left(\frac{d'_{p2}}{d_{p2}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right) \right] \right\} \quad (4.9)$$

Nesta expressão:

$$u = \frac{2 \times L}{D_e} \quad (4.10)$$

- L → Distância da superfície ao eixo do cabo (mm).
- D_e → Diâmetro externo do cabo (mm).
- d'_{pk} → Distância do cabo p à imagem do cabo k.
- d_{pk} → Distância do cabo p ao cabo k.

4.3.1.2. - Grupos de cabos enterrados juntos com cargas idênticas

Neste caso como os cabos se encontram próximos entre si, a radiação de calor de cabo será perturbada pela radiação de calor dos outros cabos.

- **Grupos de cabos em esteira conjunta.**

Se se tratar de cabos com bainhas metálicas por debaixo da bainha exterior, de maneira a providenciar uma camada isotérmica (IEC 60287-2-1, 2006, p.37) a resistência térmica é dada por (4.11).

$$T_4 = \frac{\rho_t}{2 \times \pi} \times [0,475 \times \ln(2 \times u) - 0,346] \quad (4.11)$$

Caso o cabo não tenha bainha metálica sob a bainha exterior T_4 tem a forma de (4.12).

$$T_4 = \frac{\rho_t}{2 \times \pi} \times [0,475 \times \ln(2 \times u) - 0,142] \quad (4.12)$$

Esta expressão pode ser usada para cabos onde não existam bainhas metálicas mas pode ser usada para casos onde exista blindagem em fios de cobre.

- **Grupos de cabos em trevo conjunto.**

Neste tipo de instalação a distância L mede-se em relação ao centro do grupo de cabos.

Se se tratar de cabos com bainhas metálicas por debaixo da bainha exterior a resistência térmica determina-se através de (4.13).

$$T_4 = \frac{1,5 \times \rho_t}{2 \times \pi} \times [\ln(2 \times u) - 0,630] \quad (4.13)$$

Neste caso, a resistência térmica da bainha externa determinada através de (4.8) deve ser multiplicada por 1,6 (IEC 60287-2-1, 2006, p.39).

Se se tratar de cabos que não tenham bainha metálica sob a bainha exterior, T_4 , obtém-se através de (4.14).

$$T_4 = \frac{\rho_t}{2 \times \pi} \times [\ln(2 \times u) + 2 \times \ln(u)] \quad (4.14)$$

A expressão (4.14) pode ser usada para cabos que não tenham bainhas metálicas mas podendo ter blindagem em fios de cobre.

Caso os cabos tenham um revestimento entre 20% a 50% da sua superfície longitudinal de bainha metálica ou de blindagem em fios, determina-se T_4 através de (4.15).

$$T_4 = \frac{1,5 \times \rho_t}{2 \times \pi} \times [\ln(2 \times u) - 0,630] \quad (4.15)$$

Neste tipo de instalação a resistência térmica da camada isolante (T_1) deve ser multiplicada por um factor de 1,16, e a resistência térmica da bainha externa (T_3) deve ser multiplicada por um factor de 1,6 (IEC 60287-2-1, 2006, p.39), sendo ambas as resistências térmicas obtidas através da expressão (4.8).

Nas expressões (4.11), (4.12), (4.13), (4.14) e (4.15) o coeficiente u é dado por (4.10) e vem dado pela distância do grupo de cabos à superfície e pelo diâmetro externo do cabo.

4.3.2. - Cabos ao ar livre protegidos da radiação solar

A resistência térmica do meio envolvente para cabos ao ar livre protegidos da radiação solar é dada por (4.16).

$$T_4 = \frac{1}{\pi \times D_e^* \times h \times (\Delta\theta_s)^{1/4}} \quad (4.16)$$

Nesta expressão:

$$h = \frac{Z}{(D_e^*)^g} + E \quad (4.17)$$

- D_e^* → Diâmetro Externo do Cabo (m);
- h → Coeficiente de dissipação de calor obtido pelos coeficientes Z , E e g dados na Tabela 4.4 (IEC 60287-2-1, 2006, p.57);
- $\Delta\theta_s$ → Temperatura acima da temperatura ambiente à superfície do cabo (K) calculada através do procedimento detalhado em seguida.

O cálculo do excesso de temperatura na superfície do cabo $(\Delta\theta_s)$ é realizado através de um processo iterativo em que se, atribui para valor inicial $(\Delta\theta_s)^{1/4}_n = 2$. Em seguida utilizando (4.18), é calculado o valor de $(\Delta\theta_s)^{1/4}_{n+1}$ terminando o processo iterativo quando se verifica a condição (4.19).

$$(\Delta\theta_s)^{1/4}_{n+1} = \left[\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d}{1 + K_A \times (\Delta\theta_s)^{1/4}_n} \right]^{0,25} \quad (4.18)$$

$$(\Delta\theta_s)^{1/4}_{n+1} - (\Delta\theta_s)^{1/4}_n \leq 0,001 \quad (4.19)$$

Na expressão (4.18):

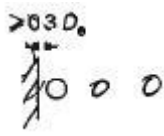
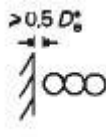
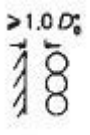
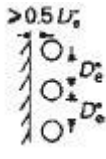
$$K_A = \frac{\pi \times D_e^* \times h}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \times [T_1 + T_2 \times (1 + \lambda_1) + T_3 \times (1 + \lambda_1 + \lambda_2)] \quad (4.20)$$

$$\Delta\theta_d = W_d \times \left[\left(\frac{1}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} - 0,5 \right) \times T_1 - \frac{\lambda_2 \times T_2}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \right] \quad (4.21)$$

$\Delta\theta \rightarrow$ Temperatura máxima admissível do condutor acima da temperatura ambiente (K).

Finalmente os coeficientes de dissipação de calor Z, E e g utilizados na expressão (4.17) são referidos na Tabela 4.4 (IEC 60287-2-1, 2006, p.57).

Tabela 4.4 - Coeficientes de dissipação de calor para grupos de cabos ao ar livre.

Modo Instalação	Z	E	g	Modo
Esteira	0,21	3,94	0,60	
Trevo juntivo	0,96	1,25	0,20	
Esteira juntiva	0,62	1,95	0,25	
Esteira juntiva vertical	1,61	0,42	0,20	
Esteira Vertical	1,31	2	0,20	
Esteira juntiva encostada	1,69	0,63	0,25	
Trevo juntivo encostado	0,94	0,79	0,20	

4.3.3. - Cabos ao ar livre expostos à radiação solar

Quando os cabos se encontram expostos à radiação solar, a determinação da resistência térmica do meio envolvente é realizada de forma idêntica à anterior apenas substituindo (4.18) por (4.22).

$$(\Delta\theta_s)^{1/4}_{n+1} = \left[\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d + \Delta\theta_{ds}}{1 + K_A \times (\Delta\theta_s)^{1/4}_n} \right]^{0,25} \quad (4.22)$$

Nesta expressão:

$$\Delta\theta_{ds} = \frac{\sigma \times D_e^* \times H}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \times [T_1 + T_2 \times (1 + \lambda_1) + T_3 \times (1 + \lambda_1 + \lambda_2)] \quad (4.23)$$

- σ → Coeficiente de absorção solar da superfície do cabo, obtido através da Tabela 4.5 (IEC 60287-2-1, 2006, p.59);
- H → Intensidade de radiação solar, cujo valor é considerado 10^3 W/m^2 para a maioria dos locais, sendo recomendado obter o valor local quando possível.

Tabela 4.5 - Coeficientes de absorção solar

Material	σ
PVC	0,6
PE	0,4

4.3.4. - Cabos entubados ou em galerias

O processo para a determinação da resistência térmica do meio envolvente para cabos entubados ou em galerias é dividido em três:

- determinação da resistência térmica do espaço entre a superfície do cabo e a superfície interna do tubo ou galeria (T_4');
- cálculo da resistência térmica do tubo ou galeria, caso o tubo seja em metal a resistência térmica é desprezada (T_4'');
- cálculo da resistência térmica externa ao tubo ou galeria (T_4''').

Assim a resistência térmica do meio envolvente para cabos entubados é dada por (4.24).

$$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4''' \quad (4.24)$$

4.3.4.1. - Resistência térmica entre a superfície do cabo e o tubo

O valor da resistência térmica T_4' é calculado através de (4.25), dependendo do número de cabos dentro do tubo, do diâmetro externo e do material do tubo.

$$T_4' = \frac{U}{1 + 0,1 \times (V + Y \times \theta_m) \times D_e} \quad (4.25)$$

As constantes U, V e Y são obtidas através de valores práticos, dependendo do material e tipo instalação. Os valores típicos usados são indicados na Tabela 4.6 (IEC 60287-2-1, 2006, p.59).

Quando temos um grupo de cabos dentro de um tubo, D_e torna-se o diâmetro externo equivalente do grupo de cabos e usa-se aproximadamente para grupos de três cabos $D_e = 2,15 \times D_e^*$.

Na expressão (4.25):

- D_e → Diâmetro externo de um cabo (mm);
- θ_m → Temperatura média entre o cabo e o tubo (°C). É necessário realizar uma estimativa inicial para este valor. Em seguida, este valor é recalculado utilizando o valor obtido para temperatura à superfície do cabo no cálculo anterior.

Tabela 4.6 - Constantes de instalação para tubos ou galerias

Instalação	U	V	Y
Tubo de cimento enterrado	5,2	1,1	0,011
Tubo de cimento no ar	5,2	1,2	0,006
Tubo de fibra	5,2	0,83	0,006
Tubo de fibra enterrada	5,2	0,91	0,01
Tubo de plástico	1,87	0,312	0,0037
Tubo Metálico	5,2	1,4	0,011
Tubo Cerâmica	1,87	0,28	0,0036

4.3.4.2. - Resistência Térmica do tubo

A resistência térmica do tubo, T_4'' , é calculada da mesma maneira que a das resistências térmicas das bainhas não metálicas (4.8).

$$T_4'' = \frac{\rho_t}{2 \times \pi} \times \ln\left(\frac{D_0}{D_d}\right) \quad (4.26)$$

Nesta expressão:

- ρ_t → Resistividade térmica do tubo (K.m/W);
 D_0 → Diâmetro externo do tubo (mm);
 D_d → Diâmetro interno do tubo (mm).

4.3.4.3. - Resistência térmica externa do tubo ou galeria

A resistência térmica externa do tubo, T_4''' , é determinada pelo mesmo método detalhado nas secções 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3, substituindo o diâmetro externo do cabo pelo do tubo.

Caso o tubo ou galeria esteja envolvido em cimento é necessário aplicar uma correcção à resistência térmica anterior. Este factor de correcção é dado por (4.27) e multiplica-se à resistência térmica.

$$c = \frac{N}{2 \times \pi} \times (\rho_e - \rho_c) \times \ln\left(u + \sqrt{u^2 - 1}\right) \quad (4.27)$$

Nesta expressão:

- N → Número de cabos no tubo;
 ρ_e → Resistividade térmica do terreno à volta do tubo (K.m/W);
 ρ_c → Resistividade térmica do cimento (K.m/W);
 L_G → Distância da superfície ao centro do tubo (m);
 r_b → Raio externo do tubo (m).

$$u = \frac{L_G}{r_b} \quad (4.28)$$

4.4. - Corrente máxima admissível

A corrente máxima admissível em regime permanente ou a 100% de carga depende de vários parâmetros, sendo os mais importantes os seguintes:

- número de cabos e, diferentes tipos construtivos de cabo nas condições de instalação em estudo;
- estrutura do cabo e materiais usados;
- meio onde o cabo está instalado;
- distâncias entre cabos e à superfície da terra;
- ligação da blindagem à terra.

Na análise ao caso de estudo realizado no Capítulo 6 vamos observar o comportamento do cabo com a variação destes parâmetros.

A análise da corrente máxima admissível em regime permanente do cabo é diferente da análise em regime transitório. Nesta secção apenas vamos fazer referência à análise em regime estacionário.

Nas subsecções seguintes serão apresentadas as várias expressões das correntes máximas admissíveis tendo em conta as várias condições de instalação (IEC 60287-1-1, 2006, p.10).

4.4.1. - Cabos enterrados onde não ocorre a dessecação do solo, ou cabos no ar protegidos da radiação solar

Neste tipo de instalação tem-se em conta que a subida de temperatura do cabo não afecta o meio envolvente, ou seja, as características do solo em torno do cabo não são alteradas devido ao aquecimento deste.

Tendo em conta (4.4) obtemos a expressão (4.29) para a corrente máxima admissível.

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d \times [0,5 \times T_1 + (T_2 + T_3 + T_4)]}{R \times T_1 + R \times (1 + \lambda_1) \times T_2 + R \times (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \times (T_3 + T_4)}} \quad (4.29)$$

Nesta expressão:

- R → Resistência ac da alma condutora (ohm/m) obtida através da expressão (3.7);
- $\Delta\theta$ → Temperatura da alma condutora acima da temperatura ambiente (K). Esta temperatura é considerada a temperatura do meio ambiente onde o cabo está instalado, incluindo o efeito de alguma fonte de calor existente fora do meio envolvente;
- T_1 → Resistência térmica da camada isolante determinada através de (4.8).
- T_2 → Resistência térmica das bainhas não metálicas entre a camada isolante e a armação obtidas através de (4.8);
- T_3 → Resistência térmica da bainha exterior estabelecida através de (4.8);
- T_4 → Resistência térmica do meio envolvente ao cabo de acordo com o detalhado na secção 4.3;
- λ_1 → Factor de Perdas para a blindagem determinado na secção 3.7.
- λ_2 → Factor de Perdas para a armação determinado na secção 3.8;
- W_d → Perdas dieléctricas na camada isolante (W/m) determinadas através da expressão (3.12).

4.4.2. - Cabos enterrados onde ocorre a dessecação parcial do solo na vizinhança do cabo

Este modelo é utilizado quando ocorre a dessecação do solo na zona adjacente do cabo, enquanto na zona inferior não ocorre. Para além disso, é necessário ter em atenção a temperatura do solo nessa zona intermédia e as duas resistividades térmicas do solo (resistividades térmicas do solo no estado seco e no estado húmido). Nestas condições a corrente máxima admissível é dada por (4.30).

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d \times [0,5 \times T_1 + (T_2 + T_3 + T_4)] + (v - 1) \times \Delta\theta_x}{R \times T_1 + R \times (1 + \lambda_1) \times T_2 + R \times (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \times (T_3 + T_4)}} \quad (4.30)$$

Nesta expressão:

- $\Delta\theta_x \rightarrow$ Temperatura crítica do solo acima da temperatura ambiente na zona onde ocorre a divisão do solo (K);
- $v \rightarrow$ Divisão da resistividade do solo no estado seco, com a resistividade do solo no estado húmido. Estes valores da resistividade nos dois estados são obtidos na Tabela 4.3.

4.4.3. - Cabos enterrados onde a dessecação do solo é para evitar

Quando se pretende limitar a temperatura à superfície do cabo ($\Delta\theta_x$) de maneira a evitar a dessecação do solo deverá ser usada a expressão (4.31). Contudo, dependendo do valor da temperatura a limitar é preciso ter em conta que a temperatura máxima do cabo pode ser excedida, sendo necessário comparar o valor com o obtido através de (4.29).

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta_x - W_d \times T_4}{R \times (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \times T_4}} \quad (4.31)$$

A resistência da alma condutora em corrente alternada deve ser determinada para o valor da temperatura em funcionamento da alma, sendo necessário fazer uma estimativa inicial para esta temperatura ao utilizar (4.31). Em seguida, utilizando o valor obtido para a corrente máxima, será recalculando o valor da temperatura referido.

4.4.4. - Cabos expostos à radiação solar

Neste tipo de instalação é preciso ter em conta a absorção da radiação solar pela bainha exterior do cabo adicionando o termo $-\sigma \times D_e^* \times H \times T_4^*$ ao numerador da fracção existente na expressão (4.29) obtendo-se (4.32).

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d \times [0,5 \times T_1 + (T_2 + T_3 + T_4)] - \sigma \times D_e^* \times H \times T_4^*}{R \times T_1 + R \times (1 + \lambda_1) \times T_2 + R \times (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \times (T_3 + T_4^*)}} \quad (4.32)$$

Nesta expressão:

- σ → Coeficiente de absorção solar da superfície do cabo, obtido através da Tabela 4.5;
- H → Intensidade de radiação solar, cujo valor é considerado 10^3 W/m^2 para a maioria dos locais, sendo recomendado obter o valor local quando possível;
- D_e^* → Diâmetro externo do cabo (m);
- T_4^* → Resistência térmica exterior do cabo ao ar livre, ajustada de forma a ter em conta a radiação solar, obtida com as expressões (4.22) e (4.23).

4.5. - Curto-circuitos

Um curto-circuito corresponde a uma situação que causa os seguintes efeitos:

- subida de temperatura dos componentes sujeitos à corrente de curto-circuito;
- forças electromagnéticas entre condutores.

A subida de temperatura é importante devido ao seu efeito no processo de envelhecimento do cabo e, por isso mesmo, deve ser limitada. Nesta secção pretende-se calcular o valor das correntes máximas de curto-circuito em processos adiabáticos e não adiabáticos.

Com este cálculo espera-se que a instalação após o curto-circuito fique em operação e em segurança e, que qualquer deformação que o cabo sofra se situe dentro dos limites de tolerância após vários curto-circuitos.

Os elementos do cabo que geralmente suportam a corrente de curto-circuito são a alma condutora e a blindagem, pelo que o cálculo da corrente de curto-circuito é importante para estes dois elementos.

Para o cálculo da corrente de curto-circuito temos que considerar inicialmente que o curto-circuito está associado um processo adiabático, ou seja, no intervalo de tempo em que se dá o curto-circuito não ocorre libertação de calor nas várias bainhas pertencentes ao cabo.

Nestas condições, a expressão para o cálculo da corrente de curto-circuito em processo adiabático corresponde a (4.33) (IEC 949, 1988, p.9).

$$I_{AD} = \sqrt{\frac{K^2 \times S^2 \times \ln\left(\frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}\right)}{t}} \quad (4.33)$$

Nesta expressão:

- I_{AD} → Corrente de curto-circuito calculada com base num processo adiabático (A);
- t → Duração do curto-circuito (s);
- K → Constante que depende do material que suporta a corrente de curto-circuito obtida na Tabela 4.7 (IEC 949, 1988, p.17);
- S → Secção do componente que suporta a corrente de curto-circuito (mm²);
- θ_f → Temperatura final (°C) obtida na Tabela 4.8 (IEC 61443, 2007, p.15, p.17);
- θ_i → Temperatura inicial (°C);
- β → Coeficiente de temperatura de resistência à corrente de curto-circuito a 0°C obtido na Tabela 4.7 (IEC 949, 1988, p.17).

Um aspecto importante que resulta deste cálculo, corresponde ao facto de que, uma vez estabelecido um valor para a corrente de curto-circuito da blindagem, é possível determinar o número e secção de fios a usar ou, no caso da blindagem ser em fita, a espessura e, a largura desta.

Tabela 4.7 - Características dos materiais para cálculo da corrente de curto-circuito.

Material	K (As ^{1/2} /mm ²)	β (K)	σ_c (J/K.m ³)	ρ_{20} (Ω/m)
Condutor				
Cobre	226	234,5	3,45x10 ⁶	1,7241x10 ⁻⁸
Alumínio	148	228	2,5x10 ⁶	2,8264x10 ⁻⁸
Blindagem, Armação				
Chumbo	41	230	1,45x10 ⁶	21,4x10 ⁻⁸
Aço	78	202	3,8x10 ⁶	13,8x10 ⁻⁸
Bronze	180	313	3,4x10 ⁶	3,5x10 ⁻⁸
Alumínio	148	228	2,5x10 ⁶	2,84x10 ⁻⁸

Tabela 4.8 - Temperaturas limite de curto-circuito num máximo de 5 segundos.

Material	Temperatura °C
Camada isolante	
PE	150
HDPE	180
XLPE	250
EPR	250
Bainha Exterior	
PVC	200
PE	150

Considerando que existe a libertação de calor durante o curto-circuito é necessário calcular um factor de processo não adiabático que se deverá multiplicar ao valor obtido por (4.33).

Este factor tem em conta os materiais que estão em contacto com o componente que sofre com a corrente de curto-circuito e determina-se com a expressão (4.34).

$$\varepsilon = \sqrt{1 + F \times A \times \sqrt{\frac{t}{S}} + F^2 \times B \times \frac{t}{S}} \quad (4.34)$$

Nesta expressão:

- F** → Factor que tem em conta o contacto imperfeito entre o condutor ou fios e o material que o rodeia (0,7 é o valor recomendado para cabos extrudidos);
- A, B** → Constantes baseadas nas propriedades térmicas do material não metálico adjacente e superior ao componente que suporta a corrente de curto-circuito. Os seus valores são determinados através de (4.35) e (4.36).

$$A = \frac{2464}{\sigma_c} \times \sqrt{\frac{\sigma_i}{\rho_i}} \quad (4.35)$$

$$B = \frac{1,22}{\sigma_c} \times \frac{\sigma_i}{\rho_i} \quad (4.36)$$

Nestas expressões:

- σ_c → Unidade volumétrica de calor do componente que suporta a corrente de curto-circuito (J/N.K.m³);
- σ_i → Unidade volumétrica de calor dos materiais que estão em contacto com

ρ_i → o componente que suporta a corrente de curto-circuito (J/N.K.m³);
Resistividade térmica dos materiais que estão em contacto com o componente que suporta a corrente de curto-circuito (K.m/W).

A expressão (4.34) é usada para blindagens com fios separados, caso a blindagem seja construída com os fios juntos ou em fita o factor de processo não adiabático toma a forma de (4.37).

$$\varepsilon = 1 + 0,61 \times M \times \sqrt{t} - 0,069 \times (M \times \sqrt{t})^2 + 0,0043 \times (M \times \sqrt{t})^3 \quad (4.37)$$

Nesta expressão:

$$M = \frac{\sqrt{\frac{\sigma_2}{\rho_2}} + \sqrt{\frac{\sigma_3}{\rho_3}}}{2 \times \sigma_1 \times \delta \times 10^{-3}} \times F \quad (4.38)$$

σ_2, σ_3 → Unidade volumétrica de calor dos materiais que estão em contacto com o componente que suporta a corrente de curto-circuito obtidos na Tabela 4.9 (J/N.K.m³);
 ρ_2, ρ_3 → Resistividade térmica dos materiais que estão em contacto com o componente que suporta a corrente de curto-circuito (K.m/W);
 σ_1 → Unidade volumétrica de calor do componente que suporta a corrente de curto-circuito (J/N.K.m³);
 δ → Espessura da blindagem (mm).

4.6. - Sobrecargas

Muitos dos problemas de dimensionamento de cabos são dependentes da subida de temperatura ao longo do tempo. Para resolver estes problemas é necessário obter uma relação da temperatura com o tempo uma vez que esta não varia instantaneamente. Nas secções seguintes será analisada esta dependência para ser possível determinar a corrente máxima em regime de sobrecarga.

4.6.1. - Capacidade térmica

Uma vez que a subida ou descida de temperatura está dependente do tempo é necessário determinar as capacidades térmicas dos vários elementos de um cabo.

A capacidade térmica de um elemento é definida pela capacidade de armazenar calor por unidade de comprimento de um elemento do cabo e é obtida pela expressão (4.39).

$$Q = \frac{\pi}{4} \times (D_2^2 - D_1^2) \times \sigma_c \quad (4.39)$$

Nesta expressão:

- σ_c → Unidade volumétrica de calor do elemento do cabo (J/N.K.m³), obtida na Tabela 4.9;
- D_2^2 → Diâmetro externo do elemento do cabo (m);
- D_1^2 → Diâmetro interno do elemento do cabo (m).

A unidade volumétrica de calor σ_c é obtida na Tabela 4.9 (IEC 60853-2, 2008, p.75) tendo em conta o material do elemento do cabo em estudo. Esta unidade é parametrizada pela capacidade de armazenar calor de um determinado material por unidade de volume.

Tabela 4.9 - Unidade volumétrica de calor dos vários elementos do cabo.

Material	Unid. Vol. Calor (J/K.m ³)
Condutor	
Cobre	3,45 x 10 ⁶
Alumínio	2,5 x 10 ⁶
Bainhas, blindagens, armação	
Aço	3,8 x 10 ⁶
Bronze	3,4 x 10 ⁶
Camada isolante	
PE	2,4 x 10 ⁶
XLPE	2,4 x 10 ⁶
PVC	1,7 x 10 ⁶
EPR	2 x 10 ⁶
Bainha exterior	
PVC	1,7 x 10 ⁶
PE	2,4 x 10 ⁶
Tubos	
Cimento	1,9 x 10 ⁶
Fibra	2 x 10 ⁶
PVC	1,7 x 10 ⁶
PE	2,4 x 10 ⁶

4.6.2. - Regime transitório

As capacidades térmicas em conjunto com as resistências térmicas calculadas nas secções 4.2 e 4.3 permitem construir o circuito térmico do cabo. O circuito térmico do cabo é reduzido até ficar igual ao circuito térmico equivalente ilustrado na Figura 4.5.

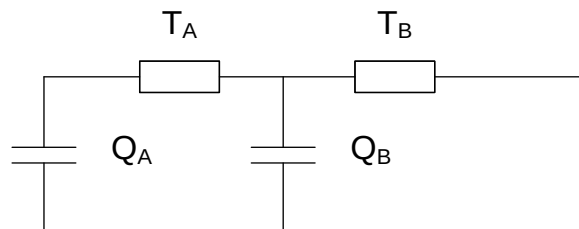


Figura 4.5 - Circuito térmico equivalente reduzido.

O regime transitório está dividido em duas durações dependendo do tempo de estudo (IEC 60853-2, 2008, p23). Estas duas partes serão referidas em seguida.

- **Regime de longa duração**

Para tempos de estudo superiores a $\frac{1}{3} \times T \times Q$ a Figura 4.6 ilustra o circuito térmico típico para cabos monopolares. T e Q são definidas pela soma das resistências térmicas do cabo e pela soma das capacidades térmicas do cabo, respectivamente.

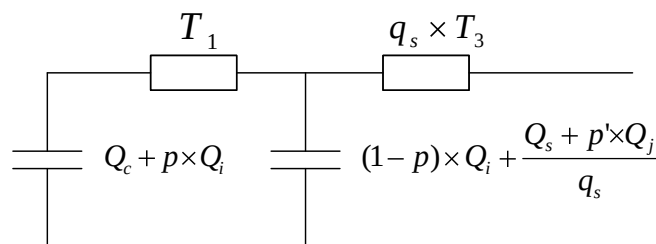


Figura 4.6 - Circuito térmico para regimes de longa duração.

Nesta figura:

Q_i	→	Capacidade térmica da camada isolante;
Q_c	→	Capacidade térmica da alma condutora;
Q_j	→	Capacidade térmica da bainha exterior;
Q_s	→	Capacidade térmica da blindagem;
p	→	Factor de divisão da camada isolante obtido na expressão (4.40);
p'	→	Factor de divisão da bainha exterior determinado por (4.41);

$q_s \rightarrow$ Rácio das perdas por efeito de Joule na alma condutora mais as perdas por efeito de Joule na blindagem, pelas perdas por efeito de Joule na alma condutora sendo obtido através da expressão (4.42).

$$p = \frac{1}{2 \times \ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_i}{d_c}\right)^2 - 1} \quad (4.40)$$

$$p' = \frac{1}{2 \times \ln\left(\frac{D_e}{D_s}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_e}{D_s}\right)^2 - 1} \quad (4.41)$$

$$q_s = \frac{W_s + W_j}{W_j} \quad (4.42)$$

Fazendo a analogia entre a Figura 4.5 e a Figura 4.6 obtêm-se as seguintes relações:

$$T_A = T_1 \quad (4.43)$$

$$T_B = q_s \times (T_3 + T_4' + T_4'') \quad (4.44)$$

$$Q_A = Q_c + p \times Q_i \quad (4.45)$$

$$Q_B = (1 - p) \times Q_i + \frac{Q_s + p' \times Q_j + 0,5 \times Q_d}{q_s} \quad (4.46)$$

Os coeficientes T_4' , T_4'' e Q_d desprezam-se se o cabo não estiver entubado. Por outro lado Q_d é a capacidade térmica do tubo e é determinada através de (4.39) usando o mesmo procedimento que o utilizado para o cálculo da capacidade térmica da camada isolante.

Com as expressões já obtidas obtém-se o regime transitório parcial da temperatura do cabo em função do tempo através da expressão (4.47). Esta expressão permite obter a temperatura da alma condutora acima da temperatura à superfície do cabo para um determinado intervalo de tempo. Neste cálculo considera-se que as perdas no cabo W_j se mantêm constantes ao longo do tempo.

$$\theta_c(t) = W_j \times [T_a \times (1 - e^{-a \times t}) + T_b \times (1 - e^{-b \times t})] \quad (4.47)$$

Nesta expressão:

$$a = \frac{M_0 + \sqrt{M_0^2 - N_0}}{N_0} \quad (4.48)$$

$$b = \frac{M_0 - \sqrt{M_0^2 - N_0}}{N_0} \quad (4.49)$$

$$T_a = \frac{1}{a-b} \times \left[\frac{1}{Q_A} - b \times (T_A + T_B + T_C) \right] \quad (4.50)$$

$$T_b = T_A + T_B + T_C - T_a \quad (4.51)$$

$$M_0 = 0,5 \times (Q_A \times \{T_A + T_B + T_C\} + Q_B \times (T_B + T_C)) \quad (4.52)$$

$$N_0 = Q_A \times T_A \times Q_B \times (T_B + T_C) \quad (4.53)$$

Após a determinação de (4.47) determina-se um factor de atenuação da temperatura entre a alma condutora e a superfície do cabo através da expressão (4.54).

$$a(t) = \frac{\theta_c(t)}{(W_j \times (T_A + T_B))} \quad (4.54)$$

Com a variação da temperatura entre a alma e a superfície do cabo determinada, o passo seguinte consiste em determinar a variação de temperatura entre o cabo e o meio ambiente em que ele está instalado.

Caso o cabo esteja enterrado a determinação do regime transitório parcial do meio ambiente é obtido através de (4.55). Este processo de cálculo utiliza o método das imagens igualmente usado na secção 4.3.1.1.

$$\begin{aligned} \theta_a(t) = & \frac{\rho_T \times W_t}{4 \times \pi} \\ & \times \left\{ \left[\int_0^t -e^{\frac{-D_c^2}{16 \times t \times \delta}} dt - \int_0^t -e^{\frac{-L^2}{t \times \delta}} dt \right] \right. \\ & \left. + \sum_{k=1}^{k=N-1} \left[\int_0^t -e^{\frac{-d_{pk}^2}{4 \times t \times \delta}} dt - \int_0^t -e^{\frac{-d'_{pk}^2}{4 \times t \times \delta}} dt \right] \right\} \end{aligned} \quad (4.55)$$

A resposta final da subida de temperatura no cabo é determinada por (4.56).

$$\theta(t) = \theta_a(t) + a(t) \times \theta_c(t) \quad (4.56)$$

Se se tratar de cabos instalados ao ar livre substitui-se nas expressões (4.50), (4.51), (4.52) e (4.53), a variável T_B por $T_B + q_s \times T_4$, sendo T_4 a resistência térmica do ar determinada nas secções 4.3.2 e 4.3.3. Neste caso a resposta da temperatura do cabo em função do tempo é dada apenas por $\theta_c(t)$.

- **Regime de curta duração**

Para tempos de estudo inferiores ou iguais a $\frac{1}{3} \times T \times Q$ a Figura 4.7 ilustra o circuito térmico típico para cabos monopolares.

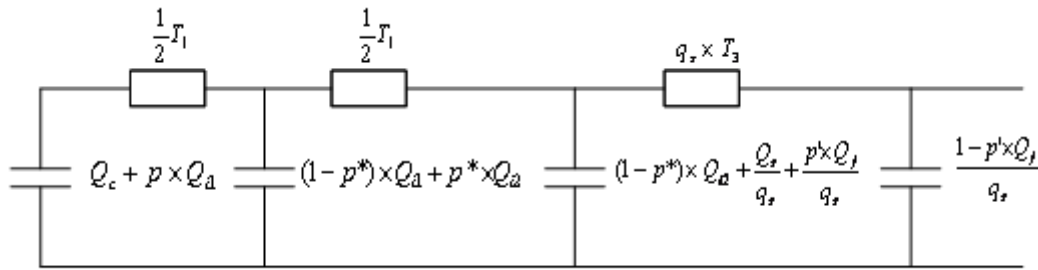


Figura 4.7 - Circuito térmico para regimes de duração curtos.

Nesta figura:

$Q_{i1}, Q_{i2} \rightarrow$ Capacidades térmicas parciais da camada isolante

$$p^* = \frac{1}{\ln\left(\frac{D_l}{d_c}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_l}{d_c}\right) - 1} \quad (4.57)$$

Fazendo uma analogia entre a Figura 4.5 e a Figura 4.7 obtêm-se as seguintes relações:

$$T_A = 0,5 \times T_1 \quad (4.58)$$

$$T_B = 0,5 \times T_1 + q_s \times (T_3 + T_4' + T_4'') \quad (4.59)$$

$$Q_A = Q_c + p^* \times Q_{i1} \quad (4.60)$$

$$Q_B = p^* \times Q_{i2} + (1 - p^*) \times Q_{i1} + \left[(1 - p^*) \times Q_{i2} + \frac{Q_s + p' \times Q_j}{q_s} \right] \times \left(\frac{q_s \times T_3}{0,5 \times T_1 + q_s \times T_3} \right)^2 \quad (4.61)$$

Caso o cabo esteja entubado considera-se no cálculo os coeficientes T_4' , T_4'' e Q_d e $Q_B = 0,3 \times Q_{i2} + (1 - p^*) \times Q_{i1}$. O parâmetro Q_d é a capacidade térmica do tubo e é determinada através de (4.39) usando o mesmo procedimento que utilizado para o cálculo da capacidade térmica da camada isolante.

Seguidamente obtém-se o regime transitório parcial da temperatura do cabo em função do tempo da mesma maneira que nos regimes de longa duração através da expressão (4.47).

Com a variação da temperatura entre a alma e a superfície do cabo determinada, o passo seguinte consiste em determinar a variação de temperatura entre o cabo e o meio ambiente em que ele está instalado.

Caso o cabo esteja enterrado a determinação do regime transitório parcial do meio ambiente é obtido através de (4.62).

$$\theta_a(t) = \frac{\rho_T \times W_t}{4 \times \pi} \times \left\{ \left[\int_0^t -e^{\frac{-D_e^2}{16 \times t \times \delta}} dt \right] + \sum_{k=1}^{k=N-1} \left[\int_0^t -e^{\frac{-d_{pk}^2}{4 \times t \times \delta}} dt \right] \right\} \quad (4.62)$$

A resposta final da subida de temperatura no cabo é determinada por (4.56). Caso se tratem de cabos instalados ao ar livre o procedimento a usar é igual ao regime de longa duração.

4.6.3. - Corrente de sobrecarga

Por fim, o cálculo da corrente em regime de sobrecarga é dado por (4.63).

$$I_2 = I_R \times \left\{ \frac{h_1^2 \times R_1}{R_{max}} + \frac{(R_R/R_{max}) \times (r - h_1^2 \times [R_1/R_R])}{\theta_R(t)/\theta_R(\infty)} \right\}^{0,5} \quad (4.63)$$

Nesta expressão:

$$r = \theta_{max}/\theta_R(\infty) \quad (4.64)$$

t → Duração da sobrecarga, medida a a partir do momento em que se aplica a sobrecarga;

- I_R → Corrente máxima admissível determinada no subcapítulo 4.4;
 I_1 → Corrente que circula no cabo antes da aplicação da corrente de sobrecarga (A);
 I_2 → Corrente de sobrecarga aplicada ao cabo durante um certo intervalo de tempo;

$$h_1 = I_1/I_R \quad (4.65)$$

- R_1 → Resistência ac da alma condutora antes da aplicação da sobrecarga;
 R_{max} → Resistência ac da alma condutora no fim do período da aplicação da sobrecarga;
 R_R → Resistência ac da alma condutora em regime permanente;
 θ_{max} → Temperatura máxima acima da temperatura ambiente no fim da aplicação da sobrecarga;
 $\theta_R(t)$ → Temperatura da alma condutora depois da aplicação de I_R ;
 $\theta_R(\infty)$ → Temperatura máxima da alma condutora em regime permanente.

Capítulo 5

Desenvolvimento da aplicação

5.1. - Introdução

A aplicação “CabCalc”, que se desenvolveu de raiz neste trabalho, tem como função o cálculo de diversos parâmetros eléctricos de cabos de energia em AT (até 150 kV) em função das características construtivas e das condições previstas para a sua instalação.

A aplicação é constituída por três módulos:

- uma base de dados, que armazena toda a informação relativa aos materiais usados nos cabos AT, bem como informação relativa às características dos próprios cabos para efectuar os respectivos cálculos no módulo de cálculo criado para o efeito;
- um módulo para o cálculo dos vários parâmetros associados ao dimensionamento de cabos AT;
- um interface com o utilizador desenvolvido de forma “amigável” através da criação de vários formulários para introdução e consulta de dados.

Na Figura 5.1 ilustra-se a arquitectura base da aplicação como descrita anteriormente. Nas secções seguintes são detalhadas as características da aplicação.

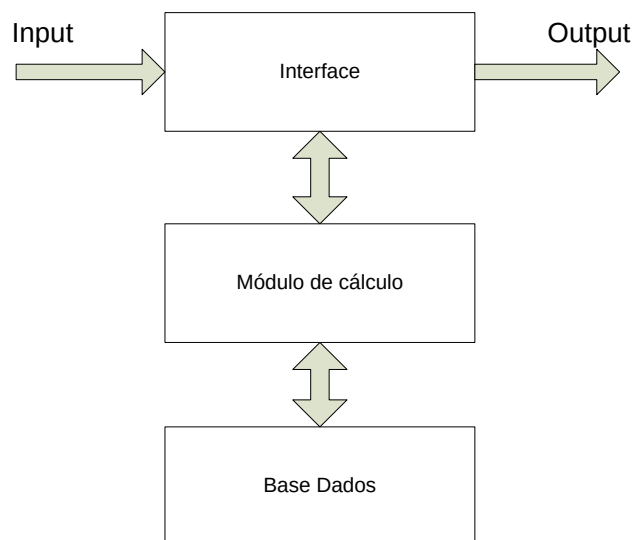


Figura 5.1 - Arquitectura base da aplicação.

5.2. - Arquitectura da aplicação

A aplicação “CabCalc” tal como descrita na secção 5.1 é constituída por três módulos distintos. O primeiro módulo engloba a base de dados assim como toda a informação introduzida, o segundo módulo contém todo o cálculo associado descrito nos capítulos 3 e 4, e o terceiro engloba o interface com o utilizador. O módulo da base de dados pode ser instalado numa máquina diferente do módulo de interface e de cálculo, o que permite uma arquitectura Cliente/Servidor. A aplicação pode ainda ser instalada numa máquina isolada.

Para o desenvolvimento da aplicação usaram-se duas ferramentas da Microsoft. Para a criação da base de dados utilizou-se o MS Access. Esta ferramenta foi escolhida devido à facilidade de criação de base de dados que ela oferece. Para a criação dos módulos da interface e de cálculo foi escolhida a ferramenta Visual Studio 2005, associada à linguagem de programação denominada Visual Basic. Optou-se por esta ferramenta e linguagem de programação devido à facilidade que elas disponibilizam para a criação de formulários para a interface gráfica. Por outro lado, uma vez que é necessário o manuseamento e tratamento de um número elevado de dados inseridos pelo utilizador e retirados da base de dados, torna-se necessário também criar um módulo que seja compilado de maneira a criar um ficheiro executável e reduzir assim o tempo de resposta da aplicação.

O módulo que contém a base de dados, o ficheiro “basedados.mde”, é composto pela informação introduzida pelos utilizadores nas várias tabelas descritas na secção 5.3.

No módulo de cálculo a interacção com a base de dados é conseguida através de expressões próprias para o efeito, denominadas por expressões *SQL* (“*Structured Query Language*”) e engloba também todo o tratamento de dados descritos nos Capítulos 3 e 4.

O terceiro módulo contém o interface gráfico com o utilizador com a introdução e consulta de dados associados ao dimensionamento de cabos. Na secção 5.4 apresentam-se alguns dos formulários criados para o efeito.

A aplicação permite dois modos de funcionamento como descrito anteriormente, funcionamento em modo isolado ou em rede. Quando a aplicação está em modo de funcionamento isolado apenas o utilizador da máquina em que está instalado o ficheiro da base de dados poderá usar a aplicação. Quando se encontra em modo de rede o ficheiro da base de dados encontra-se num servidor de ficheiros da rede informática, sendo possível neste caso instalar os módulos de interface e de cálculo em várias máquinas existentes na rede informática partilhando assim entre eles a mesma base de dados. A Figura 5.2 e a Figura 5.3 ilustram estes dois modos de funcionamento da aplicação.

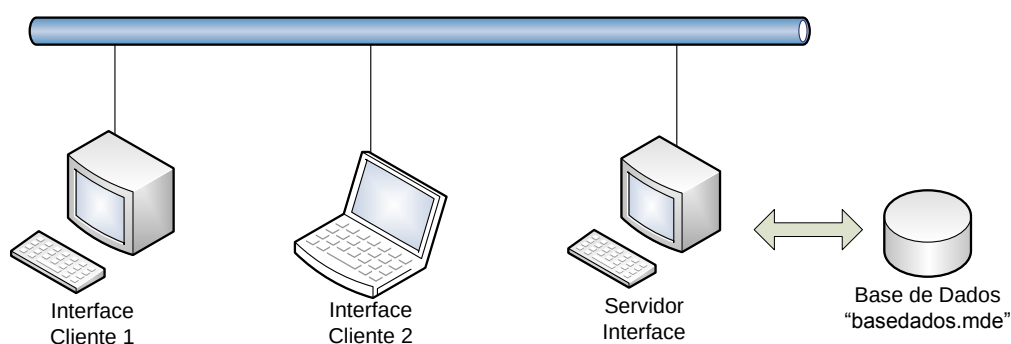


Figura 5.2 - Funcionamento em modo de rede.

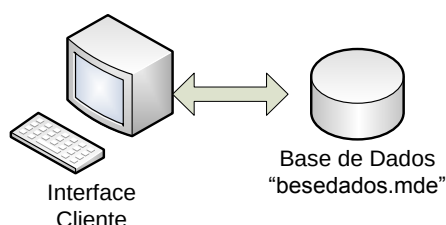


Figura 5.3 - Funcionamento em modo isolado.

O ficheiro “basedados.mde” funciona como um servidor ficando numa área partilhada na rede, podendo ser acedido por um conjunto de utilizadores. Este número, no entanto, deve ser relativamente baixo pois o seu aumento pode prejudicar o desempenho da aplicação.

5.3. - Base de dados

A base de dados foi desenvolvida de maneira a conter a informação de forma organizada e também de modo a ser fácil de aceder por parte do módulo de cálculo.

Com este critério foram criadas várias tabelas. Criaram-se tabelas para o armazenamento da informação relativa aos aspectos construtivos e de instalação dos cabos e criaram-se também

tabelas para armazenar informação relativa aos materiais usados nos cabos, designadas por “tabelas de cabo” e “tabelas de materiais” respectivamente. Na Tabela 5.1 são referidas as várias tabelas criadas na base de dados bem como a informação nelas contida.

Tabela 5.1 - Tabelas criadas e funções.

Cabo		Materiais	
Designação	Informação	Designação	Informação Materiais usados
tab_estrutura	Estrutura do cabo	tab_alma	Almas Condutoras
tab_cabo_alma	Alma condutora	tab_fs	Fitas Semicondutoras
tab_cabo_fs	Fita semicondutora	tab_sc	Semicondutores Int. e Ext.
tab_cabo_sci	Semicondutor interno	tab_iso	Camadas Isolantes
tab_cabo_iso	Camada isolante	tab_fe2	Bainhas hidro. e semic.
tab_cabo_sce	Semicondutor externo	tab_em	Blindagens em fios
tab_cabo_fs2	Fita semic. ou hidro.	tab_fc	Fitas Continuidade
tab_cabo_em	Blindagem em fios	tab_em	Blindagens em fita
tab_cabo_fc	Fita de continuidade	tab_fh	Bainhas hidro. e semic.
tab_cabo_fm	Blindagem em fita	tab_fa	Fitas de alumínio
tab_cabo_fh	Fita semicondutora e hidroexpansivel	tab_fe	Fitas de Enchimento
tab_cabo_fa	Fita de alumínio	tab_arm	Armações
tab_cabo_fe	Fita de enchimento	tab_be	Bainhas exteriores
tab_cabo_arm	Armação	tab_tubo	Tubos
tab_cabo_be	Bainha exterior	tab_almas_classe1	Almas sólidas
tab_inst	Instalação do cabo	tab_almas_classe2	Almas multifilares
		tab_almas_classe5	Almas multifilares flexíveis
		tab_almas_classe6	Almas multifilares ultra flexíveis
		tab_solo	Vários tipos de solo

Todos os cabos criados na base de dados são numerados e, a relação entre tabelas do tipo cabo é feita de acordo com o número do cabo criado. Nas tabelas de materiais a relação entre estas e as do tipo cabo é feita de acordo com o material usado no cabo. Na Figura 5.4 ilustram-se parte destas relações entre tabelas.

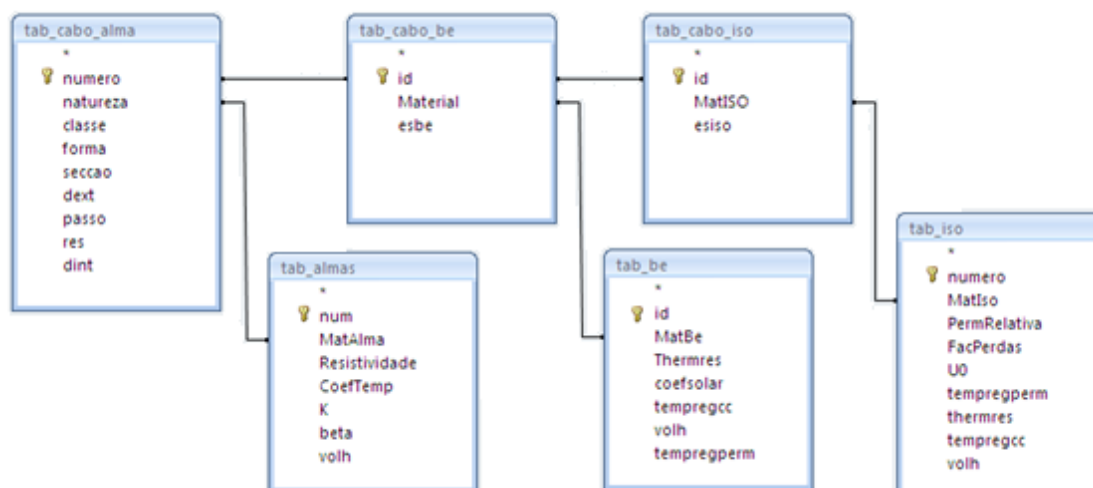


Figura 5.4 - Relações entre tabelas

5.4. - Interface

A interface da aplicação “CabCalc” foi desenvolvida com a linguagem VB (Visual Basic) utilizando a ferramenta da Microsoft denominada Visual Studio.

O interface disponibiliza vários formulários, tendo-se procurado uniformizar entre os vários formulários criados o uso de controlos ou objectos, tais como botões de navegação, separadores, caixas de texto e tabelas para a entrada e saída de dados na aplicação (*Input e Output*), botões que executam rotinas definidas de acordo com o cálculo pretendido, entre outros.

Os diversos formulários destinam-se à introdução e leitura de dados. Os principais formulários para a introdução de dados são os formulários ilustrados na Figura 5.5 e na Figura 5.6. Os dados introduzidos nestes formulários serão posteriormente guardados na base de dados nas tabelas do tipo cabo. A introdução de dados dos materiais usados nos cabos é realizada através dos menus “Ficheiro” e “Criar Material”, tal como se ilustra na Figura 5.7, aparecendo depois o formulário respectivo do material escolhido. Na Figura 5.8 ilustra-se a introdução de materiais para a bainha exterior. Estas características ficam posteriormente armazenadas nas tabelas de materiais.

Desenvolvimento da aplicação

Figura 5.5 - Formulário introdução de dados do cabo.

Figura 5.6 - Formulário introdução de dados das condições de instalação.

Figura 5.7 - Introdução de materiais.

The 'Bainha Exterior' dialog box contains a table with the following data:

	Material	Res. Term.	Temp. Reg. CC	Temp. Reg. Perm.	Unid. Vol. Calor	Coef. Abs. Solar
▶	PVC (ST1)	6	200	80	1700000	0,6
	PE (ST3)	3,5	150	80	2400000	0,4
	PE (ST7)	3,5	180	90	2400000	0,4
	PVC (ST2)	6	200	90	1700000	0,6
*						

An 'OK' button is located at the bottom right of the dialog box.

Figura 5.8 - Introdução de dados de materiais usados na bainha exterior.

Os formulários criados para a apresentação de resultados obtidos na aplicação são vários e são escolhidos dependendo da informação que se pretende visualizar. Caso se pretenda visualizar informação relacionada com a corrente máxima admissível em regime permanente do cabo selecciona-se o separador “Regime Permanente” e obtém-se uma janela semelhante à representada na Figura 5.9.

The 'Cabelte' application window displays the 'Regime Permanente' tab. It includes a menu bar (Ficheiro, Mudar, Opções, Ajuda) and a toolbar (Cabo, Instalação, Resistência, Capacidade, Indutância, Perdas, Regime Permanente, Curto-Circuito, Sobrecargas). The main area shows the following data:

Temperatura Operação Alma Condutora	Temperatura Operação Ecrã ou Fita Metálica	Temperatura Operação Bainha Externa	Temperatura Operação Superfície do Cabo
90	71,124	70,756	68,5476

Below the table, the 'Corrente Máxima Admissível (A) Regime Permanente' is displayed as 393,313352. To the right, the 'Temperatura Operação Pretendida Bainha Externa' is 80. At the bottom, the 'Passo Iteração' is 0,2, and there is an 'Iniciar' button for the 'Processo Iterativo Correção da Temperatura'. The status bar at the bottom shows 'Cálculo da Corrente Máxima Admissível em Regime Permanente' and a 'Sair' button.

Figura 5.9 - Corrente máxima admissível.

5.5. - Módulo de cálculo

5.5.1. - Estrutura do módulo de cálculo

Para serem realizados os cálculos referentes ao dimensionamento de cabos de AT foi necessário criar um conjunto de rotinas e funções para que todo este processo se efectue de uma forma ordenada, eficaz e correcta. A solução passou pela execução do diagrama de blocos ilustrado na Figura 5.10.

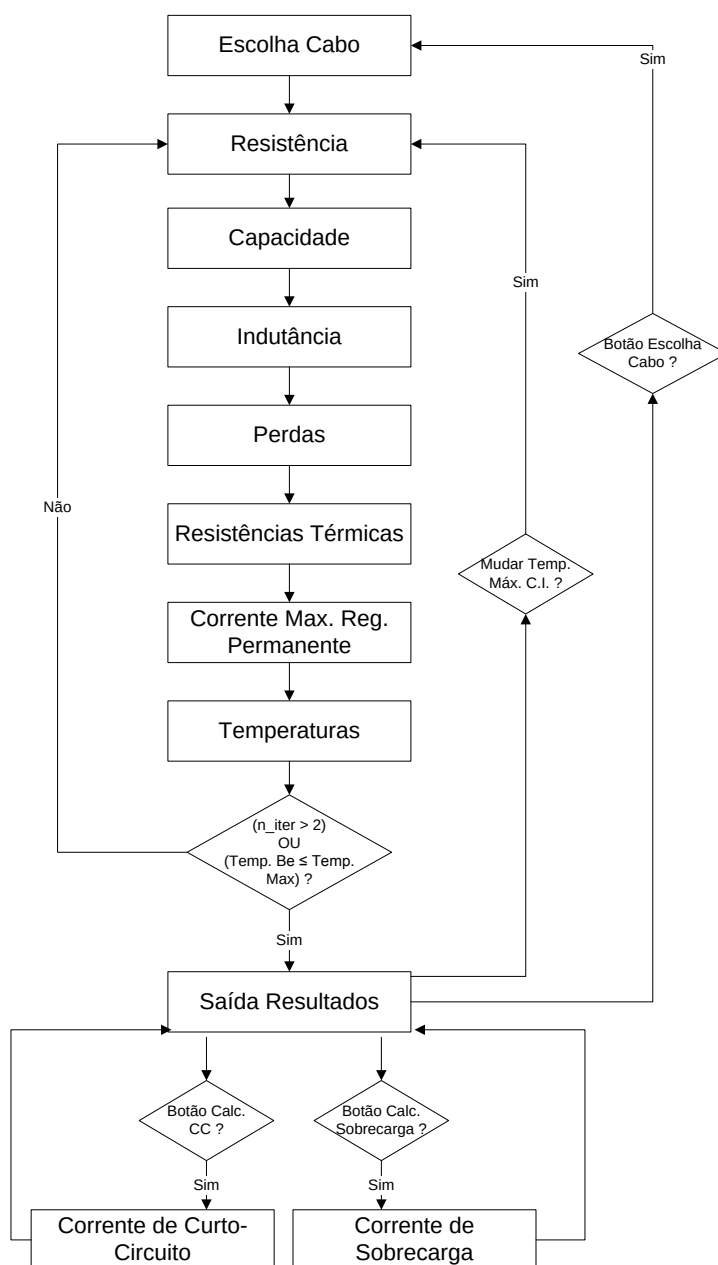


Figura 5.10 - Processo de cálculo.

A descrição das principais rotinas que figuram no diagrama de blocos da Figura 5.10 é realizada na Tabela 5.2, e a descrição dos blocos de decisão é efectuada na Tabela 5.3.

Tabela 5.2 - Descrição das rotinas principais.

Rotina	Função
Escolha Cabo	Carrega da base de dados toda a informação relativa ao cabo em estudo e aos materiais usados no respectivo cabo.
Resistência	Cálculo da resistência da alma condutora e das várias bainhas metálicas existentes.
Capacidade	Cálculo da capacidade eléctrica do cabo.
Indutância	Cálculo da indutância do cabo.
Perdas	Cálculo das perdas por efeito de Joule e factores de perdas, na alma condutora, blindagem e bainhas metálicas existentes.
Resistências Térmicas	Determinação das várias resistências térmicas do cabo, e da resistência térmica do meio envolvente.
Corrente Max. Reg. Permanente	Determinação da corrente máxima admissível do cabo em regime permanente.
Temperaturas	Cálculo das temperaturas de operação nas várias bainhas do cabo em regime permanente.
Saída de resultados	Saída de resultados para o ambiente gráfico criado no Visual Studio.
Corrente de Curto-Circuito	Determinação da corrente de curto-circuito tendo em conta a temperatura inicial do cabo e, o tempo em que ocorre o curto-circuito.
Corrente de Sobrecarga	Cálculo da corrente de sobrecarga de acordo com a carga inicial e o tempo de sobrecarga previsto.

Tabela 5.3 – Descrição dos blocos de decisão

Condição	Função
$(n_iter \geq 2)$ Ou $(Temp. Be \leq Temp. Max)$	Após terem sido feitas duas iterações e a temperatura da bainha exterior esteja dentro dos seus limites permitidos é apresentado o resultado final. Caso o número de iterações seja inferior a dois é iniciada mais uma iteração com o valor das temperaturas de operação actualizado para a correcção das resistências, por outro lado, caso a temperatura de operação da bainha exterior seja superior à sua temperatura máxima de operação é iniciada mais uma iteração baixando a temperatura de operação da alma condutora com um passo de iteração estipulado no formulário apresentado na Figura 5.9 até que a temperatura da bainha exterior esteja dentro do seu limite de operação. Esta condição encontra-se descrita na subsecção 5.5.8.
Mudar Temp. Max. C.I.	Mudança manual da temperatura máxima da camada isolante.
Botão Escolha Cabo	Caso seja premido o botão para mudança do cabo, o processo de cálculo é recommçado com os novos dados do cabo importados da base de dados.
Botão Calc. CC	Sendo premido o botão de cálculo da corrente de curto-circuito, é executada a rotina de cálculo da mesma.
Botão Calc. Sobrecarga	É executada a rotina de cálculo da corrente em regime de sobrecarga após seja premido o botão de cálculo de sobrecarga.

Na Figura 5.10 pode-se observar que o cálculo da corrente em regime de curto-circuito e, o cálculo da corrente em regime de sobrecarga só é realizado após ser premido um botão para o efeito. Optou-se por esta solução uma vez que é necessário introduzir a respectiva duração, cargas iniciais e temperaturas iniciais, só se efectuando o respectivo cálculo após a introdução destes dados.

Nas secções seguintes encontra-se a descrição detalhada de cada rotina principal do módulo de cálculo. Na descrição detalhada de cada rotina principal observam-se as várias expressões descritas nos Capítulos 3 e 4 usadas de acordo com o cálculo pretendido. Para a implementação destas rotinas utilizaram-se condições para efectuar o cálculo de acordo com as condições de instalação e estrutura do cabo.

No Capítulo 6 é apresentado um caso de estudo referente a três cabos AT com duas condições de instalação iguais para cada cabo sendo executado o processo de cálculo descrito nas secções seguintes.

5.5.2. - Escolha do cabo

Nesta rotina não se efectuam cálculos, apenas se retiram da base de dados os dados necessários para a implementação do processo de cálculo descrito nas secções seguintes.

Para aceder à base de dados usaram-se expressões *SQL* e, retiram-se primeiro os dados relativos ao dimensionamento do cabo (tabelas do tipo cabo) e, em seguida, os dados dos materiais usados (tabelas dos tipo material).

Para este processo ser o mais eficiente possível apenas se carregam das diversas tabelas existentes na base de dados os parâmetros relativos ao cabo escolhido através do número do cabo e, os parâmetros relativos aos materiais em uso do cabo através do nome do material.

5.5.3. - Resistência

Nesta rotina é realizado todo o cálculo relacionado com a resistência eléctrica de todas as partes metálicas do cabo. O procedimento usado passa por calcular a resistência para os elementos obrigatórios, verificar a existência de bainhas metálicas opcionais e efectuar o cálculo da resistência para essas bainhas. Este processo está descrito no diagrama de blocos da Figura 5.11. Nesta figura estão presentes números de expressões apresentados na secção 3.1.

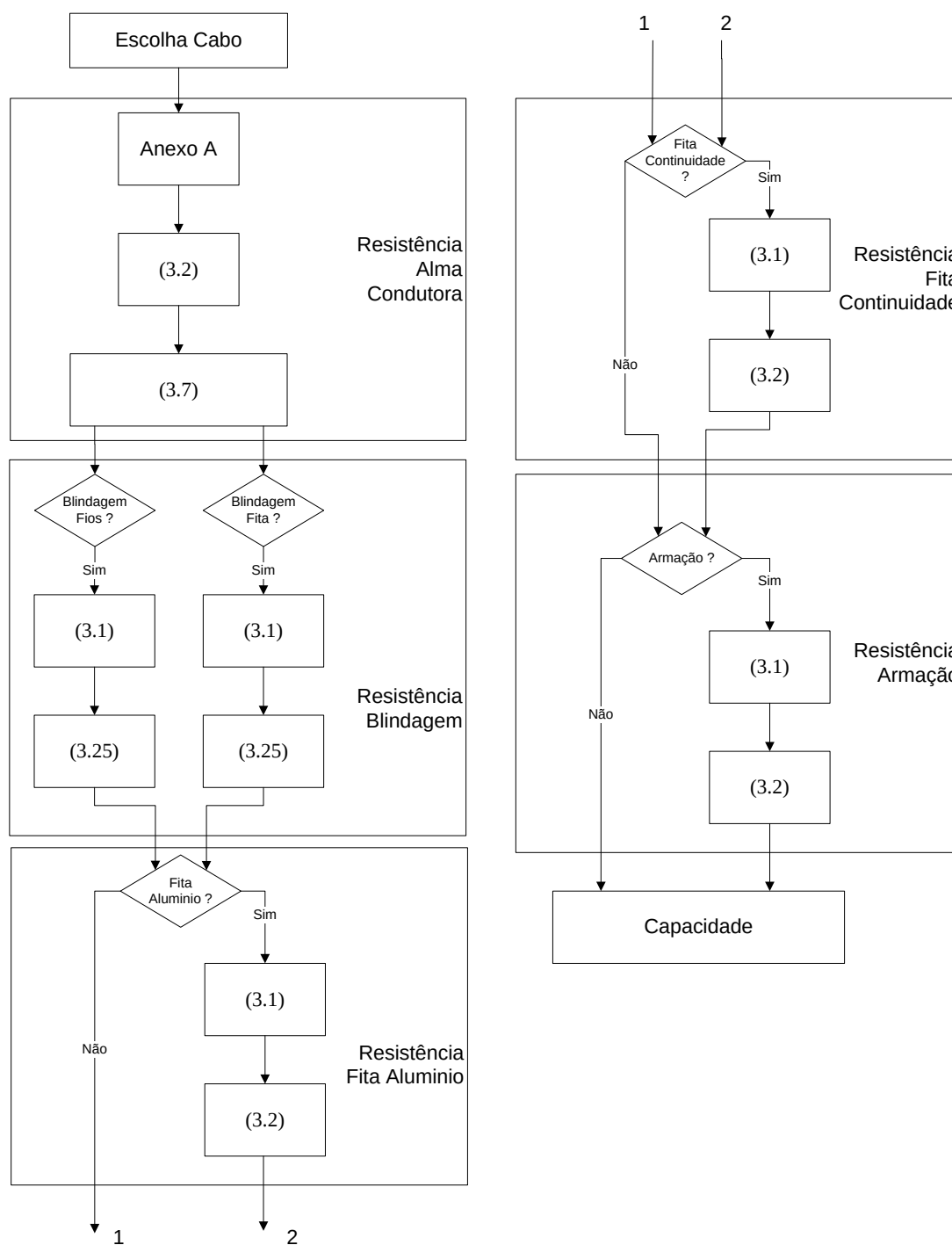


Figura 5.11 - Descrição do cálculo da resistência.

5.5.4. - Capacidade

O cálculo da capacidade descrito na Figura 5.12 é bastante simples usando apenas a expressão (3.11). Para efectuar este cálculo é necessário o uso das características da camada isolante, desde diâmetros interno e externo, factor de perdas e permitividade relativa do dieléctrico, como descrito na secção 3.3.

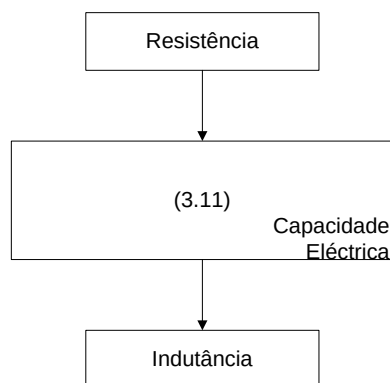


Figura 5.12 - Descrição do cálculo da capacidade.

5.5.5. - Indutância

A rotina indutância ilustrada na Figura 5.13 tem como condição a disposição dos cabos, e para o respectivo cálculo é necessário conhecer a distância média entre eixos dos cabos e o raio da alma condutora, conforme descrito na secção 3.5.

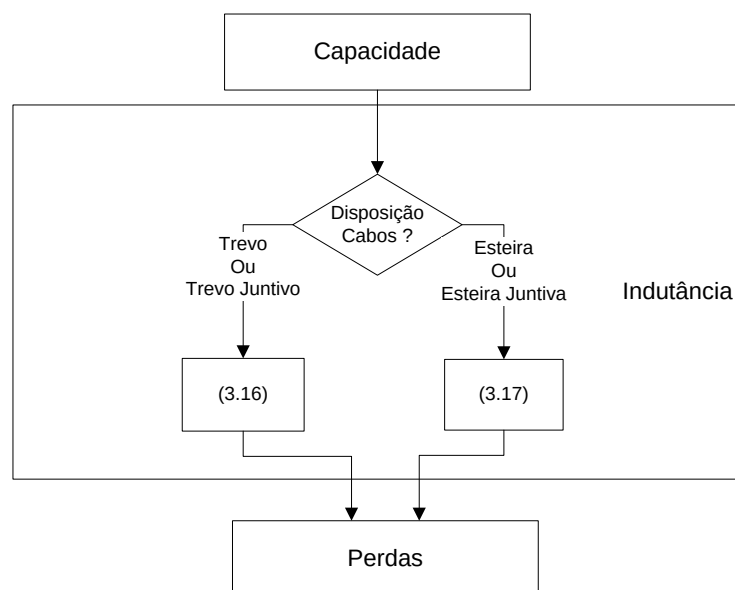


Figura 5.13 - Descrição do cálculo da indutância.

5.5.6. - Perdas

Nesta rotina calculam-se as perdas existentes nos vários elementos do cabo, desde perdas por efeito de Joule na alma condutora, blindagem e bainhas metálicas, sendo igualmente calculadas as perdas dieléctricas na camada isolante. Nesta rotina temos como condições a disposição do cabo e, o tipo de ligação da blindagem e bainhas metálicas à terra. A rotina das perdas óhmicas só estabelece valores na segunda iteração uma vez que na primeira iteração ainda não se encontra disponível nenhum valor para a corrente máxima admissível e, os valores

das resistências ainda não se encontram actualizados. As outras duas rotinas (Perdas dieléctricas, e Factor de Perdas) calculam o valor das perdas dieléctricas e dos factores de perdas nas duas iterações.

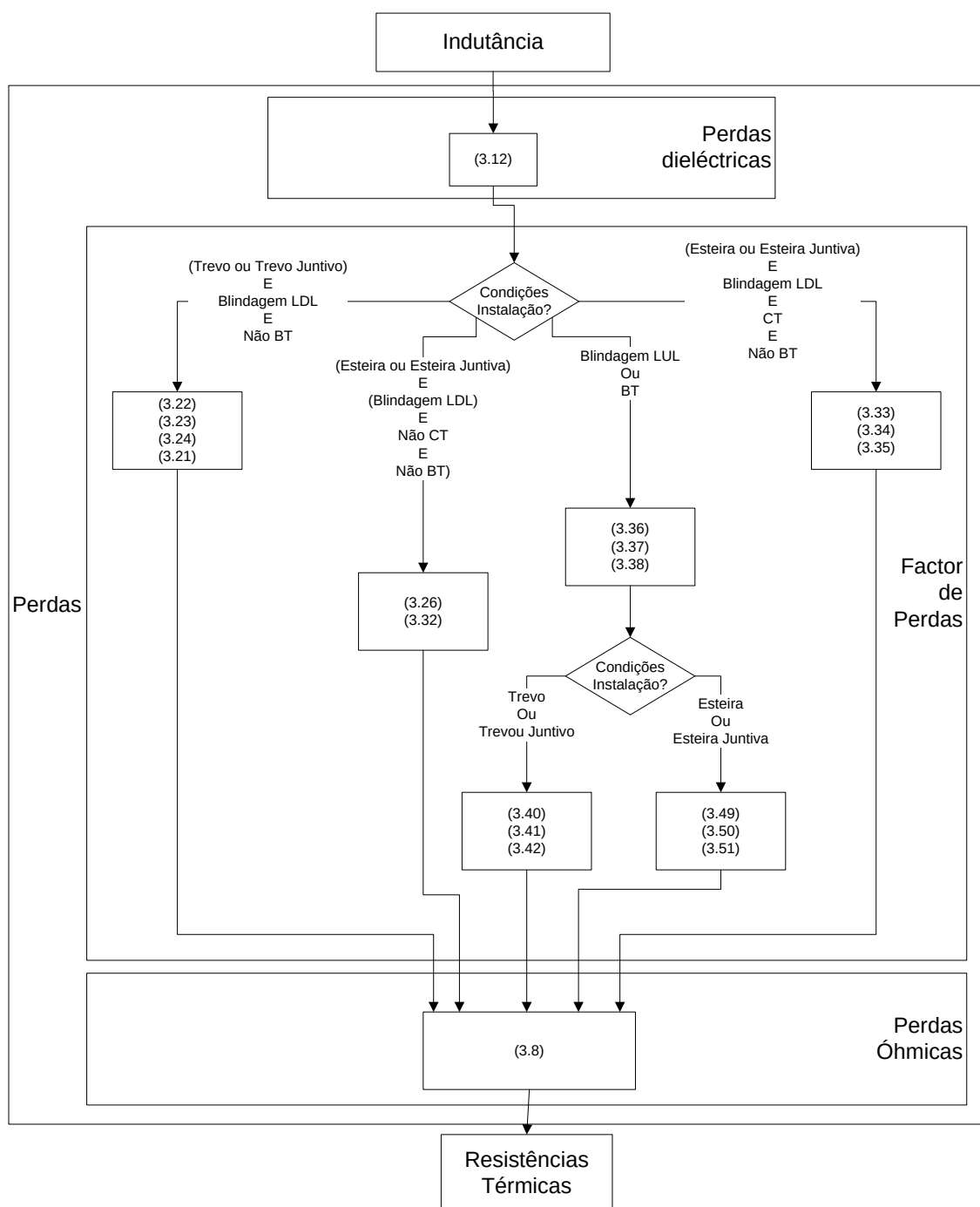


Figura 5.14 - Descrição do cálculo das perdas.

5.5.7. - Resistências Térmicas

A rotina do cálculo referente às resistências térmicas descrita na Figura 5.15 e na Figura 5.16 é a que contém mais condições na aplicação. Nesta rotina temos as condições referentes à estrutura do cabo para o cálculo da resistência térmica das bainhas não metálicas existentes entre a camada isolante e a armação e, impõem-se condições quanto as condições de instalação do cabo para o cálculo da resistência térmica do meio envolvente. Para o cálculo da resistência térmica do meio envolvente para cabos enterrados ainda se impõem condições quanto ao número de grupos de cabos enterrados. Estas condições não se encontram ilustradas nestas figuras para não aumentar desnecessariamente a sua complexidade. Assinala-se ainda que nos diversos blocos de cálculo apresentados figuram expressões apresentadas na secção 4.3.

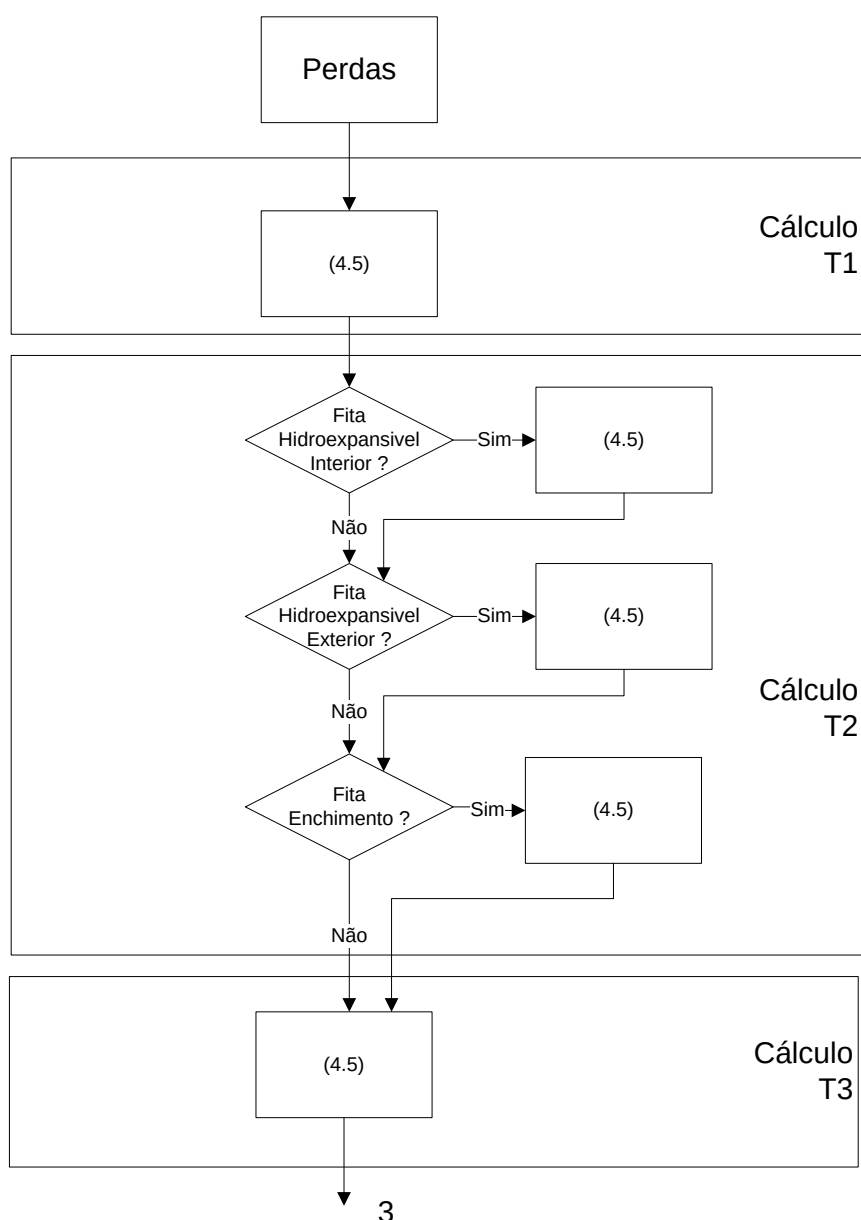


Figura 5.15 - Descrição do cálculo das resistências térmicas.

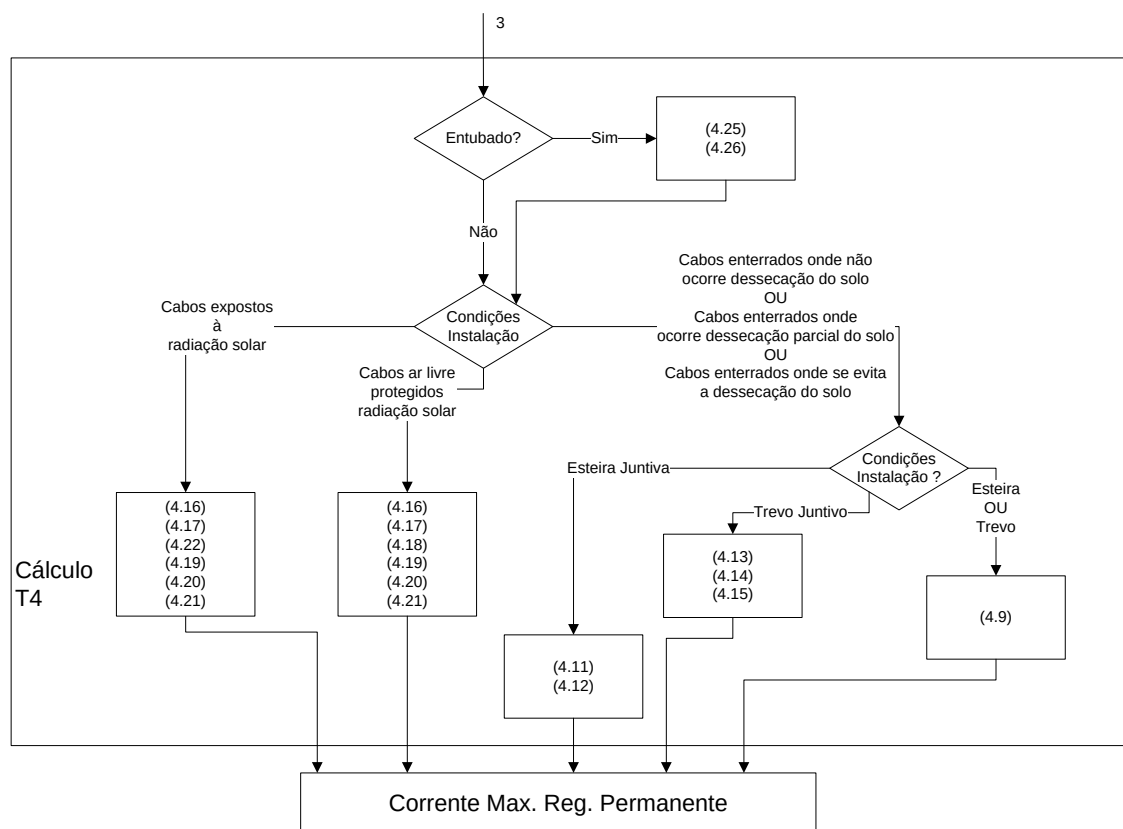


Figura 5.16 - Descrição do cálculo das resistências térmicas (continuação).

5.5.8. - Corrente máxima em regime permanente e temperaturas

As duas rotinas principais descritas na Figura 5.17 são as últimas rotinas do ciclo principal da aplicação. Depois de executadas estas duas rotinas ou se inicia um novo ciclo recomeçando o cálculo na rotina da resistência descrita na secção 5.5.3, ou já se efectuaram as duas iterações referidas no fluxograma da Figura 5.10 e a temperatura da bainha exterior já se encontra dentro dos seus limites, apresentando-se assim os resultados obtidos nos vários formulários descritos na secção 5.4. O cálculo representado na Figura 5.17 encontra-se descrito na secção 4.4.

Estas duas iterações decorrem do facto, de início, a resistência das bainhas metálicas descritas no fluxograma da Figura 5.11 serem calculadas admitindo que a temperatura para a correcção da resistência é igual à temperatura máxima de operação da camada isolante. Em seguida, esta temperatura é actualizada na rotina Temperaturas ilustrada na Figura 5.17 e o valor das resistências é recalculado na segunda iteração.

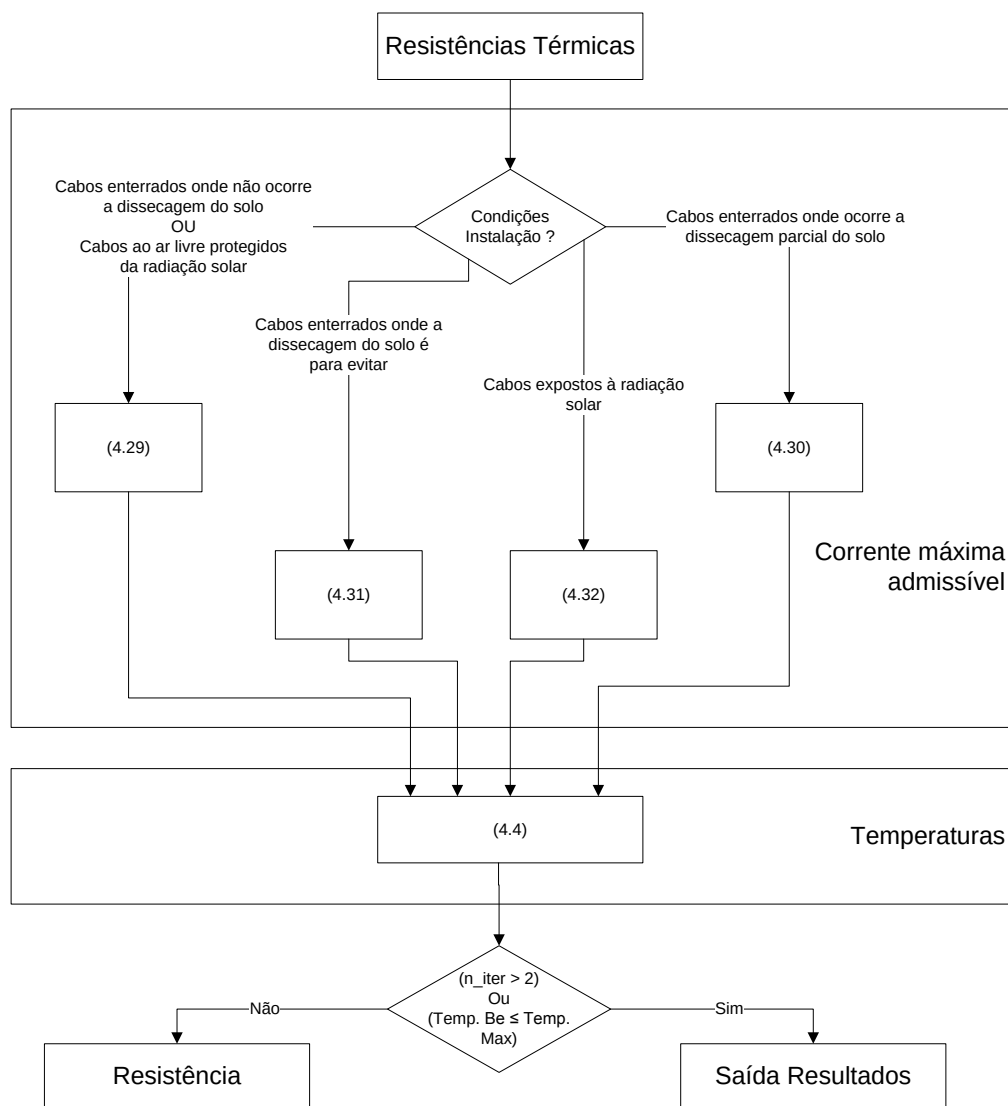


Figura 5.17 - Descrição do cálculo da corrente máxima admissível e das temperaturas.

5.5.9. - Corrente de curto-circuito

A rotina ilustrada na Figura 5.18 é bastante simples e destina-se a calcular a corrente de curto-circuito num processo adiabático através da expressão (4.33). Em seguida, verifica-se se o cálculo se refere à alma condutora ou à blindagem com fios separados para o cálculo do coeficiente de processo não adiabático. Este processo de cálculo é repetido duas vezes, a primeira para o cálculo da corrente de curto-circuito na alma condutora e, depois, para a blindagem. O cálculo da corrente de curto-circuito pode ser feito para blindagens compostas por fios (juntos ou separados) e pode também ser feito para blindagens compostas por fitas metálicas, conforme descrito na secção 4.5.

Esta rotina só é executada após ser premido um botão para o efeito (Botão calc. CC). Com efeito, é necessário introduzir a duração do curto-circuito e a temperatura da alma condutora antes do curto-circuito para ser possível realizar este cálculo.

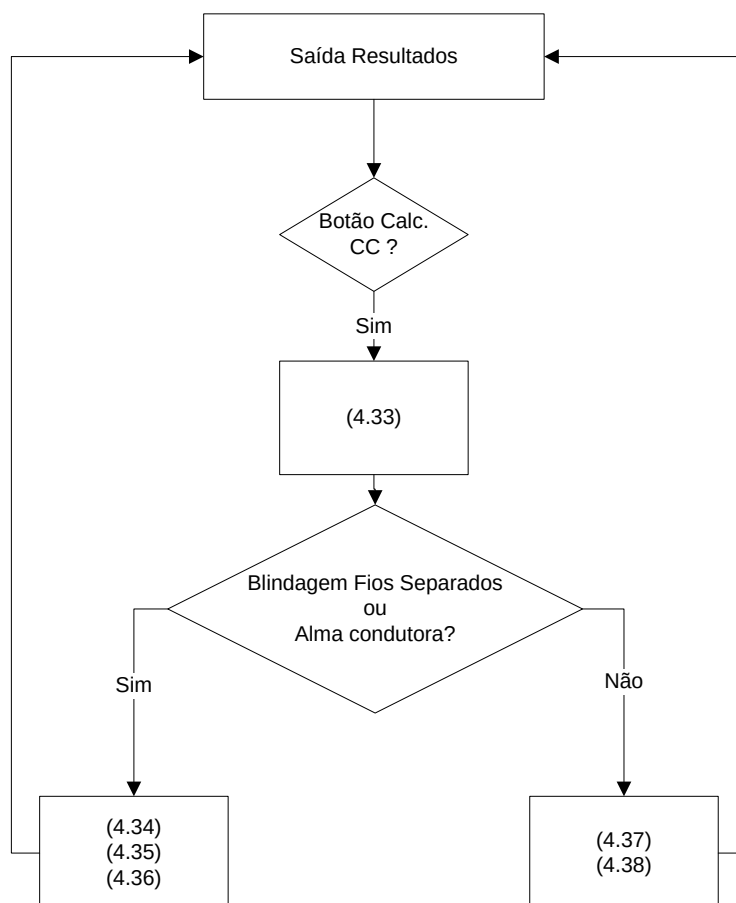


Figura 5.18 - Descrição do cálculo da corrente de curto-circuito.

5.5.10. - Corrente de Sobrecarga

A rotina para o cálculo da corrente de sobrecarga ilustrada na Figura 5.19 só é executada depois da apresentação de resultados obtidos no ciclo principal da aplicação e após ser premido um botão, do mesmo modo que a rotina para o cálculo da corrente de curto-circuito. Esta rotina tem como condições a duração da sobrecarga (longa ou curta duração) como descrito na secção 4.6.2 e também as condições de instalação do cabo (Cabo enterrado ou ao ar livre).

Para que esta rotina seja executada o utilizador tem que introduzir como dados de entrada a duração da sobrecarga e a percentagem de carga inicial.

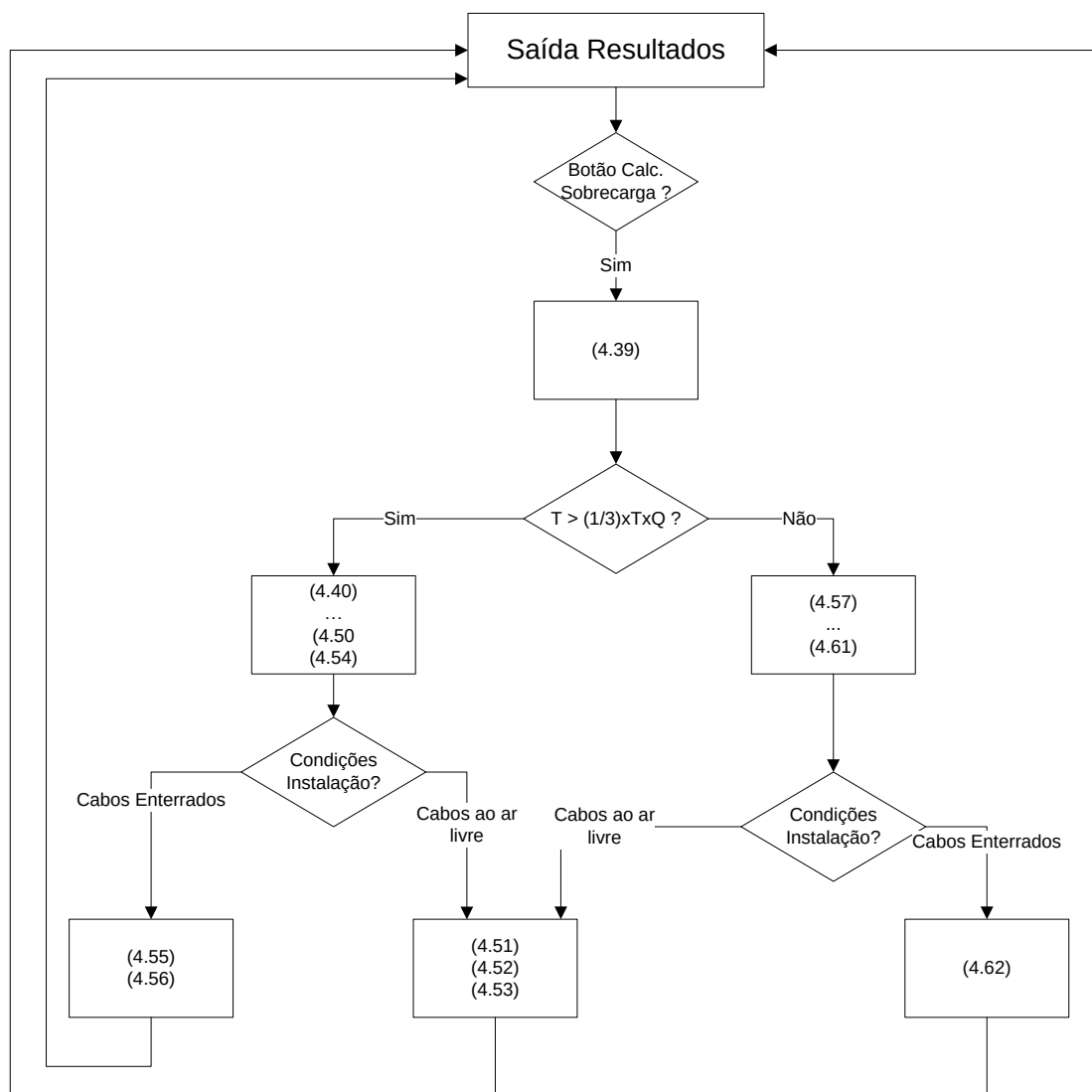


Figura 5.19 - Descrição do cálculo da corrente de sobrecarga.

Capítulo 6

Caso de estudo e análise de resultados

6.1. - Introdução

Este caso de estudo pretende simular uma consulta apresentada por um cliente usando a aplicação desenvolvida para caracterizar possíveis soluções técnicas e obter elementos que as permitam comparar de modo a seleccionar uma delas. Os dados obtidos são todos retirados da aplicação, sendo introduzidos posteriormente no Excel para sua organização, construção de tabelas e gráficos.

Neste capítulo são analisados três tipos de cabos com três secções normalizadas diferentes aplicados em duas condições de instalação distintas. Numa primeira fase, faz-se a análise da corrente máxima admissível para cabos directamente enterrados e posteriormente para cabos ao ar livre protegidos da radiação solar. Para estas duas análises apresentam-se duas soluções possíveis relativas ao tipo de ligação da blindagem à terra para cada Hipótese de estudo.

Para os cabos directamente enterrados foram consideradas quatro hipóteses de estudo e para os cabos ao ar livre duas hipóteses de estudo. Estas hipóteses dependem do número de grupos de cabos existentes na mesma vala, da temperatura ambiente e, da resistividade térmica do solo, encontrando-se descritas na subsecção 6.2.2.

No final do capítulo é apresentado um exemplo para a selecção de um cabo recorrendo à análise feita na secção 6.4.

6.2. - Descrição do sistema

Na presente secção descreve-se o campo de aplicação do cabo, desde as condições de instalação, às características da rede onde se instalará o cabo.

A norma utilizada que fixa as condições de instalação e requisitos construtivos dos cabos é a norma da EDP (DMA-C33-281/N, Março 2008).

6.2.1. - Selecção do tipo de cabo

Pretende-se que o grupo de cabos seja instalado em trevo juntivo a uma profundidade mínima de 1,3 m da superfície do solo. Caso seja instalado ao ar livre ficará encostado a uma parede vertical também em trevo juntivo. Deverá também ser feita uma análise para dois grupos de cabos com características iguais instalados na mesma vala.

Os cabos abrangidos pela norma (DMA-C33-281/N, Março 2008) são designados por LXHIOLE de acordo com a norma portuguesa NP 665.

No final do capítulo, como já foi referido no início da secção, será apresentada uma solução do cabo escolhido dependendo da capacidade de transporte que se pretende aplicar ao cabo.

6.2.2. - Dados da instalação eléctrica e do ambiente

Todos os parâmetros descritos nesta secção são usados para o cálculo eléctrico e térmico de cabos AT inseridos na aplicação.

6.2.2.1. - Características térmicas

Cabos directamente enterrados:

Hipótese 1 (período de calor):

- nº circuitos: 1;
- temperatura ambiente: 20°C;
- resistividade térmica do solo: 1,2 K.m/W.

Hipótese 2 (período de frio):

- nº circuitos: 1;
- temperatura ambiente: 10°C;
- resistividade térmica do solo: 0,85 K.m/W.

Hipótese 3 (período de calor):

- nº circuitos: 2;
- distância entre centros de circuitos: de acordo com a Tabela 6.1;
- temperatura ambiente: 20°C;
- resistividade térmica do solo: 1,2 K.m/W.

Hipótese 4 (período de frio):

- nº circuitos: 2;
- distância entre centros de circuitos: de acordo com a Tabela 6.1;

- temperatura ambiente: 10°C;
- resistividade térmica do solo: 0,85 K.m/W.

Tabela 6.1 - Distâncias entre grupos de cabos.

Secção (mm ²)	Distância entre grupos (mm)
185, 400	400
630	500

Cabos ao ar livre protegidos da radiação solar:

Hipótese 1 (período de calor):

- nº circuitos: 1;
- temperatura ambiente: 30°C.

Hipótese 2 (período de frio):

- nº circuitos: 1;
- temperatura ambiente: 20°C.

Tabela 6.2 - Período de calor e frio.

Período de calor:	15 Abril a 15 de Outubro;
Período de frio:	16 de Outubro a 14 de Abril.

Pretende-se que o cabo tenha as seguintes temperaturas máximas de operação de forma a que funcione sem deterioração ou envelhecimento significativos:

Alma condutora:

- regime permanente 90°C;
- curto-circuito 250°C;
- sobrecarga 130°C.

Bainha exterior:

- regime permanente 80°C;

A temperatura máxima de 250°C referida anteriormente está associada a uma duração máxima de curto-circuito de 5 segundos, enquanto a temperatura máxima de 130°C associada à sobrecarga tem uma duração máxima de cinco horas por sobrecarga, não excedendo as 1500 horas no seu período de vida. Para uma sobrecarga sucessiva é necessário esperar que a temperatura da camada isolante esteja dentro dos seus limites normais de funcionamento.

6.2.2.2. - Características eléctricas

As características eléctricas apresentadas nesta secção aplicam-se a cabos monopolares de tipo LXHIOLÉ, para usar em redes de distribuição de energia eléctrica subterrânea indicadas na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Características eléctricas da rede.

Tensão nominal composta	60 kV
Tensão nominal simples	36 kV
Tensão máxima do sistema	72,5 kV
Frequência nominal	50 Hz
Factor de carga	100 %
Duração de curto-circuito	0,6 s

6.2.3. - Ligação da blindagem à terra

É realizada a análise para o caso da ligação à terra da blindagem apenas numa extremidade do cabo e, também nas duas extremidades do cabo, de acordo com a Figura 6.1.

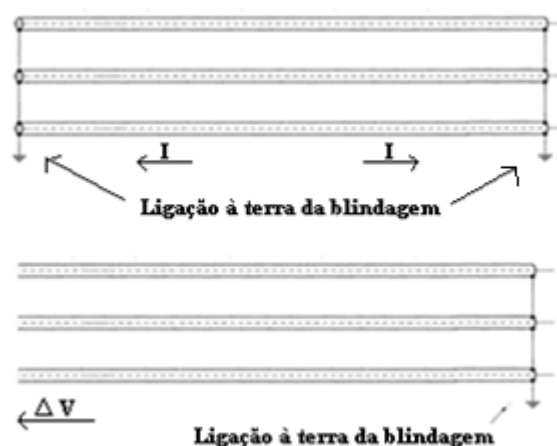


Figura 6.1 - Esquema de ligação da blindagem à terra.

6.3. - Descrição do cabo

Nesta secção descrevem-se as características da estrutura do cabo de acordo com a norma (DMA-C33-281/N, Março 2008) que fixa as características dos cabos isolados com dieléctrico sólido extrudido a usar em redes de distribuição de AT.

- **Diâmetros do cabo**

Os valores dos diâmetros sobre a camada isolante e sobre a bainha exterior devem estar dentro dos limites impostos pela Tabela 6.4 (DMA-C33-281/N, Março 2008, p.12).

Tabela 6.4 - Diâmetros mínimos e máximos do cabo.

Secção condutor (mm ²)	Diâmetro sobre a CI		Diâmetro exterior do cabo	
	mínimo (mm)	máximo (mm)	mínimo (mm)	máximo (mm)
185	40	48	53	64,5
400	47	56	60	72
630	53,5	64	66	80

- **Alma condutora**

A construção da alma condutora deve ser da classe 2, de alumínio compactado, de forma circular de acordo com a norma (IEC 60228, 2004).

As secções escolhidas para o caso de estudo são 185, 400 e 630 mm².

- **Semicondutor interno e externo**

Estas duas camadas devem ser extrudidas juntamente com a camada isolante através de um processo de tripla extrusão sobre a alma condutora com a seguinte ordem: semicondutor interno, camada isolante e semicondutor externo.

A espessura mínima em qualquer ponto destas camadas deve ser de 0,5 mm, usando-se para o cálculo uma espessura média de 0,8 mm.

- **Camada isolante**

A camada isolante deve ser constituída por um composto XLPE com as características apresentadas no Anexo B.

O valor da espessura nominal não deve ser inferior a 13 mm usando-se este valor para o cálculo.

- **Blindagem**

A blindagem é constituída por fios de cobre recozido nu envolvidos por uma fita metálica, de natureza cobre, denominada por fita de continuidade.

A fita de continuidade deve ser enrolada sobre os fios em contra-hélice e com um passo não superior a quatro vezes o diâmetro sob a blindagem.

A secção da blindagem é determinada considerando o regime mais desfavorável de carga, ou seja, admitindo que a temperatura na mesma, antes da ocorrência de um curto-circuito fase-terra, é igual à temperatura máxima do condutor em regime normal, diminuída de 10°C, e para

um valor de intensidade de corrente de 25 kA durante 0,6s (DMA-C33-281/N, Março 2008, p.9).

A secção da blindagem não deve ser inferior a 135 mm², e o valor da resistência eléctrica em corrente contínua a 20°C não deve ser superior a 0,14 Ω/km. O diâmetro dos fios não deve ser inferior a 0,5 mm, sendo o número mínimo de fios de 50.

A secção da fita deve ser no mínimo 1 mm², com uma espessura mínima de 0,1 mm.

Para as três secções usam-se os valores apresentados na Tabela 6.5. Na subsecção 6.4.4 faz-se a análise às correntes de curto-circuito da blindagem e verifica-se que estes valores se encontram dentro dos limites impostos pela norma referidos nesta subsecção.

Para a secção de 630 mm² diminui-se o diâmetro dos fios e aumenta-se o número destes de maneira a diminuir o espaço existente entre fios, mantendo-se a corrente de curto-circuito e a resistência dentro dos limites impostos como demonstrado na subsecção 6.4.4.

Tabela 6.5 - Dimensionamento da blindagem.

Secção (mm ²)	Blindagem Fios				Fita continuidade			
	Passo	Natureza	Nº Fios	Diâmetro fios (mm)	Natureza	Espessura (mm)	Largura (mm)	Passo
185	20D	Cobre	69	1,66	Cobre	0,1	10	4D
400	20D		69	1,66				
630	20D		88	1,47				

- **Camada Hidroexpansível**

Esta camada tem como espessura mínima 0,12 mm. Opta-se por escolher uma camada hidroexpansível interior com 0,45 mm de espessura e por uma camada hidroexpansível exterior de 0,65 mm de espessura. Opta-se por estas medidas de maneira a que estas funcionem como uma cama para a blindagem não existindo assim espaço livre entre os fios da blindagem para circular água. Para além disso, esta camada serve como superfície de regularização sobre os fios da blindagem de forma a permitir uma superfície mais regular. Por outro lado, funciona como camada de separação entre a blindagem e a fita de alumínio.

Uma vez que existem fitas metálicas sobre estas duas camadas ambas devem ser compostas por material semicondutor de maneira a orientar as linhas de campo da alma para as bainhas metálicas.

- **Fita de alumínio**

Esta fita tem como função assegurar a estanquidade transversal ou radial à água e, deve ser revestida do mesmo material que a bainha exterior para assegurar uma melhor aderência a esta quando a for extrudida.

Esta fita tem como espessura mínima 0,12 mm e uma sobreposição de 5 mm, usando-se para o cálculo um valor médio de 0,19 mm de espessura.

- **Bainha exterior**

A bainha deve ser constituída por um composto de polietileno de média densidade (MDPE) de cor preta. Esta bainha deve ser extrudida sobre a fita de alumínio aderindo perfeitamente a esta, tendo como valor nominal para espessura 3 mm, usando-se 3,2 mm como valor médio para o cálculo.

6.4. - Análise e comparação de resultados

6.4.1. - Diâmetros do cabo

Os diâmetros médios sobre a camada isolante e sobre a bainha exterior apresentam-se na Tabela 6.6 encontrando-se dentro dos limites impostos na Tabela 6.4.

Tabela 6.6 - Diâmetros médios da camada isolante e da bainha exterior.

Secção condutor (mm ²)	Diâmetro médio sobre a CI (mm)	Diâmetro médio exterior do cabo (mm)
185	43,6	57,3
400	51,6	65,7
630	59,2	72,9

6.4.2. - Corrente máxima admissível

A corrente máxima admissível em regime permanente é determinada tendo em conta todos os parâmetros da instalação eléctrica e ambiente indicados na subsecção 6.2.2 e, a estrutura do cabo descrita na secção 6.3. Qualquer alteração a estes parâmetros deve ser devidamente analisada para verificar o seu efeito na capacidade de transporte do cabo conforme analisado durante esta subsecção. Consideram-se cabos enterrados onde não ocorre a dessecação do solo, ou seja, as características do solo não são alteradas devido ao aquecimento do cabo, e consideram-se cabos ao ar livre protegidos da radiação solar.

Usando as hipóteses de estudo especificadas na subsecção 6.2.2.1 obtemos as correntes máximas admissíveis e temperaturas de operação em regime permanente para o três cabos com blindagens ligadas à terra numa extremidade (LUL) e, nas duas extremidades (LDL), na Tabela 6.7 e na Tabela 6.8, para cabos enterrados e para cabos ao ar livre respectivamente.

Nestas tabelas pode-se observar que existem casos em que a temperatura de operação da alma condutora não atinge os 90°C. Isto deve-se ao facto de ter sido atingida a temperatura máxima da bainha exterior que neste caso é 80°C ficando assim a corrente máxima admissível limitada pela temperatura máxima da bainha exterior.

Tabela 6.7 - Correntes e temperaturas em regime permanente em cabos enterrados.

Cabo	Hip.	Blind.	Temperatura operação (°C)				Corr. Máx. adm. Reg. Perm. (A)
			Alma	Blind.	B. ext.	Sup. cabo	
LXHIOLE 1x185	1 (calor)	LDL	90,00	77,29	77,04	75,64	323
	2 (frio)		90,00	71,10	70,73	68,65	394
	3 (calor)		89,30	80,11	*80,00	78,90	275
	4 (frio)		90,00	75,90	75,62	74,07	340
	1 (calor)	LUL	90,00	76,36	76,11	74,74	334
	2 (frio)		90,00	69,80	69,44	67,40	407
	3 (calor)		90,00	79,99	79,82	78,81	286
	4 (frio)		90,00	74,85	74,58	73,05	352
LXHIOLE 1x400	1 (calor)	LDL	90,00	80,22	79,99	78,57	467
	2 (frio)		90,00	75,23	74,88	72,73	574
	3 (calor)		86,70	80,07	*80,00	78,94	387
	4 (frio)		90,00	79,26	79,01	77,45	490
	1 (calor)	LUL	90,00	78,71	78,48	77,10	502
	2 (frio)		90,00	73,06	72,72	70,65	615
	3 (calor)		87,90	80,04	*80,00	78,92	420
	4 (frio)		90,00	77,59	77,34	75,82	526
LXHIOLE 1x630	1 (calor)	LDL	87,60	80,07	*80,00	78,54	575
	2 (frio)		90,00	78,04	77,71	75,63	723
	3 (calor)		85,10	80,04	*80,00	79,01	471
	4 (frio)		88,40	80,07	*80,00	78,39	604
	1 (calor)	LUL	90,00	80,27	79,99	78,74	652
	2 (frio)		90,00	75,24	74,92	72,93	804
	3 (calor)		86,50	80,02	*80,00	78,97	534
	4 (frio)		90,00	79,39	79,16	77,73	681

Tabela 6.8 - Correntes e temperaturas em regime permanente em cabos ao ar livre.

Cabo	Hip.	Blind.	Temperatura operação (°C)				Corr. Máx. adm. Reg. Perm. (A)
			Alma	Blind.	B. ext.	Sup. cabo	
LXHIOLE 1x185	1 (calor)	LDL	90,00	68,86	68,45	66,12	416
	2 (frio)		90,00	64,78	64,29	61,50	455
	1 (calor)	LUL	90,00	67,72	67,32	65,07	427
	2 (frio)		90,00	63,42	62,94	60,26	467
LXHIOLE 1x400	1 (calor)	LDL	90,00	71,75	71,31	68,66	639
	2 (frio)		90,00	68,19	67,67	64,50	698
	1 (calor)	LUL	90,00	69,65	69,24	66,74	674
	2 (frio)		90,00	65,68	65,20	62,22	737
LXHIOLE 1x630	1 (calor)	LDL	90,00	73,96	73,50	70,72	839
	2 (frio)		90,00	70,81	70,27	66,93	918
	1 (calor)	LUL	90,00	70,98	70,57	68,00	914
	2 (frio)		90,00	67,26	66,76	63,70	1000

Analisando os valores obtidos para cabos com a blindagem ligada nas duas extremidades, pode-se observar na Figura 6.2 que as condições de instalação afectam fortemente a corrente máxima admissível, notando-se que temperaturas ambientes mais altas, resistividades térmicas mais altas, e o número de grupos na mesma vala igual a dois conduzem a correntes máximas admissíveis no cabo mais baixas conforme se ilustra na Figura 6.2 para a Hipótese 3 em cabos enterrados.

Na mesma figura observa-se que o aumento da secção do cabo aumenta a corrente máxima admissível mas esta não varia proporcionalmente com o aumento da secção. Contudo, nota-se ainda que cabos instalados ao ar livre conduzem a correntes máximas admissíveis mais altas que nos cabos enterrados. Esta situação deve-se à resistência térmica do meio envolvente em cabos ao ar livre ser bastante mais baixa que em cabos enterrados.

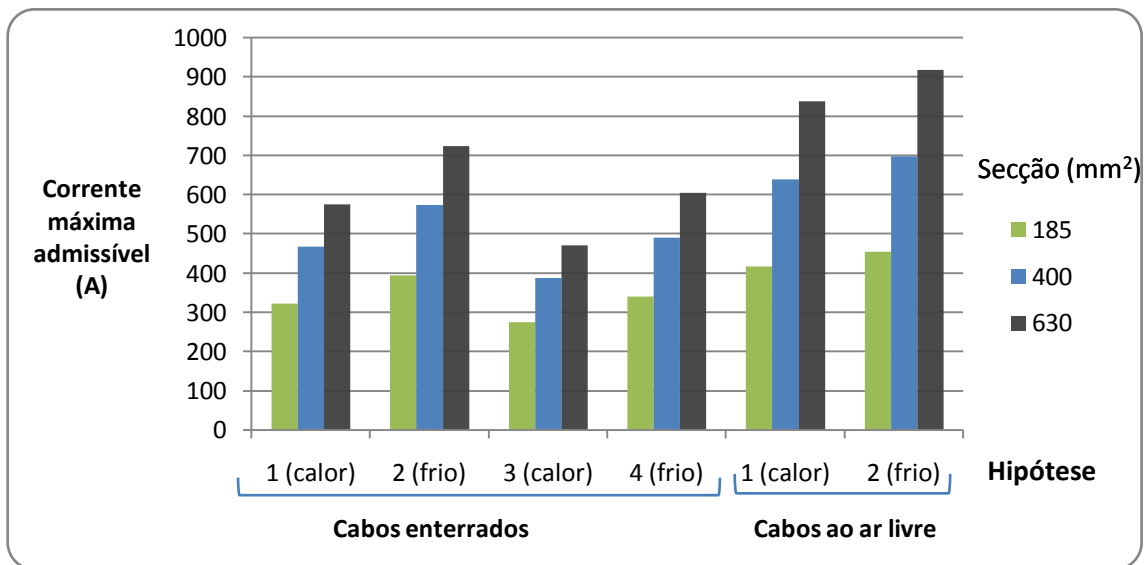


Figura 6.2 - Corrente máxima admissível em função da secção e condições de instalação.

Na Figura 6.3 observa-se o efeito da ligação da blindagem à terra na corrente máxima admissível com o aumento da secção do cabo para o caso de cabos enterrados na Hipótese 1. Nota-se que, para secções mais elevadas, a ligação da blindagem à terra nas duas extremidades do cabo contribui para uma diminuição da corrente máxima admissível comparativamente com a ligação à terra apenas numa extremidade. Contudo, convém referir que estando a blindagem à terra ligada apenas numa extremidade existe uma tensão induzida na blindagem que aumenta com o comprimento do cabo como indicado na secção 3.6.

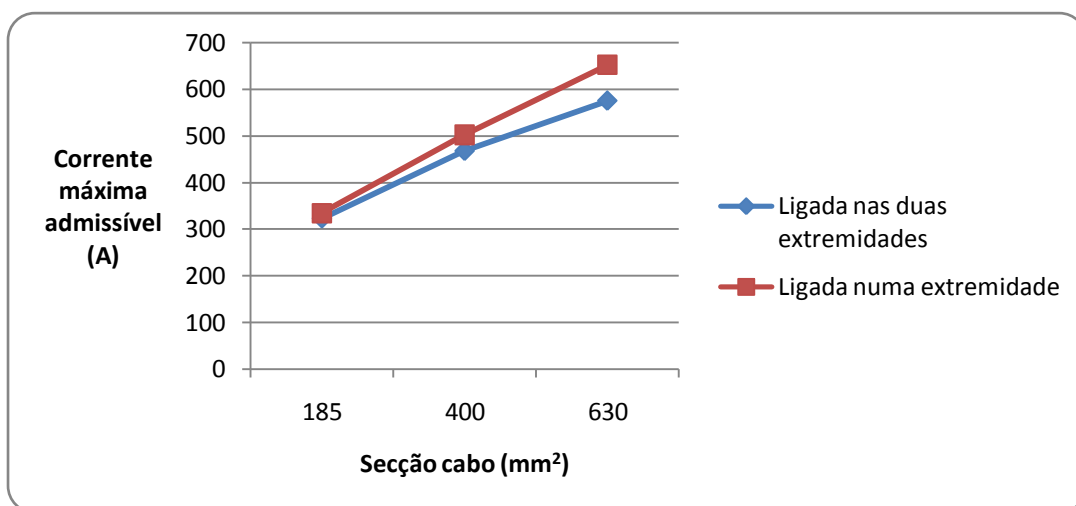


Figura 6.3 – Corrente máxima admissível em função da secção e ligação da blindagem.

Outro dos aspectos que contribui para a diminuição da corrente máxima admissível em cabos enterrados é a resistividade térmica do solo. Na Figura 6.4 verifica-se que a corrente máxima admissível diminui com o aumento da resistividade térmica do solo. Fazendo uma comparação com a Tabela 4.3 verifica-se que solos em estado seco, ou seja, com resistividades térmicas mais elevadas contribuem para correntes máximas admissíveis mais baixas.

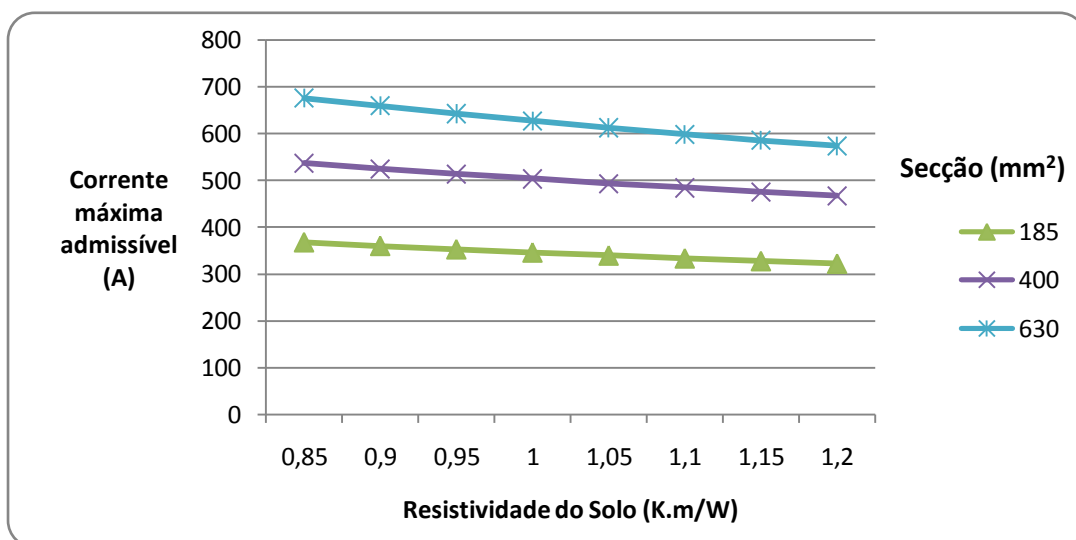


Figura 6.4 - Corrente máxima admissível em função da resistividade térmica do solo.

Caso os cabos estejam ao ar livre, um dos factores que contribui para a diminuição da corrente máxima admissível é o aumento da temperatura ambiente. Na Figura 6.5 observa-se o efeito da variação da temperatura ambiente na corrente máxima admissível. Esta diminuição da corrente máxima admissível deve-se ao facto do aumento da temperatura ambiente originar quedas de temperatura mais baixas nas bainhas do cabo originando assim uma diminuição da corrente máxima admissível.

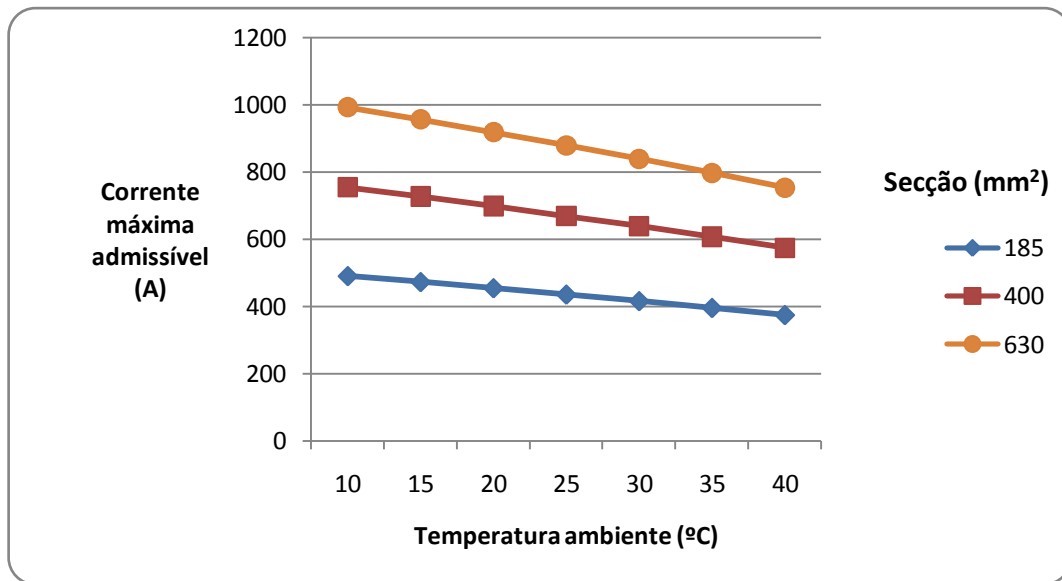


Figura 6.5 - Corrente máxima admissível em função da temperatura ambiente.

6.4.3. - Resistências

Na Tabela 6.9 e na Tabela 6.10 pode-se analisar o efeito da temperatura de operação indicada na Tabela 6.7 e na Tabela 6.8 nas resistências da alma condutora e da blindagem. Pode-se observar que o valor da resistência na alma condutora à temperatura de operação na maioria dos casos mantém-se igual variando apenas quando a temperatura de operação da alma é diferente de 90°C. No caso da blindagem, a temperatura de operação varia em todos os casos, variando assim também o valor da resistência à temperatura de operação.

Comparando a resistência das blindagens em cabos ao ar livre com cabos enterrados, verifica-se que a resistência à temperatura de operação é mais baixa para cabos ao ar livre devido à temperatura de operação da blindagem ser mais baixa em cabos ao ar livre. A temperatura de operação da blindagem é mais baixa ao ar livre devido à resistência térmica do meio envolvente ser mais baixa nestes casos, o que, para a mesma temperatura ambiente nos dois casos leva a quedas de temperatura maiores entre bainhas de cabos ao ar livre, diminuindo assim a temperatura de operação da blindagem.

O valor da resistência também tem um impacto forte na corrente máxima admissível, uma vez que, mantendo a mesma corrente na alma condutora e diminuindo a resistência com o aumento da secção, as perdas por efeito de Joule na alma também diminuem, diminuindo a potência calorífica que atravessa o cabo. Assim aumenta-se a corrente na alma até a temperatura desta em regime permanente atingir novamente a temperatura máxima de operação, aumentando as perdas por efeito de Joule mas elevando, desta maneira, o valor da corrente máxima admissível.

Tabela 6.9 – Resistências em cabos enterrados.

Cabo	Hip.	Blind.	Resistência Alma (ohm/km)			Resistência Blindagem (ohm/km)	
			DC 20ºC	DC Temp. Op.	AC	DC 20ºC	DC Temp. Op.
LXHIOLE 1x185	1 (calor)	LDL	0,164	0,21026	0,21074	0,11625	0,14242
	2 (frio)			0,21026	0,21074		0,13960
	3 (calor)			0,20980	0,21028		0,14371
	4 (frio)			0,21026	0,21074		0,14179
	1 (calor)	LUL		0,21026	0,21074		0,14200
	2 (frio)			0,21026	0,21074		0,13900
	3 (calor)			0,21026	0,21074		0,14366
	4 (frio)			0,21026	0,21074		0,14130
LXHIOLE 1x400	1 (calor)	LDL	0,0778	0,09975	0,10087	0,11625	0,14376
	2 (frio)			0,09975	0,10087		0,14148
	3 (calor)			0,09871	0,09985		0,14371
	4 (frio)			0,09975	0,10087		0,14332
	1 (calor)	LUL		0,09975	0,10087		0,14307
	2 (frio)			0,09975	0,10087		0,14049
	3 (calor)			0,09909	0,10022		0,14368
	4 (frio)			0,09975	0,10087		0,14256
LXHIOLE 1x630	1 (calor)	LDL	0,0469	0,05968	0,06172	0,11624	0,14368
	2 (frio)			0,06013	0,06216		0,14275
	3 (calor)			0,05920	0,06126		0,14366
	4 (frio)			0,05983	0,06186		0,14368
	1 (calor)	LUL		0,06013	0,06216		0,14377
	2 (frio)			0,06013	0,06216		0,14147
	3 (calor)			0,05947	0,06151		0,14364
	4 (frio)			0,06013	0,06216		0,14336

Tabela 6.10 - Resistências em cabos ao ar livre.

Cabo	Hip.	Blind.	Resistência Alma (ohm/km)			Resistência Blindagem (ohm/km)	
			DC 20ºC	DC Temp. Op.	AC		
LXHIOLE 1x185	1 (calor)	LDL	0,164	0,21026	0,21074	0,11625	0,13857
	2 (frio)			0,21026	0,21074		0,13671
	1 (calor)	LUL		0,21026	0,21074		0,13805
	2 (frio)			0,21026	0,21074		0,13609
LXHIOLE 1x400	1 (calor)	LDL	0,0778	0,09975	0,10087	0,11625	0,13989
	2 (frio)			0,09975	0,10087		0,13827
	1 (calor)	LUL		0,09975	0,10087		0,13893
	2 (frio)			0,09975	0,10087		0,13712
LXHIOLE 1x630	1 (calor)	LDL	0,0469	0,06013	0,06216	0,11624	0,14088
	2 (frio)			0,06013	0,06216		0,13945
	1 (calor)	LUL		0,06013	0,06216		0,13953
	2 (frio)			0,06013	0,06215		0,13782

6.4.4. - Correntes de curto-circuito

Na Tabela 6.11 pode-se observar que o valor das correntes de curto-circuito máximas aumenta na alma condutora com o aumento da secção desta. A corrente de curto-circuito na blindagem não sofre alterações uma vez que a secção e a resistência da blindagem se mantêm aproximadamente constantes nos três casos. De salientar que neste caso se calculou a corrente de curto-circuito máxima para uma temperatura inicial de 80°C e uma duração de 0,6 segundos, podendo a temperatura final da alma condutora atingir 250°C durante um máximo de 5 segundos, como referido na subsecção 6.2.2.1.

Tabela 6.11 - Correntes de curto-circuito em função da secção.

Cabo	Corrente Curto-circuito Alma (A) duração 0,6s		Corrente Curto-circuito Blindagem (A) duração 0,6s	
	Processo adiabático	Processo não adiabático	Processo adiabático	Processo não adiabático
LXHIOLE 1x185	23434	23818	22893	25257
LXHIOLE 1x400	50668	51231	22893	25257
LXHIOLE 1x630	79802	80508	22896	25599

Conforme descrito na secção 4.6, a corrente de curto-circuito máxima depende da duração do curto-circuito e da temperatura inicial da alma condutora. Na Figura 6.6 ilustra-se esta variação para o cabo com secção de 400 mm² e, nota-se que a corrente de curto-circuito máxima diminui com o aumento da duração e com o aumento da temperatura inicial a que se dá o curto-circuito.

No caso da corrente de curto-circuito máxima da blindagem ilustrada na Figura 6.7, verifica-se o mesmo efeito mas para correntes de curto-circuito máximas menores que as da alma, uma vez que, neste caso, a secção da blindagem é menor que a da alma condutora.

De acordo com a Tabela 6.11, no caso do cabo com secção de 185 mm², a corrente de curto-circuito máxima para um processo adiabático na alma condutora é superior à da blindagem. Já no processo não adiabático verifica-se o contrário. Esta situação deve-se ao facto da alma condutora estar apenas envolvida pela camada isolante enquanto que a blindagem, com uma secção de 149 mm² próxima da alma, encontra-se envolvida pela camada isolante e pela bainha exterior. Assim, neste caso o factor de processo não adiabático para a blindagem é superior ao da alma condutora o que origina a uma corrente de curto-circuito mais elevada no processo não adiabático.

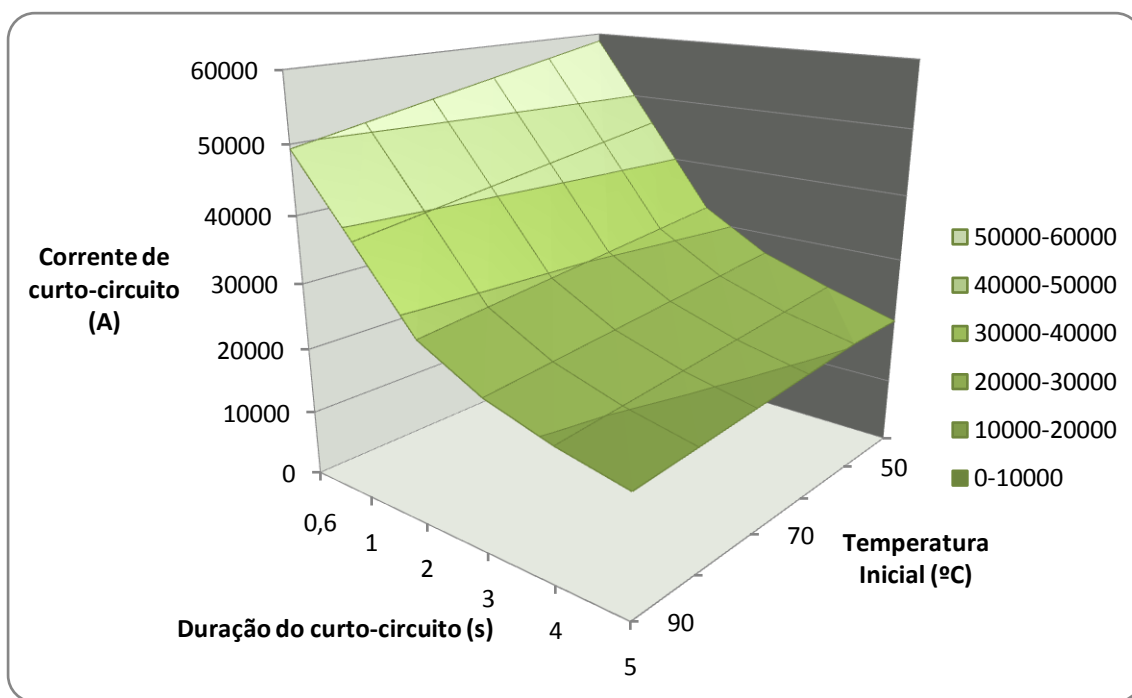


Figura 6.6 - Corrente de curto-circuito máxima na alma condutora em função da duração e da temperatura inicial da alma condutora.

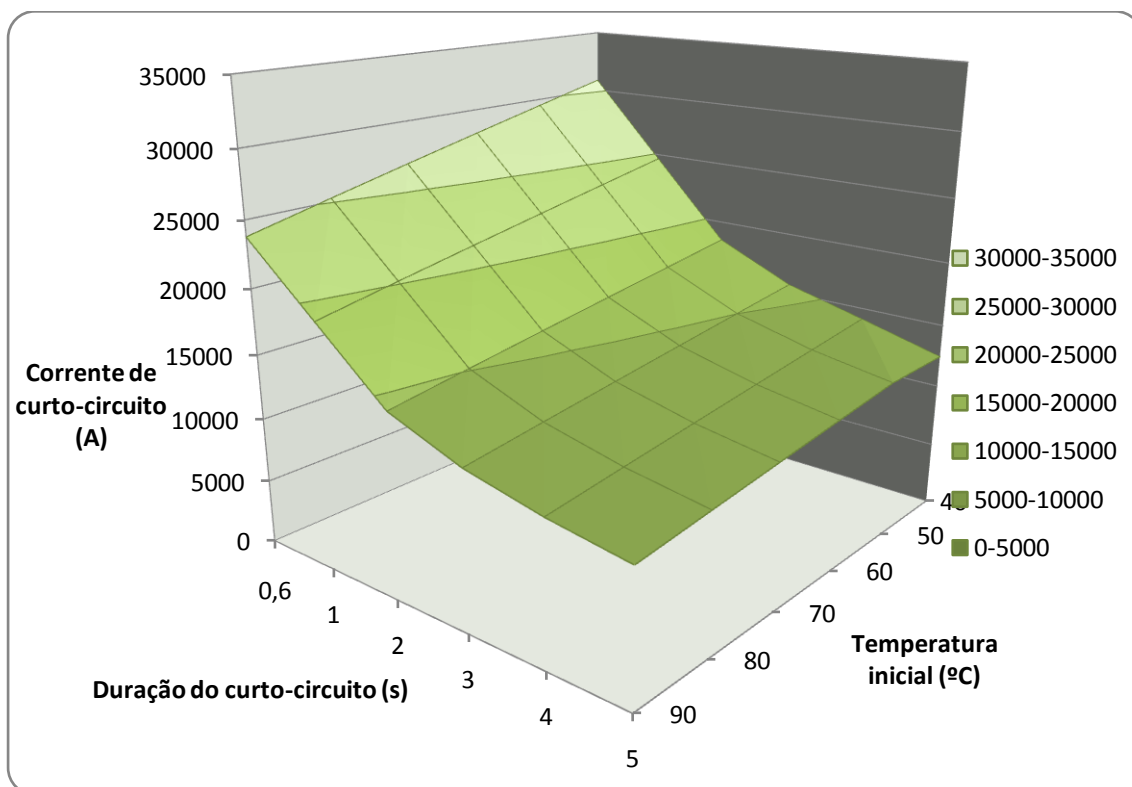


Figura 6.7 - Corrente de curto-circuito máxima na blindagem em função da duração e da temperatura inicial da alma condutora.

6.4.5. - Sobrecargas

Para a análise das sobrecargas usou-se o cabo com secção de 400 mm² e fez-se o estudo para cabos enterrados e ao ar livre. Na análise das sobrecargas teve-se em conta o tempo de sobrecarga e a percentagem da corrente máxima admissível ou carga inicial em regime permanente a que se aplica a sobrecarga. Considerou-se ainda neste caso que a temperatura de sobrecarga máxima da camada isolante é igual a 130°C.

Nestas condições e de acordo com a Tabela 6.12 e com a Tabela 6.13, verifica-se que para as hipóteses de estudo que originam correntes máximas admissíveis mais elevadas, obtêm-se correntes de sobrecarga mais elevadas. Nota-se também na Figura 6.8 que a corrente de sobrecarga para cabos enterrados diminui com o aumento da sua duração e com o aumento da carga inicial.

Tabela 6.12 - Correntes de sobrecarga para cabos enterrados.

Cabo	Hipótese	Sobrecarga Máxima Corrente (A)		Duração				
				30m	1h	2h	3h	4h
LXHIOLE 1x400	1 (calor)	li/lm	25%	1067	905	822	790	770
			50%	1020	871	794	765	746
			75%	927	802	739	715	700
			100%	744	673	638	625	616
	2 (frio)	li/lm	25%	1203	1013	922	890	869
			50%	1155	980	897	867	848
			75%	1058	913	845	821	806
			100%	866	785	748	736	728
	3 (calor)	li/lm	25%	1065	899	805	763	736
			50%	1015	861	773	735	709
			75%	916	785	711	679	658
			100%	721	639	594	575	562
	4 (frio)	li/lm	25%	1201	1007	906	863	835
			50%	1148	968	874	835	809
			75%	1039	888	810	778	757
			100%	818	730	687	669	657

Tabela 6.13 - Correntes de sobrecargas para cabos ao ar livre.

Cabo	Hipótese	Sobrecarga Máxima Corrente (A)		Duração				
				30m	1h	2h	3h	4h
LXHIOLE 1x400	1 (calor)	li/lm	25%	1665	1345	1109	1011	960
			50%	1584	1288	1071	981	935
			75%	1424	1176	998	925	889
			100%	1114	967	866	826	807
	2 (frio)	li/lm	25%	1667	1348	1114	1018	968
			50%	1592	1297	1082	994	950
			75%	1442	1195	1020	950	914
			100%	1146	1003	907	870	852

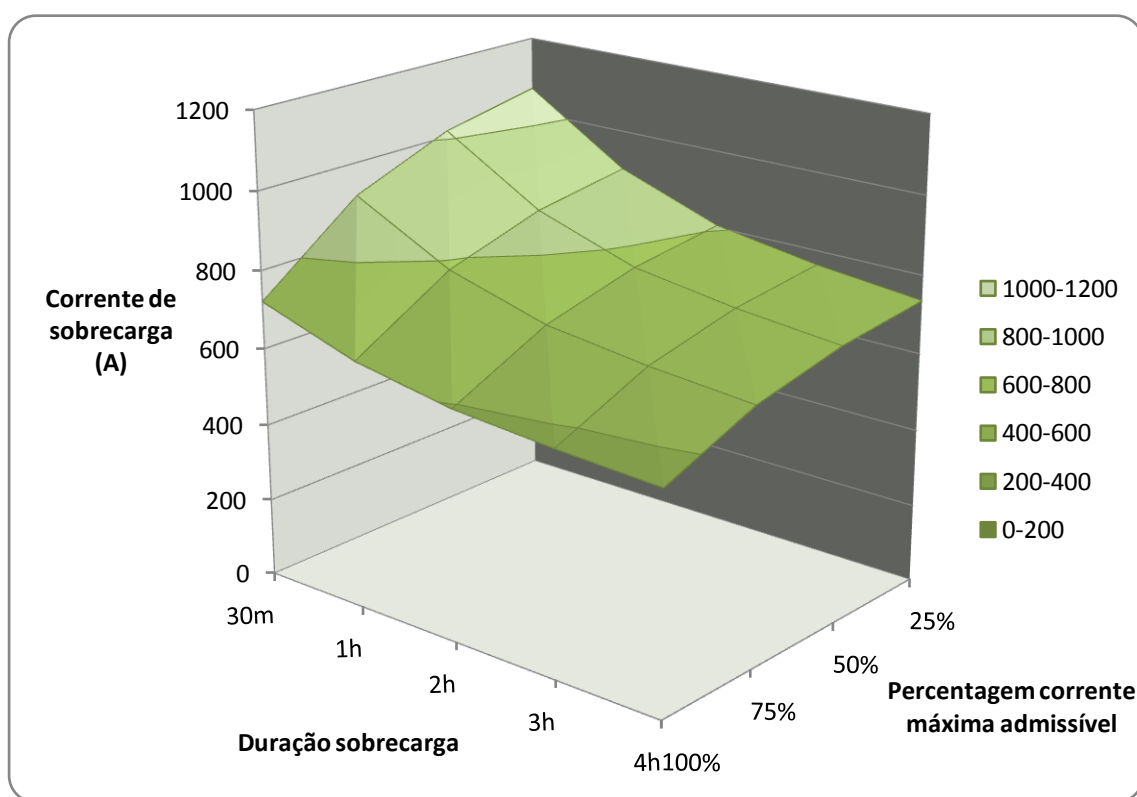


Figura 6.8 - Corrente de sobrecarga para cabo enterrado em função da duração da sobrecarga e carga inicial.

6.5. - Selecção do cabo

A selecção do cabo é realizada tendo em conta vários factores. É necessário ter em conta o local em que o cabo será instalado e a carga que se lhe vai aplicar. A título de exemplo, admitamos que se pretende-se instalar dois grupos de cabos enterrados na mesma vala e aplicar uma carga de 40 MVA a cada grupo de cabos. Para fazer a escolha do cabo recorre-se à Tabela 6.7 referente às correntes máximas admissíveis para cabos enterrados e selecciona-se o cabo

com secção suficiente para perfazer os 40 MVA, aproximadamente 384 amperes por fase à tensão de 60 kV.

Para seleccionar o cabo a utilizar considerou-se o pior caso analisado correspondente ao cabo relativo à Hipótese 3 em período de calor com a ligação da blindagem à terra nas duas extremidades do cabo. Esta Hipótese corresponde assim ao cabo LXHIOLE 1x400 com uma corrente máxima admissível de 387 A. Para este cabo e como se verifica na Figura 6.3, a corrente máxima admissível não diminui muito tendo em conta o tipo de ligação da blindagem à terra.

Capítulo 7

Conclusões e perspectivas de desenvolvimento

7.1. - Conclusões principais

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões que têm como base o trabalho desenvolvido sobre a temática dos cabos isolados com materiais dieléctricos extrudidos. Foi desenvolvida uma aplicação para o cálculo de parâmetros eléctricos e térmicos deste tipo de cabos e com base nos resultados obtidos através da aplicação, são discutidas as principais conclusões obtidas tendo em consideração os casos de estudo analisados.

No final do capítulo são apresentados alguns aspectos que não foram referidos ao longo do trabalho que podem ser de especial interesse para o desenvolvimento de um trabalho mais intenso sobre o tema estudado.

Durante o desenvolvimento deste trabalho teve-se em especial consideração o principal objectivo a ser atingido, ou seja, a implementação de uma aplicação informática capaz de calcular os parâmetros eléctricos e térmicos de cabos isolados com materiais dieléctricos extrudidos tendo em conta as condições de instalação. Procurou-se detalhar todo o processo de cálculo dos vários parâmetros bem como a implementação deste processo na aplicação através de vários fluxogramas.

Depois de analisado todo este processo e implementada a aplicação referida procurou-se comparar os resultados obtidos com dois catálogos de fabricantes, obtendo-se resultados muito próximos aos referidos nos catálogos da Solidal (2005) e da ABB (2008).

Posteriormente ao desenvolvimento e teste da aplicação, efectuou-se uma análise de resultados obtidos com recurso à aplicação e procurou-se analisar a influência de vários factores no dimensionamento de cabos. Estes factores incluíram os materiais usados nos cabos, tipo de

instalação, temperatura ambiente, características do solo e, duração da sobrecarga e do curto-circuito.

Verificou-se que a corrente máxima admissível ou capacidade de transporte de um cabo depende de diversos factores. Obtêm-se valores máximos para a corrente máxima admissível para cabos expostos ao ar livre protegidos da radiação solar, obtendo resistências térmicas do meio envolvente menores neste tipo de instalação. Em contrapartida, obtêm-se valores menores para a corrente máxima admissível para cabos enterrados em grupos uma vez que, neste caso, se obtêm resistências térmicas do meio envolvente mais elevadas devido à resistividade térmica do solo e ao aquecimento mútuo do outro grupo de cabos instalado na mesma vala.

Outro factor que influencia o valor da corrente máxima admissível é o tipo de ligação da blindagem à terra. Conclui-se que blindagens ligadas nas duas extremidades do cabo conduzem a correntes máximas admissíveis mais baixas. Esta situação é devida às correntes induzidas na blindagem originarem perdas por efeito de Joule, introduzindo assim uma fonte de calor na blindagem que influencia a propagação de calor pelas várias bainhas existentes no cabo. Verificou-se ainda que este efeito tem mais relevância para secções mais elevadas. Por outro, lado blindagens ligadas apenas numa extremidade originam correntes máximas admissíveis mais elevadas mas conduzem a tensões induzidas na blindagem que aumentam com o comprimento do cabo diminuindo a fiabilidade do isolamento.

Verificou-se ainda que o aumento da resistividade térmica dos solos, ou seja, solos mais secos, originam correntes máximas admissíveis mais baixas.

Para cabos instalados ao ar livre protegidos da radiação solar verificou-se que o principal factor que contribui para a diminuição da corrente máxima admissível é o aumento da temperatura ambiente.

Na análise do valor da corrente de curto-circuito verificou-se que o aumento da sua duração e da temperatura da alma condutora antes do curto-circuito influenciam a corrente máxima de curto-circuito originando a sua diminuição.

No caso das sobrecargas verificou-se que o aumento da sua duração e da carga aplicada inicialmente ao cabo diminui a corrente de sobrecarga a aplicar.

Por fim, concluiu-se que para se realizar a correcta escolha do cabo é preciso ter os dados relativos à sua instalação, bem como, a carga máxima a aplicar em regime permanente de maneira a escolher a secção mais adequada para que o cabo fique a operar dentro dos seus limites normais de funcionamento.

7.2. - Perspectivas de desenvolvimento

Neste trabalho para além de se ter desenvolvido uma aplicação computacional e se terem comparado os seus resultados, pode-se estender o estudo a outras vertentes do tema não previstas inicialmente. Partindo da aplicação desenvolvida, é possível desenvolver outros estudos associados aos parâmetros eléctricos e térmicos de cabos AT. Um exemplo corresponde

ao estudo da variação de frequência do sistema e análise desta variação nos vários parâmetros dos cabos.

Quanto ao desenvolvimento futuro da própria aplicação pode-se implementar um módulo de cálculo que efectue uma análise técnico-económica para determinar a secção mais económica. Por outro lado, um dos aspectos que não se encontra normalizado corresponde à instalação de cabos ao ar livre em grupos. Por esta razão, considera-se necessário a implementação de um modelo de cálculo para a análise destes casos.

A terminar considera-se que foram atingidos os objectivos propostos inicialmente e que a aplicação desenvolvida poderá contribuir um auxiliar importante em ambiente fabril.

Bibliografia

ABB, Underground cables (cables and accessories), <http://www.abb.pt/product/db0003db002618/c12573e7003302adc1256bdc002351d3.aspx>,
acedido em 07/04/2008, ABB 2008.

Alcatel, Cables de Alta Tension, Guia técnico.

EDP. DMA-C33-281/N: Condutores isolados e seus acessórios para redes: Cabos isolados de alta tensão: Características e ensaios, 4ª edição, Março 2008.

Heinhold, L. Power Cables and their Application. SIEMENS Part 1, 3rd edition 1990..

International Electrotechnical Commission. IEC 60228: Conductors of insulated cables, Edition 3.0 2004-11.

International Electrotechnical Commission. IEC 949: Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects, First edition 1988.

International Electrotechnical Commission. IEC 60287-1-1: Electric Cables - Calculation of the current rating - Part 1-1 : Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses - General, Edition 2.0 2006-12.

International Electrotechnical Commission. IEC 60287-2-1: Electric Cables - Calculation of the current rating - Part 2-1 : Thermal resistance, Edition 1.2 2006-05.

International Electrotechnical Commission. IEC 60840: Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltage above 30KV ($U_m=36KV$) up to 150KV ($U_m=170KV$) - Test methods and requirements, Third Edition 2004-04.

International Electrotechnical Commission. IEC 60853-2: Calculation of cyclic and emergency current rating of cables – Part 2: Cyclic rating of cables greater than 18/30 kV and emergency ratings for cables of all voltages, 2008.

International Electrotechnical Commission. IEC 61443: Short-circuit temperature limits of electric cables with rated voltages above 30 KV ($U_m=36KV$), 2008.

Parise G.; Rubino G. A Comparasion of the ANSI/IEEE and the CENELEC/IEC Aproaches to Overload Protection of Insulated Power Cables. IEEE Transactions on Applications, Vol. 33, NO 5, September/October 1997.

Santos, J. N. Condutores e Cabos de Energia. FEUP: Novembro 2005.

Solidal, Guia Técnico 9ª Edição. Outubro 2005.

Vale, A.A.; Moura, A.M. Cabos Subterrâneos. FEUP: Secção de P.T.D.E, 1975.

Anexo A

Tabela A.1 - Resistências máximas da alma condutora.

Secção (mm ²)	Classe 1 (ohm/km)		Classe 2 (ohm/km)		Classe 5 (ohm/km)	Classe 6 (ohm/km)
	Cobre	Alumínio	Cobre	Alumínio	Cobre	Cobre
10	1,83	3,08	1,83	3,08	1,91	1,91
16	1,15	1,91	1,15	1,91	1,21	1,21
25	0,727	1,2	0,727	1,2	0,78	0,78
35	0,524	0,868	0,524	0,868	0,554	0,554
50	0,387	0,641	0,387	0,641	0,386	0,386
70	0,268	0,443	0,268	0,443	0,272	0,272
95	0,193	0,32	0,193	0,32	0,206	0,206
120	0,153	0,253	0,153	0,253	0,161	0,161
150	0,124	0,206	0,124	0,206	0,129	0,129
185	0,101	0,164	0,0991	0,164	0,106	0,106
240	0,0775	0,125	0,0754	0,125	0,0801	0,0801
300	0,062	0,1	0,0601	0,1	0,0641	0,0641
400	0,0465	0,0778	0,047	0,0778	0,0486	-
500	-	0,0605	0,0366	0,0605	0,0384	-
630	-	0,0469	0,0221	0,0469	0,0287	-
800	-	0,0367	0,0221	0,0367	-	-
1000	-	0,0291	0,0176	0,0291	-	-
1200	-	0,0247	0,0151	0,0247	-	-
1400	-	-	0,0129	0,0212	-	-
1600	-	-	0,0113	0,0186	-	-
1800	-	-	0,0101	0,0165	-	-
2000	-	-	0,009	0,0149	-	-
2500	-	-	0,0072	0,0127	-	-

Anexo B

Tabela B.1 - Características dos materiais da camada isolante.

Isolante	Perm. Relativa	Fac. Perdas	Temp. Reg. Perm. (°C)	Temp. Reg. CC (°C)	Res. Term. (K.m/W)	U0 (kV)	Unid. Vol. Calor (J/K.m ³)
HDPE	2,3	0,001	80	180	3,5	127	2400000
LDPE	2,3	0,001	70	150	3,5	127	2400000
XLPE	2,5	0,001	90	250	3,5	127	2400000

