

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Cabos Eléctricos de Alta Tensão - Optimização das
Técnicas de Instalação para Redução das Perdas**

João Carlos Dias da Silva

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

Orientador: Prof. Dr. Helder Filipe Duarte Leite

Porto, Junho 2011

Resumo

As expansões que se têm verificado nos grandes centros urbanos nos últimos anos tiveram como consequência o aumento do número de instalações de redes eléctricas subterrâneas de Média e Alta Tensão. Este aumento deve-se principalmente às restrições com que se deparam cada vez mais as linhas aéreas, especialmente como consequência da forte rejeição social.

Actualmente as sociedades vivem num processo de reeducação para um uso racional e eficaz da energia nas suas casas, trabalho e locais públicos. Mas até ao momento em muitos países incluindo Portugal, poucas são as preocupações com a eficácia no transporte de energia até aos consumidores, a nível das redes subterrâneas. Surge assim, a necessidade de conhecer as diversas técnicas de instalação de cabos eléctricos de alta tensão de forma a otimizar o seu design e exploração com a finalidade de maximizar a sua capacidade de transporte.

A solução adoptada e descrita neste trabalho passou pela criação de um programa, com o nome de Cabcalc2.

O Cabcalc2 proporciona duas metodologias de cálculo. A primeira metodologia consiste no dimensionamento de cabos eléctricos para Média e Alta Tensão. A segunda metodologia consiste em encontrar um cabo e a solução técnica para a sua instalação, mediante a potência que um cliente pretenda transmitir, entre outros parâmetros. O cabo obtido será um dos existentes na base de dados em que são gravados todos os cabos criados e adicionados pela aplicação.

Neste trabalho são descritas as características principais dos cabos de Média e Alta Tensão, as condições de instalação usadas para o cálculo eléctrico e térmico, e seus acessórios. Será apresentado o desenvolvimento do Cabcalc2 e um caso real, com uma análise de resultados através de simulações para várias condições de instalação, de forma a justificar quais as melhores opções técnicas e económicas, tendo em vista a melhor capacidade de transporte de um cabo.

Abstract

The expansion that have been verified in the big urban centres in the last years have caused the rise of the number of underground electric networks of Medium and High tension. This increase is mainly due to the restrictions that the overhead lines face, especially with the consequence of social rejection.

Nowadays societies live in a process of reeducation for the rational and effective use of energy at home work and public places. However until now in many countries, including Portugal, few are the concerns with the effectiveness in the transport of energy until it reaches the consumers, as far as underground networks are concerned. Thus, it is necessary to know the several installation techniques of electrical cables of high tension so as to optimize its design and exploration with the finality of maximizing its transport capacity.

The solution that was adopted and described in this assignment went by the creation of a programmer, named Cabcalc2.

Cabcalc2 proportions two calculus methodologies. The first methodology consists in the design of electrical cables for Medium and High Voltage. The second methodology consists in finding a cable and the technical solution for its installation, having in mind only the potency that the client pretends to transmit. The obtained cable will be one of the existing ones in the database that are saved all the cables that are created and added by the application.

In this assignment the main characteristics of the cables of Medium and High Voltage, the conditions of installation for the calculus and its accessories are described. The development of Cabcalc2 and a real case, with an analysis of the results through simulations for the several installation conditions, will be presented so as to justify the best technical and economical options, bearing in mind the best transport capacity of the cable.

Agradecimentos

Com os melhores agradecimentos ao meu orientador Professor Doutor Hélder Filipe Duarte Leite, pelo tempo dispensado, pela forma como me ajudou a encarar os problemas, pelas críticas e conselhos que nos momentos mais difíceis ajudaram-me a manter confiante e a encontrar um caminho para a execução do trabalho.

Ao Engenheiro Álvaro Quintela e à Engenheira Marcela Teixeira pela oportunidade dada ao realizar o trabalho de dissertação a nível empresarial na Cabelte SA, possibilitando-me uma experiência que será uma mais valia para trabalhos futuros.

Aproveito para agradecer a todos os meus amigos, que sempre partilharam uma palavra amiga, uma história, a alegria de um bom riso, a sua opinião em momentos decisivos.

Um profundo agradecimento à minha namorada Sara, pelo apoio e presença ao longo do meu curso, em todos os momentos difíceis.

Aos meus pais, irmão e avó agradeço tudo o que me proporcionaram ao longo da vida e as oportunidades dadas por ter chegado até aqui.

Índice

Resumo	iii
Abstract	v
Agradecimentos	vii
Índice	ix
Lista de figuras	xiii
Lista de tabelas	xvii
Abreviaturas e Símbolos	xix
Capítulo 1	23
Introdução	23
1.1 - Redes Eléctricas Subterrâneas de Média e Alta Tensão	23
1.2 - Motivação	24
1.3 - Desafios Técnicos Associados às Redes Eléctricas Subterrâneas de Média e Alta Tensão	24
1.4 - Estrutura da Dissertação.....	25
Capítulo 2.....	27
Sistemas de Cabos Isolados de Média e Alta Tensão	27
2.1- Introdução	27
2.2- Constituintes de um Cabo Isolado	28
2.3- Técnicas de Colocação dos Cabos	36
2.4- Acessórios: Junções, Terminais, Caixas de Ligação e Limitadores de Tensão da Blindagem (SVL).....	39
Capítulo 3.....	47
Cabo Eléctricos Subterrâneos: Técnicas de Ligação da Blindagem	47
3.1- Princípios Gerais de Ligação das Blindagens.....	47
a) Sistemas de Ligação Rígida à Terra	48
b) Sistemas de Ligação Especial à Terra.....	50
3.1.1- Sistemas de Ponto Único de Ligação à Terra	51
i) Tensão Induzida nas Blindagens	51
ii) Condutor de Continuidade de Terra	52
iii) Sistema de Ponto Único de Ligação à Terra: Configurações Possíveis.....	53
3.1.2- Sistemas de Ligação Cruzada de Blindagens.....	55

3.1.3- Sistemas Mistos de Ligação Especial à Terra	62
3.2- Selecção de Sistemas com Ligação Especial de Blindagens	62
Capítulo 4	65
Cabos Subterrâneos: Cálculo Eléctrico.....	65
4.1- Resistência.....	65
4.2- Perdas Óhmicas nos Condutores.....	68
4.3- Capacidade e Perdas Dieléctricas nos Isolamentos	68
4.4- Indutância Linear por Unidade de Comprimento	69
4.5- Indutância Mútua entre a Alma e a Blindagem	70
4.6- Tensão Induzida na Blindagem	71
4.7- Factor de Perdas da Blindagem	73
4.8- Factor de Perdas da Armação	78
4.8.1- Armaduras ou Reforços Não Magnéticos.....	78
4.8.2- Armadura de Aço, Ligada à Blindagem nos Dois Lados.....	78
4.9- Queda de Tensão num Cabo	80
4.10- Potência Aparente e Potência Activa	80
Capítulo 5	83
Cálculo Térmico	83
5.1- Dimensionamento Térmico.....	83
5.2- Resistência Térmica das Bainhas.....	85
5.3- Resistência Térmica do Meio Envolvente	86
5.3.1- Cabos Enterrados	86
i) Grupos de Cabos Enterrados Afastados com Cargas Iguais.....	87
ii) Grupos de Cabos Enterrados Juntos com Cargas Iguais.....	88
5.3.2- Cabos ao Ar Livre Protegidos da Radiação Solar	90
5.3.3- Cabos Directamente Expostos à Radiação Solar	91
5.3.4- Cabos Entubados ou em Galerias.....	91
i) Resistência Térmica entre a Superfície do Cabo e o Tubo	92
ii) Resistência Térmica do Tubo	92
iii) Resistência Térmica Externa do Tubo ou Galeria	93
5.4- Corrente Máxima Admissível.....	93
5.4.1- Cabos Enterrados Onde Não Ocorre a Secagem do Solo ou Cabos ao Ar Livre Protegidos da Radiação Solar	94
5.4.2- Cabos Enterrados Onde Ocorre a Secagem Parcial do Solo	95
5.4.3- Cabos Enterrados Onde a Secagem do Solo Deve ser Evitada	96
5.4.4- Cabos Directamente Expostos à Radiação Solar	97
Capítulo 6	99
Desenvolvimento da Aplicação	99
6.1- Introdução	99
6.2- Arquitectura da Aplicação Cabcalc2.....	100
6.3- Base de Dados	101
6.4- Interface	101
Capítulo 7	111
Caso de Estudo e Análise de Resultados	111
7.1- Caso de Estudo	111
7.1.1- Resultados Obtidos	113
7.2- Análise de Resultados	117
Capítulo 8	125
Conclusões e Trabalhos Futuros.....	125
8.1- Principais Conclusões	125
8.2- Trabalhos Futuros	126

Referências.....	127
Anexo A	131
Anexo B	135
Correcções e Adaptações da Primeira Metodologia.....	135
Anexo C	137
Fluxograma de Cálculo	137
Anexo D	165
Código do programa.....	165
D.1- Form Solução Técnica	165
D.2- Form Tubo	220
D.3- Form Help	223

Lista de figuras

Figura 2.1 - Constituintes de um cabo isolado de Alta Tensão [4].....	28
Figura 2.2 - Cabo isolado de Alta Tensão com isolamento de papel impregnado [5]	31
Figura 2.3 - Cabo isolado de Alta Tensão com isolamento seco [10]	32
Figura 2.4 - Blindagens de cabos isolados de Alta Tensão [10].....	34
Figura 2.5 - Bainhas externas de cabos isolados de Alta Tensão [13]	35
Figura 2.6 - Colocação directamente no solo [15].....	37
Figura 2.7 - Colocação de cabos isolados em galeria [15].....	38
Figura 2.8 - Junções [17]	40
Figura 2.9 - Junção termoretráctil [18]	41
Figura 2.10 - Junção contráctil a frio [19].....	41
Figura 2.11 - Terminal para comutação de gás isolado (GIS) e transformador (TRF) [17]	42
Figura 2.12 - Terminal de porcelana [17].....	43
Figura 2.13 - Terminal termoretráctil [18]	43
Figura 2.14 - Terminal pré-fabricado [17]	44
Figura 2.15 - Caixa de ligação [20]	44
Figura 2.16 - Limitadores de tensão (SLV) [23]	45
Figura 2.17 - Caixa de ligação com limitadores de tensão [20]	45
Figura 3.1 - Esquema de ligação rígida à terra [16].....	49
Figura 3.2 - Circuito com transposição [16]	49
Figura 3.3 - Tensão induzida (à terra) para um condutor com uma corrente de 1000A [21] ...	51
Figura 3.4 - Sistema de ponto único (ligação à terra num extremo) [16]	53

Figura 3.5 - Sistema de ponto único (ligação à terra num ponto intermédio) [16]	53
Figura 3.6 - Sistema de ponto único (para comprimentos grandes) [16]	54
Figura 3.7 - Sistema de ponto único com transposição (para comprimentos grandes) [16]	54
Figura 3.8 - Sistema de ligação cruzada (1 secção maior, 3 secções menores) [16].....	55
Figura 3.9 - Tensões induzidas nas três fases [20]	56
Figura 3.10 - Sistema de ligação cruzada com transposição (1 secção maior, 3 secções menores) [16].....	56
Figura 3.11 - Sistema de ligação cruzada seccionada (3 secções maiores, 9 secções menores) [16].....	58
Figura 3.12 - Sistema de ligação cruzada seccionada modificada tipo 1 [16]	59
Figura 3.13 - Sistema de ligação cruzada seccionada modificada tipo 2	60
Figura 3.14 - Sistema de ligação cruzada contínua [16]	61
Figura 3.15 - Sistemas mistos [16]	62
Figura 4.1 - Disposição dos cabos em trevo [12]	69
Figura 4.2 - Disposição dos cabos em esteira [12]	70
Figura 5.1 - Lei térmica [12].....	83
Figura 5.2 - Relação entre circuito eléctrico e térmico [29]	84
Figura 5.3 - Método das imagens para determinação da resistência térmica [30]	87
Figura 6.1 - Arquitectura da segunda metodologia	100
Figura 6.2 - Dados eléctricos	102
Figura 6.3 - Campo tipo de aplicação	103
Figura 6.4 - Campo resistividades térmicas, número de circuitos e profundidades	103
Figura 6.5 - Campo distância entre grupos.....	103
Figura 6.6 - Campo temperatura ambiente	103
Figura 6.7 - Campo temperatura crítica do solo	103
Figura 6.8 - Campo instalação em tubo.....	104
Figura 6.9 - Campo afastamento entre cabos.....	104
Figura 6.10 - Definição do tubo	105
Figura 6.11 - Natureza da alma condutora	105
Figura 6.12 - Filtro para tensões.....	105
Figura 6.13 - Botão “Calcular”	106

Figura 6.14 - Botão “Resultados possíveis”	106
Figura 6.15 - Grelha com resultados finais (instalações enterradas)	106
Figura 6.16 - Grelha com resultados finais (instalações ao ar)	107
Figura 6.17 - Secção SVL do Cabcalc2	109
Figura 7.1 - Grelha com resultados finais	113
Figura 7.2 - Sistema de ponto único (comprimento 1km) [16]	114
Figura 7.3 - Sistema de ponto único (comprimento 3km) [16]	114
Figura 7.4 - Sistema de ligação cruzada seccionada modificada (comprimento 1,5km) [16].	115
Figura 7.5 - Sistema de ligação cruzada seccionada modificada (comprimento 2119m) [16]	116
Figura 7.6 - Sistema de ligação cruzada (comprimento 3km) [16]	116
Figura 7.7 - Sistema de ligação cruzada seccionada (comprimento 3km) [16]	117
Figura 7.8 - Corrente máxima admissível em função da profundidade de instalação	119
Figura 7.9 - Corrente máxima admissível em função da resistividade térmica do solo	120
Figura 7.10 - Corrente máxima admissível em função do afastamento entre cabos	121
Figura 7.11 - Corrente máxima admissível em função da temperatura ambiente	122
Figura 7.12 - Corrente máxima admissível em função da distância entre grupos	123

Lista de tabelas

Tabela 4.1 - Coeficientes de efeito pelicular e de proximidade [3].....	67
Tabela 4.2 - Factores de perdas dieléctricas para alta tensão [3]	69
Tabela 6.1 - Tabelas usadas na segunda metodologia	101
Tabela 7.1 - Dados do cliente	111
Tabela 7.2 - Dados do sistema de ponto único para o cabo XHIOLV 1X500/250 36/60 kV	114
Tabela 7.3 - Dados do sistema de ligação cruzada de blindagens para o cabo XHIOLV 1X500/250 36/60 kV	115
Tabela 7.4 - Condições de instalação caso 1	118
Tabela 7.5 - Condições de instalação caso 2	119
Tabela 7.6 - Condições de instalação caso 3	120
Tabela 7.7 - Condições de instalação caso 4	121
Tabela 7.8 - Condições de instalação caso 5	122

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

SVL *Sheath Voltage Limiter*

Lista de símbolos

a	Distância entre eixos dos cabos [mm];
α_{20}	Coeficiente de temperatura a 20°C [1/K];
B	Ângulo entre o eixo do condutor da armadura e o eixo do cabo (ver 4.8.2);
C	Capacidade por unidade de comprimento [F/m];
d	Diâmetro médio da blindagem [mm];
d_A	Diâmetro médio da armadura [mm];
d_c	Diâmetro do condutor [mm];
d_f	Diâmetro do condutor de aço [mm];
d_M	Diâmetro médio da blindagem [mm];
d_{pk}	Distância do cabo p ao cabo k;
d'_{pk}	Distância do cabo p à imagem do cabo k;
D_d	Diâmetro interno do tubo [mm];
D_e	Diâmetro externo do cabo [mm];
D_i	Diâmetro externo da isolação (excluindo ecrã) [mm];
D_o	Diâmetro externo do tubo [mm];
D_s	Diâmetro externo da blindagem do cabo [mm];
Δ_1	Coeficiente usado em 4.7;
Δ_2	Coeficiente usado em 4.7;
$\Delta\theta$	Variação da temperatura acima da temperatura ambiente [K];
$\Delta\theta_d$	Diferença de temperatura entre a superfície do cabo ao ar livre e a temperatura ambiente [K];

$\Delta\theta_{ds}$	Factor que têm em conta as perdas dieléctricas e a radiação solar directa para cálculo de T_4^* para cabos ao ar livre [K];
$\Delta\theta_s$	Excesso da temperatura na superfície do cabo acima da temperatura ambiente [K].
E_a	Tensão induzida na blindagem da fase a;
E_b	Tensão induzida na blindagem da fase b;
E_c	Tensão induzida na blindagem da fase c;
f	Frequência da rede em Hertz [Hz];
f_{corr}	Factor de correcção aplicar à resistência térmica externa do tubo ou galeria;
F	Factor que depende da forma e das dimensões do elemento considerado;
φ	Ângulo de desfasamento [rad];
g_s	Coeficiente usado em 4.7;
h	Coeficiente de dissipação de calor [$W/m^2K^{5/4}$];
H_s	Indutância da blindagem [H/m]
H_1	Componente da indutância devido aos condutores de aço [H/m];
H_2	Componente da indutância devido aos condutores de aço [H/m];
H_3	Componente da indutância devido aos condutores de aço [H/m];
I	corrente no condutor por fase [A];
I_b	Corrente no condutor b [A];
K_A	Coeficiente usado em 5.3.2;
k_p	Factor usado no cálculo de X_p ;
k_s	Factor usado no cálculo de X_s ;
L	Distância da superfície ao eixo da cabo [mm], indutância linear para cada um dos condutores de fase de um sistema trifásico [H/km], comprimento do cabo [km];
L_G	Distância da superfície ao centro do tubo [mm];
L_m	Indutância linear média [H/km];
L_M	Indutância mútua entre o condutor e a blindagem [H/km];
λ_0	Coeficiente usado em 4.7;
λ_1	Factor de perdas da blindagem;
λ'_1	Factor de perdas da blindagem causadas pela circulação de correntes na blindagem;
λ''_1	Factor de perdas da blindagem causadas pelas correntes de Foucault;
λ'_{11}	Factor de perdas para o cabo externo com maiores perdas;
λ'_{12}	Factor de perdas para o cabo externo com menores perdas;
λ'_{1m}	Factor de perdas para o cabo do meio;
m	Coeficiente usado em 4.7;
μ_e	Permeabilidade relativa longitudinal nos condutores de aço;
μ_t	Permeabilidade relativa transversal nos condutores de aço;
n_1	Número de cabos de aço;

N	Número de cabos no tubo;
P	Coeficiente definido em 4.7;
Q	Coeficiente definido em 4.7;
r_b	Raio equivalente do tubo de betão [mm];
r_L	Raio da alma condutora de cada um dos condutores [mm];
r_2	Raio exterior da bainha [mm];
r_1	Raio interior da bainha [mm];
R	Resistência do condutor em corrente alternada e à temperatura máxima de serviço [Ω/km];
R_A	Resistência A.C. da armadura por unidade de comprimento à temperatura máxima de operação [Ω/m];
R_e	Resistência A.C. equivalente da blindagem e da armadura em paralelo;
R_0	Resistência dc do condutor a 20°C [Ω/m];
R_s	Resistência da blindagem à temperatura de operação [Ω/km];
R'	Resistência linear à temperatura de operação do cabo [Ω/Km];
ρ	Comprimento da camada do condutor de aço ao longo do cabo [mm];
ρ_c	Resistividade térmica do betão [K.m/W];
ρ_e	Resistividade térmica do terreno em torno do tubo [K.m/W];
ρ_s	Resistividade eléctrica do material da blindagem à temperatura de operação [$\Omega.\text{m}$];
ρ_T	Resistividade térmica do material constituinte [K.m/W];
s	Distância entre eixos dos condutores [mm];
s_2	espaçamento axial entre cabos adjacentes em trevo; para cabos em esteira s_2 é a média geométrica dos espaços [mm];
S	Potência aparente [MVA];
δ	Factor de perdas;
t	Espessura da bainha [mm];
t_s	Espessura da blindagem [mm];
T	Resistência térmica do elemento considerado [K.m/W];
T_1	Resistência térmica da camada isolante [k.m/W];
T_2	Resistência térmica das bainhas não metálicas entre a camada isolante e a armação [k.m/W];
T_3	Resistência térmica da bainha exterior [K.m/W];
T_4	Resistência térmica do meio envolvente do cabo [K.m/W];
T_4^*	Resistência térmica exterior do cabo ao ar livre, ajustada de forma a ter em conta a radiação solar [K.m/W];
T_4'	Resistência térmica do espaço entre a superfície do cabo e a superfície interna do tubo ou galeria [K.m/W];
T_4''	Resistência térmica do tubo ou galeria [K.m/W];
T_4'''	Resistência térmica externa ao tubo ou galeria [K.m/W];

θ	Temperatura de operação da alma condutora (°C);
θ_m	Temperatura média entre o cabo e o tubo [K];
u	ver 5.3.1;
U	Tensão composta [kV], constante usada em 5.3.4;
U_0	Tensão mínima simples [V];
V	Constante usada em 5.3.4;
W	Potência calorífica [W/m ²];
W_a	Perdas na armação [W/km];
W_c	Perdas no condutor [W/m];
W_d	Perdas dieléctricas [W/km];
W_j	Perdas na alma condutora [W/km];
W_s	Perdas na blindagem [W/km];
$W_{(s+A)}$	Perdas totais na blindagem e armadura [W/m];
ω	frequência angular da rede ($2\pi f$);
x	Lados do tubo [mm] (ver 5.3.4);
X	Reactância por unidade de comprimento da blindagem por unidade de comprimento do cabo [Ω /km];
X_L	Reactância indutiva da linha [Ω /km];
X_m	Reactância mútua por unidade de comprimento entre a blindagem de um cabo externo e os outros dois cabos dispostos em esteira [Ω /km];
X_M	Reactância mútua entre a alma e a blindagem [Ω /km];
X_1	Reactância por unidade de comprimento da blindagem [Ω /km];
X_s	Argumento da função de Bessel usado para calcular o efeito pelicular;
X_p	Argumento da função de Bessel usado para calcular o efeito de proximidade;
y	Lado do tubo [mm] (ver 5.3.4);
Y	Constante usada em 5.3.4;
y_p	Factor de efeito de proximidade;
y_s	Factor de efeito pelicular;
γ	Tempo de atraso angular do fluxo magnético longitudinal nos condutores de aço em relação à força magnetizante (ver 4.8.2);

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo apresenta uma breve introdução às redes eléctricas subterrâneas de Média e Alta Tensão, como a motivação e objectivos, para a realização deste trabalho. Assim serão abordados os principais problemas inerentes à instalação de linhas eléctricas subterrâneas e na última secção a estrutura da dissertação.

1.1 - Redes Eléctricas Subterrâneas de Média e Alta Tensão

Em função de diversos factores como, por exemplo, o crescimento demográfico e a maior aquisição de equipamentos eléctricos pelos consumidores, é expectável o aumento dos requisitos de energia eléctrica. Este aumento da procura, exigirá novas instalações de linhas de transmissão com maiores potências e/ou o aumento da potência das linhas de transmissão existentes [1].

Com o aumento do consumo de energia eléctrica nos centros urbanos em todo o mundo, torna-se necessário elevar a tensão da rede de maneira a transportar a energia eléctrica. Assim, a única forma de transportar a energia até centros urbanos é através de cabos subterrâneos, sendo necessário produzir cabos subterrâneos que suportem tais tensões. Esta solução 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 chega aos 500kV [2].

Actualmente, a generalidade dos fabricantes de cabos, disponibilizam nos seus catálogos uma vasta gama de cabos e seus parâmetros eléctricos, como a resistência, indutância, capacidade, entre outros. Outro tipo de informação facultada refere-se à capacidade de transporte do cabo mediante certas características da instalação pré-definidas, como a resistividade do solo, temperatura ambiente e profundidade de instalação. Na maioria dos

casos, a capacidade é medida com a blindagem ligada à terra em ambos os extremos, sendo este o tipo de ligação hoje em dia aplicada correntemente nas redes subterrâneas, não existindo o mínimo interesse em saber se é ou não a melhor opção.

1.2 - Motivação

O uso crescente dos cabos de energia obriga a manter elevados índices de fiabilidade na sua operação, com as menores perdas possíveis. Por isso torna-se necessário conhecer qual a técnica de instalação, que permite obter a maior capacidade de transporte, garantindo a melhor opção técnica e económica.

Actualmente as empresas produtoras de cabos de energia começam a ser solicitadas pelos clientes para oferecerem uma ou várias soluções tipo “chave-na-mão”, pelo que também torna este estudo extremamente importante para no futuro oferecerem boas soluções.

Este trabalho tem como objectivo o estudo das várias técnicas de instalação de cabos isolados com materiais dieléctricos extrudidos de alta tensão (até 150kV), particularmente no que diz respeito aos tipos de ligação das blindagens e bainhas à terra. Definir critérios de decisão, em fase de projecto, do tipo de ligação da blindagem mediante o circuito em questão e assim obter uma solução técnica para um cabo normalizado a instalar.

O estudo deve ser complementado com o desenvolvimento de uma aplicação que permita fornecer ao utilizador o cabo normalizado a instalar mediante a potência e tipo de instalação pretendida, realizando o cálculo dos diversos parâmetros eléctricos associados às várias técnicas de instalação.

1.3 - Desafios Técnicos Associados às Redes Eléctricas Subterrâneas de Média e Alta Tensão

O bom conhecimento dos aspectos técnicos inerentes as linhas subterrâneas de Média e Alta Tensão, exige um estudo prévio exaustivo das várias normas nacionais, europeias e internacionais existentes, relativas aos cabos isolados de alta tensão, como por exemplo, normas relativas ao cálculo da capacidade de transporte de um cabo em regime permanente para cada, consoante as restrições impostas pela instalação, como também normas relativas aos constituintes de cada cabo, como as espessuras de isolamento ou blindagem.

A metodologia empregue habitualmente no cálculo da capacidade de transporte, baseada na Norma IEC 60287-1-1 [3], é a dificuldade de modelizar a diversidade de situações e variáveis que estão em jogo numa instalação eléctrica, tudo isto numa complexidade de expressões, que tornam o cálculo bastante lento e penoso para resolução de forma manual, podendo dar origem a erros de cálculo significativos.

Também o uso dos cabos para as tensões de transmissão cria problemas como tensões induzidas e correntes [4]. Muitos desses problemas (por exemplo, insuficiência e corrosão dos

isoladores da bainha e insuficiência das coberturas) têm sido reconhecidos desde que os cabos de blindagem metálica foram usados, e os fundamentos de cálculo das tensões da blindagem e correntes definidos, há muitos anos. Contudo, o aumento das necessidades da capacidade de transporte e conseqüentemente o aumento das capacidades de curto-circuito dos modernos sistemas de potência, têm acentuado alguns problemas. Assim, serão abordados todos os métodos de ligação da blindagem que melhor se adapta às necessidades da instalação.

1.4 - Estrutura da Dissertação

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

O capítulo 2 resume os sistemas de cabos isolados de Média e Alta Tensão, incidindo sobre os constituintes dos cabos, técnicas de colocação e seus acessórios.

O Capítulo 3 apresenta todas as técnicas de ligação da blindagem existentes, com esquemas de ligação, descrições e suas implicações.

O capítulo 4 analisa os diversos aspectos relativos ao cálculo eléctricos dos cabos, que intervêm na obtenção da capacidade de transporte, como a resistência, indutância, capacidade, perdas óhmicas e dieléctricas, entre outros.

O capítulo 5 resume o cálculo térmico aplicado aos cabos de Média e Alta Tensão, em que é feita uma analogia entre um circuito eléctrico e térmico, e os cálculos necessários para a capacidade de transporte.

O capítulo 6 explica a aplicação desenvolvida, com exemplos ilustrativos do seu funcionamento e interface.

O capítulo 7 apresenta um exemplo onde é usado o Cabcalc2 para tratar de um caso real. Após os resultados obtidos será feita uma análise de resultados, alterando alguns dados da instalação.

Por fim, no oitavo e último capítulo serão apresentadas as principais conclusões da dissertação e perspectivas futuras para o trabalho desenvolvido.

Capítulo 2

Sistemas de Cabos Isolados de Média e Alta Tensão

O capítulo 2 descreve os elementos e particularidades dos sistemas de cabos isolados de Média e Alta Tensão, nomeadamente todos os constituintes de um cabo isolado, as técnicas de colocação (directamente no solo, tubos, ao ar livre ou galeria) e seus acessórios.

2.1- Introdução

Quando um cabo está em circuito aberto, a soma geométrica desta energia é nula devido ao movimento ser desordenado e de forma aleatória. Quando um cabo se encontra em circuito fechado conetado a uma fonte de tensão eléctrica, o movimento dos electrões organiza-se, orientando-se e acelerando como consequência da presença do campo eléctrico, desta forma obtendo-se uma corrente eléctrica [5].

O campo eléctrico fornece assim a energia cinética necessária aos electrões e organiza o seu movimento colectivo. Portanto, a corrente que se obtém será superior quanto maior for a sua organização e a aceleração dos electrões como consequência da aplicação do campo eléctrico [5].

A menor ou maior facilidade que os electrões têm para movimentarem-se dentro de um material, quando são acelerados por um campo eléctrico, permite classificar os materiais em dois grandes grupos.

-Materiais condutores: caracterizam-se, porque com uma pequena quantidade de energia, os electrões mais afastados do núcleo saem das suas órbitas. A agitação térmica presente a temperaturas ordinárias é uma fonte de energia suficiente, de modo que a tais temperaturas os materiais condutores têm dentro de si grande quantidade de electrões desligados dos seus

átomos, que podem ser acelerados facilmente na presença de um campo eléctrico. Normalmente são materiais metálicos, e com muito baixas intensidades de campo eléctrico que permitem obter no seu seio correntes eléctricas significativas [5].

-Materiais isolantes: estes materiais a temperaturas normais não apresentam electrões livres que permitam o fluxo de corrente eléctrica. Para que algum dos seus electrões exteriores se liberte, necessita de tanta energia que, antes de ocorrer esta situação, a sua estrutura molecular destrói-se [5].

A nível microscópico, no fluxo da corrente eléctrica no interior de um cabo, cada electrão apresenta um movimento individualizado. Ou seja, ele move-se por sua conta chocando com os outros electrões, cedendo parte da sua energia que se dissipa sob a forma de calor. Macroscopicamente, o conjunto de todos estes processos elementares manifesta-se como uma resistência que o material apresenta, levando a um aquecimento do condutor. Este aquecimento é conhecido como “efeito de Joule” [5].

2.2- Constituintes de um Cabo Isolado

Os principais constituintes de um cabo eléctrico isolado, representados na Figura 2.1, são: os condutores, isolamentos e as protecções. O isolamento do condutor completa o cabo desde do ponto de vista eléctrico. A estes elementos são adicionados protecção com a finalidade de proteger o cabo de agressões e influências externas.

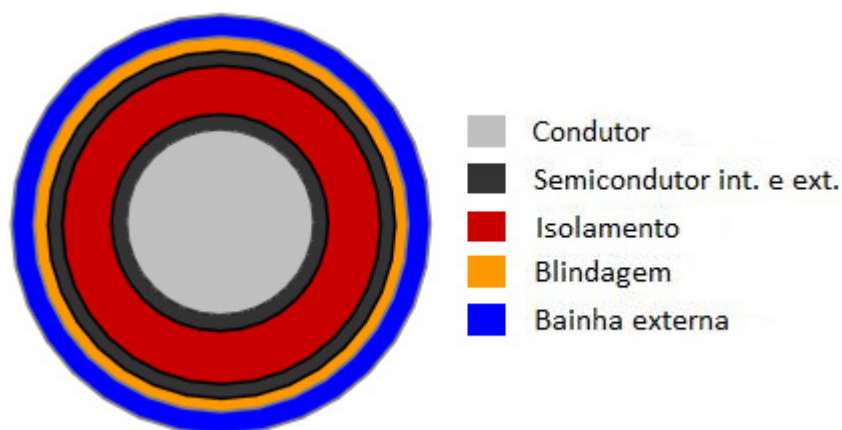


Figura 2.1 - Constituintes de um cabo isolado de Alta Tensão [4]

Em função da natureza e protecção que realizam, distinguem-se quatro tipos de elementos de protecção:

- Protecção contra danos de origem mecânica: bainha externa e armaduras.

- Protecção contra danos de origem eléctrica: blindagens e camadas semicondutoras.

Os cabos eléctricos isolados utilizados em linhas subterrâneas de alta tensão são unipolares, de campo radial, e estão formados por um só condutor de cobre ou alumínio rodeado do isolamento, bainha externa, coberturas protectoras e armadura.

Estes cabos devem satisfazer os seguintes requerimentos [5,6]:

- Devem estar isolados com materiais adequados às condições da instalação e exploração.
- Devem ser devidamente blindados e protegidos contra a corrosão que pode provocar o terreno onde se instalam ou produzida por correntes parasitas.
- Devem ter uma resistência mecânica suficiente para suportar as acções durante a instalação e as habituais depois da instalação (exceptuando as agressões de máquinas de obras públicas, tais como escavadeiras, brocas ou pontas).

Os materiais e suas montagens devem cumprir os requisitos das normas nacionais e internacionais aplicáveis.

Condutores

Os materiais constituintes dos condutores dos cabos eléctricos isolados são geralmente metálicos. Os mais utilizados são:

- O cobre (que se apresenta nas variantes de cobre nu recozido, cobre recozido estanhado e cobre duro).
- O alumínio, cujo uso é cada vez maior nos cabos de energia.

No fabrico dos condutores de cabos isolados de Média e Alta Tensão devem ser utilizadas matérias-primas de grande pureza de acordo com as normas nacionais e internacionais [7,8,9], garantindo desta forma os valores de condutividade eléctrica exigidos. Qualquer presença de impurezas, aumenta em grande medida a resistência eléctrica do material condutor, e como consequência aumentam as perdas por efeito de Joule, pondo em perigo a vida útil deste.

Isolamentos

Os isolamentos devem-se fabricar com materiais em que os electrões estão fortemente ligados aos seus núcleos, ou seja, materiais com uma elevada resistência eléctrica.

Além das características eléctricas, os isolamentos devem cumprir outras funções dependendo das influências externas a que o cabo vai estar submetido durante a sua vida útil [5,6]:

- Absorção de água e resistência à humidade.
- Grau de polimerização, vulcanização e reticulação.
- Resistência ao ozono, à acção solar, radiação ultravioleta e radiação gama.
- Resistência aos hidrocarbonetos, agentes corrosivos, ambiente salinos, alcalinos.
- Também é importante ter em conta outras características dos isolamentos tais como:
 - Termoplasticidade.
 - Cristalinidade.
 - Resistência à fissuração ou gelificação.
 - Resistência ao frio/calor.
 - Resistência ao fogo.
 - Temperaturas máximas de serviço.
 - Temperaturas de curto-circuito.
 - Resistência à tracção.
 - Carga de rotura.
 - Alongamento à rotura.
 - Resistência ao alongamento permanente.
 - Resistência à abrasão.
 - Resistência ao envelhecimento.

Em função do tipo de isolamento, os cabos isolados podem-se classificar em dois grupos:

1. Cabos com isolamento de papel impregnado.
2. Cabos de isolamento seco.

-Cabos com isolamento de papel impregnado:

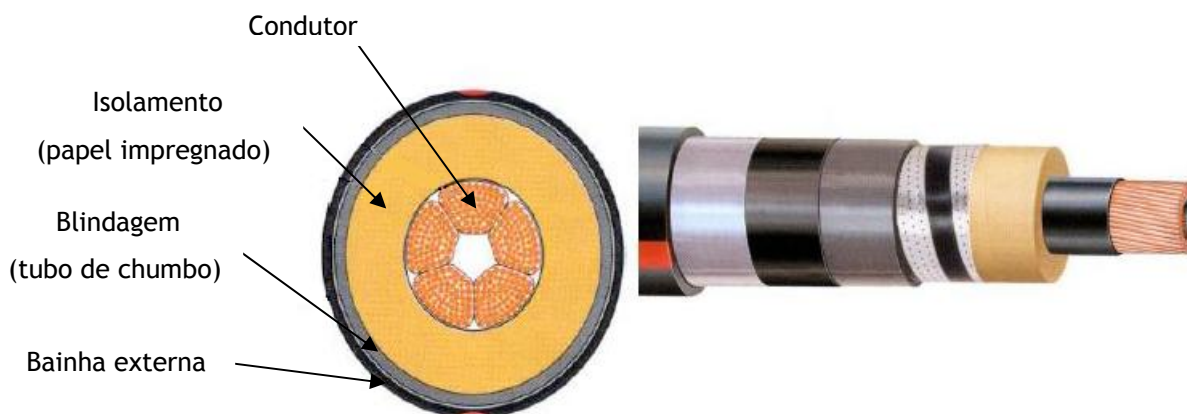


Figura 2.2 - Cabo isolado de Alta Tensão com isolamento de papel impregnado [5]

O isolamento está formado por uma mistura de resinas e óleos minerais, que utiliza como suporte físico um freio de papel celulósico desmineralizado. Esta mistura caracteriza-se por estar praticamente solidificada à temperatura ambiente, e mais fluida para temperaturas superiores. Por isso o conjunto deve ser cercado por um tubo de chumbo para evitar a perda da mistura [5].

Este tipo de isolamento tem a vantagem de apresentar uma vida útil muito superior à dos cabos com isolamento seco. Uma desvantagem deste material, registada no passado, ocorria quando à temperatura de serviço, a fluidez da mistura tornava-se tão elevada que esta vazava do tubo de chumbo através de fissuras produzidas por cristalizações do chumbo que se formavam por vibrações ou falhas na soldadura das junções dos cabos. O desenvolvimento verificado ao longo dos anos das misturas de impregnação não migrantes, apresentando uma elevada viscosidade a temperaturas elevadas (maiores das que o cabo pode alcançar), tem resolvido este problema [5].

A partir dos anos 70-80 o fabrico de cabos com isolamento de papel impregnado foi gradualmente substituído pelos cabos com isolamento seco. Na actualidade ainda existem em serviço quilómetros de cabos isolados com papel impregnado, devido à grande vida útil deste tipo de cabos [5].

-Cabos com isolamento seco:

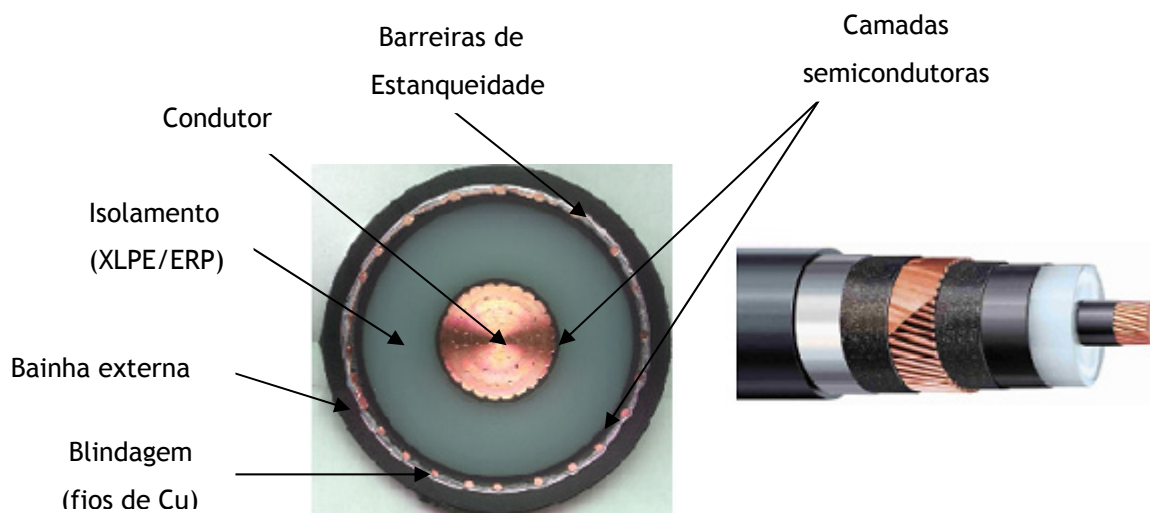


Figura 2.3 - Cabo isolado de Alta Tensão com isolamento seco [10]

Os isolamentos secos são constituídos por isolantes sintéticos extrudados tais como o PVC, o EPR ou o XLPE. Apresentam características que os diferenciam dos isolamentos de papel impregnado tais como [5]:

- Não apresentam vertimento de material na posição vertical.
- Não precisam do tubo de chumbo como protecção mecânica para evitar perdas de fluido ou a entrada de humidade.
- Apresentam boa resistência à humidade.
- Suportam bastante bem as vibrações.
- Alguns tipos especiais apresentam bom comportamento ao fogo.

Polietileno reticulado (XLPE): o XLPE foi desenvolvido como consequência da necessidade de obter um isolamento com as mesmas propriedades do polietileno termoplástico (PE), mas que superasse os seus limites. As limitações que o PE tem são o baixo ponto de fusão, representando riscos de propagação da chama, e uma elevada cristalinidade que confere uma alta rigidez e fragilidade a altas temperaturas.

Gomas de etileno-propileno (EPR): têm sido desenvolvidas com a finalidade de melhorar as desvantagens do XLPE, já que apresenta uma elevada rigidez mecânica. O XLPE dificilmente aceita a introdução de componentes que permitam modificar as suas propriedades, já o ERP permite a incorporação de cargas e plastificantes que tornam possível a criação de misturas adaptadas a exigências específicas.

Os isolamentos dos cabos eléctricos isolados de Alta Tensão são fabricados sobre o condutor, por tripla extrusão, dos seguintes elementos:

- Camada semicondutora sobre o condutor.
- Isolamento à base de polietileno reticulado (XLPE).
- Camada semicondutora sobre o isolamento.

O XLPE não é um termoplástico, de modo que ao aumentar a temperatura não se torna líquido, mantendo a sua forma, mesmo com propriedades de material elástico. Como consequência aumenta a temperatura admissível do condutor, que passa de 75°C no PE a 90°C no XLPE, o que permite a circulação de maiores intensidades de corrente em regime permanente. No caso de curto-circuitos, pode-se alcançar até 250°C durante curtos períodos de tempo [11].

Ao ser um isolamento seco, é especialmente sensível à penetração da humidade, acabando por danificar o cabo quando está enterrado em terrenos húmidos devido ao aumento progressivo de arborescentes que penetram através do isolamento. Por essa razão os cabos de XLPE podem ser fabricados com uma ou duas barreiras longitudinais (fitas hidroexpansivas), que evitam a propagação da água no interior do cabo mediante obstrução tanto sobre o condutor como sobre a blindagem.

Camadas semicondutoras

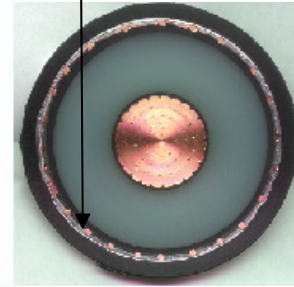
As camadas semicondutoras dos cabos eléctricos isolados são camadas finas de polímero, geralmente da mesma composição básica do material do isolamento, que se mistura com produtos condutores, como o carbono, para reduzir a sua resistência de isolamento. As camadas semicondutoras internas e externas são dispostas para homogeneizar o campo eléctrico na superfície do condutor e na blindagem metálica respectivamente, com a missão de impedir que as zonas ocas nas superfícies interiores e exterior do isolamento suportem campos eléctricos intensos, que poderiam causar descargas parciais na presença de ar ou vapor de água, degradando o isolamento.

Blindagem ou ecrã metálico

Blindagem de alumínio corrugado



Blindagem em fios de cobre



Blindagem de fita de alumínio

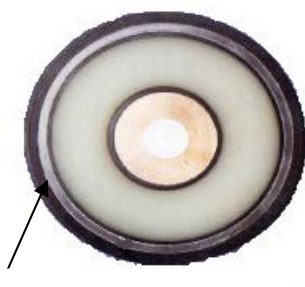


Figura 2.4 - Blindagens de cabos isolados de Alta Tensão [10]

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 [12]:

- 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 corrugado.

Bainhas externas e armaduras



Bainha externa de polietileno de segurança



Bainha de polietileno grafitado

Figura 2.5 - Bainhas externas de cabos isolados de Alta Tensão [13]

As bainhas externas dos cabos eléctricos isolados são elementos de protecção mecânica contra a corrosão, geralmente não metálicas, que isolam a blindagem (de cobre ou alumínio) do terreno. A sua função é proteger o cabo contra agentes externos prejudiciais, tais como químicos, biológicos, abrasivos, atmosféricos, entre outros.

Também se utilizam para melhorar as características internas do cabo que permitam satisfazer as suas prestações:

- Como enchimentos para dar forma cilíndrica a cabos multicondutores.
- Como elementos de apoio que suportam esforços de tracção.
- De barreiras anti-chama em cabos resistentes ao fogo.

Por vezes utilizam-se armaduras como material de protecção. 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 [12]:

- 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 [12].

2.3- Técnicas de Colocação dos Cabos

Os cabos isolados subterrâneos de alta tensão podem ser instalados de três formas:

- Colocação directamente no solo;
- Colocação em tubos;
- Colocação ao ar livre ou em galeria.

Colocação directamente no solo

Esta técnica de colocação de cabos, é amplamente usada em muitos países. A sua rapidez e o baixo custo, são as principais vantagens.

Nos termos da regulamentação portuguesa [14], os cabos que constituem as canalizações subterrâneas devem ser protegidos contra as deteriorações resultantes do abatimento de terras, do contacto com corpos duros, do choque das ferramentas metálicas manipuladas pelo homem, e se tal tiver lugar, da acção química causada pelos elementos do solo.

Os cabos que comportam uma armadura em aço colocada sobre uma bainha de estanqueidade podem, por este facto, ser directamente enterrados. Uma protecção mecânica independente, constituída por caleira de betão, tubos, lajes, é em princípio, necessária no caso de cabos não armados. No entanto, estes podem ser directamente enterrados, sem protecção complementar, desde que eles próprios possam suportar o efeito de esmagamento da terra e o contacto com corpos duros e, além disso, comportem um ecrã metálico ligado à terra [6].

A profundidade de colocação deverá ser determinada em função das condições locais e da tensão de serviço da canalização. Os cabos são enterrados directamente no solo, a uma profundidade não inferior a 1,2m, ficando envolvidos de areia adequada, ou em terra fina ou cirandada, e mecanicamente protegidos por placas de betão, ou de material equivalente, colocadas 0,1 m acima dos mesmos [7]. Para os cabos de alta e muito alta tensão, colocados em caleira de betão pré-fabricada e cheia de areia, aconselha-se a colocação da parte inferior dos ternos nas profundidades mínimas seguintes [6]:

- Colocação fora das aglomerações ou nas subestações: 0,80m;
- Colocação em aglomerações: 1,20m.

Tanto as canalizações enterradas como as caleiras ou tubos deverão possuir por cima, a uma altura mínima de 0,10m (de preferência 0,20m), um dispositivo avisador constituído por uma grelha metálica, protegida contra a corrosão, ou uma grelha plástica [6].

O raio de curvatura para os cabos de Alta Tensão deverá ser no mínimo 20 vezes o seu diâmetro [6].

Sempre que numa mesma vala exista outra canalização, desaconselha-se a sobreposição das mesmas. Além de ser uma solução desfavorável no aspecto térmico, torna delicada qualquer intervenção posterior nos cabos das camadas inferiores [6].

Recomenda-se, em cada caso, a definição da disposição relativa das canalizações colocadas lado a lado, no seguimento de um estudo que tenha em conta, nomeadamente, a redução das capacidades de transporte, o espaço disponível e o custo da obra civil. Será previsto pelo menos um espaçamento de 0,20m entre os bordos mais próximos de duas canalizações vizinhas, permitindo estabelecer um compromisso, a fim de minimizar a influência térmica entre as canalizações, a largura da vala e os riscos de deterioração durante a colocação ou em caso de incidente [6].

A Figura 2.6 mostra dois exemplos para cabos colocados directamente no solo, numa configuração em esteira e trevo.

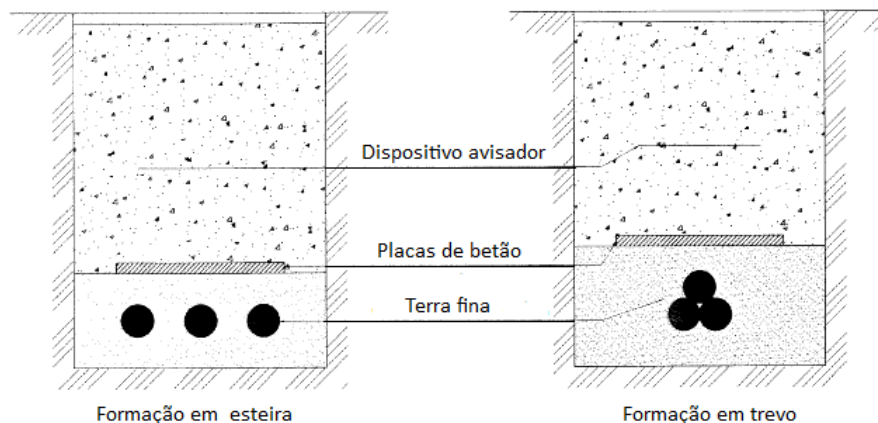


Figura 2.6 - Colocação directamente no solo [15]

Colocação ao ar livre ou em galeria

Este tipo de canalização é a mais benéfica do ponto vista eléctrico, na medida em que é máxima a evacuação do calor, o que equivale a uma maior capacidade de transporte de energia por parte dos cabos isolados. Além disso, caracteriza-se pela facilidade de instalação de cabos e por causar pouco desconforto ao executar o trabalho.

No entanto, a canalização em galeria é evitada sempre que possível, pois envolve um custo de construção elevado. Só se utiliza em casos especiais em que não se possa realizar outro tipo de canalizações, ou em casos em que existam galerias de serviços. Outra desvantagem desta canalização é tornar os cabos muito vulneráveis.

Os cabos estão dispostos ao longo da parede da galeria com braçadeiras para evitar movimentos produzidos por ciclos térmicos de serviço ou esforços electrodinâmicos produzidos pelas correntes de curto-circuito [5]. As abraçadeiras devem ser colocadas a uma distância tal que garanta que os cabos não se soltem.

As galerias devem ser de betão ou outro material de rigidez, estanqueidade e duração equivalentes. As paredes devem permitir uma fixação segura das estruturas de apoio dos cabos e permitir a fixação dos meios de instalação do cabo. Além disso as galerias devem estar bem ventiladas para obterem uma baixa temperatura média e terem um bom sistema de drenagem [5].

É aconselhável prever um intervalo livre entre canalizações vizinhas, colocadas num mesmo tabuleiro, a fim de limitar a influência térmica, de possibilitar às canalizações uma certa liberdade de movimentos e de favorecer a manipulação dos cabos. É desaconselhável a colocação de várias canalizações, sobre um mesmo tabuleiro, em camadas sobrepostas. Pelo contrário, é possível prever vários tabuleiros sobrepostos, sendo guardada uma distância de 30cm entre tabuleiros, o que tornará desprezável a influência térmica e permitirá uma manipulação fácil dos cabos [5].

Para evitar sobretensões nas protecções metálicas dos cabos, todos os elementos metálicos que seguram o cabo estão ligados à terra. No caso de existirem cabos pertencentes a redes de tensão diferentes, os circuitos de terra deverão ser independentes. Nunca se instalam cabos eléctricos em galerias onde existam condutas de gases ou líquidos inflamáveis [5].

A Figura 2.7 mostra dois dos exemplos existentes para cabos colocados ao ar livre ou em galeria, numa configuração em esteira e trevo:

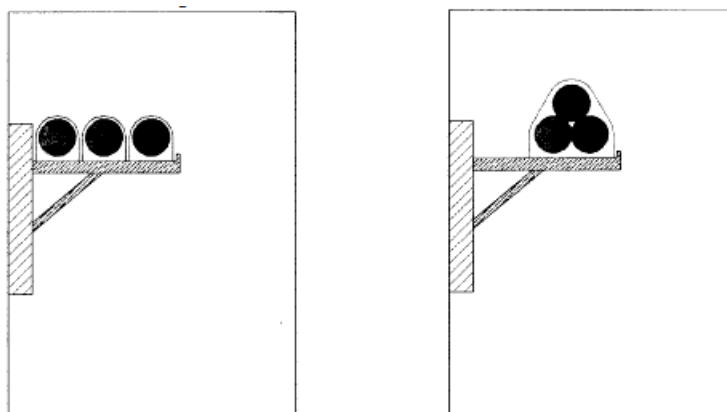


Figura 2.7 - Colocação de cabos isolados em galeria [15]

2.4- Acessórios: Junções, Terminais, Caixas de Ligação e Limitadores de Tensão da Blindagem (SVL)

Os acessórios são utilizados para dar continuidade ao cabo, devem ser adequados à natureza, composição e secção dos cabos, nunca aumentando a resistência eléctrica destes. Também devem ser adequados às características do ambiente: no interior, exterior, ou em caso de poluição.

Em instalações subterrâneas, os acessórios dos cabos subterrâneos aplicam-se de acordo com as instruções do fabricante, utilizando os materiais adequados para garantir a perfeita continuidade do condutor e o seu isolamento. Cabe destacar que nestas instalações os acessórios são elementos muito críticos do ponto de vista do isolamento porque suportam uma descontinuidade do campo eléctrico, isto deve-se a interromperem o isolamento principal do cabo, que é reconstituído mediante a montagem na obra dos diferentes componentes do acessório.

Como são elementos que não limitam a capacidade de transporte da instalação, as junções e os terminais devem cumprir uma série de condições que garantam a não diminuição das características eléctricas e mecânicas do cabo [5]:

- A condutividade da junção ou terminal deverá ser igual ou superior à de um só condutor de mesmo comprimento.
- O isolamento deve ser tão eficaz como o isolamento do próprio cabo.
- A junção ou terminal deve ser protegido para evitar a deterioração mecânica e a entrada da humidade.
- A junção ou terminal deve resistir aos esforços electrodinâmicos em caso de curto-circuito, assim como o efeito térmico da corrente, tanto em regime normal como em caso de sobrecargas ou curto-circuitos.
- As junções e terminais devem ser fabricados e ensaiados de acordo com as especificações.

Junções

As junções devem ser concebidas e fabricadas para garantir uma ligação correcta de todos os elementos que constituem o cabo, sem sofrerem deformações e sem alterar as suas propriedades mecânicas e eléctricas.

As junções a instalar devem estar em conformidade com as normas em vigor para acessórios de cabos de Média e Alta Tensão [8,9]. Existem três tipos específicos de junções em função do material a ser utilizado para o isolamento externo:

-Junção pré-fabricada:

A junção pré-fabricada é feita de materiais isolantes e semicondutores para altas tensões, em que a conexão dos condutores pode ser por compressão ou soldados. Têm excelentes características eléctricas, mecânicas e térmicas e a sua cobertura assegura uma perfeita protecção [16].

Nos pontos de união dos diferentes troços da instalação utilizam-se junções adequadas às características dos condutores a unir. A montagem deve ser feita por pessoal qualificado.

As linhas subterrâneas devem ser dispostas em troços com o maior comprimento possível, a fim do número de junções ser o menor. Na hora de definir o comprimento da instalação deve-se ter em conta as dimensões das bobinas onde se encontra o cabo, porque os ramos de maior comprimento implicam bobinas maiores, o que incrementa as dificuldades de transporte, o preço e a data de entrega. Portanto, para cada projecto há que analisar a possibilidade de utilizar ou um número maior de junções ou a utilização de bobinas maiores. Este tipo de junção pode ser com blindagem interrompida e sem blindagem interrompida, como mostra a Figura 2.8.



Junção sem interrupção da blindagem



Junção com interrupção da blindagem

Figura 2.8 - Junções [17]

-Junção termoretráctil:

Neste tipo de junção, ilustrada na Figura 2.9, os elementos reconstitutivos da camada semicondutora sobre o condutor, do isolamento e da camada semicondutora sobre o isolamento aplicam-se mediante um processo conhecido como termocontração. Posteriormente a blindagem metálica é restituída e aplica-se mediante termocontração o elemento que reconstrói a bainha exterior do cabo.



Figura 2.9 - Junção termoretráctil [18]

-Junção contráctil a frio:

Estas junções restituem a camada semicondutora sobre o condutor, o isolamento e a camada semicondutora sobre o isolamento, aplicando os elementos de reconstituição ao retirar o seu suporte interno. A junção fica perfeitamente fixada ao cabo, apresentando boa fiabilidade, e que não necessita de perícia e tempo necessários para a aplicação de calor como acontece nas tecnologias termoretrácteis [18]. O que explica a notável penetração no mercado deste produto. A Figura 2.10 mostra um exemplo deste tipo de junção.



Figura 2.10 - Junção contráctil a frio [19]

Terminais

Os terminais são instalados nas transições aéreas subterrâneas. Dependendo do projecto pode-se optar por colocar os terminais nas estruturas de transição ou numa estrutura dentro da subestação. Para tensões de 115kV ou superiores, é necessário que os terminais

tenham um sistema de enchimento interno podendo ser através de silicone, composto de polibuteno ou SF6, considerando as recomendações do fabricante [16].

Os terminais a instalar devem estar em conformidade com as normas em vigor para acessórios de cabos de Média e Alta Tensão [8,9]. Além disso, na especificação das características deverá ter em conta o nível de poluição da região onde será instalado. Os tipos de terminais representados nas Figuras 2.11, 2.12, 2.13, 2.14, respectivamente, são:

-Encapsulada:



Figura 2.11 - Terminal para comutação de gás isolado (GIS) e transformador (TRF) [17]

-Intempérie:

1) Porcelana



Figura 2.12 - Terminal de porcelana [17]

2) Termoretráctil



Figura 2.13 - Terminal termoretráctil [18]

3) Pré-fabricado



Figura 2.14 - Terminal pré-fabricado [17]

Caixas de ligação

As caixas de ligação são electricamente e mecanicamente uns dos acessórios integrantes das redes subterrâneas, do sistema de ligação por cabos, associados a sistemas de energia de cabos de Alta Tensão do tipo XLPE.

São usadas com junções e terminais para proporcionar fácil acesso a interrupções da bainha para fins de teste limitar a tensão na blindagem. A caixa de ligação faz parte do sistema de ligação, que é essencial para melhorar a capacidade de transporte da corrente e protecção humana.

A Figura 2.15 mostra um exemplo deste tipo de caixas comercializadas.

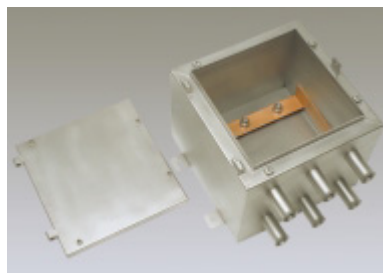


Figura 2.15 - Caixa de ligação [20]

Limitadores de tensão na blindagem (SVL)

O comprimento das secções nos sistemas de ligação especial descritos no capítulo 3 é determinado pelos níveis de tensão máximos admissíveis, para condições normais e de defeito.

A circulação de correntes em regime permanente induz tensões no circuito das blindagens ao longo de todo o seu comprimento. Na ocorrência de defeitos internos e externos estas correntes produzem tensões induzidas nas blindagens, ainda superiores. Estas tensões induzidas não devem ultrapassar os valores admissíveis pela bainha exterior dos cabos e acessórios ou pelos isolamentos de descontinuidade das blindagens nas junções e terminais. O seu valor depende do comprimento das secções menores, dos parâmetros eléctricos e geométricos da linha, da intensidade de curto-circuito e do esquema do circuito de blindagens. Os cabos e acessórios são projectados para resistir a estas sobretensões [21,22].

Os fenómenos transitórios de origem atmosférica ou de manobra originam sobretensões que se propagam pelo circuito das blindagens podendo alcançar valores muito elevados nos pontos de interrupção das blindagens e nos terminais. Para limitar estas sobretensões, é necessário instalar dispositivos limitadores de tensão (em inglês sheath voltage limiters, SLV) [19,20]. Nas figuras 2.16 e 2.17 estão representados limitadores de tensão e uma caixa de ligação com limitadores de tensão respectivamente.



Figura 2.16 - Limitadores de tensão (SLV) [23]



Figura 2.17 - Caixa de ligação com limitadores de tensão [20]

Capítulo 3

Cabo Eléctricos Subterrâneos: Técnicas de Ligação da Blindagem

O presente capítulo descreve a ligação à terra das blindagens dos cabos que constituem uma linha trifásica isolada, instalada seja numa galeria de serviços, numa instalação interior ou directamente enterrada. Para diminuir as perdas na linha e melhorar a capacidade de transporte, costumam adoptar-se alguns sistemas de ligação que reduzem a intensidade das correntes induzidas nas blindagens. Estes sistemas implicam ligações particulares das blindagens entre si e à terra e dão lugar a tensões permanentes e sobretensões transitórias nos circuitos de blindagem que devem ser considerados.

3.1- Princípios Gerais de Ligação das Blindagens

Numa linha de corrente alternada, o conjunto formado pelas blindagens e pelas suas ligações actua como um circuito secundário de um transformador [21] fortemente ligado ao circuito primário, formado pelos condutores principais submetidos à tensão de rede. Por esta razão, podem aparecer no circuito das blindagens intensidades de corrente consideráveis durante o funcionamento normal da linha. Há que ter em conta as perdas e o aquecimento acrescentado por esta causa e adoptar, em muitos casos, os métodos de ligação propostos para minimiza-las. Distinguem-se dois tipos de esquemas de ligação à terra das blindagens [22]:

- Sistemas de ligação rígida à terra
- Sistemas de ligação especial à terra

Em ambos os sistemas, deverão ser cumpridas as seguintes condições [21]:

- Durante o funcionamento normal, devem-se conduzir à terra as correntes capacitivas, mantendo as blindagens num potencial próximo do da terra.
- Durante o tempo que durar um curto-circuito, tanto externo à linha como ocorrido nela mesma ou em algum dos seus elementos, as correntes de falha que possam percorrer o circuito de blindagens não devem provocar tensões excessivas entre as blindagens e a terra e entre partes do circuito de blindagens. A rigidez do isolamento entre blindagem e terra (bainha do cabo) e do isolamento de separação entre partes da blindagem deverá ser suficiente para resistir a estas tensões.
- Nos pontos em que as sobretensões transitórias de origem atmosférica ou de manobra possam produzir solicitações dieléctricas inadmissíveis no circuito de blindagens, deverão existir limitadores de tensão adequadamente dimensionados.

A adopção de medidas para anular ou minimizar nas blindagens as intensidades permanentes associadas ao funcionamento da linha em condições normais, pode provocar outro tipo de problemas, principalmente o aparecimento em circuitos de blindagens de tensões elevadas durante a ocorrência de curto-circuitos ou sobretensões transitórias na rede [21].

a) Sistemas de Ligação Rígida à Terra

Nestes sistemas, as blindagens das três fases ligam-se directamente entre si e à terra para que, em todos os pontos da linha, como mostra a Figura 3.1, as tensões das blindagens entre si e em relação à terra se mantenham próximas de zero. Não se adopta nenhuma disposição para evitar a circulação de correntes pelas blindagens em regime permanente. Estas correntes, induzidas pelos condutores principais, originarão uma produção adicional de calor, com a consequente diminuição da capacidade de transporte da linha [22].

As blindagens devem unir-se entre si e à terra nos dois extremos da linha. Se for preciso, de forma a limitar as tensões de blindagem que poderiam ocorrer em caso de defeito na própria linha, as blindagens unir-se-ão entre si noutros pontos [22].

É prudente ligar as blindagens entre si e à terra cada 2 a 3km [22], mas apenas é exigível se as tensões geradas entre as fases ou entre fase e terra por queda de tensão causada pela circulação de corrente de defeito superarem a tensão de perfuração da bainha.

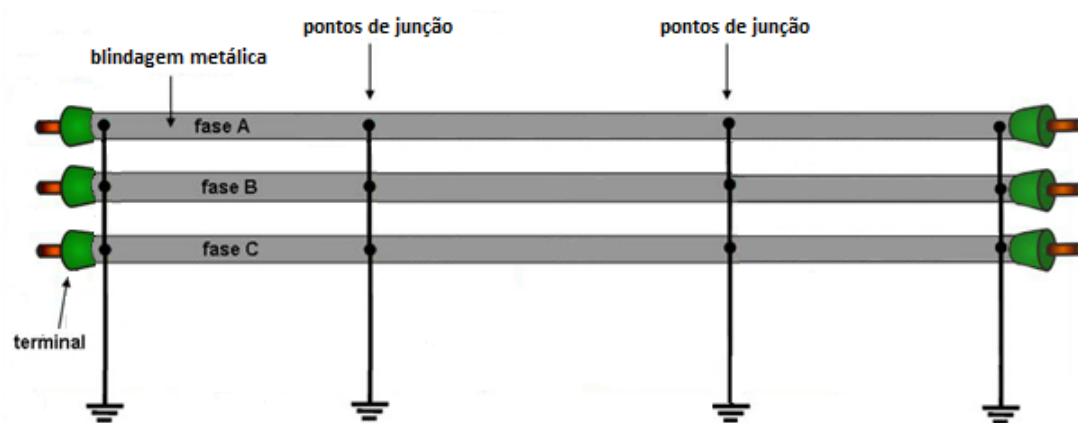


Figura 3.1 - Esquema de ligação rígida à terra [16]

Geralmente, os cabos unipolares que constituem uma linha trifásica dispõem-se em trevo o mais próximo possível, para reduzir as correntes nas blindagens, as quais aumentam com a separação entre fases. Nesta configuração, as transposições de fases ao longo da linha só são úteis para reduzir a sua influência indutiva sobre os cabos adjacentes [22].

A transposição consiste numa troca da posição física dos cabos para que todas as fases ocupem a mesma posição relativa na instalação, para o mesmo comprimento. É levada a cabo com a finalidade das fases ficarem com as mesmas características eléctricas, principalmente a impedância, para que nenhuma delas fique submetida a uma carga maior que as outras. Em sistemas com cabos numa formação em triângulo não é necessário levar a cabo a transposição devido às fases ocuparem a mesma posição relativa [16]. A Figura 3.2 mostra um circuito com transposição a cada terço do comprimento da linha.

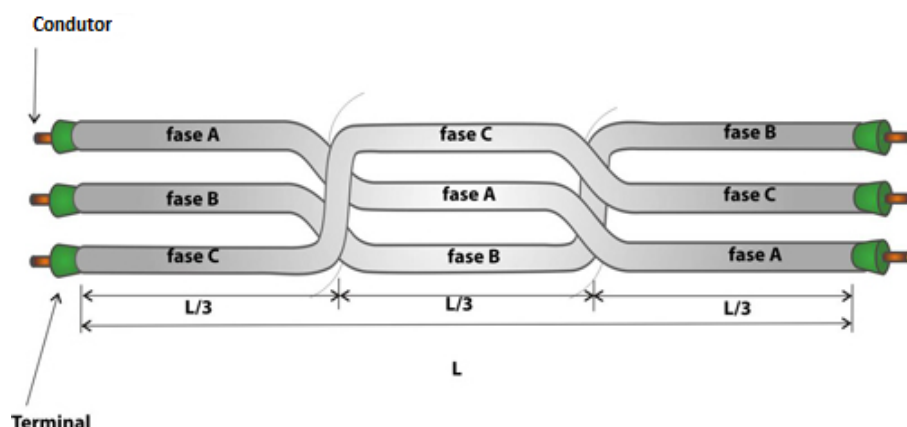


Figura 3.2 - Circuito com transposição [16]

Numa disposição plana, ou assimétrica, a transposição de condutores pode conseguir, a igualdade de correntes nas blindagens, e, com isso, o valor mínimo de perdas neste tipo de ligação. Em nenhum caso a transposição de condutores serve para anular as correntes nas blindagens.

b) Sistemas de Ligação Especial à Terra

A circulação permanente de corrente pelas blindagens durante o funcionamento normal da linha conduz a um aumento das perdas e à necessidade de sobredimensionar a secção dos condutores principais para conseguir uma determinada capacidade de transporte na linha. De forma a evitar estes inconvenientes, as blindagens ligam-se à terra seguindo esquemas que excluam a formação de circuitos fechados entre elas, ou que consigam anular as forças electromotrizes induzidas nos possíveis circuitos fechados, sem que deixem de ser satisfeitas as condições de segurança já expostas. Conseguindo este objectivo, aparecem, para além das vantagens procuradas, outras duas [22]:

- Pode incrementar-se a separação entre fases para conseguir uma melhor dissipação do calor para o meio circundante.
- Ao ser menor a secção necessária do condutor principal, a corrente capacitiva absorvida pela linha é um pouco menor.

A selecção do tipo de ligação especial à terra a ser utilizado, depende do estudo de rentabilidade que se elabora para comparar o custo das perdas que se evitam a utilizar estes sistemas, com o benefício do aumento da capacidade de transporte dos cabos. Há que ter em conta certos inconvenientes [5,22]:

- O sistema de blindagens (cabos e acessórios) deve suportar tensões permanentes (da ordem de algumas dezenas de volts) e transitórias (da ordem de alguns kilovolts) e por conseguinte deve estar totalmente isolado da terra, excepto nos pontos de ligação previstos.
- Em certos casos, deverão ser empregues junções que permitam a descontinuidade eléctrica nas blindagens.
- Devem instalar-se elementos de limitação das sobretensões transitórias (SLV) de curta duração nos pontos de descontinuidade das blindagens e, em certos casos, nos extremos.
- Nos casos de ligação à terra num único ponto, é necessário instalar um condutor de continuidade de terra.

As perdas nas blindagens não podem eliminar-se completamente anulando a intensidade total que as percorre. Por um lado, o efeito de proximidade gera correntes parasitas nos caminhos fechados dentro da massa da blindagem (perdas de Foucault) que também ocasionam perdas [22], por outro, na prática é difícil escolher o comprimento do cabo e o seu espaçamento.

3.1.1- Sistemas de Ponto Único de Ligação à Terra

A forma mais simples de ligação especial consiste num arranjo, em que as blindagens dos três cabos são conetadas entre si e ligadas à terra num só ponto, ao longo do seu comprimento [21]. Em todos os outros pontos, uma tensão estará presente na blindagem à terra que será máxima no ponto mais afastado da ligação à terra. Por isso as blindagens devem ser adequadamente isoladas da terra. Neste caso existe um circuito fechado pelas blindagens excepto através dos limitadores de tensão na blindagem (SVL's se existirem), razão pela qual não flui corrente normal e longitudinalmente ao longo das blindagens e não ocorre perdas (correntes de Foucault continuam presentes).

i) Tensão Induzida nas Blindagens

A comparação feita no funcionamento de um cabo isolado formado pelas blindagens e pelas suas ligações, com um transformador [21], advém, como já foi referido das blindagens actuarem como um circuito secundário. No circuito assim formado, são induzidas tensões ao longo do seu comprimento. A Figura 3.3 mostra as tensões induzidas nas blindagens para um determinado circuito.

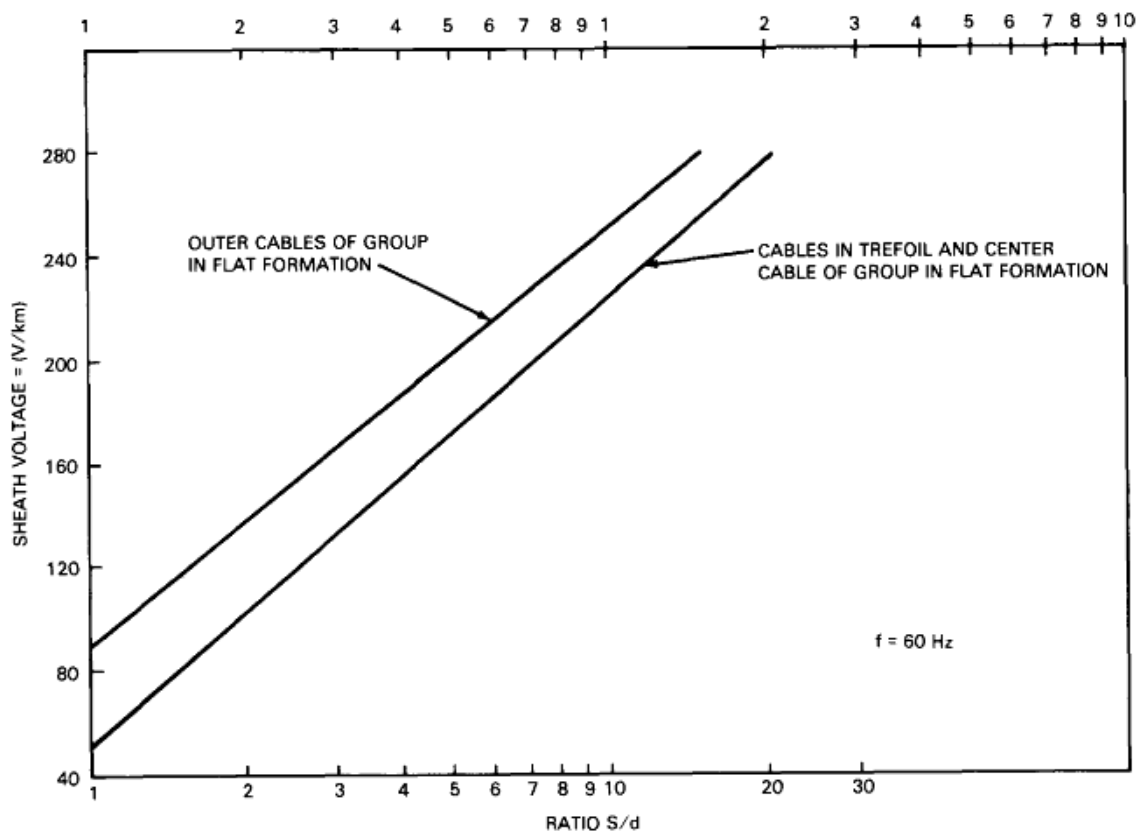


Figura 3.3 - Tensão induzida (à terra) para um condutor com uma corrente de 1000A [21]

Para o circuito, temos:

$$I = 1000 \text{ A} \qquad \frac{S}{d} = 2$$

Onde

S =distância entre os eixos dos cabos [mm]

d =diâmetro médio da blindagem [mm]

A tensão na blindagem será 103 V/km e 138 V/km para formação em trevo e esteira respectivamente. Como a blindagem do cabo pode estar exposta em alguns pontos em contacto por pessoas, que estejam ao potencial da terra, é uma prática comum especificar uma tensão máxima admissível durante a operação à plena carga. É reconhecido que esta tensão será altamente excedida durante sistemas transitórios e curto-circuitos. A tensão máxima induzida permitida à plena carga varia consideravelmente entre vários países.

Nos Estados Unidos, não existe qualquer norma que defina valores máximos para tensões induzidas, praticando-se valores entre 65V e 90V. No Canadá existem casos em que não excede os 100V, mas recentemente avanços na tecnologia permitem situações com tensões entre 300V-400V e mesmo até 600V [21]. Já o México, têm uma norma que estabelece o limite nos 125V [16].

Na Europa também não existe regulamentação para estas tensões. Em França, Itália, Holanda e Noruega não existe limite fixados, apesar de na Noruega na prática usar-se limites de 60V [21].

ii) Condutor de Continuidade de Terra

No caso de circulação de correntes de curto-circuito na linha com forte componente homopolar, haverá um retorno pela terra. Como a blindagem do cabo na ligação especial é ligada numa só posição, está não pode transportar a corrente de retorno. Neste caso, podem induzir-se tensões muito elevadas no circuito das blindagens e nos condutores próximos e paralelos à linha [16].

A fim de proporcionar um caminho de baixa impedância para a corrente homopolar, é colocada uma ligação condutora entre os eléctrodos de terra de ambos os extremos da linha formado por um condutor (ou vários) de secção suficiente para suportar a corrente de curto-circuito esperada. Este condutor, instalado em localização adjacente à linha, transpõe-se em pontos intermédios para equilibrar as f.e.m. induzidas e evitar assim a circulação permanente de corrente durante o funcionamento normal da linha. O condutor de continuidade de terra deverá estar isolado em todo o seu percurso [21].

iii) Sistema de Ponto Único de Ligação à Terra: Configurações Possíveis

A Figura 3.4 ilustra a aplicação deste método de ligação especial num só ponto para um circuito de comprimento curto. Nestes diagramas são omissas as caixas de ligação, as quais permitem testar o isolamento da bainha.

a) Com o ponto de ligação num extremo

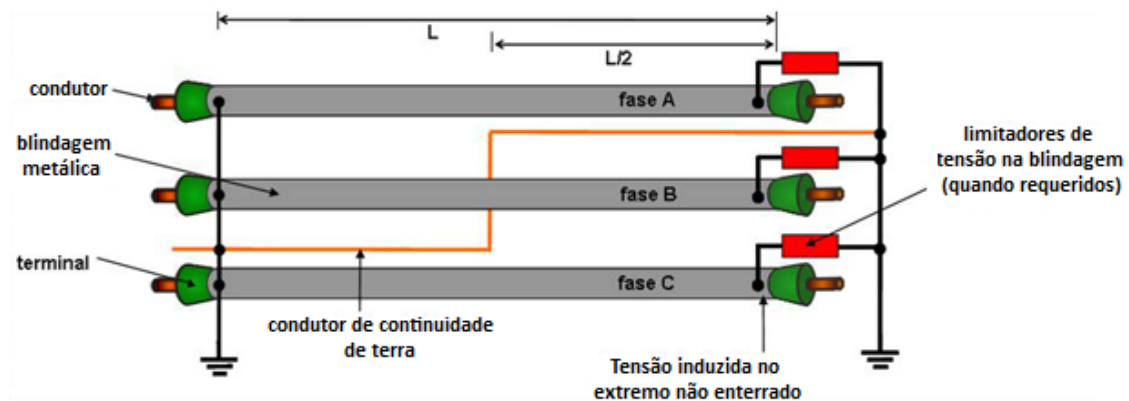


Figura 3.4 - Sistema de ponto único (ligação à terra num extremo) [16]

Quando o comprimento do circuito é tal que o limite de tensão induzida é excedido, o ponto de ligação à terra pode ser deslocado para um ponto intermédio, como representado na Figura 3.5. A tensão induzida em cada uma das duas secções menores formadas, é reduzida [16,21,22].

b) Com o ponto de ligação no centro

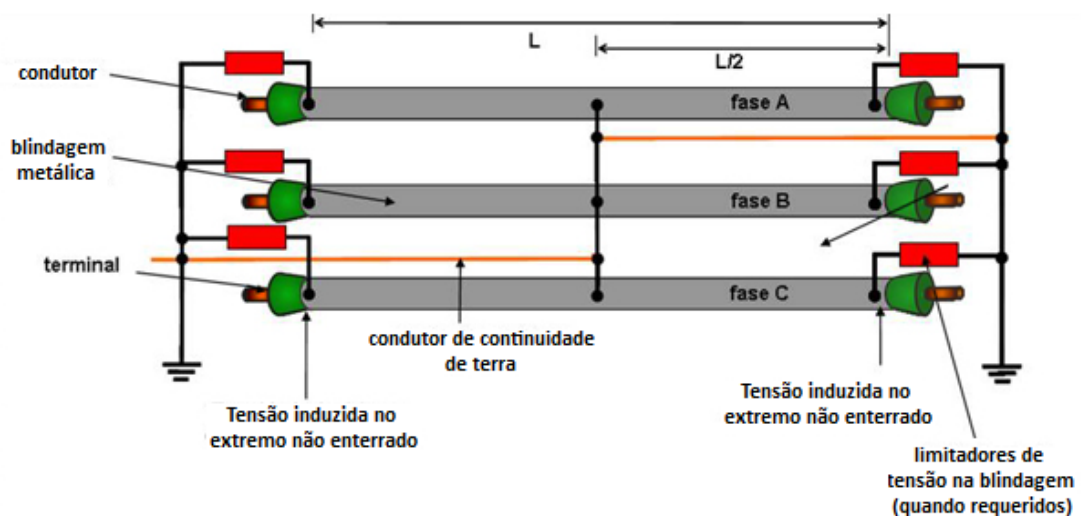


Figura 3.5 - Sistema de ponto único (ligação à terra num ponto intermédio) [16]

c) Comprimentos longos

Caso o circuito apresente um comprimento muito grande para ser tratado com este método, então pode ser seccionado com o uso de junções de blindagem interrompida, de maneira que as tensões permanentes induzidas na blindagem para cada seccção elementar estejam dentro dos limites impostos [21].

As Figuras 3.6 e 3.7 ilustram a aplicação do sistema de ligação especial num ponto único sem transposição e com transposição respectivamente, para um circuito de grande comprimento.

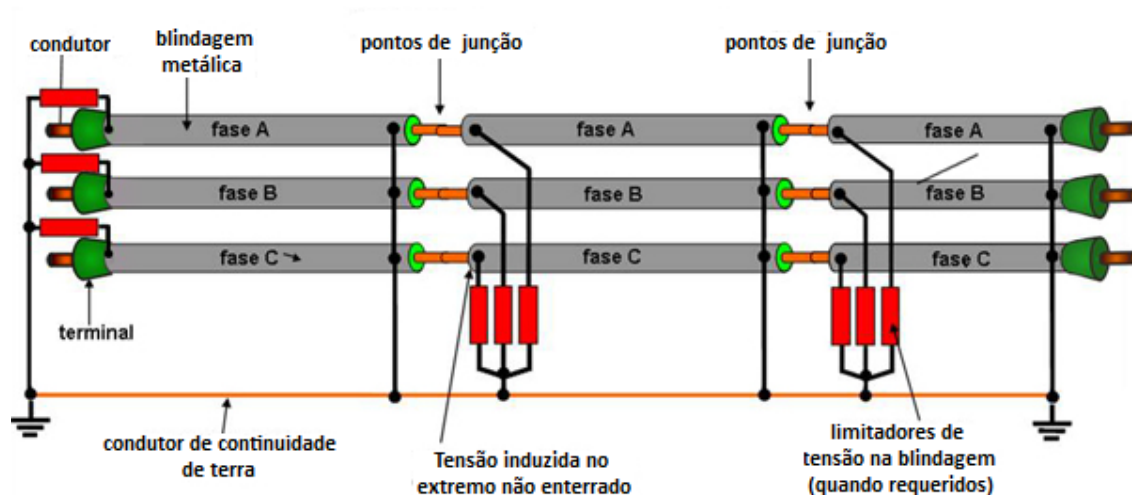


Figura 3.6 - Sistema de ponto único (para comprimentos grandes) [16]

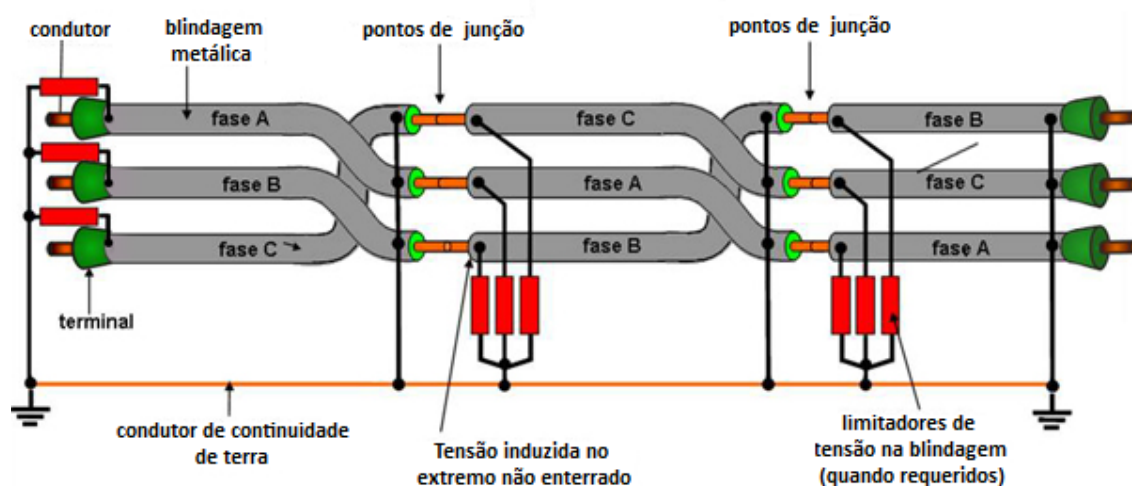


Figura 3.7 - Sistema de ponto único com transposição (para comprimentos grandes) [16]

3.1.2- Sistemas de Ligação Cruzada de Blindagens

O sistema de ligação cruzada de blindagens, têm como objectivo tentar neutralizar a tensão total induzida nas blindagens para minimizar a circulação de correntes e consequentemente as suas perdas. Aplicando este sistema, pode-se assim aumentar o espaçamento entre cabos permitindo uma maior dissipação do calor aumentando a capacidade de transporte do cabo.

a) Comprimentos curtos

A forma básica de ligação cruzada consiste em sectionar o cabo em três secções menores de igual comprimento e cruzar a sua ligação, de forma a neutralizar a tensão induzida nas três secções, como se mostra na Figura 3.8. Isto sucede-se pois cada um dos três campos magnéticos alternados induz uma tensão com um desfasamento de 120° , e idealmente a adição vectorial das tensões induzidas será zero. O conjunto das três secções menores forma uma secção maior. As blindagens são então ligadas à terra no início e no fim de cada secção maior [24].

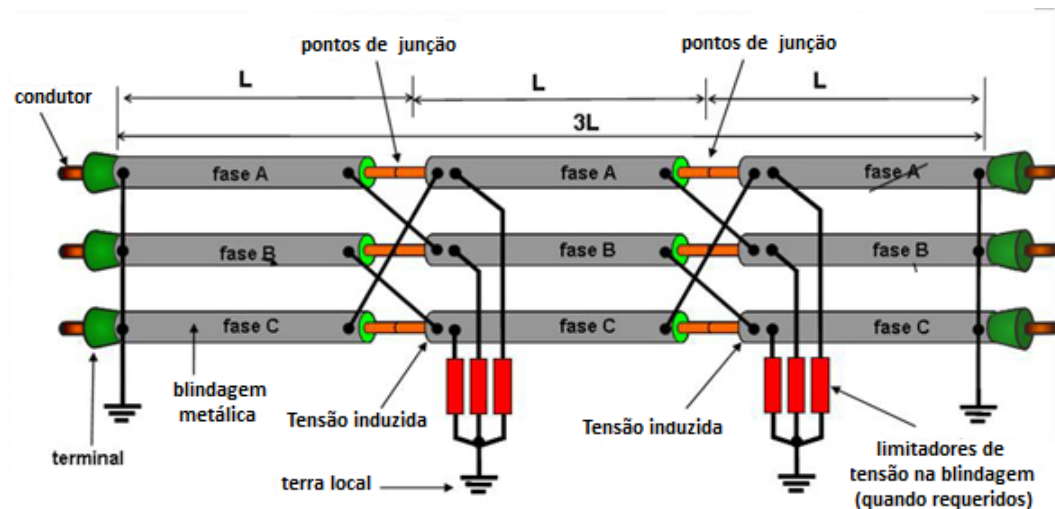


Figura 3.8 - Sistema de ligação cruzada (1 secção maior, 3 secções menores) [16]

Na prática, devido ao comprimento do cabo e às condições de instalação de instalação, poderá resultar uma pequena tensão residual e uma corrente negligenciável (ver Figura 3.9).

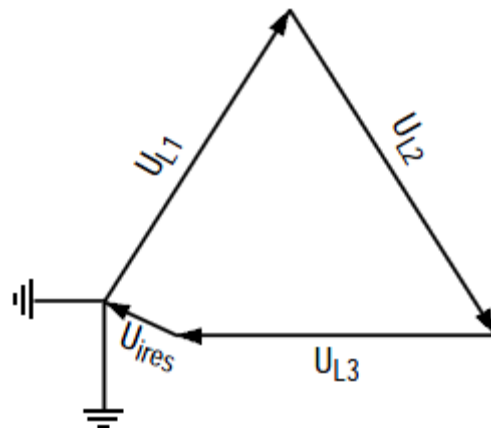


Figura 3.9 - Tensões induzidas nas três fases [20]

Por esta razão, pode-se recorrer a uma configuração em esteira, em que os cabos são transpostos a cada secção menor, ou seja, em cada uma das posições onde haja junções. Assim as tensões induzidas nas blindagens serão neutralizadas, independentemente da configuração dos cabos, caso as três secções elementares sejam iguais [16,20]. A Figura 3.10 ilustra essa disposição.

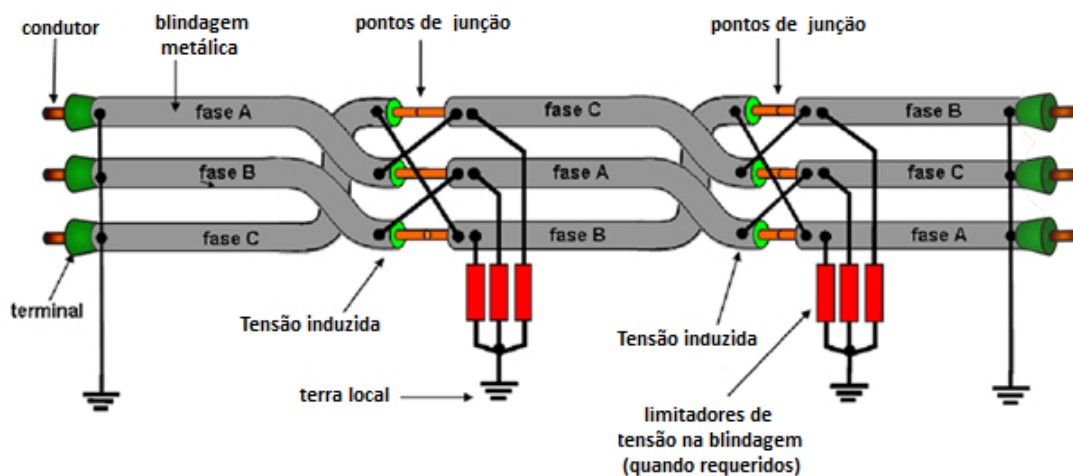


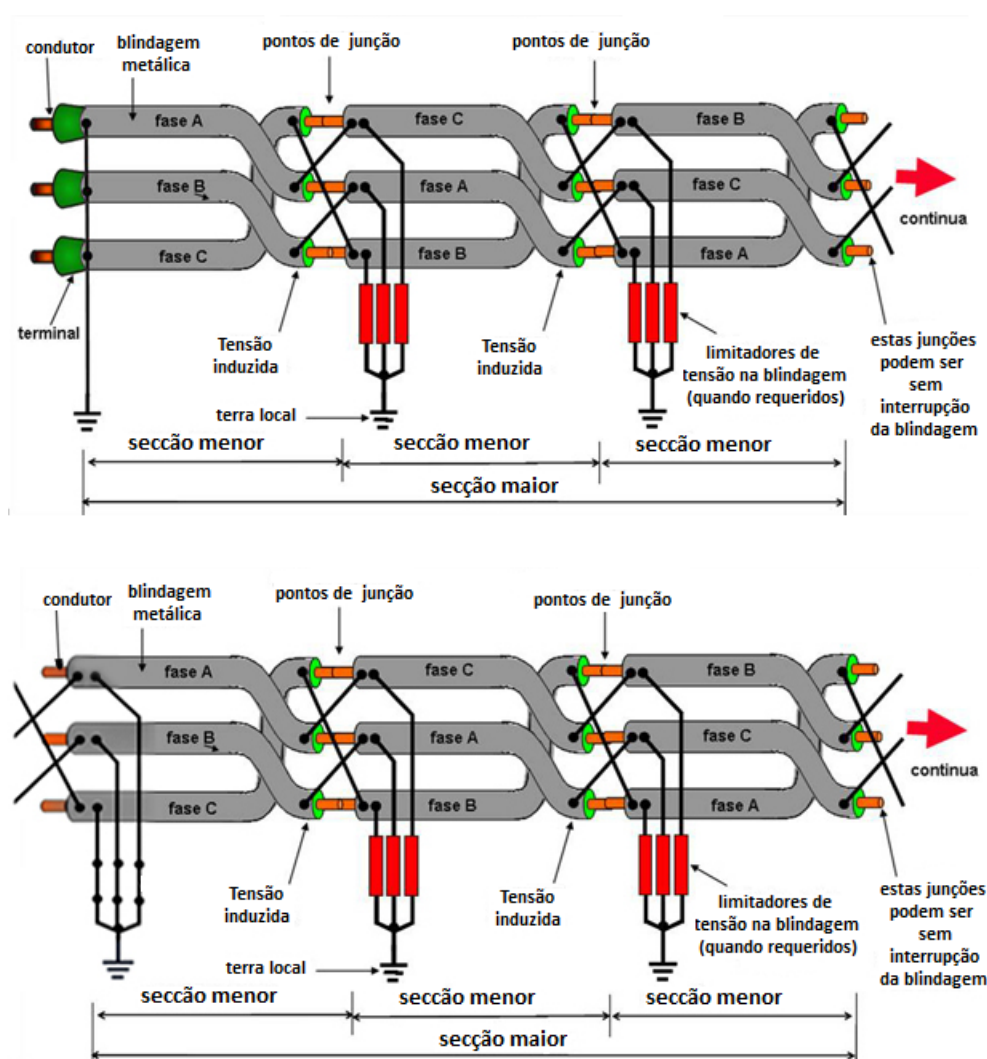
Figura 3.10 - Sistema de ligação cruzada com transposição (1 secção maior, 3 secções menores) [16]

b) Comprimentos longos

O método de ligação especial da blindagem cruzada pode ser estendido a circuitos de cabos de comprimentos muito grandes, pelos métodos descritos de seguida.

b1) Sistema de ligação especial de blindagem cruzada seccionada

Quando o número de secções menores elementares é divisível exactamente por três, o circuito pode ser combinado de forma a prever uma ou mais secções maiores em série. Na junção das secções maiores e nas extremidades do circuito, as blindagens devem ser ligadas entre si e à terra. Na Figura 3.11 cada secção maior é separada e ligada como na Figura 3.10. Os limitadores de tensão nas blindagens, quando são requeridos, deverão ser instalados apenas nas junções onde exista ligação especial de blindagem do tipo cruzada.



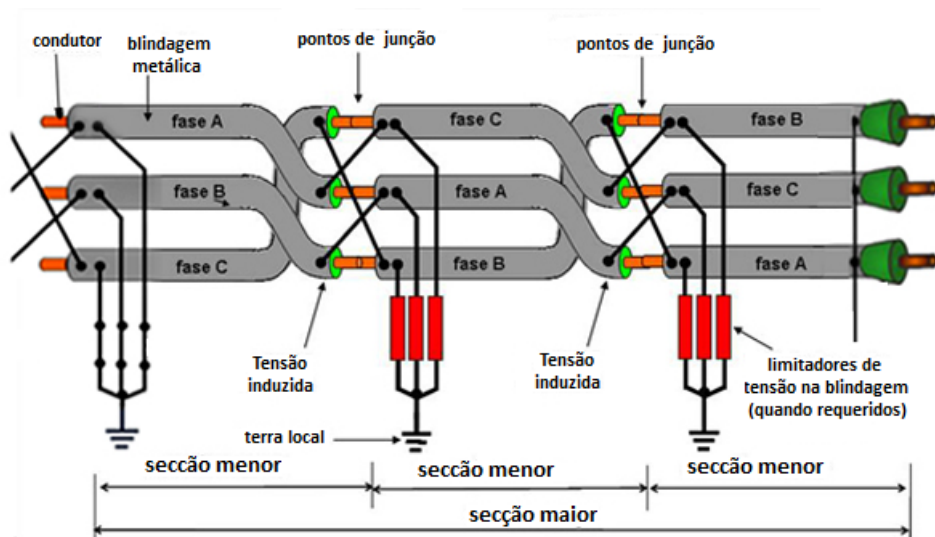


Figura 3.11 - Sistema de ligação cruzada seccionada (3 seções maiores, 9 seções menores) [16]

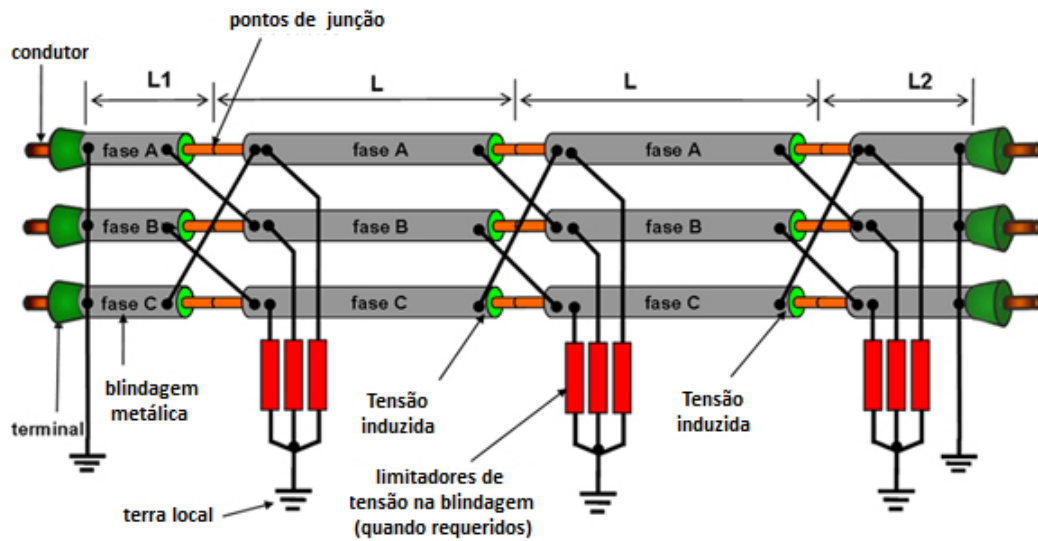
b2) Sistema de ligação especial de blindagem cruzada seccionada modificada

Na versão modificada de ligação especial da blindagem cruzada, não é necessário ter um número de seções menores elementares exactamente divisível por três. Esta versão é a ideal para situações em que os comprimentos das bobinas dos cabos são insuficientes e não correspondam ao comprimento necessário para a instalação.

As condições de equilíbrio de tensão dentro de uma determinada secção principal consistindo em quatro seções menores podem ser alcançadas através da subdivisão de uma secção menor em duas subseções, como se segue [21]:

- 1) Um comprimento curto ou subseção seguido de duas seções elementares e outro comprimento curto ou subseção completando uma secção maior. A soma dos comprimentos curtos das subseções deve ser igual ao comprimento de uma das seções menores elementares, como se mostra na Figura 3.12.

a) Sem transposição



b) Com transposição

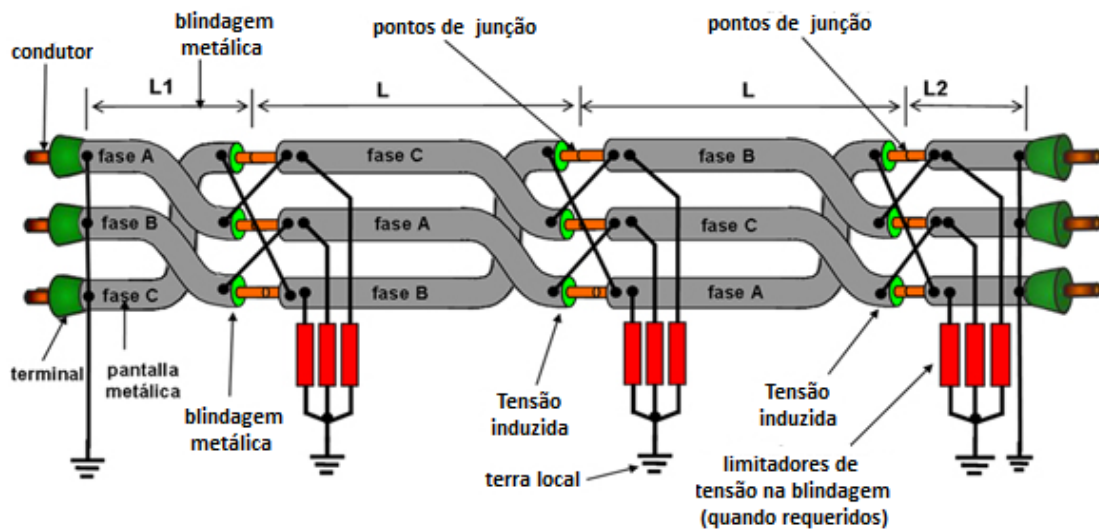
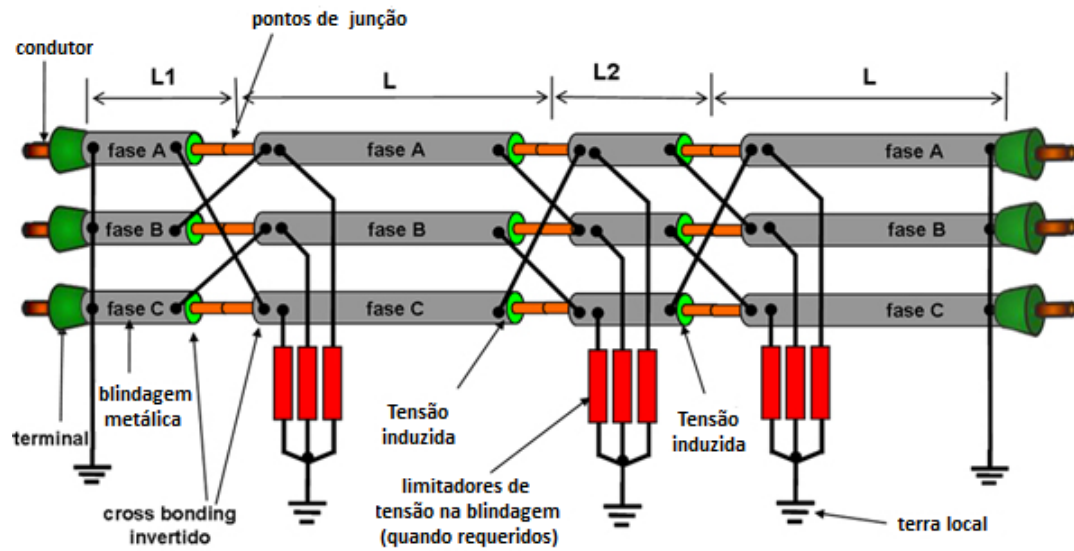


Figura 3.12 - Sistema de ligação cruzada seccionada modificada tipo 1 [16]

- 2) Um comprimento curto ou subsecção seguido por um comprimento de secção elementar menor, depois outra subsecção ou comprimento curto seguido por outro comprimento de secção elementar menor, completando a secção maior. A soma dos comprimentos curtos das subsecções deve ser igual ao comprimento de uma das secções elementares. Como se mostra na Figura 3.13, para este caso a primeira ligação especial da blindagem cruzada deve ser invertida.

a) Sem transposição



b) Com transposição

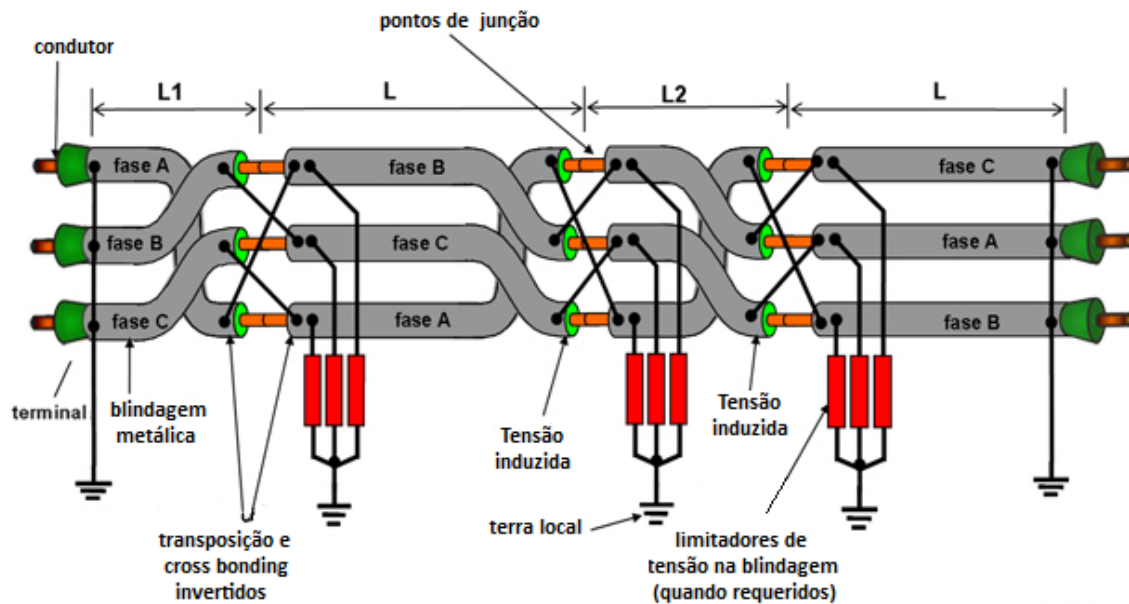


Figura 3.13 - Sistema de ligação cruzada seccionada modificada tipo 2

a) sem transposição; b) com transposição [16]

b3) Sistema de ligação especial de blindagem contínua

Nestes sistemas as blindagens devem ser ligadas de forma cruzada no final de cada secção menor elementar através de todo o comprimento do cabo. As três blindagens devem ser ligadas entre si e à terra nas duas extremidades do percurso, como de mostra na Figura 3.14 [21]. É desejável que os cabos sejam transpostos de modo que cada condutor ocupe cada uma das três posições por um terço do comprimento total. Preferencialmente, o número de secções menores elementares deveria ser exactamente divisível por três. Em alguns casos em que não se pode dividir em três secções iguais, estará presente um desequilíbrio. Este desequilíbrio criado usando um número de secções elementares não divisível por três diminui à medida que aumenta o número de secções.

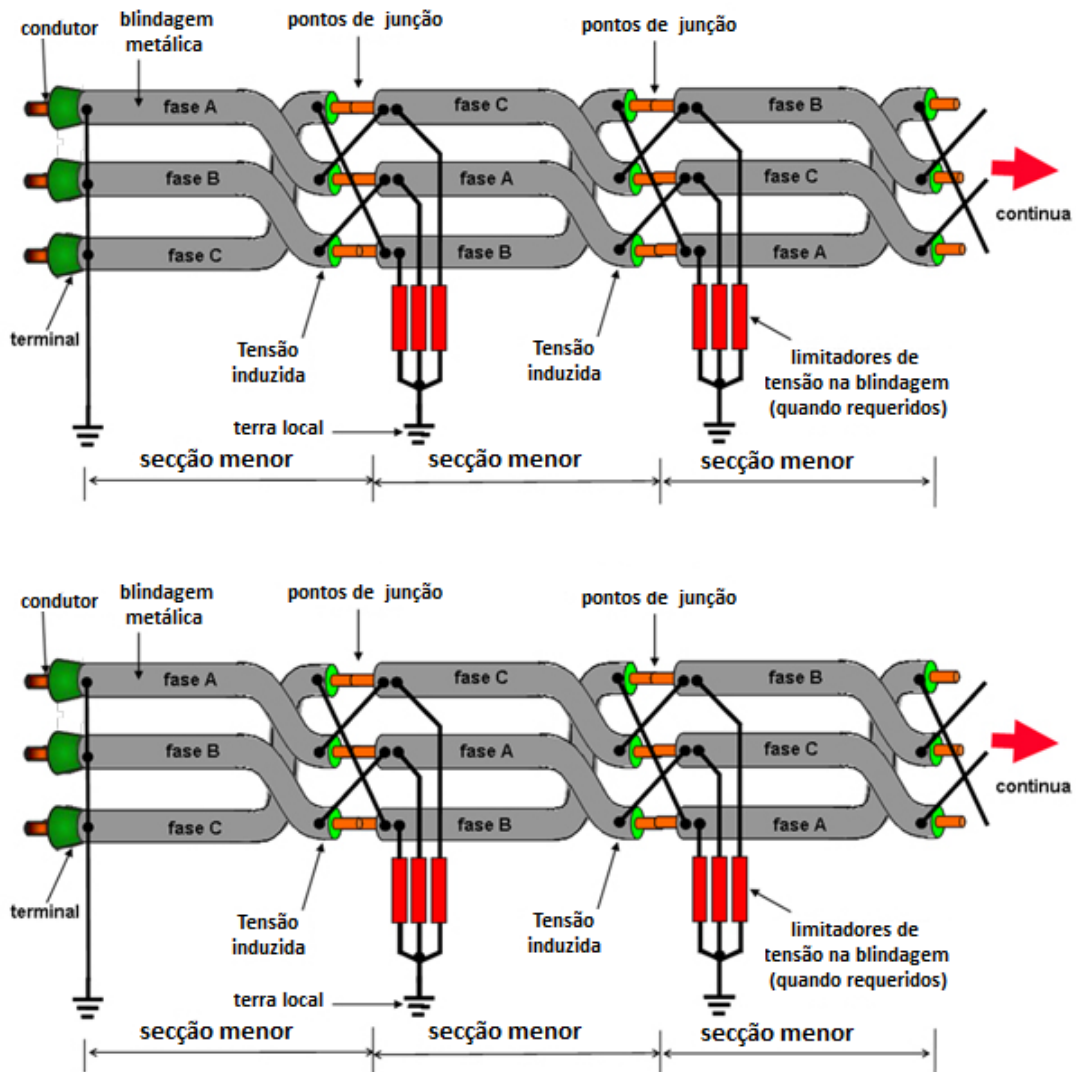


Figura 3.14 - Sistema de ligação cruzada contínua [16]

3.1.3- Sistemas Mistos de Ligação Especial à Terra

Quando o número de secções menores elementares não são exactamente divisíveis por três, o sistema pode ser concebido considerando uma mistura de comprimentos do sistema de ligação especial com blindagem cruzada e num só ponto. A Figura 3.15 mostra a combinação da ligação especial de blindagem num ponto, e no final do sistema a ligação especial de blindagem cruzada, a qual pode ser contínua ou seccionada [16].

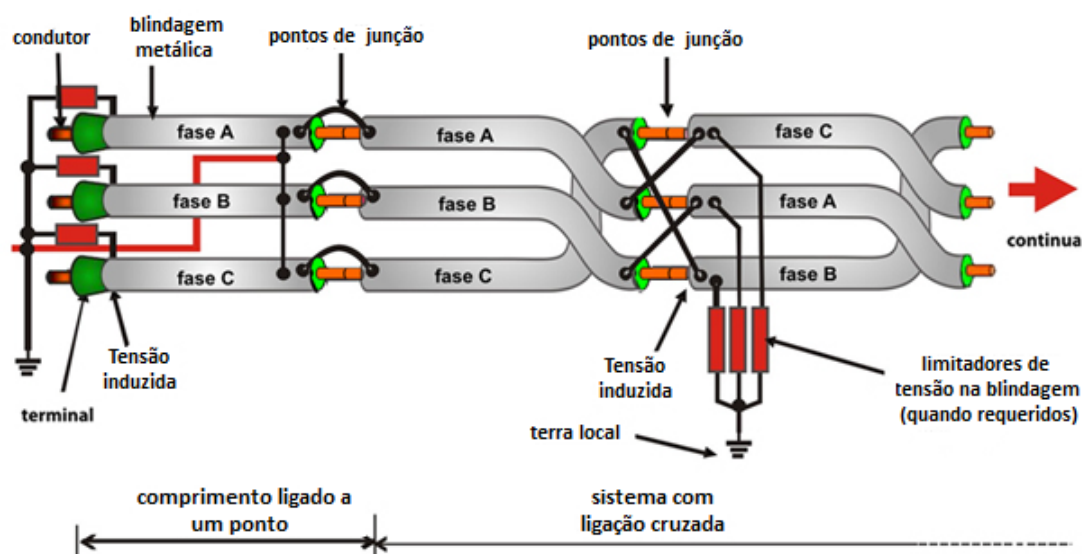


Figura 3.15 - Sistemas mistos [16]

3.2- Selecção de Sistemas com Ligação Especial de Blindagens

Para seleccionar um sistema com ligação especial de blindagem cruzada, é conveniente pensar nos pontos seguintes:

a) Uso do sistema de ligação especial de blindagem num ponto

Para formar um sistema com ligação especial de blindagem cruzada, é necessário um mínimo de três secções menores elementares, devendo ser usadas blindagens seccionadas e isoladas apenas na posição das juntas. Por esta razão este sistema deve ser evitado para circuitos de cabos que inclua apenas um ou dois comprimentos e, em vez disso, aplicar o sistema de ligação especial de blindagem num ponto único [16,21].

Embora as blindagens dos cabos num sistema de ligação especial de blindagem num ponto geralmente apresentarem uma área de secção transversal e condutividade com capacidade de conduzir correntes de curto-circuito devidas a falhas no sistema de energia, estas

blindagens não são capazes de realizar esta função por estarem ligadas à terra apenas num ponto. Por isso o condutor de continuidade de terra deve ser usado.

b) Vantagens do sistema de ligação especial de blindagem cruzada

A vantagem principal da ligação especial de blindagem cruzada, é que enquanto as correntes induzidas nas blindagens são anuladas durante operações normais de carga equilibrada, as blindagens formam um eixo contínuo entre as duas extremidades do circuito, ficando ligadas à terra nessas extremidades. Assim na ocorrência de defeitos à terra, as correntes nas blindagens podem fluir, sendo eliminada a necessidade do condutor de continuidade de terra.

c) Selecção de um sistema de ligação especial de blindagem cruzada

Para circuitos de cabos com comprimentos muito grandes deve-se seleccionar um sistema de ligação de blindagem cruzada seccionada e/ou um sistema de ligação cruzada contínua. As vantagens de cada método são as seguintes [16]:

d) Vantagens do sistema de ligação especial de blindagem cruzada seccionada

1. A união das blindagens em cada secção maior permite que a corrente de curto-circuito, em caso de defeito no cabo, se distribua entre as três blindagens, exceptuando a secção maior onde ocorreu o defeito.
2. A união e ligação à terra das blindagens em cada secção maior tende a diminuir as sobretensões transitórias nas blindagens.
3. O número de limitadores de tensão é reduzido e não são utilizados nas extremidades das secções maiores.
4. A união das blindagens em cada secção maior garante que nenhuma corrente nas blindagens devido às desigualdades no comprimento das secções menores, fluirá para além desses pontos.

e) Vantagens do sistema de ligação especial de blindagem cruzada seccionada

1. Os efeitos de secções menores de comprimento não uniforme podem ser reduzidos, uma vez que formam parte de um circuito de blindagens que contém várias secções. É possível empregar um número total de secções que não seja múltiplo de três.

2. As correntes podem ser monitorizadas em todo o circuito apenas com um ponto de medição.

f) Considerações adicionais

Em qualquer caso, a selecção do sistema de ligação à terra deve ser em função da solução mais económica, considerando o investimento inicial e de operação. Esta análise deverá envolver, conforme aplicável ao tipo de sistema escolhido, o seguinte [16]:

- Custos das junções sem blindagem interrompida.
- Custos de junções com blindagem interrompida.
- Caixas de ligação.
- Limitadores de tensão.
- Perdas na blindagem durante a vida útil do cabo.
- Capacidade de transporte de corrente no condutor.

Capítulo 4

Cabos Subterrâneos: Cálculo Eléctrico

A capacidade de transporte de um cabo isolado é limitada pela temperatura máxima admissível que o cabo pode alcançar em serviço [3]. Esta temperatura depende fortemente do calor dissipado pelos condutores.

As diferentes condições e disposições do circuito alteram as características eléctricas do cabo, produzindo um menor ou maior calor, diminuindo a capacidade de transporte [3]. Estes diferentes aspectos serão analisados nas diversas secções deste capítulo.

4.1- Resistência

Um cabo subterrâneo transportando uma corrente eléctrica aquece. O seu aquecimento é proporcional ao quadrado da intensidade de corrente eléctrica que o percorre devendo-se às perdas de potência activa por efeito de Joule. Quanto maior for a sua resistência eléctrica maior será o calor produzido.

Quando o condutor de um cabo é percorrido por uma corrente alternada, é induzido um campo magnético que gera uma força contra electromotriz no seu interior e nos condutores próximos, opondo-se ao sentido original da corrente. Isto faz com que a intensidade de corrente no cabo seja menor do que a corrente no caso de uma tensão contínua do mesmo valor que a tensão eficaz em corrente alternada. Deste modo a resistência óhmica aumenta e consequentemente as perdas por efeito de Joule [3]. Este fenómeno causa uma diferença na distribuição da corrente eléctrica no condutor, reduzindo a densidade de corrente no seu interior sendo mais elevada na periferia (efeito pelicular), e deformação da distribuição da corrente eléctrica no condutor devido à presença de correntes induzidas por campos magnéticos de outros cabos existentes nas proximidades do cabo em análise (i.e. efeito de proximidade) [3,25].

O factor de efeito pelicular y_s , é calculado pelas equações (eq. 4.1) e (eq. 4.2) de acordo com a norma [3]:

$$y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0,8X_s^4} \quad (\text{eq. 4.1})$$

Onde:

X_s argumento da função de Bessel usado para calcular o efeito pelicular, dado por [3]:

$$X_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_s \quad (\text{eq. 4.2})$$

k_s factor usado no cálculo de X_s (tabela 4.1);

f frequência da rede em Hertz;

R' resistência linear à temperatura de operação do cabo [Ω/km].

O factor de efeito pelicular 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 [12].

O factor de efeito de proximidade, y_p , é calculado pelas equações (eq. 4.3) e (eq. 4.4) [3]:

$$y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0,8X_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{X_p^4}{192 + 0,8X_p^4} + 0,27} \right] \quad (\text{eq. 4.3})$$

Onde:

X_p argumento da função de Bessel usado para calcular o efeito de proximidade, dado por [3]:

$$X_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p \quad (\text{eq. 4.4})$$

K_p factor usado no cálculo de X_p (tabela 4.1);

d_c diâmetro do condutor [mm];

s distância entre eixos dos condutores [mm];

f frequência da rede em Hertz [Hz];

R' resistência linear à temperatura de operação do cabo [Ω/km].

Os coeficientes dos factores pelicular e proximidade, K_s e K_p , são dados na Tabela 4.1, de acordo com a norma [3].

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

Tabela 4.1 - Coeficientes de efeito pelicular e de proximidade [3]

Determinados os valores dos factores y_s e y_p , a fórmula da resistência do condutor em corrente alternada e à temperatura máxima de serviço é [3]:

$$R = R' \cdot (1 + y_s + y_p) \quad [\Omega/\text{km}] \quad (\text{eq. 4.5})$$

Onde:

R' resistência d.c. do condutor à temperatura máxima de operação [Ω/Km];

y_s factor de efeito pelicular;

y_p factor de efeito de proximidade.

A resistência R' em corrente contínua à temperatura máxima de serviço, é [26]:

$$R' = R_0 \cdot [1 + \alpha_{20}(\theta - 20)] \quad [\Omega/\text{km}] \quad (\text{eq. 4.6})$$

Onde:

R_0 resistência d.c. do condutor a 20°C [Ω/m];

O valor de R_0 deve ser obtido directamente da IEC 228 [24]. Esta norma apresenta uma gama de dimensões de condutores, com o valor R_0 especificado.

α_{20} coeficiente de temperatura a 20°C;

- Cobre; $\alpha_{20}=3,83 \times 10^{-3} \text{ (k}^{-1}\text{)}$;
- Alumínio; $\alpha_{20}=4,03 \times 10^{-3} \text{ (k}^{-1}\text{)}$;

θ temperatura máxima de operação em graus Celsius (esta variável deverá ser determinada pelo tipo de isolamento a ser usada - Tabela A.1 Anexo A).

4.2- Perdas Óhmicas nos Condutores

Quando uma corrente I atravessa um condutor, são geradas perdas de potência activa por efeito de Joule, cujo valor por unidade de comprimento é:

$$W_j = R \cdot I^2 \quad [\Omega/km] \quad (\text{eq. 4.7})$$

Onde:

R resistência do condutor em corrente alternada e à temperatura máxima de serviço $[\Omega/Km]$;

I corrente no condutor por fase $[A]$.

4.3- Capacidade e Perdas Dieléctricas nos Isolamentos

A capacidade entre dois condutores é determinada pelo quociente entre a quantidade de energia armazenada nos mesmos e a diferença de potencial aplicada. Ela varia com a geometria do cabo e os materiais utilizados na sua construção. Para condutores de secção circular é dada por [3]:

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \cdot \ln \left(\frac{D_i}{d_c} \right)} 10^{-9} \quad [F/m] \quad (\text{eq. 4.8})$$

Onde:

ε permitividade relativa da isolamento;

D_i diâmetro externo da isolamento (excluindo ecrã) $[mm]$;

d_c diâmetro do condutor, incluindo ecrã, se existir $[mm]$.

As perdas dieléctricas 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 4.2 encontram-se os valores mais usuais para o factor de perdas nos isolantes usados em alta tensão [3].

Tipo isolante	tang δ	U_0 (kV)
EPR	0,005	63,5
PVC	0,1	6
PE	0,001	127
XLPE (unfilled)	0,001	127
XLPE (filled)	0,005	63,5

Tabela 4.2 - Factores de perdas dieléctricas para alta tensão [3]

As perdas dieléctricas em cada fase e por unidade de comprimento nos isolamentos são dadas por [3]:

$$W_d = \omega \cdot C \cdot U_0^2 \cdot \tan \delta \quad [W/m] \quad (\text{eq. 4.9})$$

Onde:

- ω frequência angular da rede ($2\pi f$);
- C capacidade por unidade de comprimento [F/m] calculada por (4.8);
- U_0 tensão simples [V];
- δ factor de perdas.

4.4- Indutância Linear por Unidade de Comprimento

A indutância de operação em geral depende da relação da distância entre eixos dos condutores e do diâmetro externo. Os casos considerados são [27]:

- Cabos instalados em trevo

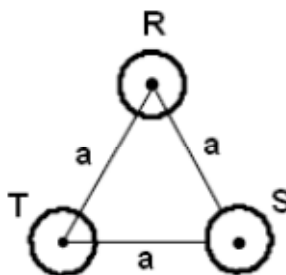


Figura 4.1 - Disposição dos cabos em trevo [12]

$$L_R = L_S = L_T = L \quad (\text{eq. 4.10})$$

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \left(\frac{a}{0,779 \cdot r_L} \right) \quad [H/km] \quad (\text{eq. 4.11})$$

- Cabos instalados em esteira

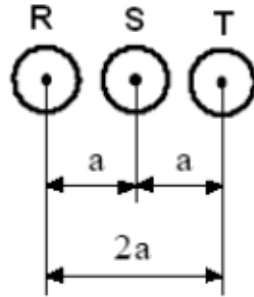


Figura 4.2 - Disposição dos cabos em esteira [12]

$$L_m = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \left(\frac{a'}{0,779 \cdot r_L} \right) \quad [H/km] \quad (\text{eq. 4.12})$$

$$a' = \sqrt[3]{2} \cdot a \quad [mm] \quad (\text{eq. 4.13})$$

Nestas expressões:

- L indutância linear para cada um dos condutores de fase de um sistema trifásico [H/Km];
- a distância entre eixos dos cabos [mm];
- r_L raio da alma condutora de cada um dos condutores [mm];
- L_m indutância linear média [H/km];

4.5- Indutância Mútua entre a Alma e a Blindagem

A auto-indução entre almas e blindagens é considerada no caso de cabos monopolares sem transposição 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:

- Sistema de ponto único de ligação à terra;
- Quando os cabos estão em esteira com transposição;
- Sistema de ligação cruzada de blindagens.

A reactância mútua entre a alma e a blindagem calcula-se através da fórmula [27]:

$$X_M = \omega \cdot L_M \quad [\Omega/km] \quad (\text{eq. 4.14})$$

Onde:

ω frequência angular da rede ($2\pi f$);

L_M indutância mútua entre o condutor e a blindagem calculada como se segue [27]:

- Cabos instalados em trevo

$$L_M = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{2a}{d_M}\right) \quad [H/km] \quad (\text{eq. 4.15})$$

- Cabos instalados em esteira

$$L_M = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot \sqrt[3]{2} \cdot a}{d_M}\right) \quad [H/km] \quad (\text{eq. 4.16})$$

Onde:

a distância entre eixos dos cabos [mm];

d_M diâmetro médio da blindagem [mm].

4.6- Tensão Induzida na Blindagem

Como foi referido anteriormente, a circulação de correntes em regime permanente induz tensões no circuito das blindagens ao longo de todo o seu comprimento. Estas tensões dependem da disposição dos cabos e podem produzir ou não correntes dependendo do sistema de ligação da blindagem aplicado.

Para um sistema disposto em trevo, considerando os cabos igualmente espaçados, as tensões induzidas nas blindagens para a fase a, b e c respectivamente, são dadas pelas seguintes expressões [21]:

$$E_a = j\omega I_b (2 \cdot 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} + \frac{j\sqrt{3}}{2} \right) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) \quad [V/m] \quad (\text{eq. 4.17})$$

$$E_b = j\omega I_b (2 \cdot 10^{-7}) \left(\frac{2S}{d} \right) \quad [V/m] \quad (\text{eq. 4.18})$$

$$E_c = j\omega I_b (2 \cdot 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} - \frac{j\sqrt{3}}{2} \right) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) \quad [V/m] \quad (\text{eq. 4.19})$$

Onde:

- ω frequência angular da rede [2 π f];
 I_b corrente no condutor b [A];
 S distância entre eixos dos cabos [mm];
 d diâmetro médio da blindagem [mm].

Para um circuito disposto em esteira sem transposição, com cabos igualmente espaçados, as tensões induzidas nas blindagens para a fase a, b e c respectivamente, são dadas pelas seguintes expressões [21]:

$$E_a = j\omega I_b (2 \cdot 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} \log_e \frac{S}{d} + \frac{j\sqrt{3}}{2} \log_e \frac{4S}{d} \right) \quad [V/m] \quad (\text{eq. 4.20})$$

$$E_b = j\omega I_b (2 \cdot 10^{-7}) \left(\frac{2S}{d} \right) \quad [V/m] \quad (\text{eq. 4.21})$$

$$E_c = j\omega I_b (2 \cdot 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} \log_e \frac{S}{d} - \frac{j\sqrt{3}}{2} \log_e \frac{4S}{d} \right) \quad [V/m] \quad (\text{eq. 4.22})$$

Onde:

- ω frequência angular da rede (2 π f);
 I_b corrente no condutor b [A];
 S distância entre eixos dos cabos [mm];
 d diâmetro médio da blindagem [mm].

Para um circuito disposto em esteira com transposição, com cabos igualmente espaçados, as tensões induzidas nas blindagens para a fase a, b e c são iguais e dadas pela seguinte expressão [28]:

$$U = X_M \cdot I \cdot L \quad [V] \quad (\text{eq. 4.23})$$

Onde:

- X_M indutância mútua entre a alma e a blindagem [Ω /km];
 I corrente no condutor por fase [A];
 L comprimento do cabo [km].

4.7- Factor de Perdas da Blindagem

As perdas na blindagem devem-se por um lado às perdas ôhmicas por circulação das correntes induzidas nas blindagens, e por outro lado às perdas por correntes de Foucault. Estas perdas calculam-se como um incremento aparente (λ_1) da resistência do condutor.

O factor λ_1 reflecte a influência das correntes que circulam na blindagem devido ao aparecimento das tensões induzidas (λ_1'), e a influência das correntes de Foucault na própria blindagem (λ_1''), calculado com a seguinte expressão [3]:

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1'' \quad (\text{eq. 4.24})$$

Nos sistemas de ligação rígida à terra, a influência das correntes de Foucault (λ_1'') é insignificante em comparação com a influência das correntes que circulam na blindagem (λ_1') [3].

Nos sistemas de ligação especial à terra, não há circulação de correntes na blindagem, apenas ocorrem perdas devida à existência de correntes de Foucault (λ_1'') [3].

O factor de perdas da blindagem para três cabos monopolares dispostos em trevo no sistema de ligação rígida à terra é dado por [3]:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} \quad (\text{eq. 4.25})$$

$$\lambda_1'' = 0 \quad (\text{eq. 4.26})$$

$$R_s = R_{s0} \times [1 + \alpha_{20}(\theta_s - 20)] \quad [\Omega/km] \quad (\text{eq. 4.27})$$

Onde:

- R_s resistência da blindagem à temperatura de operação $[\Omega/km]$;
 R resistência do condutor em corrente alternada à temperatura máxima de operação $[\Omega/km]$ dada por (eq. 4.5);
 X reactância por unidade de comprimento da blindagem por unidade de comprimento do cabo $[\Omega/km]$ dada por (eq. 4.14).

Para três cabos monopolares dispostos em esteira com o cabo do meio equidistante dos cabos dos extremos sem transposição no sistema de ligação rígida à terra, o factor de perdas e não é igual para os três cabos. O cabo que apresenta mais perdas é um dos cabos externos com a fase em atraso. O factor é dado por [3]:

$$\lambda'_{11} = \frac{R_S}{R} \left[\frac{0,75P^2}{R_S^2 + P^2} + \frac{0,25Q^2}{R_S^2 + Q^2} + \frac{2R_S P Q X_m}{\sqrt{3}(R_S^2 + P^2)(R_S^2 + Q^2)} \right] \quad (\text{eq. 4.28})$$

No outro cabo externo o factor de perdas é dado por [3]:

$$\lambda'_{12} = \frac{R_S}{R} \left[\frac{0,75P^2}{R_S^2 + P^2} + \frac{0,25Q^2}{R_S^2 + Q^2} - \frac{2R_S P Q X_m}{\sqrt{3}(R_S^2 + P^2)(R_S^2 + Q^2)} \right] \quad (\text{eq. 4.29})$$

No cabo do meio o factor de perdas é dado por [3]:

$$\lambda'_{1m} = \frac{R_S}{R} \frac{Q^2}{R_S^2 + Q^2} \quad (\text{eq. 4.30})$$

Nas três expressões anteriores (eq. 4.28), (eq. 4.29) e (eq. 4.30) verifica-se que:

$$P = X + X_m \quad (\text{eq. 4.31})$$

$$Q = X - \frac{X_m}{3} \quad (\text{eq. 4.32})$$

$$\lambda''_1 = 0 \quad (\text{eq. 4.26})$$

$$X_m = 2\omega 10^{-7} \ln(2) \quad [\Omega/\text{Km}] \quad (\text{eq. 4.33})$$

Onde:

R_S resistência da blindagem à temperatura de operação $[\Omega/\text{km}]$;

R resistência do condutor em corrente alternada à temperatura máxima de operação $[\Omega/\text{km}]$ dada por (eq. 4.5);

X reactância por unidade de comprimento da blindagem por unidade de comprimento do cabo $[\Omega/\text{km}]$ dada por (eq. 4.14);

X_m reactância mútua por unidade de comprimento entre a blindagem de um cabo externo e os outros dois cabos dispostos em esteira $[\Omega/\text{km}]$.

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 (eq. 4.28) [3].

Para três cabos monopolares em esteira, com o cabo do meio equidistante dos cabos dos extremos e transposição regular dos cabos, no sistema de ligação rígida à terra, o factor de perdas é dado por [3]:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_1}\right)^2} \quad (\text{eq. 4.34})$$

$$\lambda''_1 = 0 \quad (\text{eq. 4.26})$$

$$X_1 = 2\omega 10^{-7} \ln \left\{ 2 \cdot \sqrt[3]{2} \cdot \left(\frac{s}{d} \right) \right\} \quad [\Omega/m] \quad (\text{eq. 4.35})$$

Onde:

- R_s resistência da blindagem à temperatura de operação $[\Omega/\text{km}]$;
- R resistência do condutor em corrente alternada à temperatura máxima de operação $[\Omega/\text{km}]$ dada por (eq. 4.5);
- X_1 reactância por unidade de comprimento da blindagem $[\Omega/m]$;
- s distância entre eixos dos cabos $[\text{mm}]$;
- d diâmetro médio da blindagem $[\text{mm}]$.

Para cabos unipolares em sistemas de ligação especial à terra, o factor de perdas da corrente de Foucault é dado por [3]:

$$\lambda''_1 = \frac{R_s}{R} \left[g_s \lambda_0 (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}} \right] \quad (\text{eq. 4.36})$$

Onde:

$$g_s = 1 + \left(\frac{t_s}{D_s} \right)^{1,74} (\beta_1 D_s 10^{-3} - 1,6) \quad (\text{eq. 4.37})$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4\pi\omega}{10^7 \rho_s}} \quad (\text{eq. 4.38})$$

- R_s resistência da blindagem à temperatura de operação $[\Omega/\text{km}]$;
- R resistência do condutor em corrente alternada à temperatura máxima de operação $[\Omega/\text{km}]$ dada por (eq. 4.5);
- ρ_s resistividade eléctrica do material da blindagem à temperatura de operação $[\Omega.m]$;

- D_s diâmetro externo da blindagem do cabo [mm];
 t_s espessura da blindagem [mm];
 ω frequência angular da rede ($2\pi f$).

As fórmulas para λ_0 , Δ_1 e Δ_2 são dadas a seguir em que [3]:

$$m = \frac{\omega}{R_s} 10^{-7} \quad (\text{eq. 4.39})$$

Para $m \leq 0,1$ e Δ_1 e Δ_2 podem ser ignoradas.

- Para três cabos dispostos em trevo [3]:

$$\lambda_0 = 3 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2 \quad (\text{eq. 4.40})$$

$$\Delta_1 = (1,14m^{2,45} + 0,33) \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0,92m+1,66)} \quad (\text{eq. 4.41})$$

$$\Delta_2 = 0 \quad (\text{eq. 4.42})$$

Onde:

- s distância entre eixos dos cabos [mm];
 d diâmetro médio da blindagem [mm].

- Para três cabos dispostos em esteira, os factores λ_0 , Δ_1 e Δ_2 dependem da localização do cabo em estudo dados em a) b) c) [3]:

a) Cabo do centro

$$\lambda_0 = 6 \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2 \quad (\text{eq. 4.43})$$

$$\Delta_1 = 0,86m^{3,08} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1,4m+0,7)} \quad (\text{eq. 4.44})$$

$$\Delta_2 = 0 \quad (\text{eq. 4.45})$$

b) Cabo externo com fase em avanço

$$\lambda_0 = 1,5 \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2 \quad (\text{eq. 4.46})$$

$$\Delta_1 = 4,7m^{0,7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0,16m+2)} \quad (\text{eq. 4.47})$$

$$\Delta_2 = 21m^{2,2} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1,47m+5,06)} \quad (\text{eq. 4.48})$$

c) Cabo externo com a fase em atraso

$$\lambda_0 = 1,5 \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2 \quad (\text{eq. 4.49})$$

$$\Delta_1 = -\frac{0,74(m+2)m^{0,5}}{2+(m-0,3)^2} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(m+1)} \quad (\text{eq. 4.50})$$

$$\Delta_2 = 0,92m^{3,7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(m+2)} \quad (\text{eq. 4.51})$$

Para cabos colocados em tubo, as perdas no condutor podem ser calculadas pela fórmula dada em (4.25) para a blindagem de um cabo monopolar, alterada por um factor 1,5. A fórmula modificada será [3]:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1,5}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2} \quad (\text{eq. 4.52})$$

Onde:

R_s resistência da blindagem à temperatura de operação [Ω/km];

R resistência do condutor em corrente alternada à temperatura máxima de operação [Ω/km] dada por (eq. 4.5);

X reactância por unidade de comprimento da blindagem por unidade de comprimento do cabo [Ω/km] dada por (eq. 4.14).

Onde o factor de efeito pelicular e proximidade da resistência R do condutor em corrente alternada à temperatura máxima de operação são aumentados igualmente por um factor de 1,5. A resistência R para este caso calcula-se por [3]:

$$R = R' [1 + 1,5(y_s + y_p)] \quad [\Omega/km] \quad (\text{eq. 4.53})$$

Onde:

R' resistência d.c. do condutor à temperatura máxima de operação $[\Omega/Km]$;
 y_s factor de efeito pelicular;
 y_p factor de efeito de proximidade.

4.8- Factor de Perdas da Armação

O cálculo para o factor de perdas da armação é diferente consoante a armadura apresente propriedades magnéticas como é o caso do aço ou não.

4.8.1- Armaduras ou Reforços Não Magnéticos

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 4.7. 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.

4.8.2- Armadura de Aço, Ligada à Blindagem nos Dois Lados

A resistência equivalente da blindagem e armadura em paralelo é dada por [3]:

$$R_e = \frac{R_s \cdot R_A}{R_s + R_A} \quad [\Omega/m] \quad (\text{eq. 4.54})$$

Onde:

R_s resistência da blindagem por unidade de comprimento do cabo à temperatura máxima de operação $[\Omega/m]$;
 R_A resistência A.C. da armadura por unidade de comprimento à temperatura máxima de operação $[\Omega/m]$.

A indutância dos elementos do circuito é calculada por fase, como de seguida [3]:

$$(\text{eq. 4.55})$$

$$H_s = 2 \times 10^{-7} \ln\left(\frac{2s_2}{d}\right) \quad [\Omega/m]$$

Onde H_s é a indutância devida à blindagem (H/m) [3]

$$H_1 = \pi\mu_e \left(\frac{n_1 d_f^2}{\rho d_A}\right) 10^{-7} \sin\beta \cos\gamma \quad [H/m] \quad (\text{eq. 4.56})$$

$$H_2 = \pi\mu_e \left(\frac{n_1 d_f^2}{\rho d_A}\right) 10^{-7} \sin\beta \cos\gamma \quad [H/m] \quad (\text{eq. 4.57})$$

$$H_3 = 0,4(\mu_t - 1) \left(\frac{d_f}{d_A}\right) 10^{-6} \cos^2\beta \quad [H/m] \quad (\text{eq. 4.58})$$

Onde:

H_1, H_2 e H_3 são componentes da indutância devido aos condutores de aço [H/m];

s_2 espaçamento axial entre cabos adjacentes em trevo; para cabos em esteira s_2 é a média geométrica dos espaços [mm];

d_A diâmetro médio da armadura [mm];

d_f diâmetro do condutor de aço [mm];

ρ comprimento da camada do condutor de aço ao longo do cabo [mm];

n_1 número de condutores de aço;

β ângulo entre o eixo do condutor da armadura e o eixo do cabo;

γ tempo de atraso angular do fluxo magnético longitudinal nos condutores de aço em relação à força magnetizante;

μ_e permeabilidade relativa longitudinal dos condutores de aço;

μ_t permeabilidade relativa transversal dos condutores de aço.

Assumem-se os seguintes valores de γ , μ_e e μ_t [3]:

$$\mu_e = 400$$

$$\mu_t = 10, \text{ quando os condutores estão em contacto}$$

$$\mu_t = 1, \text{ quando os condutores estão separados}$$

$$\gamma = 45^\circ$$

Tendo:

$$B_1 = \omega(H_s + H_1 + H_3) \quad [\Omega/m] \quad (\text{eq. 4.59})$$

$$B_2 = \omega(H_2) \quad [\Omega/m] \quad (\text{eq. 4.60})$$

As perdas totais na blindagem e armadura $W_{(s+A)}$ são dadas por [3]:

$$W_{(s+A)} = I^2 \cdot R_e \left(\frac{B_2^2 + B_1^2 + R_e B_2}{(R_e + B_2)^2 + B_1^2} \right) \quad [W/m] \quad (\text{eq. 4.61})$$

As perdas na blindagem e armadura podem ser assumidas como aproximadamente iguais [3]:

$$\lambda'_1 = \lambda_2 = \frac{W_{(s+A)}}{2W_c} \quad (\text{eq. 4.62})$$

Onde:

$W_c = I^2 R$ perdas no condutor [W/m];

4.9- Queda de Tensão num Cabo

Para determinar a queda de tensão é necessário avaliar as perdas que ocorrem em cada um dos elementos do cabo (condutor, isolamento e protecções metálicas). A expressão que proporciona o módulo da queda de tensão numa linha de transporte de energia eléctrica, considerando os parâmetros característicos da linha em estudo assim como o sistema de ligação das blindagens é a seguinte [5]:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot L \cdot \sqrt{(R(1 + \lambda))^2 + X_L^2} \quad [V] \quad (\text{eq. 4.63})$$

Onde:

- I intensidade da corrente na linha em estudo [A];
- R resistência do condutor em corrente alternada à temperatura máxima de operação [Ω/km] dada por (eq. 4.5);
- λ factor de perdas da blindagem;
- X_L reactância indutiva da linha [Ω/km];
- L comprimento do cabo [km].

4.10-Potência Aparente e Potência Activa

A intensidade de corrente que circula pela linha está relacionada com a potência transportada segundo as seguintes expressões:

- 1) Quando é conhecido apenas a potência transportada:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} \quad [A] \quad (\text{eq. 4.64})$$

Onde:

S potência aparente [MVA];
 U tensão composta [kV].

2) Quando é conhecido a potência transportada e o factor de potência ($\cos \varphi$):

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} \quad [A] \quad (\text{eq. 4.65})$$

Onde:

P potência aparente [MVA];
 U tensão composta [kV];
 $\cos \varphi$ factor de potência;

Capítulo 5

Cálculo Térmico

A intensidade de corrente máxima admissível em regime permanente, é aquela que é obtida quando o equilíbrio térmico é alcançado. Esse equilíbrio depende da resistência térmica total dos elementos, que devem passar o calor gerado no cabo para atingir o meio ambiente. Estes diferentes aspectos serão analisados nas diversas secções deste capítulo.

5.1- Dimensionamento Térmico

Os vários componentes do cabo e do ambiente externo, opõem uma resistência à propagação do calor produzido a partir das fontes de calor no interior do cabo (condutores, blindagens e armaduras). Esta resistência depende da resistência térmica dos diferentes materiais e espessuras dos mesmos.

A diferença de temperatura $\Delta\theta$, entre duas faces de um elemento, é proporcional à potência calorífica W , que o atravessa, de acordo com a expressão (eq. 5.1), e a Figura 5.1 [12].

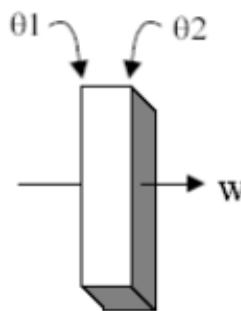


Figura 5.1 - Lei térmica [12]

$$\Delta\theta = T \times W \quad [K] \quad (\text{eq. 5.1})$$

Onde:

T resistência térmica do elemento considerado [K.m/W];
 W potência calorífica [W/m²].

Esta relação permite que os circuitos eléctricos e térmicos possam ser estudados da mesma maneira, mediante as analogias seguintes [12]:

Diferença de temperatura	↔	Diferença de potencial
Potência calorífica	↔	Intensidade de corrente
Resistência térmica	↔	Resistência eléctrica

A Figura 5.2 ilustra a relação entre o circuito eléctrico e térmico se considerarmos um cabo subterrâneo monopolar.

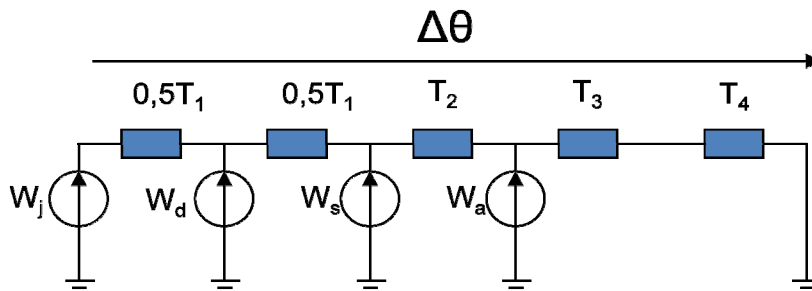


Figura 5.2 - Relação entre circuito eléctrico e térmico [29]

Onde:

$\Delta\theta$ variação da temperatura acima da temperatura ambiente [K];
 T_1 resistência térmica da camada isolante [K.m/W];
 T_2 resistência térmica das bainhas não metálicas entre a camada isolante e a armação [K.m/W];
 T_3 resistência térmica da bainha exterior [K.m/W];
 T_4 resistência térmica do meio envolvente do cabo [K.m/W];
 W_j perdas na alma condutora [W/km];
 W_s perdas na blindagem [W/km];
 W_a perdas na armação [W/km];
 W_d perdas dieléctricas [W/km].

De acordo com a Figura 5.2 as perdas totais por efeito de Joule são dadas por (eq. 5.2).

$$W_T = W_j + W_s + W_A = I^2 \cdot R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \quad [W/km] \quad (\text{eq. 5.2})$$

Onde:

R resistência do condutor em corrente alternada e à temperatura máxima de serviço [Ω/km];

I corrente no condutor por fase (A).

λ_1 factor de perdas da blindagem metálica para as perdas totais em todos os condutores do cabo;

λ_2 factor de perdas da armadura para as perdas totais em todos os condutores do cabo.

5.2- Resistência Térmica das Bainhas

As resistências térmicas podem escrever-se sob a forma da seguinte expressão [12]:

$$T = \rho_T \cdot F \quad [K \cdot m/W] \quad (\text{eq. 5.3})$$

Onde:

ρ_T resistividade térmica do material constituinte [$K \cdot m/W$];

F factor que depende da forma e das dimensões do elemento considerado;

Como os cabos de Alta Tensão e em alguns casos os de Média Tensão são monopolares, as bainhas são cilíndricas. Assim o cálculo da resistência térmica é igual para todas as bainhas não metálicas, sendo o factor F obtido através da seguinte expressão [30]:

$$F = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (\text{eq. 5.4})$$

Onde:

r_2 raio exterior da bainha [mm];

r_1 raio interior da bainha [mm].

Usando as expressões (eq. 5.3) e (eq. 5.4), e como é mais habitual trabalhar com as espessuras das diferentes bainhas existentes nos cabos, a resistência térmica determina-se através da seguinte expressão [30]:

$$T = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[1 + \frac{2t}{r_1} \right] \quad [K.m/W] \quad (\text{eq. 5.5})$$

Onde:

ρ_T resistividade térmica do material constituinte [K.m/W];
 t espessura da bainha [mm];
 r_1 raio interior da bainha [mm].

Na Tabela A.2 e A.3 do anexo A, apresentam-se os vários materiais extrudidos em cabos de Média e Alta Tensão com respectivas resistividades térmicas usados para a camada isolante e para a bainha exterior.

5.3- 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 [12]. Por isso é necessário ter uma especial atenção para o cálculo desta resistência térmica.

5.3.1- Cabos Enterrados

A resistência térmica é fortemente influenciada pelas características térmicas do solo, do diâmetro do cabo, da disposição dos cabos, modo de instalação (directamente enterrados, entubados), e da existência ou não de fontes de calor externas ao cabo. Estes são aspectos importantes para a determinação da resistência térmica de cabos enterrados.

Quando o cabo está em serviço, todo o calor produzido pelo cabo deve ser transmitido para o meio envolvente e por isso quanto menor for a resistividade térmica do terreno maior é a dissipação do calor. Na Tabela A.4 do anexo A são apresentados alguns valores da resistividade térmica de vários tipos de solo.

i) Grupos de Cabos Enterrados Afastados com Cargas Iguais

Neste sistema a resistência térmica do meio envolvente é determinada usando a sobreposição, assumindo que cada cabo actua como uma fonte de calor não interferindo com a radiação de calor dos outros. Considera-se que os cabos estão separados quando a distância entre os seus eixos é superior a duas vezes o diâmetro externo do cabo [30].

Usualmente através da configuração é possível determinar qual o cabo mais quente, e calcula-se assim 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 (eq. 5.26).

A determinação da resistência térmica do meio envolvente, T_4 , realiza-se com recurso ao método das imagens, tendo em conta as distâncias entre cabos e entre as suas imagens tal como se observa na Figura 5.3.

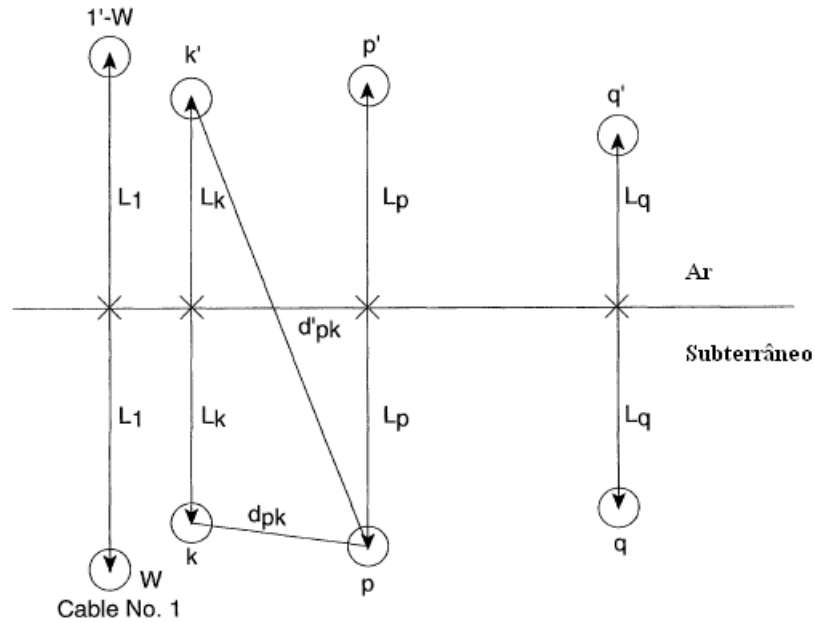


Figura 5.3 - Método das imagens para determinação da resistência térmica [30]

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 a seguinte [30]:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln \left\{ \left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right) \left[\left(\frac{d'_{p1}}{d_{p1}} \right) \left(\frac{d'_{p2}}{d_{p2}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pq}}{d_{pq}} \right) \right] \right\} \quad [K.m/W] \quad (\text{eq. 5.6})$$

Onde:

$$u = \frac{2L}{D_e} \quad (\text{eq. 5.7})$$

- 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.

ii) Grupos de Cabos Enterrados Juntos com Cargas Iguais

Neste sistema, os cabos encontram-se próximos entre si, pelo que a radiação de calor de cada cabo será perturbada pela radiação de calor dos outros [30].

- Grupos de cabos enterrados em esteira conjunta

Se os cabos estiverem providos de bainhas metálicas debaixo da bainha exterior, de forma a providenciar uma função isotérmica a resistência térmica é dada por [30]:

$$T_4 = \rho_T(0,475 \ln(2u) - 0,346) \quad [K.m/W] \quad (\text{eq. 5.8})$$

Onde:

$$u = \frac{2L}{D_e} \quad (\text{eq. 5.7})$$

- L distância da superfície ao eixo do cabo [mm];
- D_e diâmetro externo do cabo [mm].

Caso o cabo não tenha uma bainha metálica sob a bainha exterior, de forma a ser insuficiente a função isotérmica, a resistência térmica é dada por [30]:

$$T_4 = \rho_T(0,475 \ln(2u) - 0,142) \quad [K.m/W] \quad (\text{eq. 5.9})$$

Onde:

$$u = \frac{2L}{D_e} \quad (\text{eq. 5.7})$$

- L distância da superfície ao eixo do cabo [mm];
- D_e diâmetro externo do cabo [mm].

Esta expressão pode ser usada para cabos que não tenham bainhas metálicas, podendo ter blindagem em fios de cobre.

- **Grupos de cabos enterrados em trevo juntivo**

Para esta configuração, a distância L é medida em relação ao centro do grupo de cabos.

No caso de cabos com bainhas metálicas debaixo da bainha exterior a resistência térmica determina-se através de [30]:

$$T_4 = \frac{1,5}{\pi} \rho_T [\ln(2u) - 0,630] \quad [K.m/W] \quad (\text{eq. 5.10})$$

Onde:

$$u = \frac{2L}{D_e} \quad (\text{eq. 5.7})$$

L distância da superfície ao eixo do cabo [mm];

D_e diâmetro externo do cabo [mm].

Neste caso, a resistência térmica da bainha externa determinada através de (eq. 5.5) deve ser multiplicada por 1,6 [30].

No caso de cabos que não tenham bainhas metálicas sob a bainha exterior, a resistência térmica determina-se através de [30]:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T [\ln(2u) - 2 \ln(u)] \quad [K.m/W] \quad (\text{eq. 5.11})$$

Onde:

$$u = \frac{2L}{D_e} \quad (\text{eq. 5.7})$$

L distância da superfície ao eixo do cabo [mm];

D_e diâmetro externo do cabo [mm].

Esta expressão pode ser usada para cabos que não tenham bainhas metálicas, 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, T_4 determina-se através de [30]:

(eq. 5.10)

$$T_4 = \frac{1,5}{\pi} \rho_T [\ln(2u) - 0,630] \quad [K.m/W]$$

Onde:

$$u = \frac{2L}{D_e} \quad (\text{eq. 5.7})$$

L distância da superfície ao eixo do cabo [mm];

D_e diâmetro externo do cabo [mm].

Neste tipo de instalação a resistência térmica da camada isolante (T1) deve ser multiplicada por um factor de 1,16, e a resistência térmica da bainha externa (T3) deve ser multiplicada por um factor de 1,6 [30], sendo ambas as resistências térmicas obtidas através da expressão (eq. 5.5). Para as expressões (eq. 5.8), (eq. 5.9), (eq. 5.10) e (eq. 5.11) o coeficiente u é dado por (eq. 5.7).

5.3.2- Cabos ao Ar Livre Protegidos da Radiação Solar

A resistência térmica T_4 em torno de um cabo ao ar livre e protegido da radiação solar é dada pela fórmula [30]:

$$T_4 = \frac{1}{\pi D_e^* h (\Delta\theta_s)^{1/4}} \quad [K.m/W] \quad (\text{eq. 5.12})$$

Onde:

$$h = \frac{Z}{(D_e^*)^g} + E \quad [W/m^2 K^{5/4}] \quad (\text{eq. 5.13})$$

D_e^* diâmetro externo do cabo [mm];

h coeficiente de dissipação de calor obtido através da formula em cima, usando os valores apropriados das constantes Z , E e g dados na tabela A.5 do anexo A;

$\Delta\theta_s$ excesso da temperatura na superfície do cabo acima da temperatura ambiente [K].

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 (eq. 5.14), é calculado o valor de $(\Delta\theta_s)^{1/4}_{n+1}$ terminando o processo iterativo quando se verifica a condição (eq. 5.15).

$$(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} = \left[\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d}{1 + K_A(\Delta\theta_s)_n^{1/4}} \right]^{0,25} \quad [K] \quad (\text{eq. 5.14})$$

$$(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} - (\Delta\theta_s)_n^{1/4} \leq 0,001 \quad (\text{eq. 5.15})$$

Onde:

$$K_A = \frac{\pi D_e^* h}{(1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \left[\frac{T_1}{n} + T_2(1 + \lambda_1) + T_3(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right] \quad (\text{eq. 5.16})$$

$$\Delta\theta_d = W_d \left[\left(\frac{1}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} - \frac{1}{2} \right) T_1 - \frac{n\lambda_2 T_2}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \right] \quad [K] \quad (\text{eq. 5.17})$$

$\Delta\theta$ variação da temperatura acima da temperatura ambiente [K].

5.3.3- Cabos Directamente Expostos à Radiação Solar

Quando os cabos são expostos directamente à radiação solar, a determinação da resistência térmica do meio envolvente é realizada de forma idêntica à anterior apenas substituindo (eq. 5.14) por (eq. 5.18) [30].

$$(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} = \left[\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d + \Delta\theta_{ds}}{1 + K_A(\Delta\theta_s)_n^{1/4}} \right]^{0,25} \quad [K] \quad (\text{eq. 5.18})$$

Onde:

$$\Delta\theta_{ds} = \frac{\sigma D_e^* H}{(1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \left[\frac{T_1}{n} + T_2(1 + \lambda_1) + T_3(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right] \quad [K] \quad (\text{eq. 5.19})$$

σ coeficiente de absorção solar da radiação para o cabo (ver tabela A.6 - anexo A) [K.m/W];

H intensidade de radiação solar, cujo valor é considerado 103 W/m² para a maioria dos locais, sendo recomendado obter o valor local quando possível;

D_e^* diâmetro externo do cabo [mm].

5.3.4- Cabos Entubados ou em Galerias

A resistência térmica do meio envolvente para cabos entubados ou em galerias é dividido em três partes:

- 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''').

A resistência térmica obtém-se assim somando essas três partes [30]:

$$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4''' \quad [K.m/W] \quad (\text{eq. 5.20})$$

i) Resistência Térmica entre a Superfície do Cabo e o Tubo

O valor da resistência térmica T_4' depende do número de cabos dentro do tubo, do diâmetro externo e do material do tubo, e calcula-se através de [30]:

$$T_4' = \frac{U}{1 + 0,1 \times (V + Y \times \theta_m) \times D_e} \quad [K.m/W] \quad (\text{eq. 5.21})$$

Onde:

$\left. \begin{matrix} U \\ V \\ Y \end{matrix} \right\}$ são constantes, dependendo da instalação. Valores típicos são indicados na tabela A.7;

D_e^* diâmetro externo do 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.

ii) Resistência Térmica do Tubo

A resistência térmica T_4'' das paredes do tubo deve ser calculada através de [30]:

$$T_4'' = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln \left(\frac{D_o}{D_d} \right) \quad [K.m/W] \quad (5.22)$$

Onde:

D_o diâmetro externo do tubo [mm];

D_d distância interno do tubo [mm];
 ρ_T resistividade térmica do material do tubo [K.m/W].

iii) Resistência Térmica Externa do Tubo ou Galeria

A resistência térmica externa do tubo, T_4''' , é determinada pelo mesmo método detalhado nas secções 5.3.1, 5.3.2, 5.3.3, substituindo o diâmetro externo do cabo pelo do tubo.

Caso o tubo ou galeria esteja envolvido em betão é necessário aplicar uma correcção à resistência térmica anterior. Este factor de correcção é dado por [30]:

$$f_{corr} = \frac{N}{2 \times \pi} \times (\rho_e - \rho_c) \times \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) \quad (\text{eq. 5.23})$$

Onde:

N número de cabos no tubo;
 ρ_e resistividade térmica do terreno em torno do tubo [K.m/W];
 ρ_c resistividade térmica do betão [K.m/W];

$$u = \frac{L_G}{r_b} \quad (\text{eq. 5.24})$$

L_G distância da superfície ao centro do tubo [mm];
 r_b raio equivalente do tubo de betão [mm], dado por [30]:

$$\ln r_b = \frac{1}{2} \frac{x}{y} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \ln \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \ln \frac{x}{2} \quad (\text{eq. 5.25})$$

As quantidades x e y são os lados pequenos e longos, respectivamente, da secção do tubo independentemente da sua posição em milímetros. Esta fórmula só é válida para razões de $y/3$ menores que 3.

5.4- Corrente Máxima Admissível

A corrente máxima admissível em regime permanente que um cabo pode atingir depende de vários parâmetros, como por exemplo, o número de cabos existentes na instalação, estrutura do cabo e seus materiais, profundidades de instalação, sistema de ligação da blindagem entre outros.

5.4.1- Cabos Enterrados Onde Não Ocorre a Secagem do Solo ou Cabos ao Ar Livre Protegidos da Radiação Solar

A corrente máxima admissível de um cabo A.C. pode ser derivada através da expressão para o aumento da temperatura acima da temperatura ambiente [3].

$$\Delta\theta = \left(I^2R + \frac{1}{2}W_d\right)T_1 + [I^2R(1 + \lambda_1) + W_d]nT_2 + [I^2R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d]n(T_3 + T_4) \quad [K] \quad (\text{eq. 5.26})$$

Onde:

I corrente percorrida num condutor [A];

R resistência em corrente alternada por unidade de comprimento de um condutor temperatura máxima de operação [Ω/m];

W_d perdas dieléctricas por unidade de comprimento para a isolação circundante do condutor [W/m];

T_1 resistência térmica por unidade de comprimento entre o condutor e a blindagem [$\text{K.m}/\text{W}$];

T_2 resistência térmica por unidade de comprimento entre a camada isolante e a armação [$\text{K.m}/\text{W}$];

T_3 resistência térmica por unidade de comprimento da bainha exterior [$\text{K.m}/\text{W}$];

T_4 resistência térmica por unidade de comprimento do meio envolvente do cabo [$\text{K.m}/\text{W}$].

n número de condutores no cabo (condutores com secções iguais e transportando a mesma carga);

λ_1 factor de perdas da blindagem metálica para as perdas totais em todos os condutores do cabo;

λ_2 factor de perdas da armadura para as perdas totais em todos os condutores do cabo.

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.

A corrente admissível é obtida através da fórmula que se segue [3]:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d[0,5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0,5} \quad [A] \quad (\text{eq. 5.27})$$

5.4.2- Cabos Enterrados Onde Ocorre a Secagem Parcial do Solo

Este modelo é utilizado quando ocorre a secagem 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 [3]:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d[0,5T_1 + n(T_2 + T_3 + vT_4)] + (v-1)\Delta\theta_x}{R[T_1 + n(1+\lambda_1)T_2 + nR(1+\lambda_1+\lambda_2)(T_3 + T_4v)]} \right]^{0,5} [A] \quad (\text{eq. 5.28})$$

Onde:

v razão da resistividade térmica das zonas de solo seco e húmido dado por:

$$(v = \frac{\rho_d}{\rho_w}) \quad (\text{eq. 5.29})$$

ρ_d resistividade térmica do solo seco [K.m/W];

ρ_w resistividade térmica do solo húmido [K.m/W];

θ_x temperatura crítica do solo e temperatura da fronteira entre as zonas secas e húmidas [K];

$\Delta\theta_x$ aumento da temperatura crítica do solo. Este é o aumento da temperatura da fronteira entre as zonas secas e húmidas acima da temperatura ambiente do solo ($\theta_x - \theta_a$) [K].

θ_a temperatura ambiente [°C];

Esta temperatura é considerada a temperatura do meio ambiente onde o cabo está instalado, incluindo o efeito de alguma fonte de calor existente;

R resistência em corrente alternada por unidade de comprimento de um condutor temperatura máxima de operação [Ω/m];

W_d perdas dieléctricas por unidade de comprimento para a isolamento circundante do condutor [W/m];

T_1 resistência térmica por unidade de comprimento entre o condutor e a blindagem [K.m/W];

T_2 resistência térmica por unidade de comprimento entre a camada isolante e a armação [K.m/W];

T_3 resistência térmica por unidade de comprimento da bainha exterior [K.m/W];

T_4 resistência térmica por unidade de comprimento do meio envolvente do cabo [K.m/W].

- n número de condutores no cabo (condutores com secções iguais e transportando a mesma carga);
- λ_1 factor de perdas da blindagem metálica para as perdas totais em todos os condutores do cabo;
- λ_2 factor de perdas da armadura para as perdas totais em todos os condutores do cabo.

5.4.3- Cabos Enterrados Onde a Secagem do Solo Deve ser Evitada

Quando é desejado que a migração da humidade seja evitada pela limitação do aumento da temperatura na superfície do cabo para valores não superiores a $\Delta\theta_x$, o valor correspondente deve ser obtido com a expressão [3]:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta_x - nW_d T_4}{nRT_4(1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \right]^{0,5} \quad [A] \quad (\text{eq. 5.30})$$

Onde:

- $\Delta\theta_x$ aumento da temperatura crítica do solo. Este é o aumento da temperatura da fronteira entre as zonas secas e húmidas acima da temperatura ambiente do solo ($\theta_x - \theta_a$) [K];
- W_d perdas dieléctricas por unidade de comprimento para a isolação circundante do condutor [W/m];
- R resistência em corrente alternada por unidade de comprimento de um condutor temperatura máxima de operação [Ω/m];
- T_4 resistência térmica por unidade de comprimento do meio envolvente do cabo [K.m/W];
- n número de condutores no cabo (condutores com secções iguais e transportando a mesma carga);
- λ_1 factor de perdas da blindagem metálica para as perdas totais em todos os condutores do cabo;
- λ_2 factor de perdas da armadura para as perdas totais em todos os condutores do cabo.

Contudo, dependendo do valor de $\Delta\theta_x$ isso pode resultar numa temperatura de condutor que exceda o máximo valor admissível. O valor da corrente obtida deverá ser o menor valor dos dois valores obtidos, na equações (eq. 5.27) e (eq. 5.28).

5.4.4- Cabos Directamente Expostos à Radiação Solar

Tendo em conta o efeito da radiação solar num cabo, a corrente admissível é dada pela fórmula [3]:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d[0,5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4^*)] - \sigma D_e^* H T_4^*}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4^*)} \right]^{0,5} [A] \quad (\text{eq. 5.31})$$

Onde:

- σ coeficiente de absorção solar para a superfície do cabo (ver tabela A.6);
- 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 equações (eq. 5.18) e (eq. 5.19).
- R resistência em corrente alternada por unidade de comprimento de um condutor temperatura máxima de operação [Ω/m];
- W_d perdas dieléctricas por unidade de comprimento para a isolamento circundante do condutor [W/m];
- T_1 resistência térmica por unidade de comprimento entre o condutor e a blindagem [K.m/W];
- T_2 resistência térmica por unidade de comprimento entre a camada isolante e a armação [K.m/W];
- T_3 resistência térmica por unidade de comprimento da bainha exterior [K.m/W];
- n número de condutores no cabo (condutores com secções iguais e transportando a mesma carga);
- λ_1 factor de perdas da blindagem metálica para as perdas totais em todos os condutores do cabo;
- λ_2 factor de perdas da armadura para as perdas totais em todos os condutores do cabo.

Capítulo 6

Desenvolvimento da Aplicação

Este capítulo descreve como o Cabcalc2 foi desenvolvido, explicando a sua arquitectura e a base de dados usada. Contem ainda um conjunto de imagens ilustrativas da sua interface para uma melhor aprendizagem de utilização.

6.1- Introdução

A aplicação Cabcalc2 foi inicialmente desenvolvida tendo por base a aplicação CabCalc [12]. O CabCalc permite o dimensionamento de cabos de Média e Alta Tensão (até 150kV) em função das suas características construtivas e das condições previstas para a sua instalação.

A aplicação CabCalc é constituída por [12]:

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

O módulo de cálculo e a interface do CabCalc foram criados com recurso ao Visual Studio 2005, usando a linguagem de programação Visual Basic.

De forma a rentabilizar ao máximo o trabalho anteriormente desenvolvido, o Cabcalc2 foi igualmente criado através da linguagem de programação Visual Basic mas usando o Visual Studio 2010 Express.

6.2- Arquitectura da Aplicação Cabcalc2

A aplicação Cabcalc2 proporciona duas metodologias de cálculo. A primeira metodologia consiste no dimensionamento dos cabos de energia que foi adquirida integralmente do CabCalc, e possibilita ao utilizador adicioná-lo à base de dados se assim o desejar. A segunda metodologia consiste em encontrar um cabo e uma solução técnica para a sua instalação, mediante apenas a potência que o cliente pretende transmitir.

Esta última metodologia permite ler da base de dados todos os cabos criados e seus materiais, tais como: tipo de alma condutora, isolamento, fita semicondutora, fita hidroexpansiva, blindagem, bainha externa, entre outros, e suas espessuras, e assim calcular os respectivos parâmetros eléctricos, oferecendo ao utilizador um ou vários cabos e as técnicas possíveis, para a sua instalação com as respectivas capacidades de transporte. As técnicas obtidas para cada cabo têm em conta a potência mínima exigida pelo cliente. A Figura 6.1 ilustra a arquitectura da segunda metodologia.

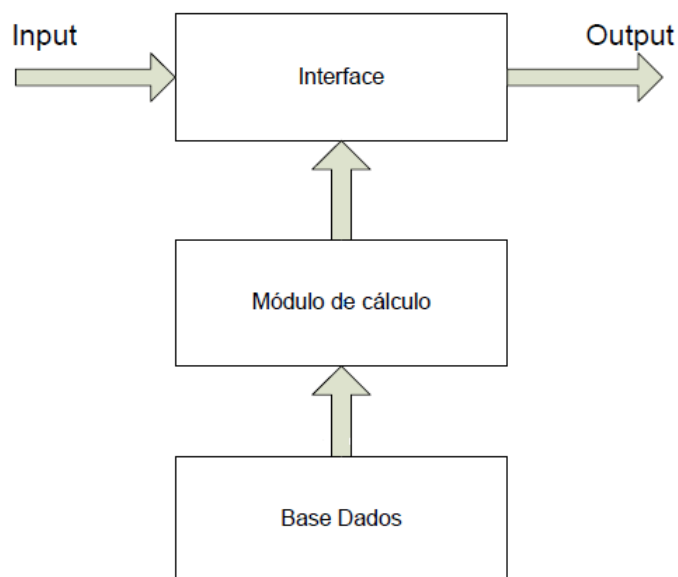


Figura 6.1 - Arquitectura da segunda metodologia

A criação da segunda metodologia exigiu correcções e adaptações da primeira metodologia (Anexo B).

6.3- Base de Dados

A base de dados usada é formada por um conjunto de tabelas designadas por “tabelas de instalação”, “tabelas de cabo” e “tabelas de materiais”. As “tabelas de instalação” contêm informação de forma organizada dos tipos de instalação para cada cabo adicionado, as “tabelas de cabo” incluem igualmente para cada cabo informação do tipo de material usado e suas espessuras e as “tabelas de materiais” com os materiais existentes e suas características para as diferentes camadas de um cabo. A nova metodologia criada no Cabcalc2, apenas utiliza as “tabelas de cabo” e uma tabela de instalação. Na tabela 6.1, são referidas as tabelas usadas.

Cabo	
Designação	Informação
tab_estrutura	estrutura do cabo
tab_cabo_alma	alma condutora
tab_cabo_arm	armação em fita
tab_cabo_arm2	armação em fios
tab_cabo_be	bainha exterior
tab_cabo_em	blindagem em fios
tab_cabo_fa	fita de alumínio
tab_cabo_fc	fita de continuidade
tab_cabo_FE	fita de enchimento
tab_cabo_fh	fita semicondutora e hidroexpansível
tab_cabo_FM	blindagem em fita
tab_cabo_fs	fita semicondutora
tab_cabo_fs2	fita semicondutora 2
tab_cabo_iso	camada isolante
tab_cabo_sce	semicondutor externo
tab_cabo_sci	semicondutor interno
tab_inst	instalação do cabo

Tabela 6.1 - Tabelas usadas na segunda metodologia

6.4- Interface

A interface criada para a nova metodologia do Cabcalc2, disponibiliza ao utilizador um conjunto de campos para introdução de dados, consistindo num input obrigatório para a obtenção de resultados.

Os dados introduzidos são de três tipos: eléctricos, físicos e opcionais. Os primeiros dados a inserir são de natureza eléctrica tal como ilustrado na Figura 6.2.

Frequência Hz
 Tensão kV ☐ Filtro
 Corrente A
 Potência
☒ Aparente MVA
☐ Eléctrica kW Cos φ
 Potência nominal
☒ 1% ☐ 2% ☐ 3%
☐ 4% ☐ 5% ☐ 6%
☐ 7% ☐ 8% ☐ 10%
☐ 100% ☐ 200% ☐ 250%
☐ 300% ☐ 400% ☐ 500%
 MVA

Figura 6.2 - Dados eléctricos

Os campos a preencher para os dados eléctricos são:

- Frequência da rede onde o cabo vai ser instalado, usualmente de 50Hz para os países Europeus.
- Tensão eléctrica em [kV] da rede onde o cabo vai ser instalado.
- Potência aparente em [MVA] ou eléctrica em [kW] a transmitir pelo cabo, consoante os dados fornecidos por parte do cliente. No caso de ser facultada a potência eléctrica também será necessário o fornecimento do factor de potência.
- Potência nominal, para abranger uma certa gama de possíveis cabos a usar. Este campo disponível em percentagem, consiste numa gama de valores para a potência nominal mínima pretendida. Por exemplo, se o utilizador introduzir uma potência aparente de 80MVA e seleccionar para a potência nominal um incremento de 2%, a aplicação irá pesquisar um cabo e uma técnica de instalação que possibilite no mínimo uma potência compreendida entre 80 e 81,5 MVA. Se seleccionar 500%, a pesquisa será compreendida para cabos e instalações compreendidas entre 80 e 480MVA. A necessidade deste campo deve-se ao facto de ser impossível obter com exactidão um cabo com a potência pretendida.

A disparidade para os valores percentuais escolhidos deveu-se à eventualidade de não se querer ocultar possíveis resultados. Como é de conhecimento geral os cabos ao serem afastados uns dos outros permitem uma melhor dissipação do calor gerado pelos mesmos, pelo que é de esperar que aumentem a sua capacidade de transporte. Na realidade tal acontece nos sistemas de ligação

rígida à terra para afastamentos maiores que os seus diâmetros [3,22,30], mas não produzindo valores muito significativos. Já nos sistemas de ligação especial sempre que é incrementado um afastamento entre cabos a sua capacidade de transporte aumenta, podendo obter por exemplo para o cabo LXHIOLE 1x1000/135 36/60kV uma potência 1,7 vezes superior do que o sistema com ligação rígida à terra no caso de cabos juntivos. Assim quando se insere um elevado afastamento entre cabos apesar de ser praticamente impossível obter uma solução para sistemas de ligação rígida à terra, poderá obter uma solução para o sistema de ligação especial.

É de todo conveniente que o utilizador tenha por base estes conhecimentos teóricos.

A interface para os dados físicos é ilustrada nas Figuras 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9.

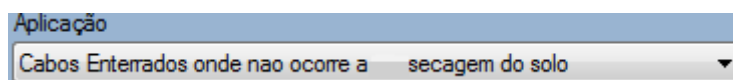


Figura 6.3 - Campo tipo de aplicação

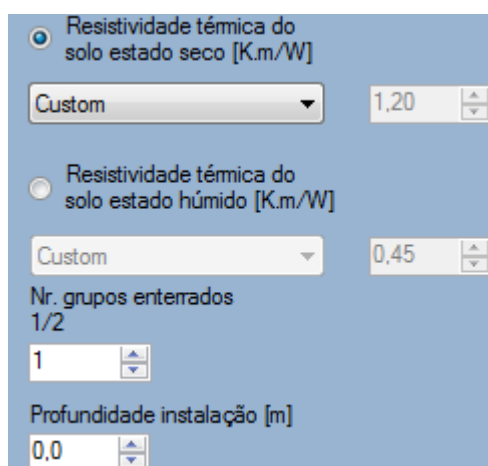


Figura 6.4 - Campo resistividades térmicas, número de circuitos e profundidades

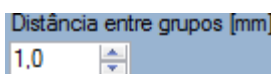


Figura 6.5 - Campo distância entre grupos

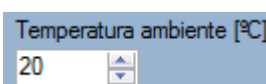


Figura 6.6 - Campo temperatura ambiente

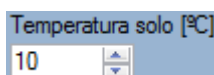
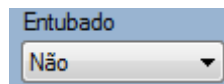


Figura 6.7 - Campo temperatura crítica do solo



Entubado

Não

Figura 6.8 - Campo instalação em tubo

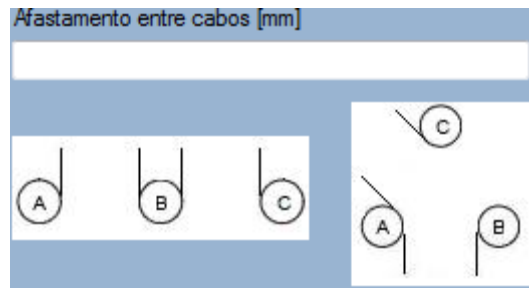


Figura 6.9 - Campo afastamento entre cabos

Os campos a preencher para os dados físicos são:

- Aplicação do cabo, caso este seja para uma instalação subterrânea ou ar livre entre as outras de acordo com a norma IEC 60287-1-1 [3].
- Resistividades térmicas do solo no local de instalação em $[K.m/W]$. Estas dependem da composição do solo e do seu estado, em caso de seco ou húmido.
- Número de grupos enterrados, no caso de se tratar apenas de um único circuito, ou dois se a instalação já conter um circuito. Este parâmetro influencia a capacidade de transporte do ponto de vista térmico.
- Profundidade de instalação em $[m]$, para o circuito.
- Distância entre grupos em $[mm]$, na situação do cálculo ser feito para dois grupos enterrados.
- Temperatura ambiente do meio onde o cabo será instalado em $[^{\circ}C]$.
- Temperatura crítica do solo em $[^{\circ}C]$, a colocar para instalações onde ocorre parcial secagem do solo e instalações onde se evita a secagem do solo. Esta é a temperatura da fronteira entre as zonas secas e húmidas [3].
- Entubado, se é pretendido que o cabo seja ou não entubado. Normalmente usa-se o cabo entubado nas travessias de estradas. Deve-se ter em conta o rigor na escolha deste tipo de instalação uma vez que o seu uso permite uma menor dissipação de calor e consequentemente diminuição da capacidade de transporte do cabo. Se for seleccionado “Sim” para este campo, surge a janela da Figura 6.10, onde é solicitada a introdução do tipo de tubo e as suas dimensões construtivas, de acordo com a norma IEC 60287-1-1 [3]. É conveniente para isso conhecer valores padrões para este tipo de instalações.

Figura 6.10 - Definição do tubo

- Afastamento entre cabos em [mm], caso se opte por colocar os cabos afastados. Se não for inserido qualquer valor, a aplicação fará uma pesquisa para os cabos existentes assumindo que as instalações são para formações em trevo e esteiras juntas.

Os dados ilustrados Figura 6.11, são opcionais pois permite ao utilizador obter resultados para cabos com alma de alumínio, cobre ou ambas.

Os dados ilustrados Figura 6.11 e 6.12 são opcionais. No caso dos expostos na Figura 6.11 permite ao utilizador obter resultados para cabos com alma de alumínio, cobre ou ambas. O da Figura 6.12 permite ao utilizador filtrar ou não resultados para cabos dimensionados para as tensões seleccionadas no campo de tensão.

Figura 6.11 - Natureza da alma condutora

Figura 6.12 - Filtro para tensões

Após inseridos os dados eléctricos, físicos e opcionais resta conhecer quais os resultados, por isso pressiona-se o botão “Calcular” representado na Figura 6.13. Assim dar-se-á início à

pesquisa e cálculo de todos os cabos, que se adaptam aos requisitos introduzidos. Caso o Cabcalc2 retorne um ou mais cabos, todos serão de secções diferentes.

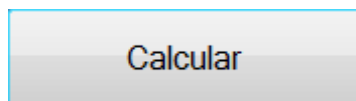


Figura 6.13 - Botão “Calcular”

A base de dados pode conter cabos de igual secção e designação, mas com espessuras ou materiais constituintes diferentes. Caso esses cabos existam e sirvam para a instalação, o utilizador poderá identificá-los, ao pressionar o botão da Figura 6.14.

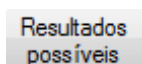


Figura 6.14 - Botão “Resultados possíveis”

A visualização dos resultados na interface é constituída pela grelha ilustrada na Figura 6.15, no caso de uma instalação enterrada, onde contêm os diferentes tipos de instalação possíveis. Se for obtido um ou mais cabos, esta grelha gera os cabos com as respectivas correntes máximas admissíveis para a respectiva instalação.

	Número	Secção	Tensão	Designação	Trevo LDL	Esteira c/ transposição LDL	Esteira s/ transposição LDL	Trevo LUL ou Cross	Esteira LUL ou Cross
►	8	630	60	LXHO1AZ1 1x6...	Não admitido	Não admitido	Não admitido	Não admitido	770,9592
	157	500	60	XHIOV 1x500/38...	777,4282	Não admitido	Não admitido	806,3192	803,4502

Figura 6.15 - Grelha com resultados finais (instalações enterradas)

As colunas que esta grelha engloba são:

- Número: numeração do cabo obtido.
- Secção: secção do cabo [mm²].
- Tensão: tensão estipulada para o cabo [kV].
- Designação: designação normalizada do cabo.
- Trevo LDL: instalação para formação em trevo com blindagem ligada nas duas extremidades [A].
- Esteira c/transposição LDL: instalação para formação em esteira com transposição de fases e blindagem ligada nas duas extremidades [A].

- Tensão: tensão estipulada para o cabo [kV].
- Designação: designação normalizada do cabo.
- Trefoil LDL: instalação para formação em trevo com blindagem ligada nas duas extremidades [A].
- Trefoil direct LDL: instalação para formação em trevo junto a uma parede com blindagem ligada nas duas extremidades [A].
- Flat horizontal touch with transposition LDL: instalação para formação em esteira juntiva com transposição de fases e blindagem ligada nas duas extremidades [A].
- Flat horizontal spaced with transposition LDL: instalação para formação em esteira espaçada com transposição de fases e blindagem ligada nas duas extremidades [A].
- Flat vertical touch with transposition LDL: instalação para formação em esteira juntiva com transposição de fases e blindagem ligada nas duas extremidades [A].
- Flat vertical spaced with transposition LDL: instalação para formação em esteira espaçada com transposição de fases e blindagem ligada nas duas extremidades [A].
- Flat horizontal touch without transposition LDL: instalação para formação em esteira juntiva sem transposição de fases e blindagem ligada nas duas extremidades [A].
- Flat horizontal spaced without transposition LDL: instalação para formação em esteira espaçada sem transposição de fases e blindagem ligada nas duas extremidades [A].
- Flat vertical touch without transposition LDL: instalação para formação em esteira juntiva sem transposição de fases e blindagem ligada nas duas extremidades [A].
- Flat vertical spaced without transposition LDL: instalação para formação em esteira espaçada sem transposição de fases e blindagem ligada nas duas extremidades [A].
- Trefoil Sp or Cross: instalação para formação em trevo com blindagem ligada num ponto ou cruzada [A].
- Trefoil direct Sp or Cross: instalação para formação em trevo junto a uma parede com blindagem ligada num ponto ou cruzada [A].
- Flat horizontal touch Sp or Cross: instalação para formação em esteira juntiva com blindagem ligada num ponto ou cruzada [A].
- Flat horizontal spaced Sp or Cross: instalação para formação em esteira espaçada com blindagem ligada num ponto ou cruzada [A].
- Flat vertical touch Sp or Cross: instalação para formação em esteira juntiva com blindagem ligada num ponto ou cruzada [A].

- Flat vertical spaced Sp or Cross: instalação para formação em esteira espaçada com blindagem ligada num ponto ou cruzada [A].

Nos resultados obtidos para formações em trevo e esteira com blindagem ligada num ponto ou cruzada, para obter o comprimento máxima admissível da ligação a um ponto ou o comprimento máximo do troço para a ligação cruzada das blindagens recorre-se à secção do SVL da aplicação, ilustrada na Figura 6.17.

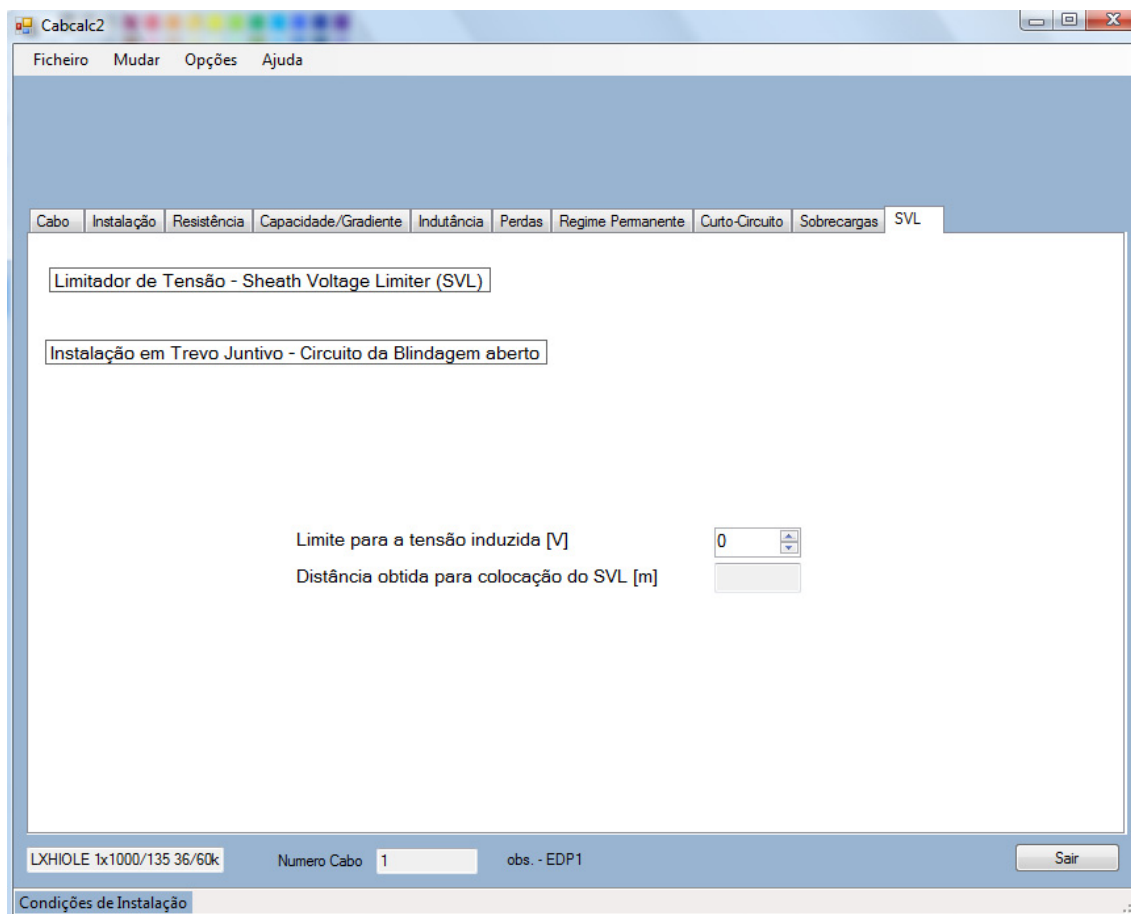


Figura 6.17 - Secção SVL do Cabcalc2

Depois de admitir um valor limite para a tensão induzida, tendo em conta as características do cabo de forma a não o danificar a longo prazo, introduz-se esse valor no campo “Limite para a tensão induzida [V]” e assim é obtido o comprimento máximo no campo “Distância obtida para colocação do SVL [m]”.

Capítulo 7

Caso de Estudo e Análise de Resultados

De forma a perceber o funcionamento do Cabcalc2, neste capítulo será feita uma simulação considerando um caso real em que um cliente pretenda conhecer de forma rápida a solução adoptar para a potência a transmitir numa instalação enterrada, não facultando nenhum outro dado da instalação para além da tensão de serviço. Depois serão feitas algumas simulações alterando vários dados físicos da instalação para verificar até que ponto podem interferir nos resultados obtidos.

Os principais cálculos a seguir desta metodologia estão descritos no fluxograma do Anexo C e o código do programa no Anexo D.

7.1- Caso de Estudo

Os únicos dados fornecidos pelo cliente estão indicados na Tabela 7.1.

Tensão Nominal Composta	60kV
Frequência	50Hz
Potência eléctrica	50000kW
cos φ	0,8

Tabela 7.1 - Dados do cliente

Os passos a seguir são:

1. Seleccionar o tipo de aplicação no campo “Aplicação”. Para o caso escolhe-se “Cabos enterrados onde não ocorre a secagem do solo”, pois é a aplicação mais comum.

2. Seleccionar a frequência da rede no campo “Frequência”. A frequência será de 50Hz.
3. Seleccionar a tensão da rede no campo “Tensão”. A tensão é um dado adquirido do cliente constando nos 60kV.
4. Introduzir a potência pretendida pelo cliente para transmitir no campo “Potência”. Os dados facultados pelo cliente presentes na Tabela 6.1 incluem a potência eléctrica de 50000kW com um factor de potência de 0,8. Assim obtêm-se automaticamente no campo “Corrente” a corrente exigida pela potência a transmitir situada nos 601,4A.
5. Seleccionar o tipo de alma condutora no campo “Alma condutora”. Como o cliente não restringiu a alma do cabo a usar, opta-se assim por alma de cobre devido à sua melhor condutividade face ao alumínio, apesar do preço ser muito superior.
6. Definir se a instalação é ou não entubada no campo “Entubado”. Para este caso considera-se uma instalação não entubada.
7. Seleccionar a resistividade térmica do solo do local a instalar no campo “Resistividade térmica do solo estado seco [K.m/W]” ou no campo “Resistividade térmica do solo estado húmido [K.m/W]”. Como é desconhecido à partida o tipo de solo, de forma a garantir um resultado fiável escolhe-se a resistividade térmica mais desfavorável, como é o caso do solo “Custom” (1,20K.m/W) da resistividade térmica do solo estado seco.
8. Definir número de grupos instalados no campo “Nr. Grupos enterrados 1/2”. Como o cabo é para ser instalado numa vala sem qualquer outro circuito existente, o número de grupos enterrados será “1”.
9. Definir profundidade de instalação no campo “Profundidade instalação [m]”. Nos termos da regulamentação portuguesa [14], os cabos devem ser enterrados a uma profundidade mínima de 1,20m, pelo que opta-se por esta medida.
10. Seleccionar a temperatura do meio ambiente onde o cabo está instalado no campo “Temperatura ambiente [°C]”. Como este dado também é desconhecido opta-se por considerar uma temperatura de 20°C, sendo prática comum adoptar este valor [6].
11. Definir afastamento entre cabos no campo “Afastamento entre cabos [mm]”. Como o afastamento entre cabos só favorece instalações nos sistemas de ligação especial à terra escolhe-se assim não incrementar qualquer afastamento, de forma a encontrar uma solução para formações juntas.
12. Seleccionar a potência nominal mínima pretendida no campo “Potência nominal”. Sem nenhum critério específico escolhe-se 5%, o que equivale a 52500kW, fazendo a procura numa gama mínima compreendida entre 50000kW e 52500kW.

Este valor pode ser alterado sempre que se desejar, pois a base de dados pode conter poucos cabos e não retornar um cabo que satisfaça os requisitos.

13. Ultrapassados os passos anteriores, resta fazer o cálculo que melhor se adapta aos requisitos introduzidos, pressionando o botão “Calcular”.

7.1.1- Resultados Obtidos

Os resultados obtidos estão representados na Figura 7.1, retirada do Cabcalc2.

Designação	Trevo LDL	Esteira c/ transposição LDL	Esteira s/ transposição LDL	Trevo LUL ou Cross	Esteira LUL ou Cross
XHIOLV 1x500/250 36/60KV	614,9268	603,6373	Não admitido	731,2314	754,7649
XHIOLV 1x630/250 36/60KV	666,0721	665,2273	626,824	848,1665	867,701

Figura 7.1 - Grelha com resultados finais

Obteve-se o cabo número 122 da base de dados com a designação XHIOLV 1X500/250 36/60 kV e o cabo número 140 com designação XHIOLV 1X630/250 36/60 kV. A principal diferença destes cabos para além da dimensão das suas espessuras reside na secção da alma condutora, o que torna as suas performances distintas. A capacidade de transporte do cabo XHIOLV 1X630/250 36/6 kV é bastante superior à do cabo XHIOLV 1X500/250 36/60 kV para as várias instalações possíveis, apenas não sendo admitida a instalação em esteira sem transposição com blindagem ligada nas duas extremidades do cabo 122.

Assim, aconselhava o cliente a instalar o cabo 122 por ser o mais barato, numa instalação em esteira usando o sistema de ponto único de ligação à terra ou cruzada de blindagens com uma capacidade de transporte de 754,8A, conforme o comprimento necessário para a instalação.

Apesar da formação em trevo e em esteira sem transposição com a blindagem ligada nas duas extremidades satisfazerem os requisitos da instalação (614,92A em trevo e 603,64 em esteira s/ transposição), não optaria por essa solução apesar de ser a mais barata pois os valores obtidos por excesso para a capacidade de transporte são muito próximas da pretendida. Deve-se considerar sempre uma margem de segurança para possíveis aumentos de potência da linha subterrânea ou mesmo devido a dificuldades originadas pelas condições reais da instalação em obter tais valores.

Para adoptar o sistema de ponto único de ligação à terra ou cruzada de blindagens será necessário ter em conta o limite máximo para a tensão induzida e o comprimento da instalação, para aplicação do SVL (sheath voltage limiter) ou escolha do ponto de cruzamento das blindagens.

A Tabela 7.2 apresenta dados obtidos através da secção SVL do Cabcalc2 (Figura 6.16) considerando comprimentos de 1 e 3 km para a instalação do cabo XHIOLV 1X500/250 36/60 kV utilizando o sistema de ponto único de ligação à terra.

Comprimento total da instalação [Km]	Ligação Blindagem	Tensão máxima induzida [V]	Ponto de colocação do SVL [m]
1	um ponto	≈40,4	1000
3	um ponto	90	2300-3000

Tabela 7.2 - Dados do sistema de ponto único para o cabo XHIOLV 1X500/250 36/60 kV

Se a instalação for de 1 km a tensão máxima induzida é de 40,4 V, não constituindo um valor significativo de por em risco a vida útil do cabo. Neste caso o SVL pode ser colocado no fim da instalação (Figura 7.2). Para uma instalação de 3 km assumindo uma tensão máxima induzida de 90 V, deve ser colocado um SVL a 2,3 km e no fim do cabo (Figura 7.3). Nestas instalações, o SVL pode ser aplicado independentemente dos comprimentos das bobinas, atendendo apenas à tensão máxima admissível.

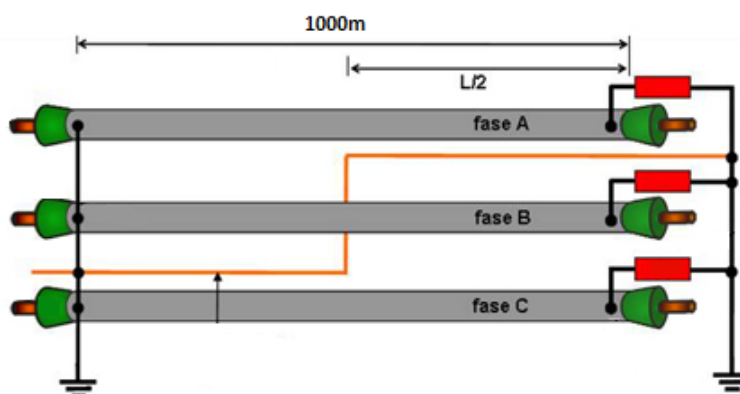


Figura 7.2 - Sistema de ponto único (comprimento 1km) [16]

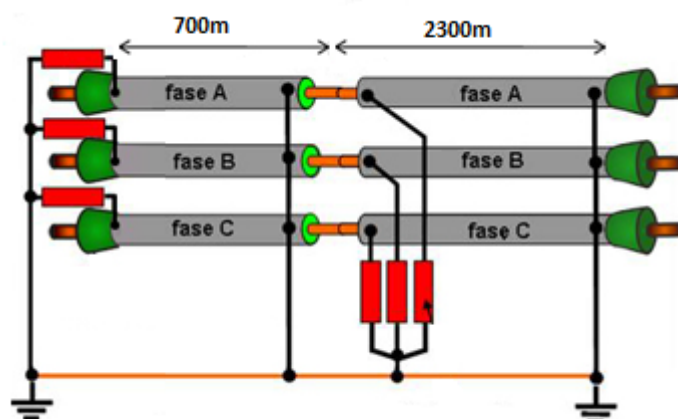


Figura 7.3 - Sistema de ponto único (comprimento 3km) [16]

A Tabela 7.3 apresenta os dados obtidos considerando alguns comprimentos para a instalação do cabo XHIOLV 1X500/250 36/60 kV utilizando o sistema de ligação cruzada de blindagens, de forma a abranger uma certa gama de possibilidades.

Comprimento total da instalação [Km]	Ligação Blindagem	Tensão máxima induzida [V]	Ponto de colocação do SVL ou de cruzamento no caso de blindagem cruzada [m]	Capacidade da Bobina [m]
1,5	cruzada	≈ 20	250-500-1250	500
2,119	cruzada	$\approx 28,5$	353,5-1059,5-1765,5	800
3	cruzada	$\approx 40,4$	1000-2000	1000
3	cruzada	≈ 20	500-1000-2000-2500	500

Tabela 7.3 - Dados do sistema de ligação cruzada de blindagens para o cabo XHIOLV 1X500/250 36/60 kV

Para um comprimento de 1,5 km, apesar de ser exactamente divisível por três (500m) [21], tendo em conta os limites da bobina de cabo, pode-se recorrer à configuração da Figura 7.4, em que o comprimento é dividido em quatro secções menores, em que as duas secções do meio são de igual comprimento e as maiores, e a primeira e última somadas completam uma secção maior. Assumindo que cada bobina tem um comprimento de 500m, utiliza-se para as secções do meio 500m de cada, e para a primeira e última secção 250m. A tensão máxima induzida será aproximadamente 20V correspondente ao comprimento de 500m.

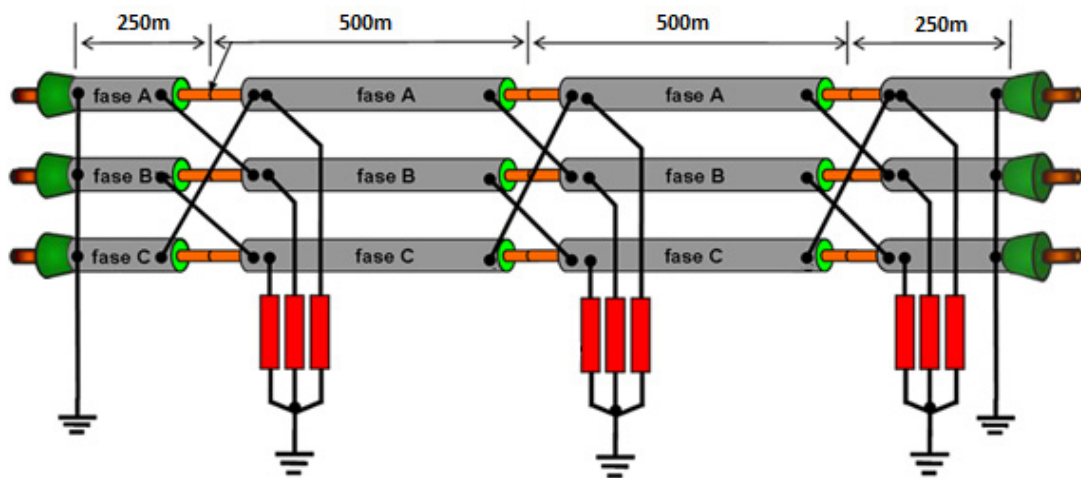


Figura 7.4 - Sistema de ligação cruzada seccionada modificada (comprimento 1,5km) [16]

Para o comprimento de 2119m, o seu valor já não é exactamente divisível por três (706,3m). No entanto recorrendo novamente ao sistema de ligação cruzada seccionada modificada a sua configuração pode ser dada pela Figura 7.5. Assumindo que a capacidade da bobina é de 800 m, esta não restringe o comprimento máximo das secções menores. A tensão máxima induzida será aproximadamente 28,5V para o comprimento de 706m.

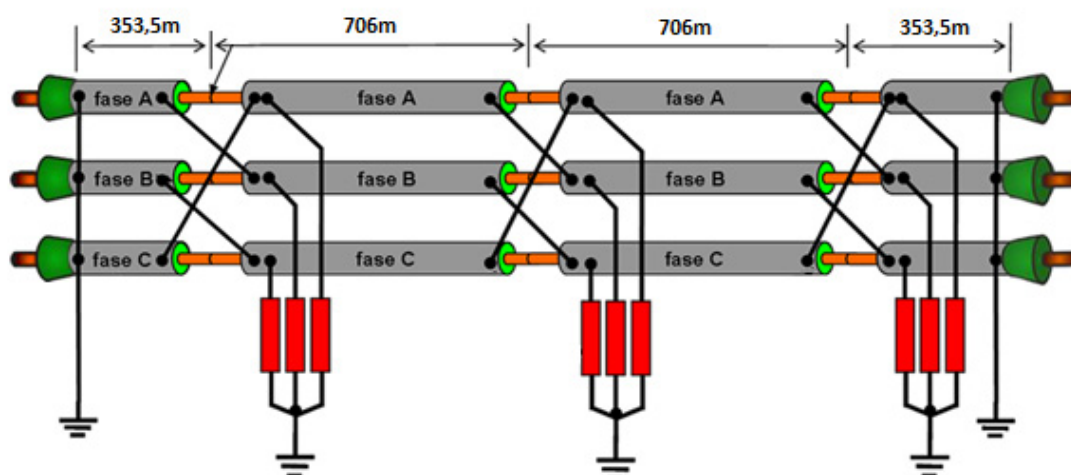


Figura 7.5 - Sistema de ligação cruzada seccionada modificada (comprimento 2119m) [16]

Para o comprimento de 3km, como o seu valor é exactamente divisível por três (1000m) e a capacidade da bobina satisfaz cada secção menor (1000m), a sua instalação é dada pela Figura 7.6. Neste caso a tensão máxima induzida será aproximadamente 40,4V para o comprimento de 1000m.

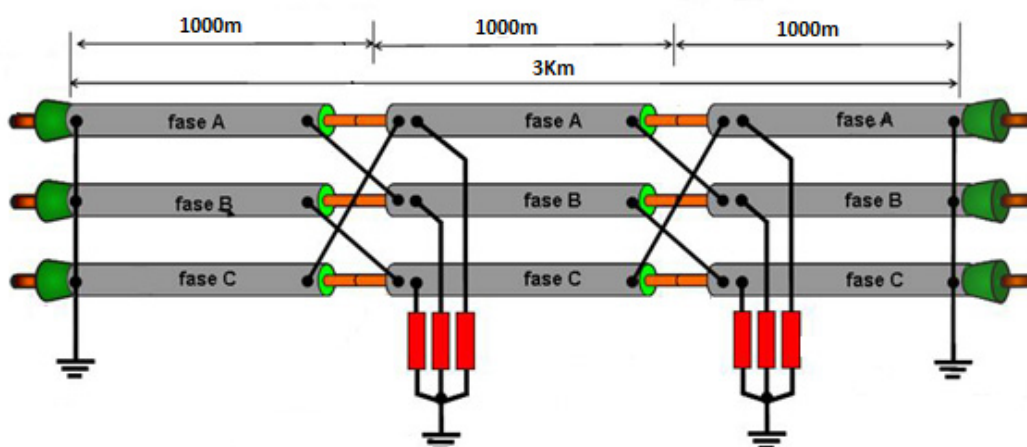


Figura 7.6 - Sistema de ligação cruzada (comprimento 3km) [16]

Se a capacidade das bobinas fosse apenas de 500m para o mesmo comprimento de instalação, a sua configuração poderia ser a da figura 7.7 com uma tensão máxima induzida de 20V.

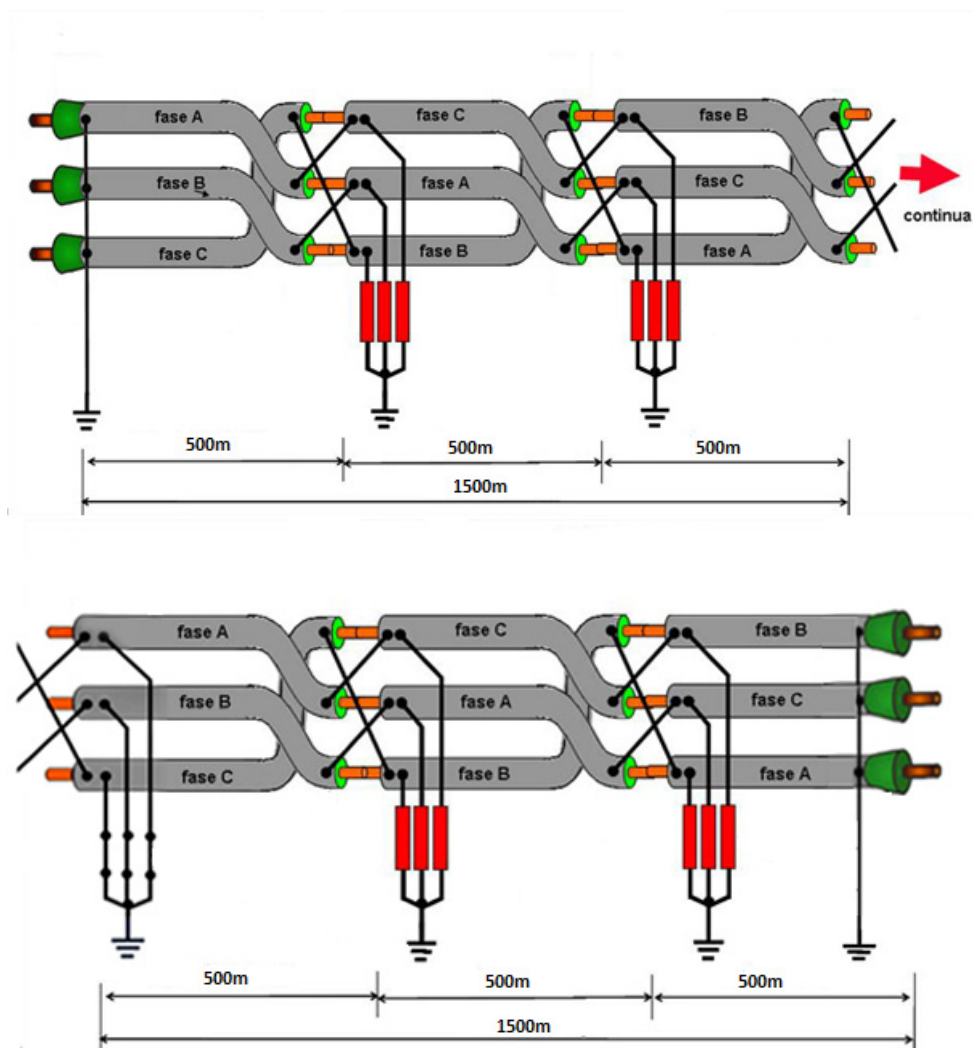


Figura 7.7 - Sistema de ligação cruzada seccionada (comprimento 3km) [16]

7.2- Análise de Resultados

O caso em estudo resultou em dois cabos de cobre, ambos com a mesma estrutura mas de espessuras e secção diferentes. O principal elemento responsável pela obtenção da capacidade de transporte é a alma condutora e a que encarece mais o cabo. Desconhecendo os sistemas de ligação especial à terra, o cabo XHIOLV 1X630/250 36/60 kV era a opção certa, utilizando configurações em trevo ou esteira com transposição, com blindagem ligadas nas duas extremidades, mas facilmente se percebe pelos dados obtidos que utilizando um cabo mais barato, como é o caso do XHIOLV 1X500/250 36/60 kV, é possível obter óptimas performances utilizando os sistemas de ligação especial à terra. Apesar destes sistemas de ligação necessitarem de outro tipo de acessórios, ao contrário dos sistemas de ligação rígida à terra, a sua aplicação facilmente é justificada devido ao preço final ser inferior em comparação ao cabo de secção superior.

No exemplo foi demonstrada uma simulação em que era desconhecido por completo as condições reais do local de instalação, daí a necessidade de terem sido admitidos alguns valores por excesso. De seguida serão apresentados alguns resultados para o cabo XHIO LV 1X500/250 36/60 kV considerando uma instalação em esteira igualmente enterrada, com transposição de fases e blindagem ligada nas duas extremidades, mantendo inalterados os dados da instalação e variando individualmente os seguintes parâmetros:

- Profundidade de instalação;
- Resistividade térmica do solo;
- Afastamento entre cabos;
- Temperatura ambiente;
- Distâncias entre 2 grupos enterrados.

Os dados foram tratad

os com recurso ao Excel para demonstrar até que ponto esses valores podem influenciar os resultados finais.

- **Profundidade de instalação**

Tipo de instalação

Tensão nominal [kV]	60
Frequência [Hz]	50
Afastamento entre cabos [mm]	0 (juntiva)
Resistividade térmica do solo [K.m/W]	1,2
Temperatura ambiente [°C]	20

Tabela 7.4 - Condições de instalação caso 1

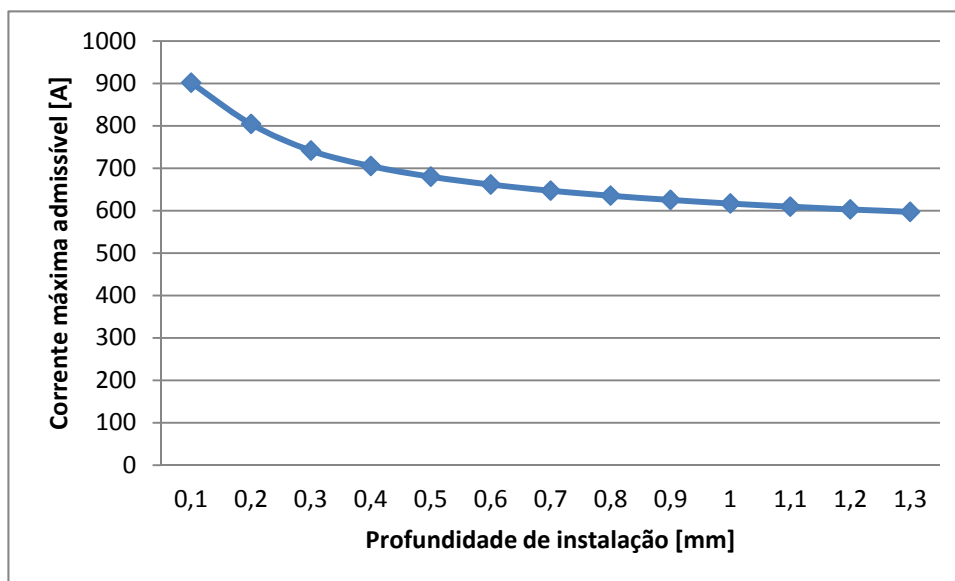


Figura 7.8 - Corrente máxima admissível em função da profundidade de instalação

Pela análise da Figura 7.8 é visível o forte impacto que o aumento da profundidade de instalação provoca na capacidade de transporte do cabo. À medida que a profundidade cresce, maior será a dificuldade com que o calor dissipado pelo cabo seja libertado até à superfície do solo, razão pela qual a sua capacidade diminui.

- Resistividade térmica do solo

Tipo de instalação

Tensão nominal [kV]	60
Frequência [Hz]	50
Afastamento entre cabos [mm]	0 (juntiva)
Profundidade de instalação [m]	1,3
Temperatura ambiente [°C]	20

Tabela 7.5 - Condições de instalação caso 2

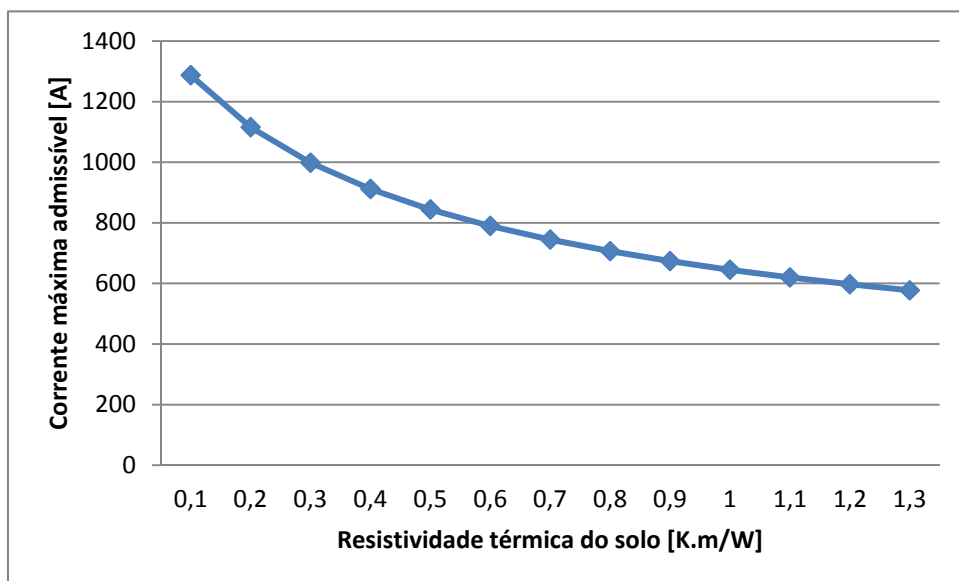


Figura 7.9 - Corrente máxima admissível em função da resistividade térmica do solo

A Figura 7.9 ilustra a diminuição da capacidade de transporte à medida que a resistividade térmica do solo aumenta. Quanto maior for este parâmetro maior resistência o solo oferece à dissipação do calor. Este parâmetro é um dos elementos que mais influência a corrente máxima admissível e por isso sempre que possível deverão ser seleccionadas terras ou areias adequadas [7] de baixa resistência térmica.

- Afastamento entre cabos

Tipo de instalação

Tensão nominal [kV]	60
Frequência [Hz]	50
Resistividade térmica do solo [K.m/W]	1,2
Profundidade de instalação [m]	1,3
Temperatura ambiente [°C]	20

Tabela 7.6 - Condições de instalação caso 3

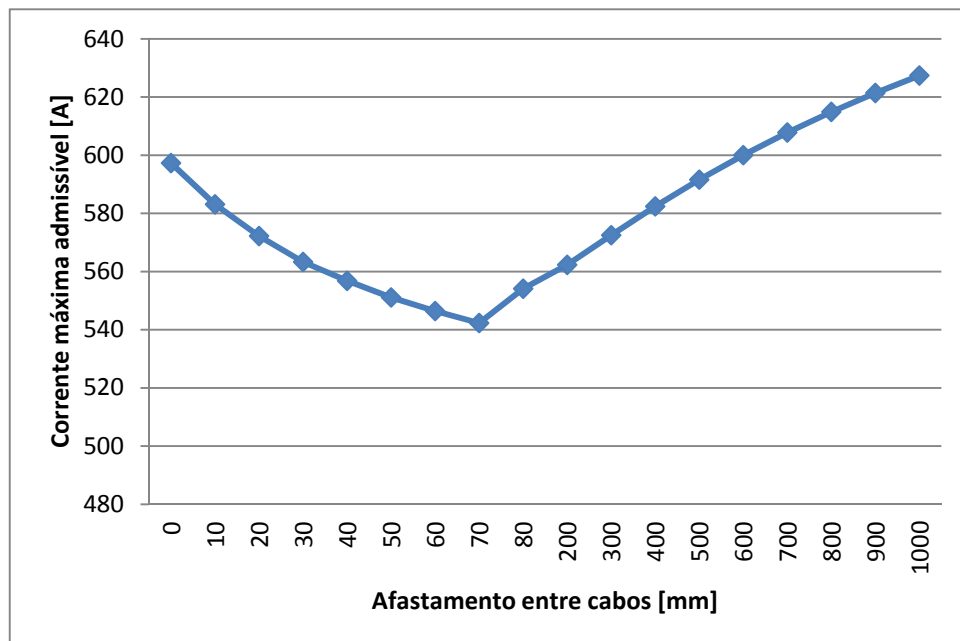


Figura 7.10 - Corrente máxima admissível em função do afastamento entre cabos

Pela análise da Figura 7.10 verifica-se que a capacidade de transporte do cabo vai diminuindo enquanto o afastamento entre cabos adjacentes for menor ou igual ao seu diâmetro (70,65mm). Para esses valores considera-se que cada cabo está sujeito ao campo magnético produzido pelos cabos adjacentes, contribuindo assim para a produção adicional de correntes induzidas nas suas blindagens para além da corrente produzida pelo próprio [3,22,30]. Para valores superiores ao diâmetro do cabo, tal já não acontece, verificando-se um aumento da corrente máxima admissível à medida que é incrementado um afastamento.

- Temperatura ambiente

Tipo de instalação

Tensão nominal [kV]	60
Frequência [Hz]	50
Afastamento entre cabos [mm]	0 (juntiva)
Resistividade térmica do solo [K.m/W]	1,2
Profundidade de instalação [m]	1,3

Tabela 7.7 - Condições de instalação caso 4

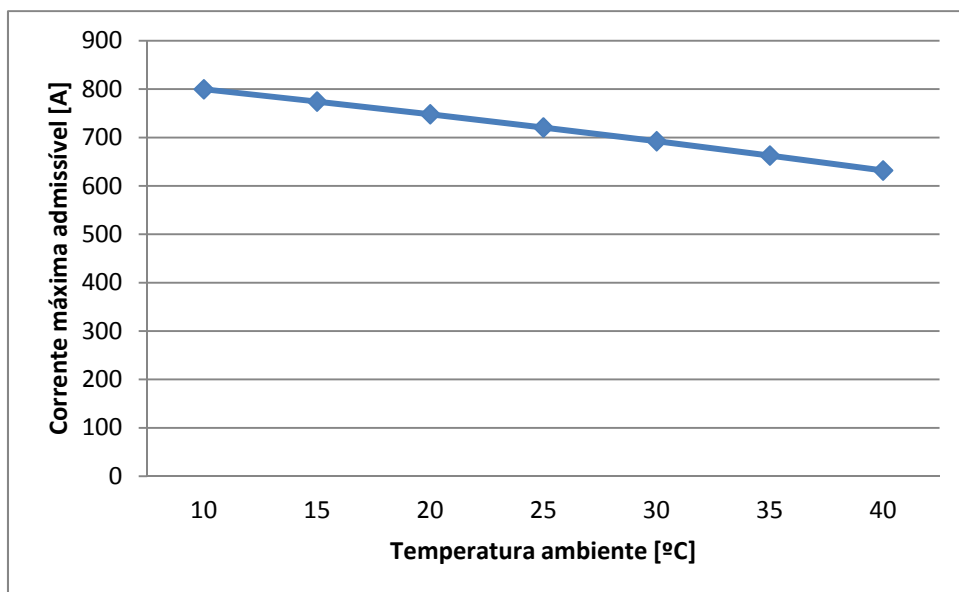


Figura 7.11 - Corrente máxima admissível em função da temperatura ambiente

Na Figura 7.11 observa-se o efeito da variação da temperatura ambiente onde o cabo está instalado 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 [12].

- Distâncias entre 2 grupos enterrados

Tipo de instalação

Tensão nominal [kV]	60
Frequência [Hz]	50
Afastamento entre cabos [mm]	0 (juntiva)
Resistividade térmica do solo [K.m/W]	1,2
Temperatura ambiente [K.m/W]	20
Profundidade de instalação [m]	1,3
Nr. grupos enterrados 1/2	2

Tabela 7.8 - Condições de instalação caso 5

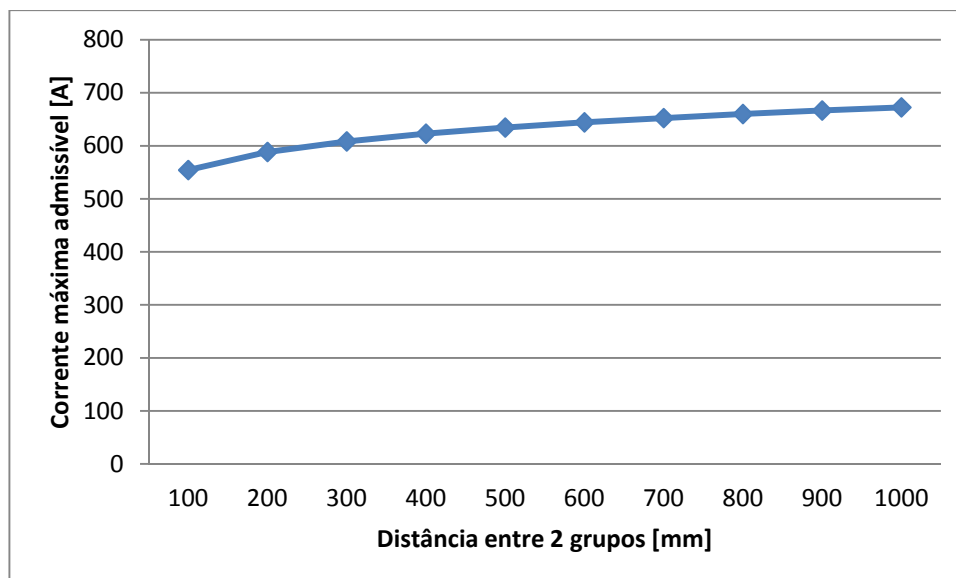


Figura 7.12 - Corrente máxima admissível em função da distância entre grupos

Analisando a Figura 7.12 observa-se um aumento da capacidade de transporte à medida que é incrementado uma distância entre os 2 grupos enterrados. Assim, quanto maior for essa distância menor será impacto térmico provocado por cada grupo, permitindo o aumento da corrente máxima admissível.

Capítulo 8

Conclusões e Trabalhos Futuros

8.1- Principais Conclusões

Este documento descreve todas as técnicas de ligação de blindagem existentes com as suas particularidades de instalação e as considerações a ter de forma ao oferecer um conjunto de critérios para melhorar a escolha a tomar. Como o desenvolvimento do Cabcalc2 foi atingido, todos os objectivos foram cumpridos.

O Cabcalc2 não necessita para variável de entrada o comprimento da instalação, pois todos os cálculos eléctricos efectuados [3,21,27,30], não têm em conta os comprimentos totais dos cabos, como é o caso por exemplo das perdas totais dadas em [W/km] ou a queda de tensão [V/km]. Assim todas as soluções obtidas para as instalações, apresentam as capacidades de transporte para soluções uniformizadas. Por exemplo, os cálculos referidos pela norma [3] para uma instalação em esteira com a blindagem cruzada, prevê que essa instalação deva ser feita dividindo o cabo em três comprimentos iguais, não se referindo aos comprimentos máximos que podem ser admitidos bem como as tensões máximas induzidas, então todas as configurações descritas no Capítulo 3 para sistemas de ligação especial de blindagem cruzada, apresentam-se como diferentes possibilidades consoante as condições reais de instalação e/ou capacidades das bobinas de cabo.

Os sistemas de ligação especial à terra, demonstram que para qualquer cabo permitem uma elevada melhoria na capacidade de transporte, tanto numa formação em trevo ou esteira, por isso aconselha-se este tipo de sistemas.

A análise de resultados efectuada no capítulo 7 demonstra o impacto na corrente máxima admissível num cabo que as condições de instalação podem oferecer, por isso sempre que possível deverá ser reunida a maior quantidade de informação da instalação, com o objectivo de obter valores que se ajustem mais à realidade. Assim, pode-se evitar o uso de cabos de maiores secções, reduzindo à partida o investimento inicial.

Todas as simulações efectuadas pelo Cabcalc2 apenas usaram os cabos que já existiam na base de dados, pelo que não foram criados novos cabos para o efeito. De forma a permitir que os cálculos efectuados abranjam uma melhor e maior gama de escolha, ou evitar que o programa não retorne soluções, deve-se promover a adição de um conjunto de cabos para todas as secções normalizadas de cobre e alumínio.

8.2- Trabalhos Futuros

Para um melhor aproveitamento de todas as potencialidades da aplicação desenvolvida, é sugerido um estudo incidindo nas tensões induzidas nas blindagens dos cabos. Não existe normalização em Portugal para esses valores e desconhece-se instalações usando sistemas de ligação especial. Por isso, seria interessante conhecer valores limites para futuras aplicações.

Todos os cálculos efectuados pelo programa são para cabos monopolares, assim pode-se implementar um módulo de cálculo para cabos multipolares, tornando-o uma ferramenta mais flexível. Por outro lado, também seria interessante adaptá-lo de forma a permitir cálculos para vários grupos enterrados e ao ar livre, evitando a aplicação de factores de correcção tabelados.

Referências

- [1] O. Fábio, “Estudo de instalações de linhas subterrâneas de Alta Tensão com relação a campos magnéticos”, Dissertação apresentada à Escola Politécnica da universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia, 2010.
- [2] Cabo de 66-500kV XLPE. Disponível em <http://portuguese.alibaba.com/>. Acesso em Junho de 2011.
- [3] IEC 287-1-1:“Electric cables-calculation of the current rating, part 1: current rating equations (100% load factor) and calculation of losses, section 1: general”, First edition 1994-12.
- [4] Jordi-Roger Riba Ruiz and Xavier Alabern Morera, “Effects of the circulating sheath currents in the magnetic field generated by an underground power line”. ICREPQ’06, Palma de Mallorca, 2006.
- [5] Teresa Partida Manzanera, “Estudio de la Capacidad de Transporte de Sistemas de Cables Aislados de Alta Tensión”. Proyecto Fin de Carrera. Departamento de Ingeniería Eléctrica - Universidade Carlos III de Madrid Escuela Politecnica Superior, Madrid. 117 pp.
- [6] Solidal, Guia Técnico. 10ª Edição, SOLIDAL - Condutores Eléctricos, S.A., QUINTAS & QUINTAS - Condutores Eléctricos, S.A. Lisboa, 2010.
- [7] EDP. DMA-C33-281/N, “ Condutores isolados e seus acessórios para redes: Cabos, isolados com dieléctrico sólido extrudido e de tensão estipulada 36/60 (72,5) kV - Características e ensaios”, 3ª edição. Lisboa, 2006.
- [8] IEC 60502-2, “Power cables with extruded insulation and their accessories or rated voltages from 1 kV ($U_m=1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m=36$ kV) - Part 2: Cables for rated voltages from 6kV ($U_m=7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m=36$ kV)”, Second edition, 2005.
- [9] IEC 60840, “Power cables with extruded insulation and their accessories or rated voltages above 30 kV ($U_m=36$ kV) up to 150 kV ($U_m=170$ kV) - Test methods and requirements, 2004.

- [10]Viakon. “Cables de Energia em México. Evolución y Perspectivas”. Viakon Conductores Monterrey. Disponível em <http://www.congresopeninsulardeenergia.com>. Acesso em Maio de 2001.
- [11]George F. Moore, BICC Cables Ltd. (1997). “Electric cables handbook”. Edited by G.F. Moore. - 3rd edition. ISBN 0-632-04075-0.
- [12]Silva, J., “Dimensionamento de cabos de alta tensão (até 150 kV) e projecto de instalação eléctrica”. Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores Major Energia -Universidade do Porto, 2008.
- [13]Catálogo Cabelte. Disponível em <http://www.cabelte.pt/>. Acedido em Junho de 2011.
- [14]RSLEAT, “Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão”, Edição DGE, Lisboa, Abril 1993.
- [15] Catálogo Nexans. “60-500kV High Voltage Underground Power Cables - XLPE insulated cables”.
- [16]Norma CFE-AT-DP, “Distribución-Construcción de Sistemas subterráneos - Diseño y Proyecto Alta Tensión” [Versão electrónica]. Disponível em <http://www.acec.unce.org.mx>. Acesso em Março de 2011.
- [17]Abb. “High Voltage Cable Accessories (52-420 kV)” [Versão electronica]. Disponível em <http://www.abb.com/>. Acesso em Maio de 2011.
- [18]Elcon. “Copas terminals termocontráctiles”, Gedisan - General distribuidora, S.A.
- [19]Prysmian, “Cables y Sistemas de MT. Soluções completas” [Versão electrónica]. Disponível em <http://www.voltimum.pt/>. Acedido em Maio de 2011.
- [20]Tyco Electronics, “LINK BOXES Cross bonding and sectionalisation for high-voltage cable systems” [Versão electronica], Tyco Electronics Raychem GmbH Energy Division. Disponível em www.tycoelectronics.com. Acesso em Março de 2011.
- [21]“IEEE Guide for the Application of Sheath-Bonding Methods for Single-Conductor Cables and the Calculation of Induced Voltages and Currents in Cable Sheaths,” ANSI/IEEE Std 575-1988 , vol., no., pp.0_1, 1987.
- [22]General Cable, “Ligações à terra em circuitos de Alta Tensão”. ICAT 2005 CO/VAR/PRO/ICA/080/022, 2005.

- [23]Elektrik Malzemeleri, "Link Boxes for high voltage cable system" [Versão electronica], Elektrik Malzemeleri Yuklenim San. Tic. Ltd. Disponível em <http://www.elektrik-malzemeleri.com/>. Acesso em Maio de 2011.
- [24]Demetrios A. Tziouvara, "Protection of High-Voltage AC Cables" Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Presented at WPRC 2005 and Power Systems Conference 2006.
- [25]Alcatel. "Cables de Alta Tension" Alcatel, The Hi-Speed Company.
- [26]IEC 60228: "Conductors of insulated cables", Third edition 2004-11.
- [27]Brugg , "High Voltage XLPE Cable Systems - Technical User Guide", Brugg Kabel AG Business Unit Power Systems, Switzerland, 2006.
- [28]Arnold, A.H.M., "The theory of sheath losses in single-conductor lead-covered cables," Electrical Engineers, Journal of the Institution of , vol.67, no.384, pp.69-89, December 1928.
- [29]Cofré, P.M., "Cálculo de cables subterráneos" [Versão electronica], Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas. Disponível em <https://www.u-cursos.cl/>. Acesso em Maio de 2011
- [30]IEC 60287-2-1: "Electric Cables - Calculation Of Current Rating Part 2: Thermal Resistance , section 1: Calculation Of Thermal Resistance", First edition 1994-12.

Anexo A

Isolante	Perm. Relativa	Fac. Perdas	Temp. Reg. Perm.	Temp. Reg. CC	Res. Term. (K.m/W)	U0	Unid. Vol. Calor (J/K.m3)
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

Tabela A 1 - Características dos materiais da camada isolante [3]

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 A 2 - Resistividades térmicas dos materiais para a camada isolante [30]

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

Tabela A 3 - Resistividades térmicas dos materiais para a bainha exterior [30]

Tipo de solo	Densidade (g/cm ³)	Porcentagem 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	0,6	1,33
	2,02	7	0,5	0,87

Tabela A 4 - Resistividades térmicas do solo [25]

Instalação	Z	E	g	Modo
Esteira	0,21	3,94	0,6	
Trevo juntivo	0,96	1,25	0,2	
Esteira juntiva	0,62	1,95	0,25	
Esteira juntiva vertical	1,61	0,42	0,2	
Esteira vertical	1,31	2	0,2	
Esteira juntiva encostada	1,69	0,63	0,25	
Trevo juntivo encostado	0,94	0,79	0,2	

Tabela A 5 - Coeficientes de dissipação de calor para grupos de cabos ao ar livre [30]

Material	σ
PVC	0,6
PE	0,4

Tabela A 6 - Coeficientes de absorção solar [3]

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

Tabela A 7 - Constantes de instalação para tubos ou galerias [30]

Anexo B

Correcções e Adaptações da Primeira Metodologia

1. Cálculo para cabos entubados, não estava afectado com os respectivos factores de correcção.
2. Para cabos entubados envolvidos em betão o factor de correcção segundo a IEC 60287 não estava aplicado.
3. A aplicação originava um erro interno em certos casos para instalações de 2 grupos.
4. Fórmula errada para cabos com armadura em fios, magnética.
5. Não permitia o cálculo para cabos onde se evita a secagem do solo.
6. Introdução de um comando para permitir alterar a temperatura do solo, no caso de “Cabos enterrados onde ocorre parcial secagem do solo” e para “Cabos enterrados onde se evita a secagem do solo”. Constatei que os dimensionamentos existentes para estas situações registadas na base de dados estavam errados. NOTA: A temperatura do solo deverá ser sempre maior que a temperatura ambiente.
7. Dimensionamento da fita semicondutora não era possível, pois originava erro do programa.
8. No dimensionamento não permitia a escolha de secções normalizadas de cobre classe2, superiores a 800mm² (passava de 800 para 25mm²).
9. Não dava acesso à selecção de todas as secções normalizadas pelo IEC 60228.
10. Não incorporava os devidos factor de efeito pelicular e de proximidade para secções elevadas.
11. No dimensionamento de cabos, na escolha do diâmetro da alma condutora quando aparece a mensagem “Inserir diâmetro manualmente”, significa que na base local o diâmetro para a secção escolhida não está definido, tendo o valor zero (apesar do programa apresentar um valor, isso deve-se pelo facto de estar um cabo seleccionado

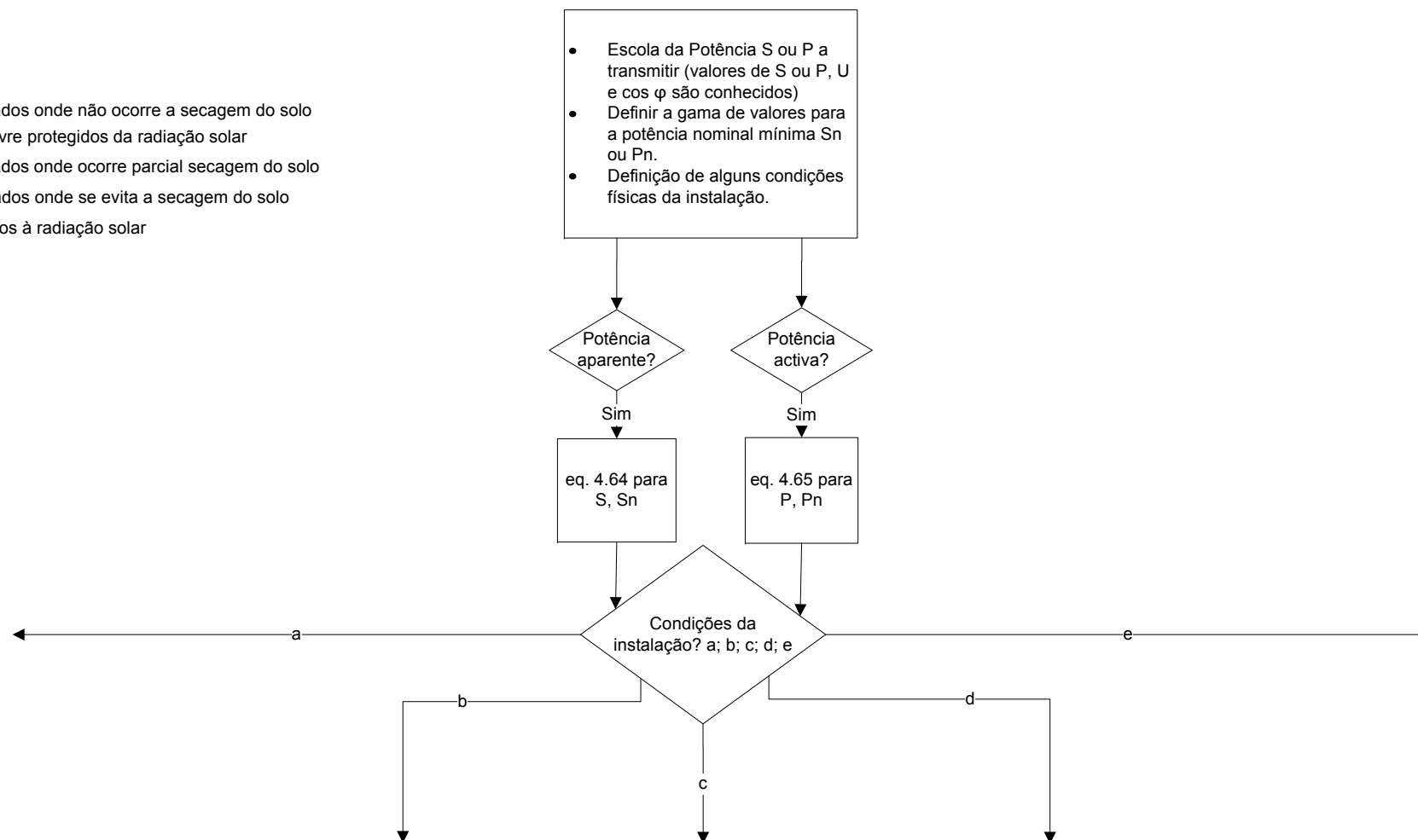
na base de dados). Convém assim inserir o diâmetro que se pretende para a alma condutora no programa.

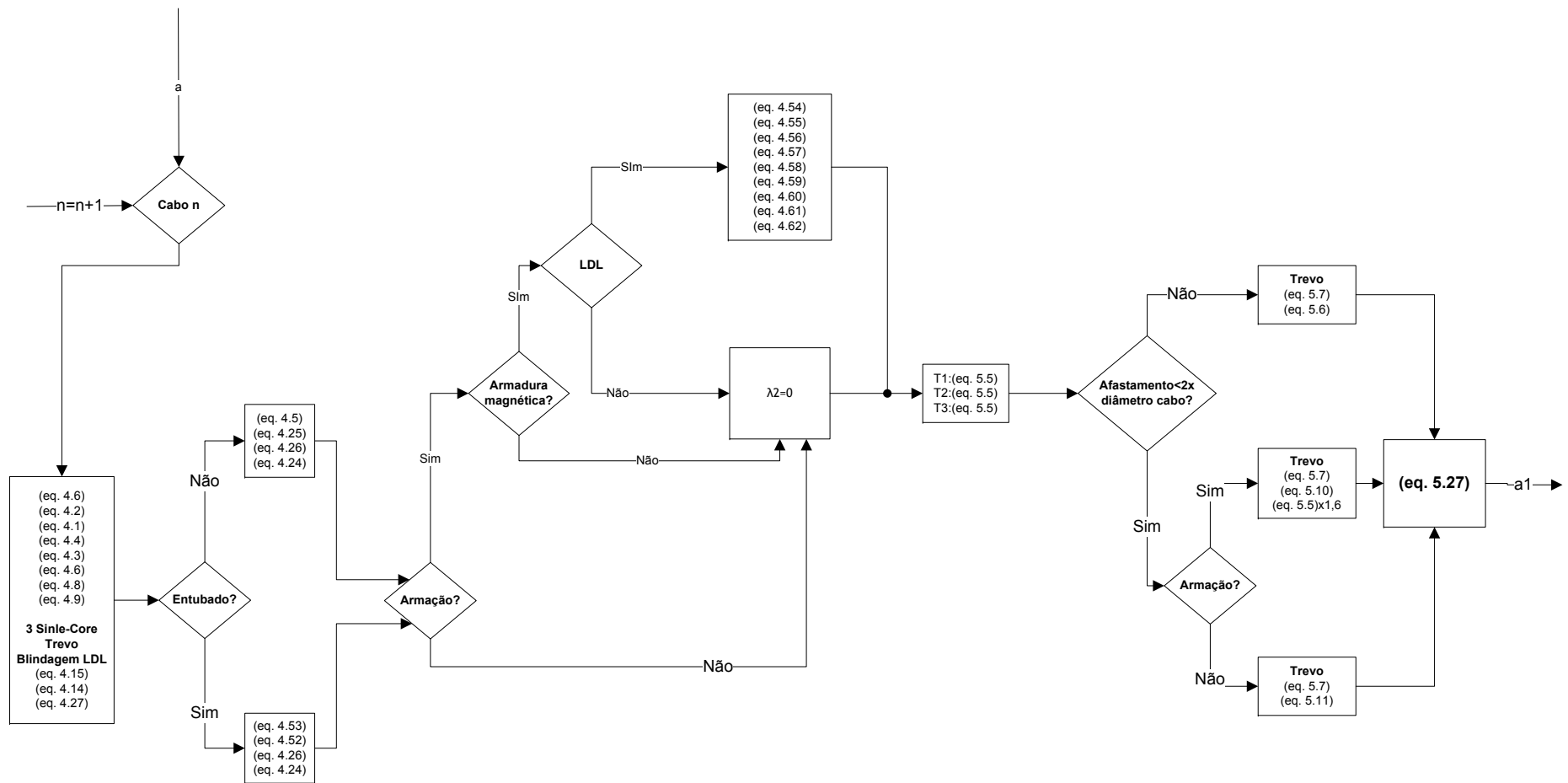
12. Na escolha da alma condutora, por vezes poderá originar um erro. Esse erro foi impossível resolver, pois a complexidade de rotinas da aplicação é que estão nessa origem. NOTA: Sempre que se estiver a dimensionar a alma condutora, antes de guardar as alterações, deverá sempre clicar nas células, pois os dados só assim os dados serão gravados, não originando qualquer erro.
13. Na remoção dos cabos da baselocal, o programa não eliminava correctamente o cabo da tabela “tab_insttubo”.
14. Erros de cálculo da resistência para a armadura, nomeadamente nos valores do coeficiente de temperatura.
15. Cálculos apresentados na tab para a indutância e reactância errados, para formações em trevo e esteira.
16. Introdução de um novo comando para cálculo da queda de tensão em função do comprimento do troço do cabo.
17. Introdução de uma tab denominada de SVL (sheath voltage limiter), para escolha do comprimento máximo para aplicação da transposição em função da tensão máxima induzida permitida.

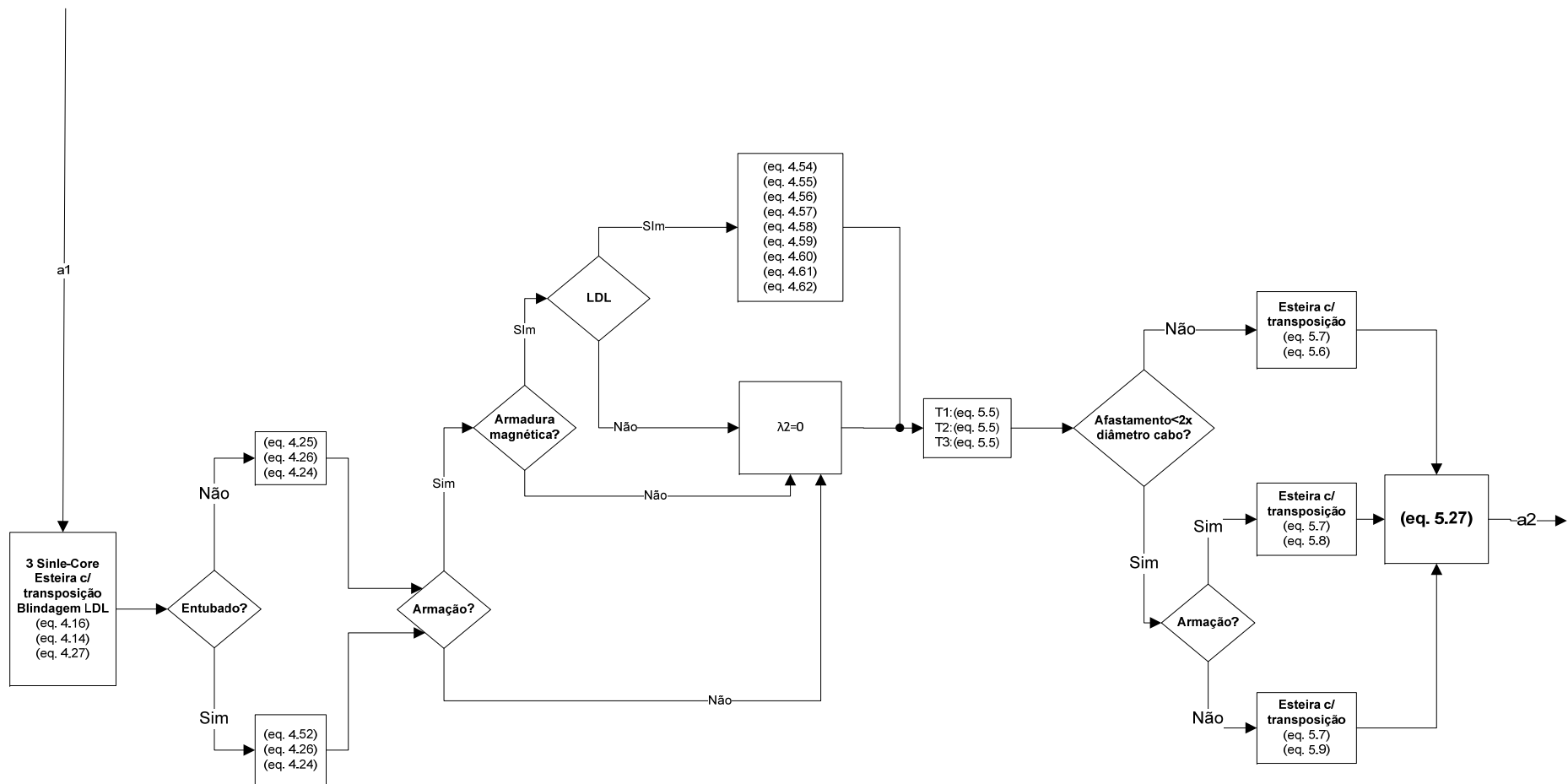
Anexo C

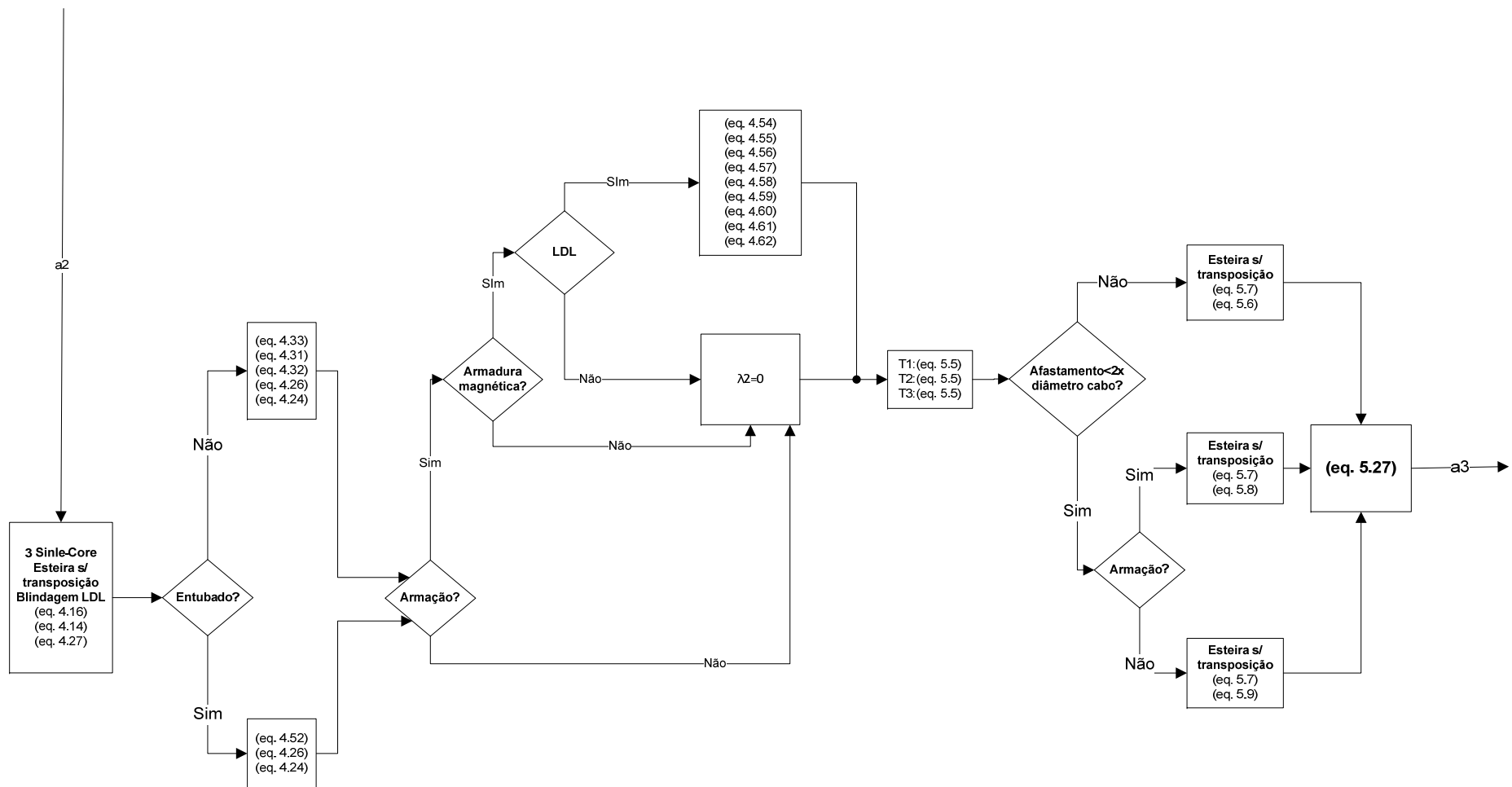
Fluxograma de Cálculo

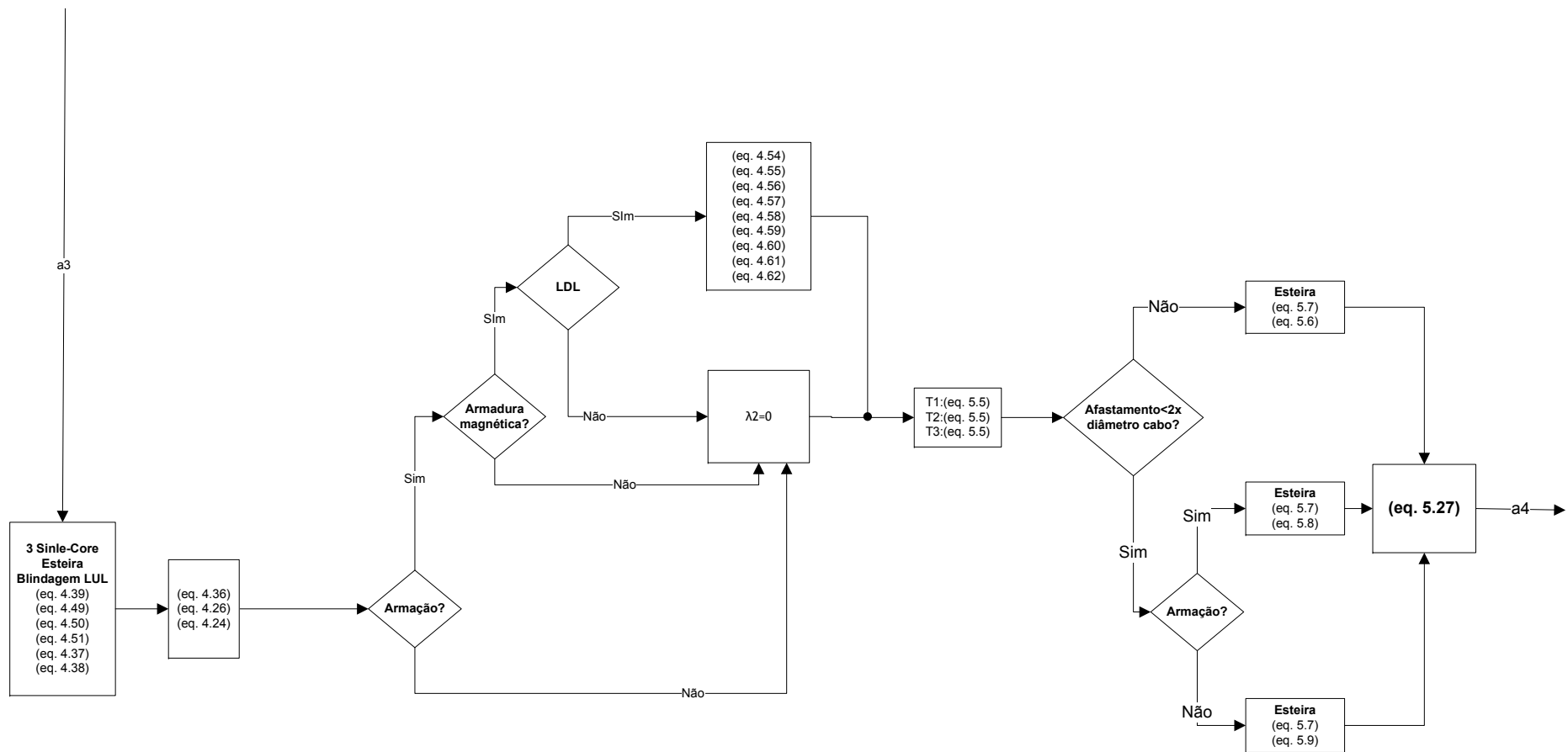
- a) Cabos enterrados onde não ocorre a secagem do solo
- b) Cabos ao ar livre protegidos da radiação solar
- c) Cabos enterrados onde ocorre parcial secagem do solo
- d) Cabos enterrados onde se evita a secagem do solo
- e) Cabos expostos à radiação solar

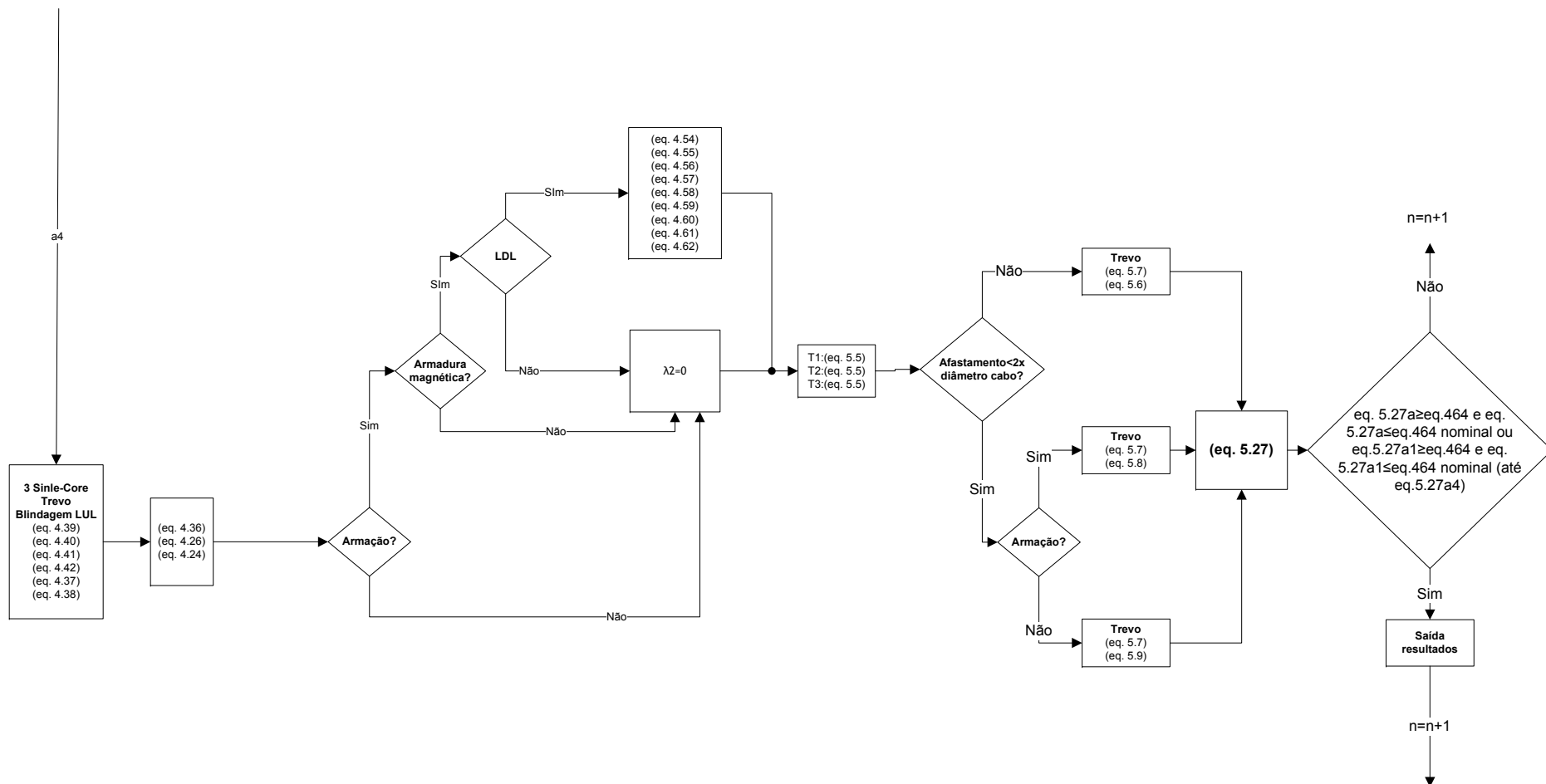


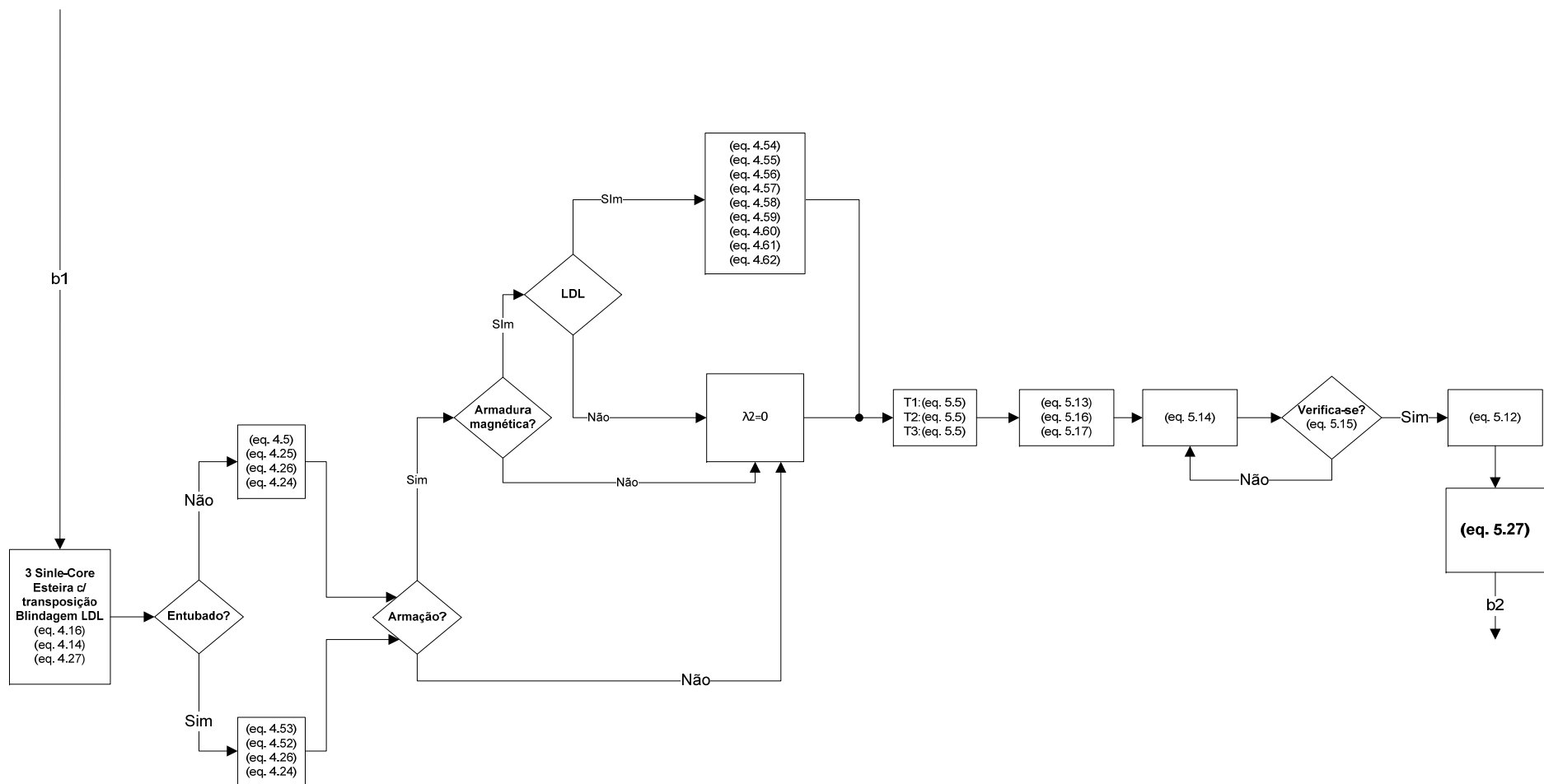


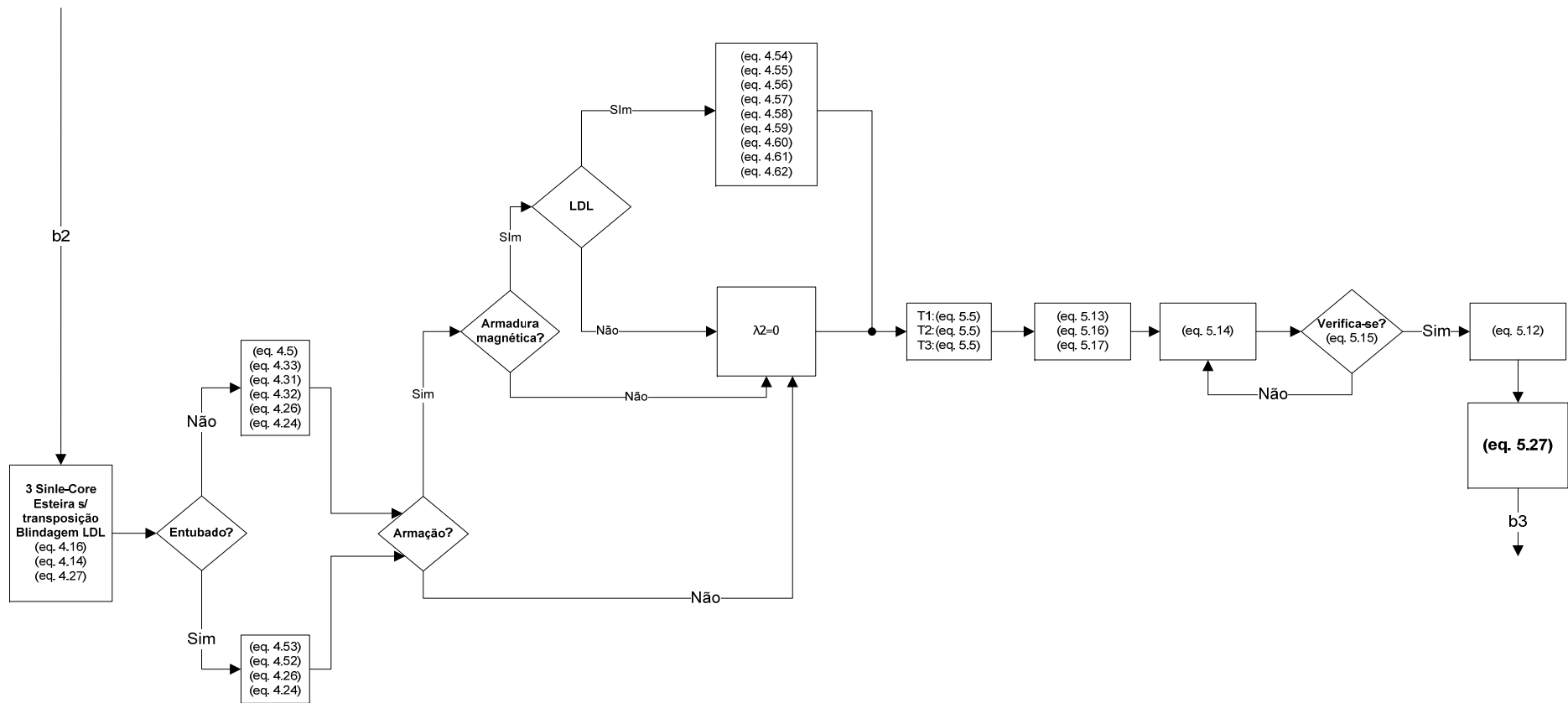


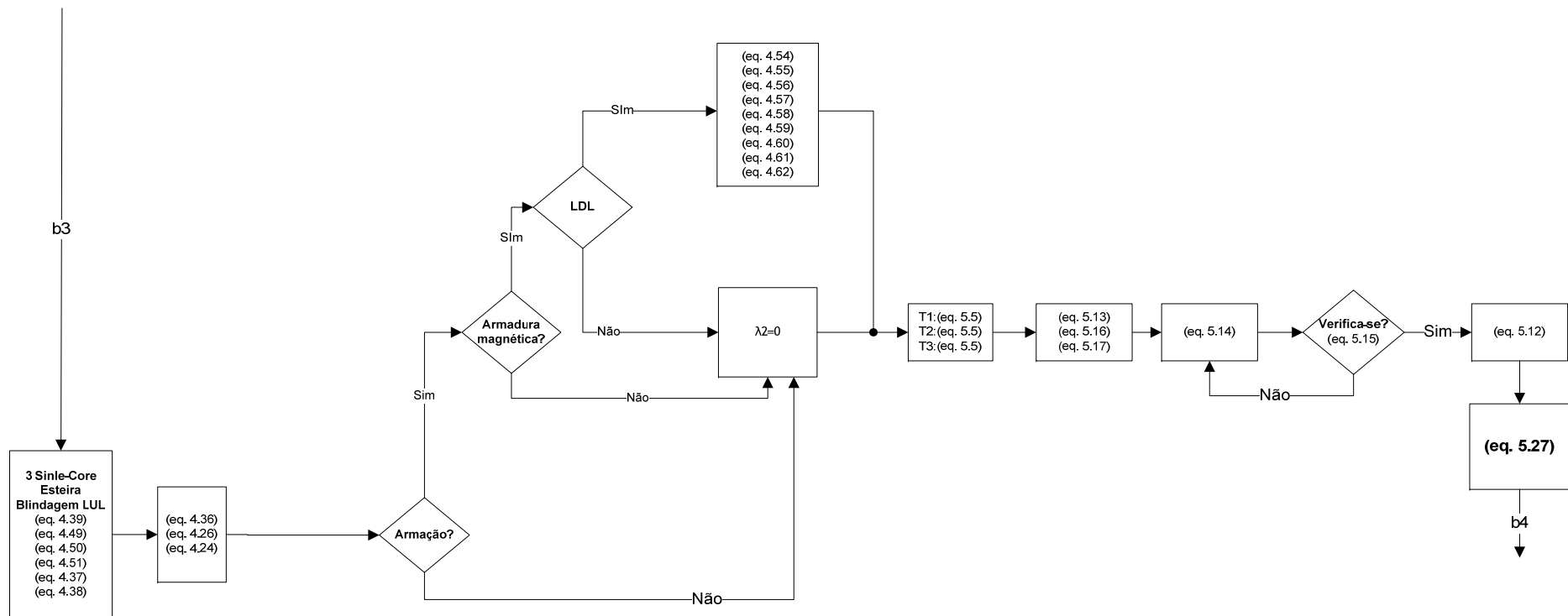


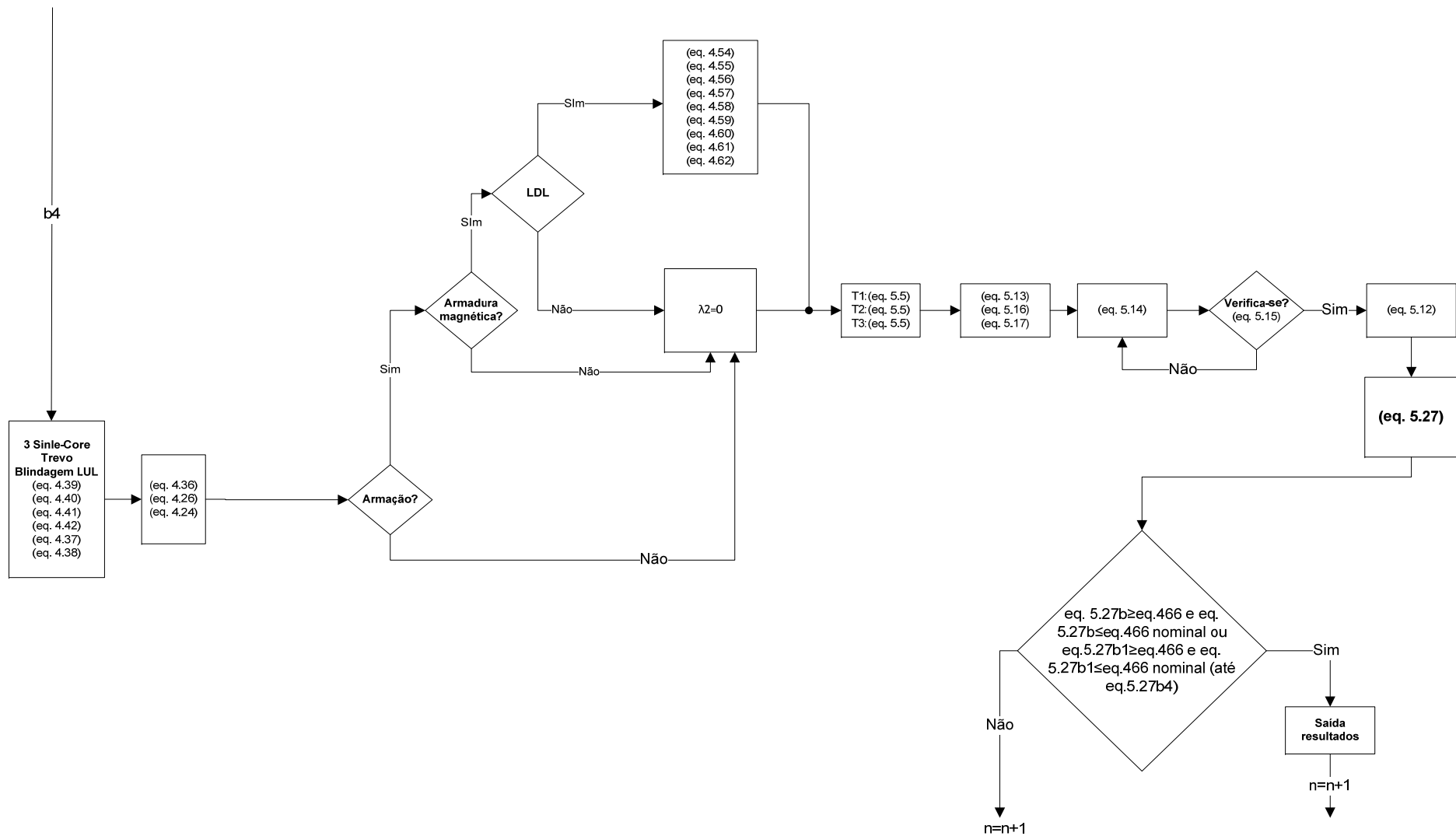


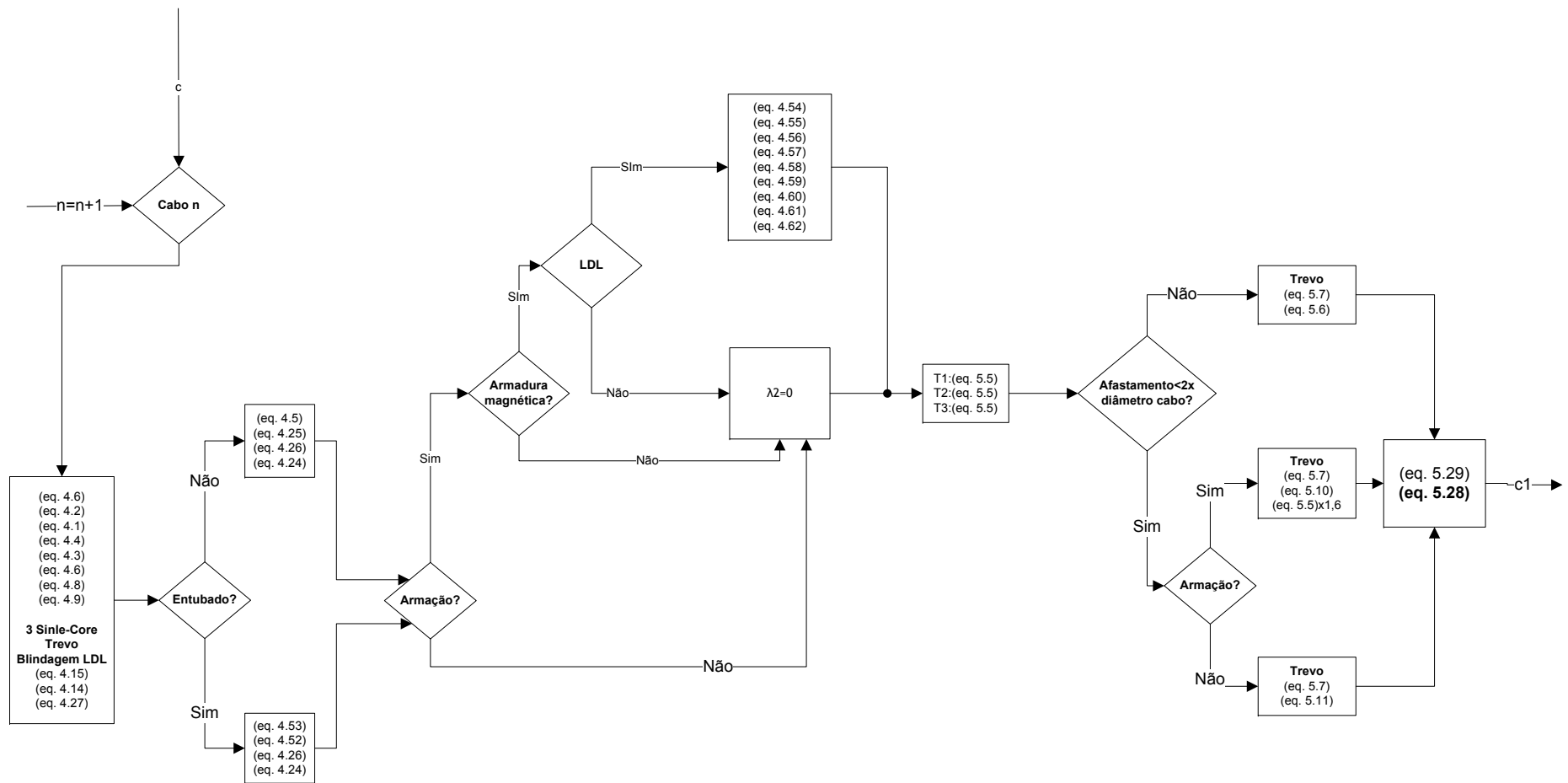


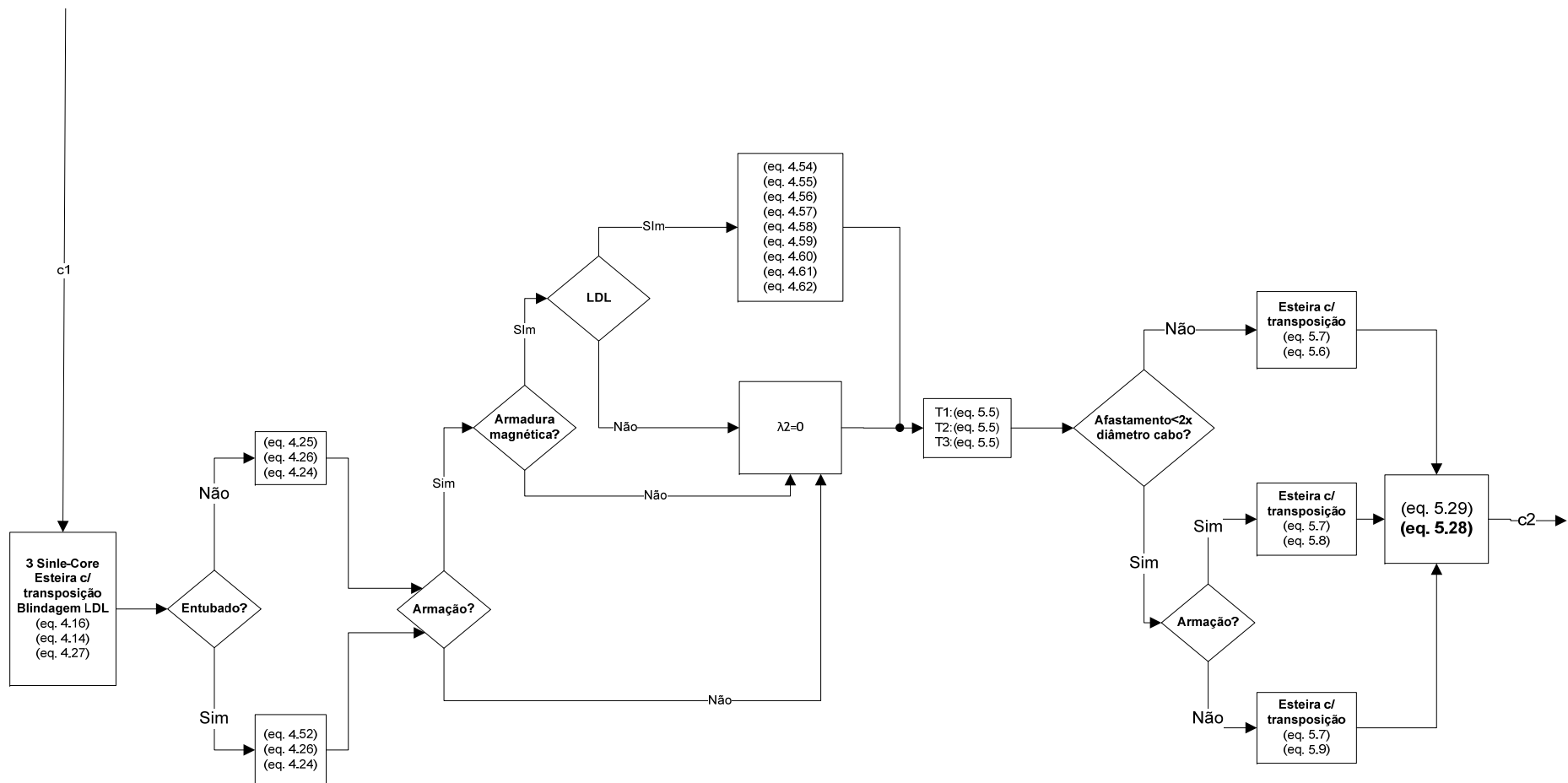


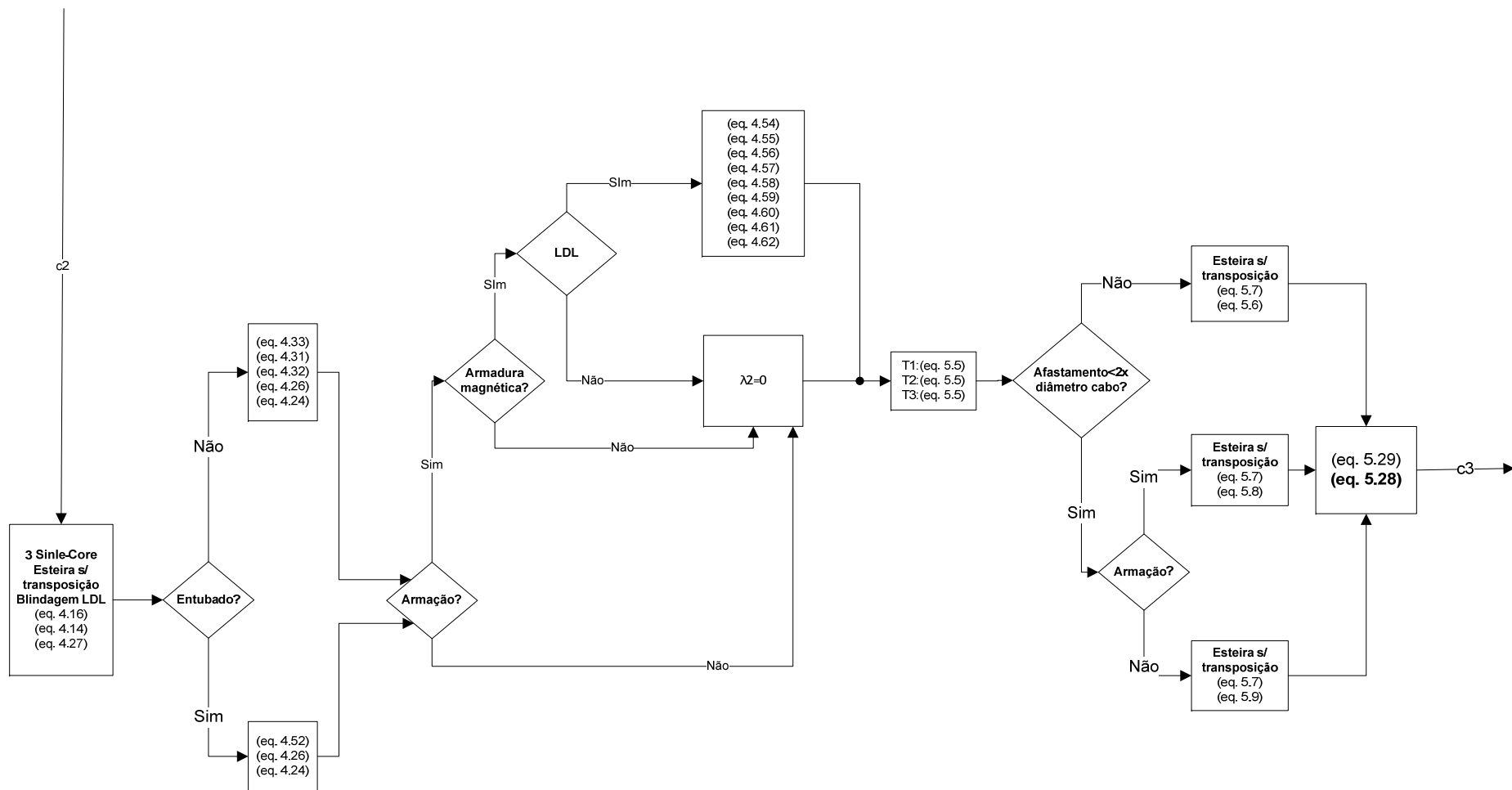


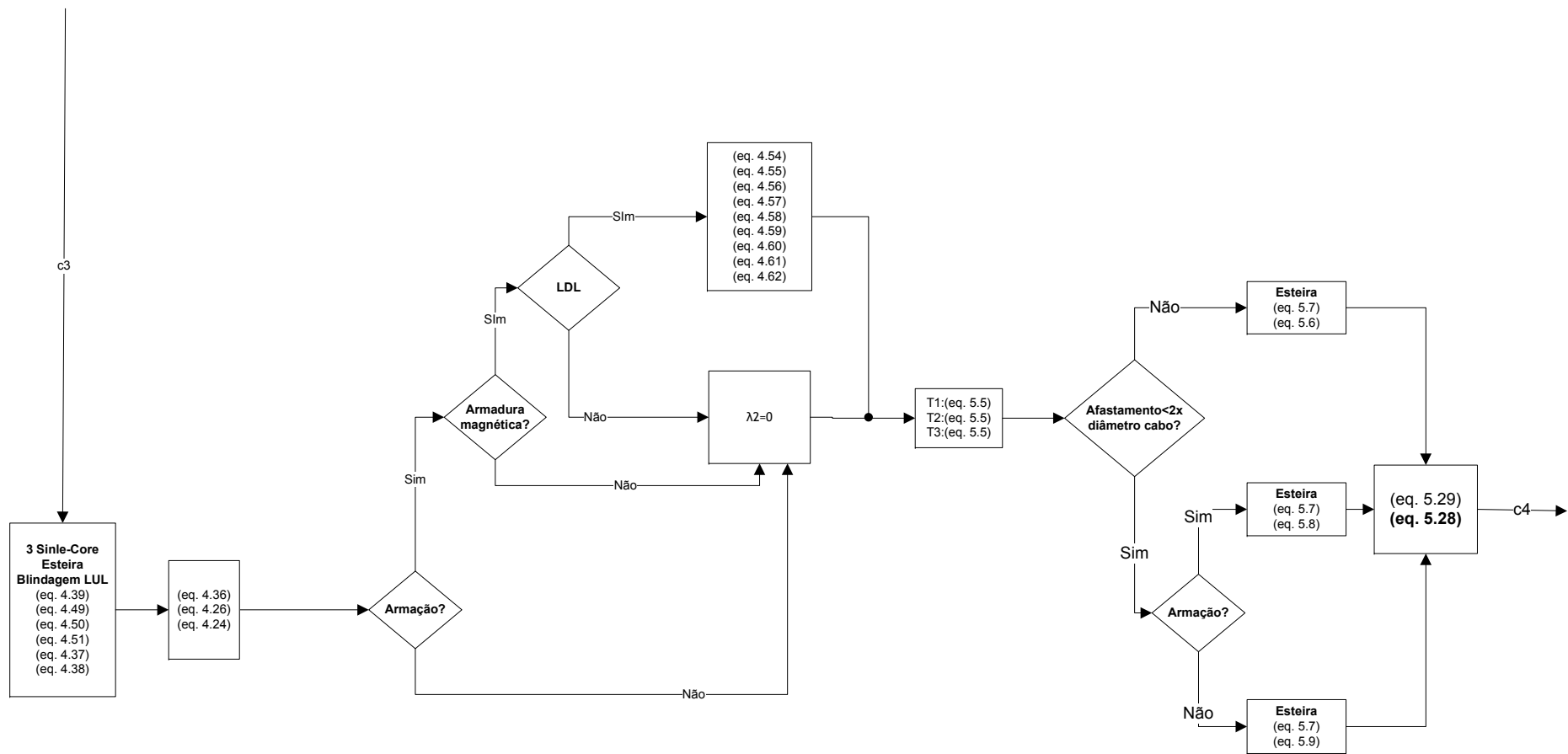


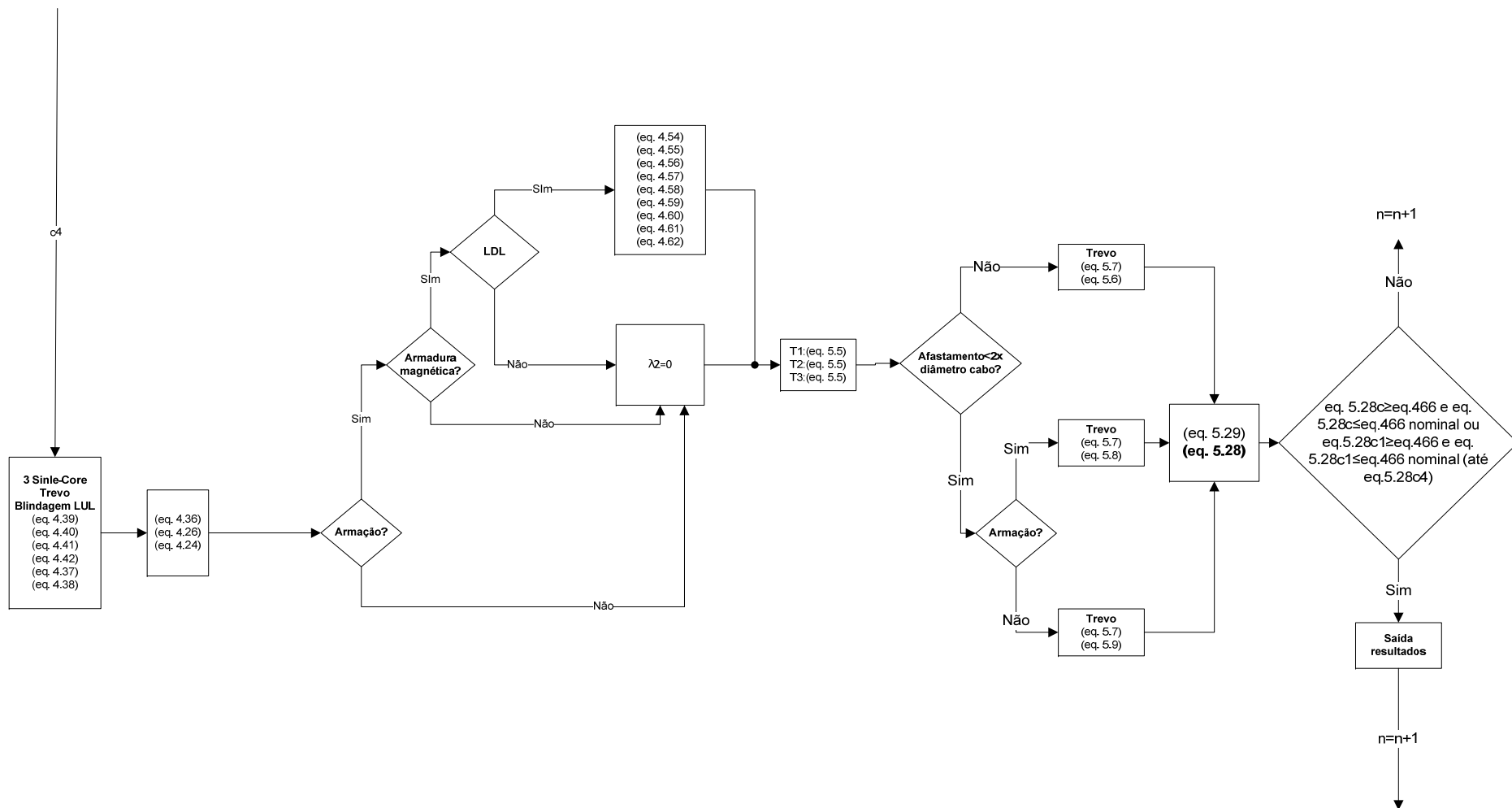




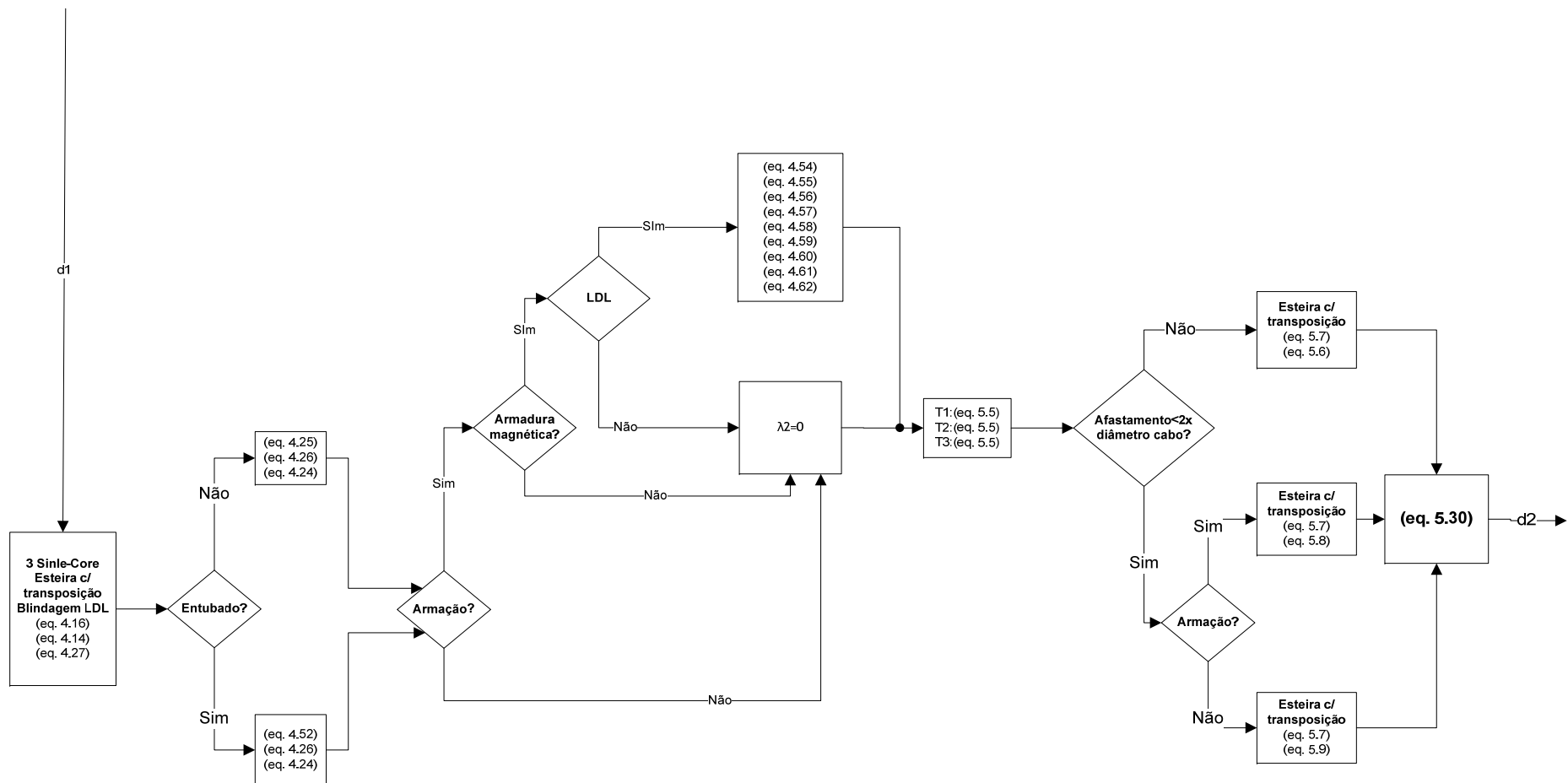


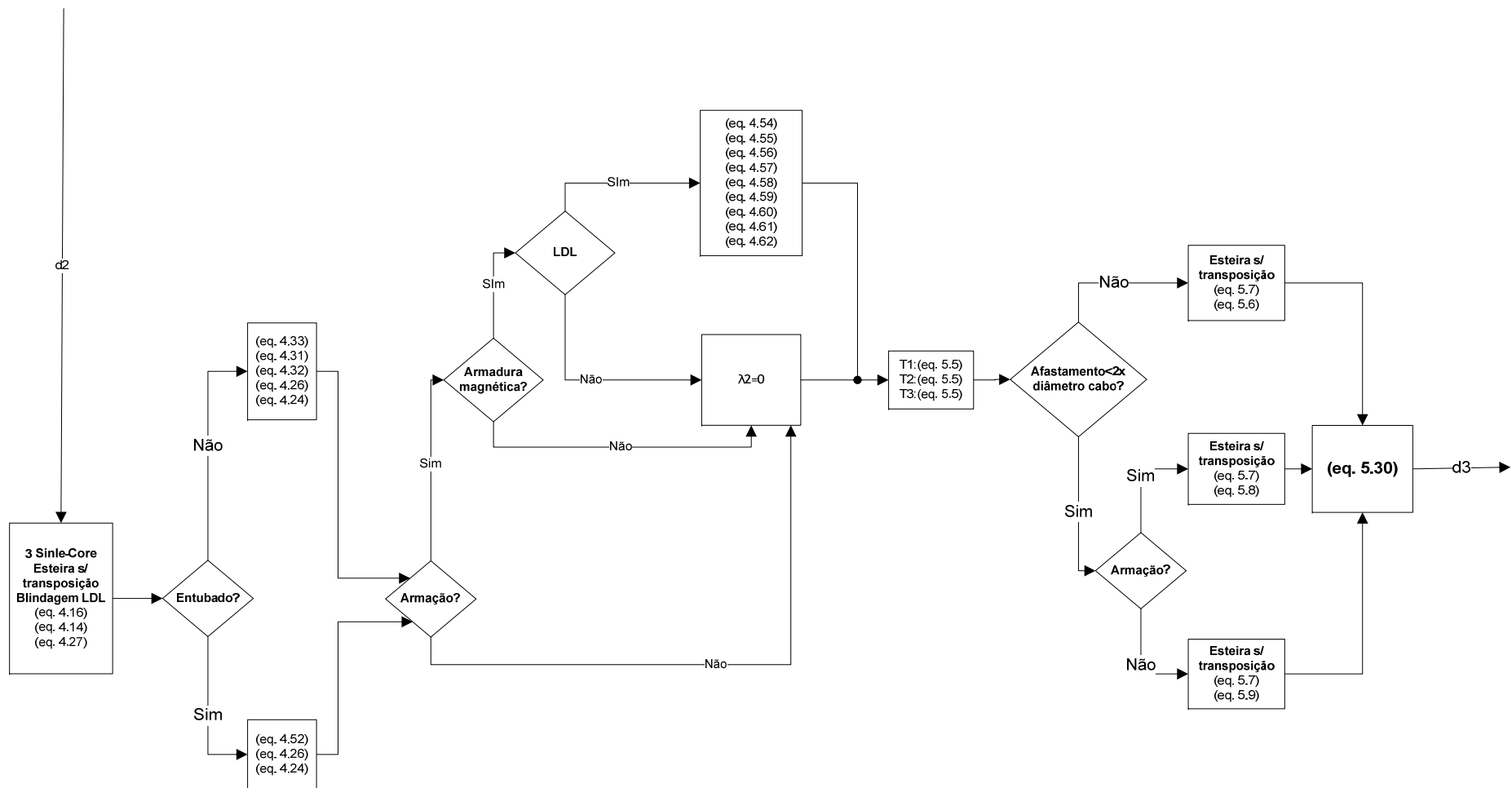


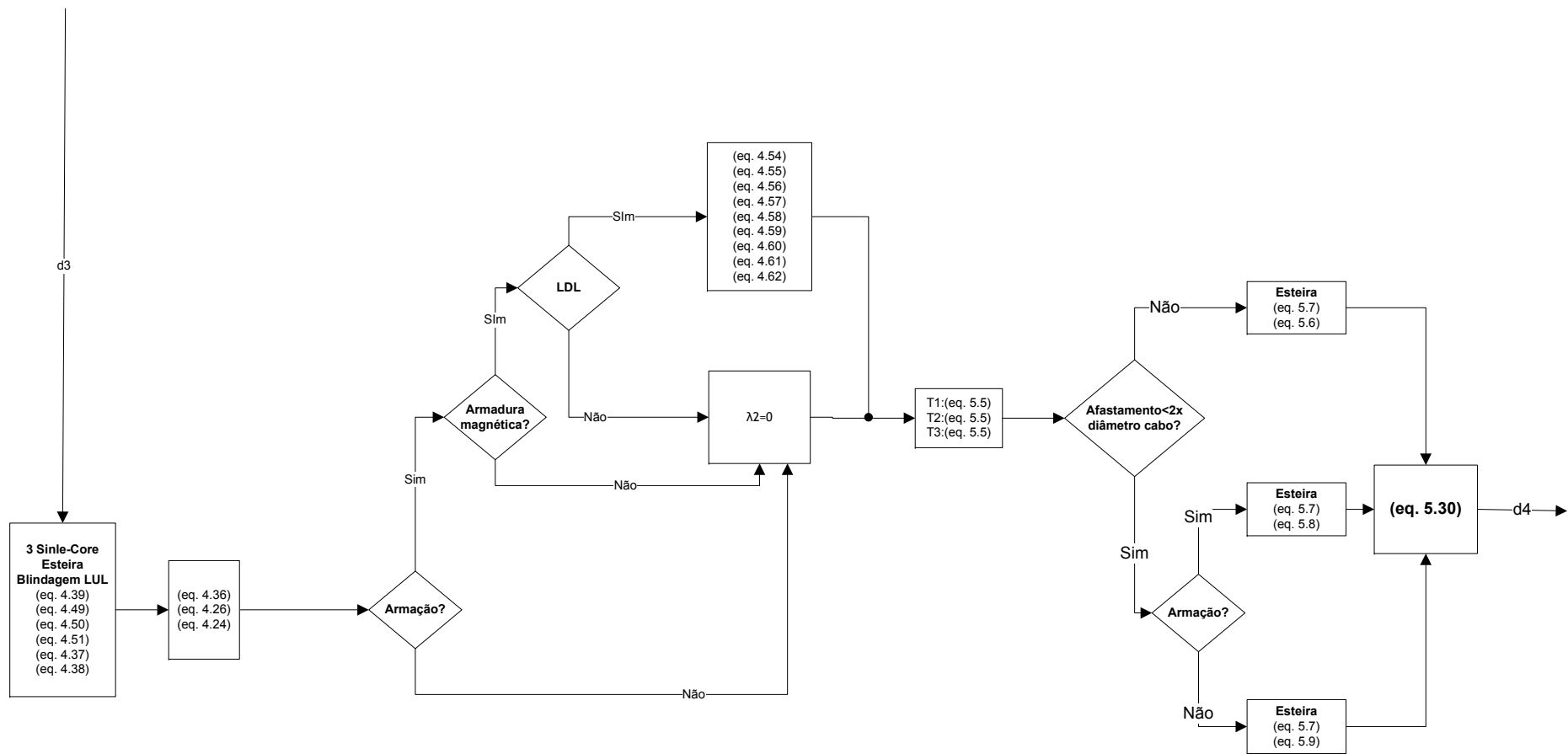


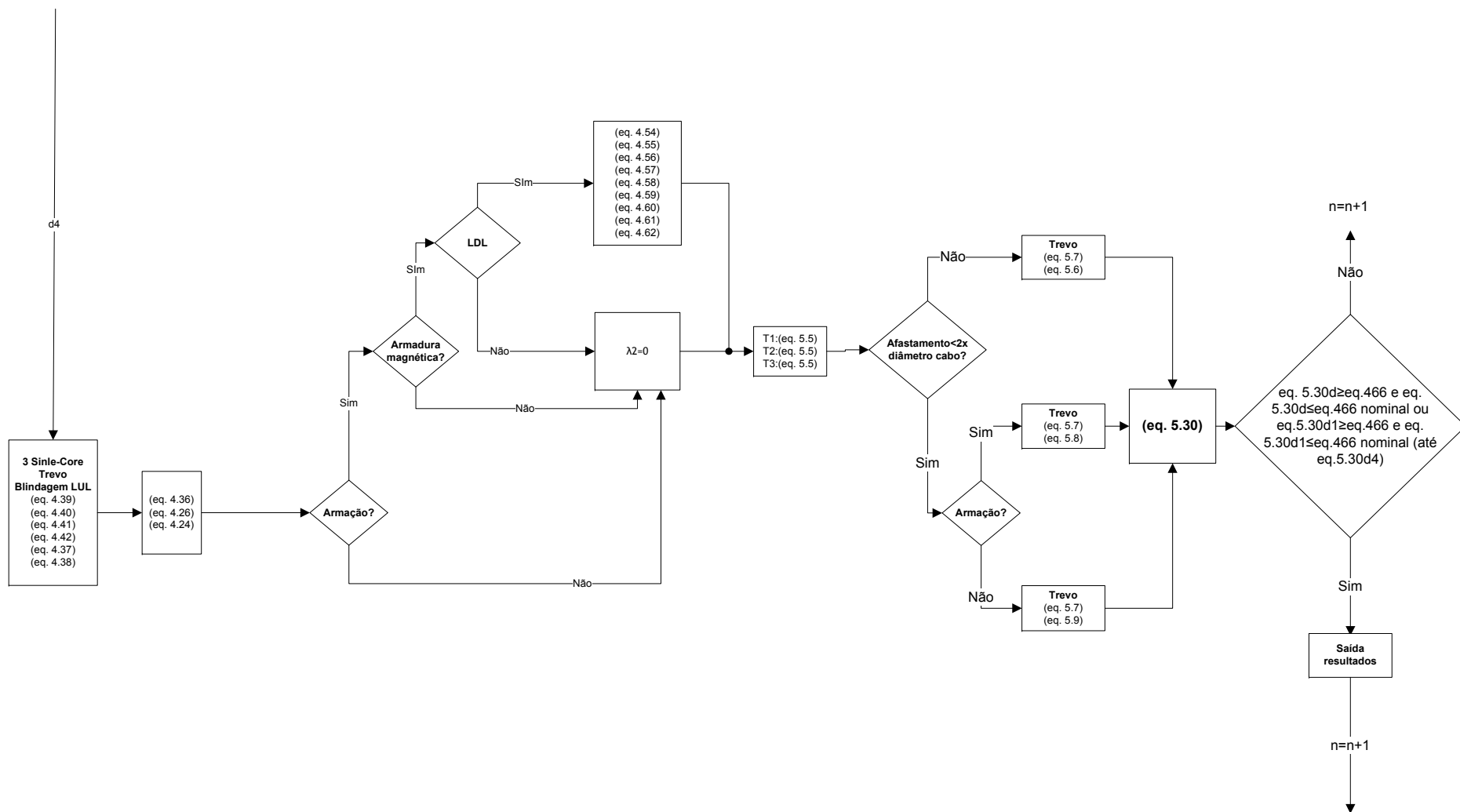


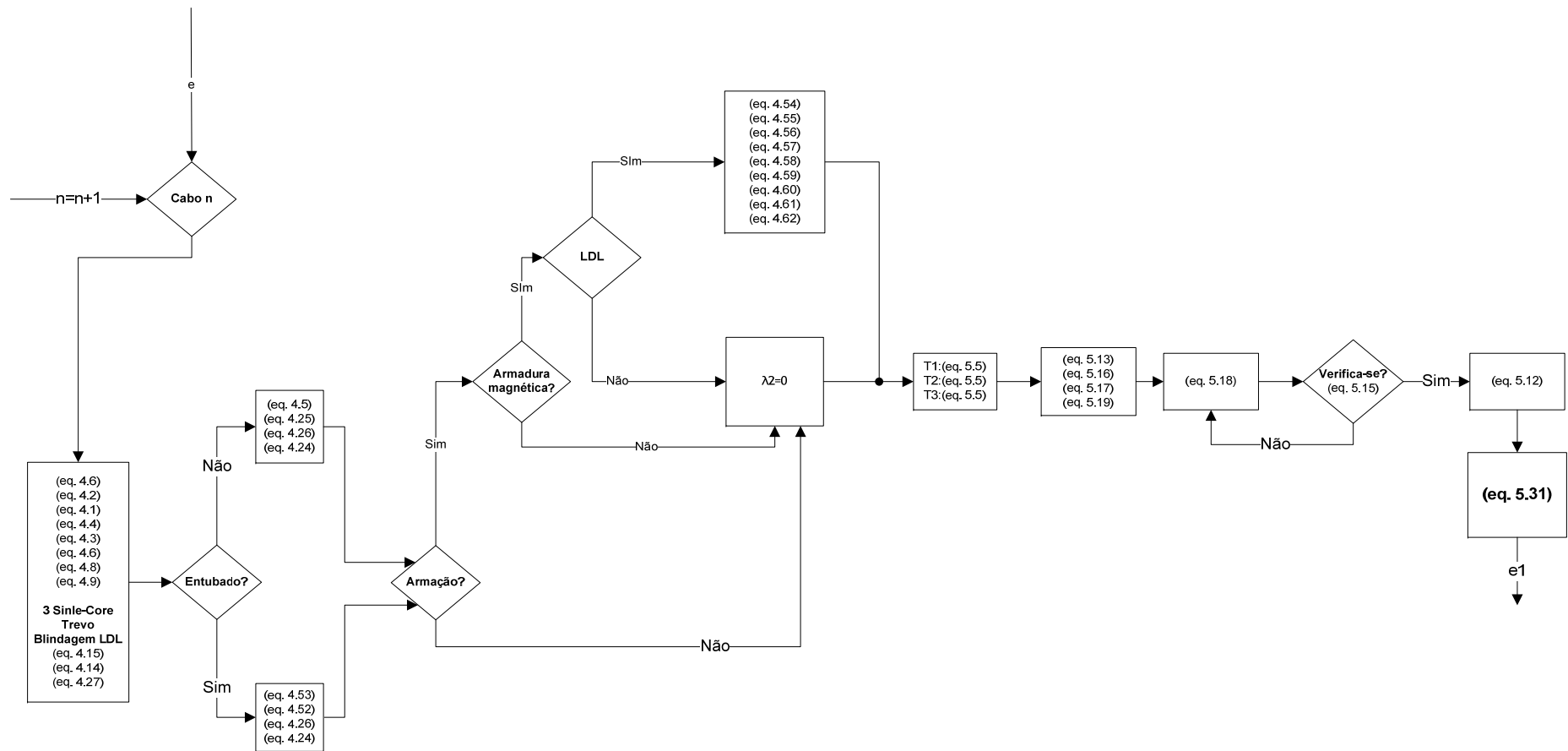


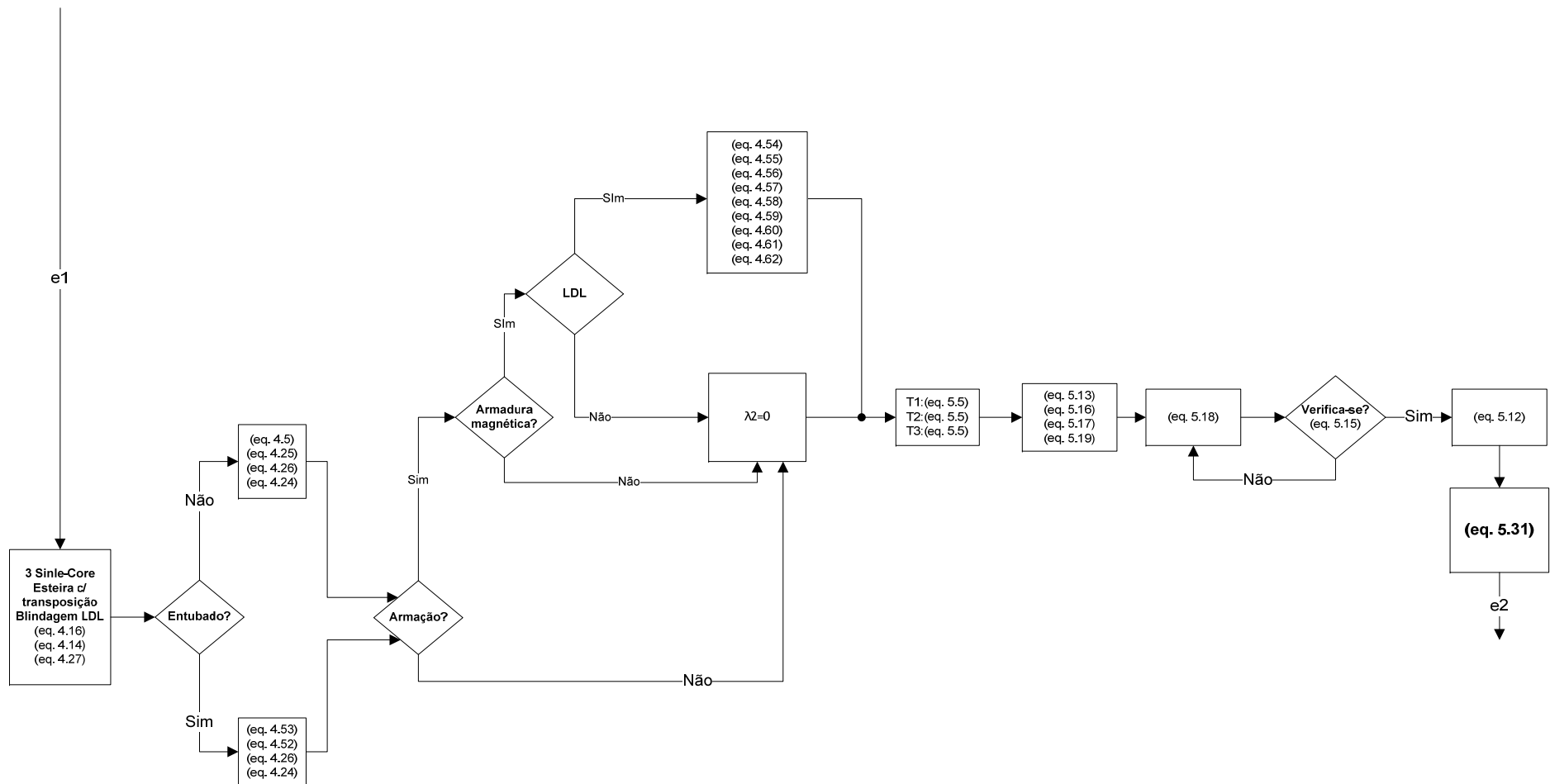


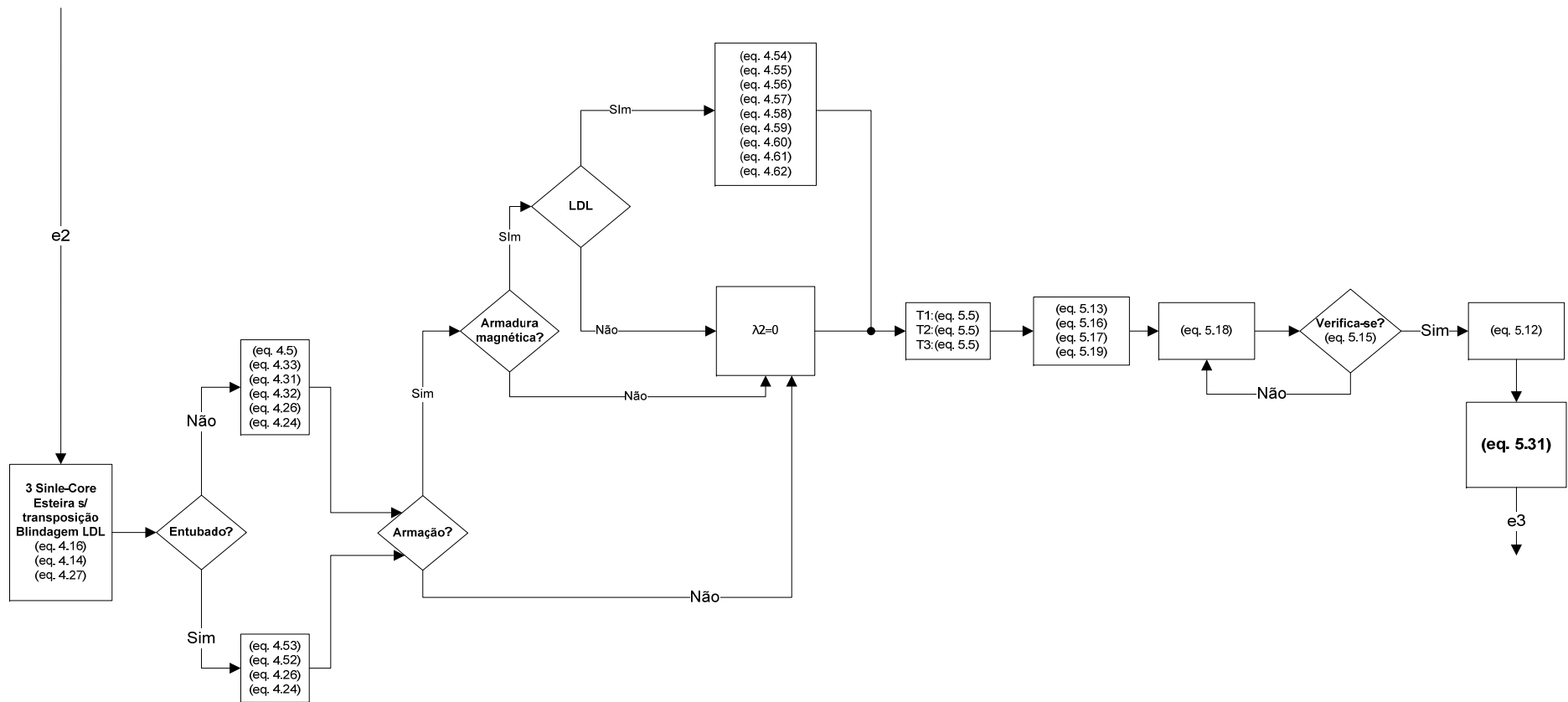


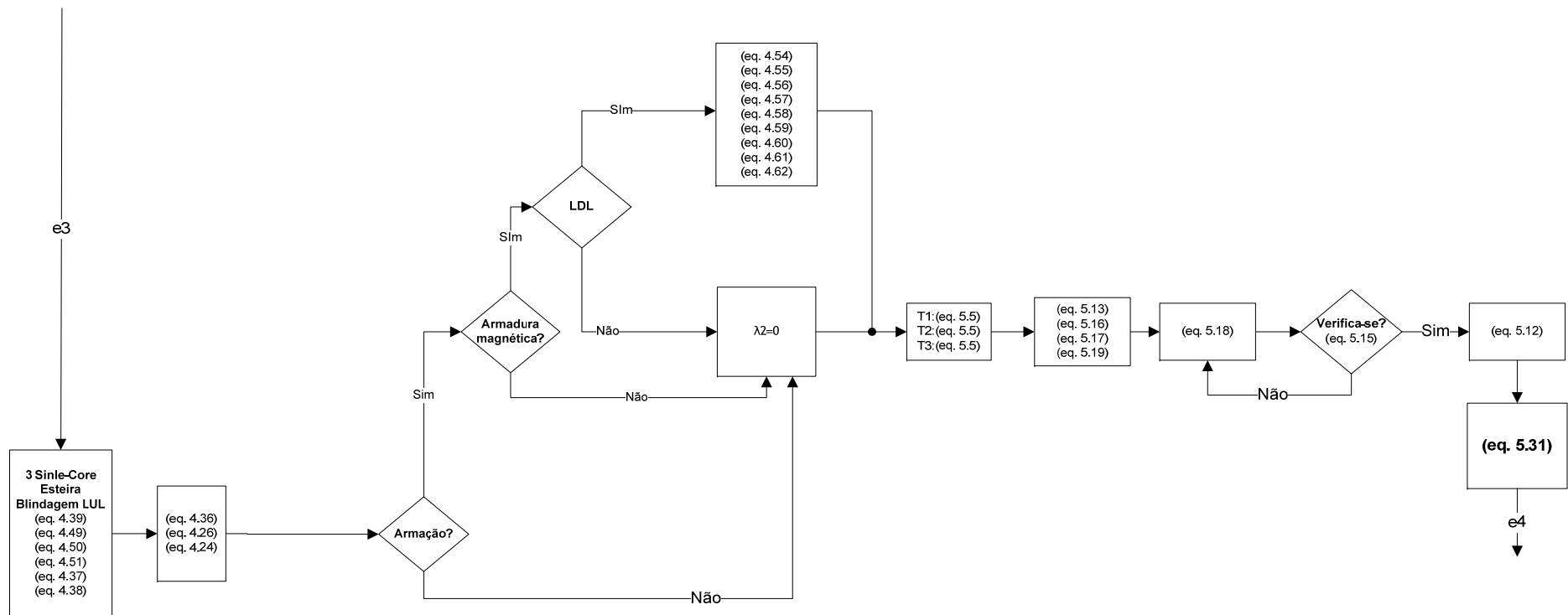


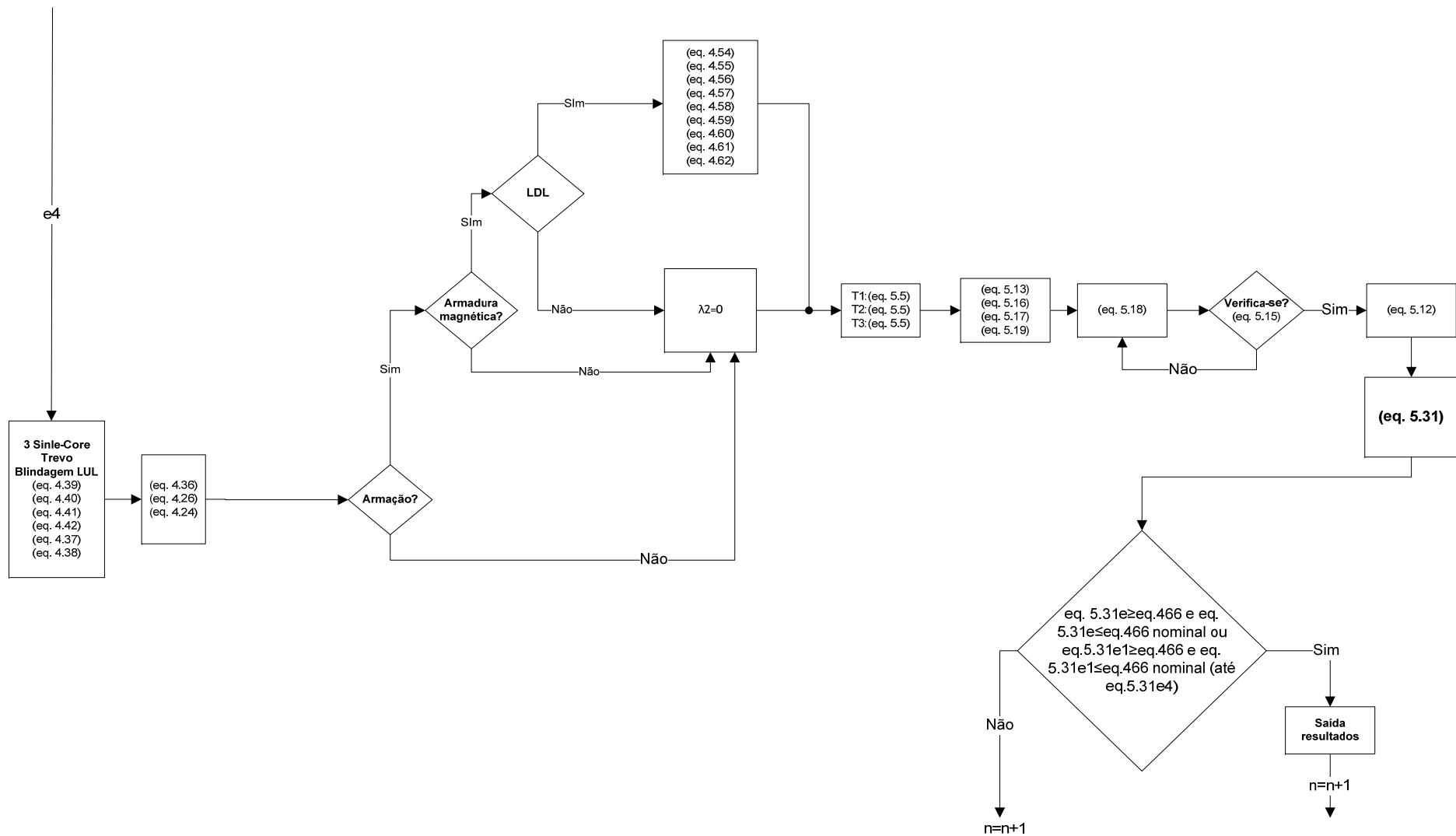












Anexo D

Código do programa

D.1- Form Solução Técnica

```
Imports System.Math
Public Class soptima

    'corrente pretendida pelo cliente
    Dim I As Single
    'potência aparente pretendida pelo cliente
    Dim Sap As Single
    'potência nominal mínima
    Dim Sapn As Single
    'tensão da rede
    Dim U As Single
    'resistência dc a 20°C da alma
    Dim res20dc As Single
    'resistência dc da alma à temperatura de operação
    Dim resdco As Single
    'resistência ac da alma
    Dim resac As Single
    'natureza alma condutora
    Dim natureza As String
    'material isolamento
    Dim matiso As String
    'temperatura de operação
    Dim tempop As Single
    'coeficiente de temperatura do material
    Dim coeftemp As Single
    'coeficiente auxiliar de temperatura do material
    Dim coeftemp2 As Single
    'argumento da função de Bessel usado para calcular o efeito pelicular
    Dim xs As Single
    'factor de efeito pelicular
    Dim ys As Single
    'argumento da função de Bessel usado para calcular o efeito de proximidade
    Dim xp As Single
    'factor de efeito de proximidade
    Dim yp As Single
    'forma da alma condutora
    Dim forma As String
```

```

'factor usado no cálculo de Xs (efeito pelicular)
Dim ks As Single
'factor usado no cálculo de Xp (efeito de proximidade)
Dim kp As Single
'frequência da rede
Dim f As Single
'diâmetro da alma condutora
Dim dc As Single
'diâmetro do cabo
Dim dext As Single
'afastamento entre cabos
Dim afastamento As Single
'espessura do semiconductor interno
Dim esci As Single
'espessura do semiconductor externo
Dim esce As Single
'espessura da isolação
Dim esiso As Single
'espessura da fita semicondutora
Dim efs As Single
'espessura da fita semicondutora para outro constituinte do cabo
Dim efs2 As Single
'diâmetros blindagem em fios
Dim dfem As Single
'espessura da fita de continuidade
Dim espessurafc As Single
'largura da fita de continuidade
Dim largurafc As Single
'passo da fita de continuidade
Dim passofc As Single
'espessura da blindagem em fita
Dim espessurafm As Single
'largura da blindagem em fita
Dim largurafm As Single
'espessura da fita hidroexpansiva
Dim efh As Single
'espessura de fita de alumínio
Dim espessurafa As Single
'espessura da fita de enchimento
Dim espessurafe As Single
'espessura da armação
Dim espessuraarm As Single
'largura da armação
Dim larguraarm As Single
'passo da armação
Dim passoarm As Single
'número de fitas da armação
Dim nfarm As Single
'espessura da armação em fios
Dim espessuraarm2 As Single
'fita de continuidade da armação em fios
Dim fcarm2 As String
'número de fios da armação em fios
Dim nfarm2 As Single
'passo da armação em fios
Dim passoarm2 As Single
'espessura da bainha externa
Dim esbe As Single

'variáveis da tabela estrutura
Dim estrutura_fe As String
Dim estrutura_sci As String

```

```

Dim estrutura_isolacao As String
Dim estrutura_sce As String
Dim estrutura_fs As String
Dim estrutura_em As String
Dim estrutura_fm As String
Dim estrutura_fc As String
Dim estrutura_fh As String
Dim estrutura_fa As String
Dim estrutura_arm As String
Dim estrutura_arm2 As String
Dim estrutura_be As String
Dim estrutura_fs2 As String
'afastamento entre cabos
Dim s As Single
'permitividade relativa isolamento
Dim permrelativa As Single
'diâmetro da isolamento
Dim diamiso As Single
'diâmetro do semiconductor interno
Dim diamsci As Single
'capacidade do cabo
Dim capacidade As Single
'factor de perdas do material da isolamento
Dim facperdas As Single
'perdas dieléctricas
Dim wdv As Single
'área da blindagem em fios
Dim emarea As Single
'número de fios da blindagem
Dim nfem As Single
'passo da blindagem em fios
Dim passobem As Single
'resistência dc a 20°C da blindagem em fios
Dim res20dcem As Single
'material da blindagem
Dim matebli As String
'resistividade dos materiais
Dim resistividade As Single
'intensidade de corrente em regime permanente
Dim iregperm As Single
'resistência dc da blindagem em fios à temperatura de operação
Dim resdcem As Single
'área da blindagem em fita
Dim fmarea As Single
'passo da blindagem em fita
Dim passobfm As Single
'resistência dc a 20°C da blindagem em fita
Dim res20dcfm As Single
'resistência dc da blindagem em fita à temperatura de operação
Dim resdcfm As Single
'número de fitas da blindagem em fita
Dim nffm As Single
'área da fita de alumínio
Dim faarea As Single
'resistência dc a 20°C da fita de alumínio
Dim res20dcfa As Single
'resistência dc da fita de alumínio à temperatura de operação
Dim resdcfa As Single
'área da armação em fios
Dim armarea As Single
'resistência dc a 20°C da armação em fios
Dim res20dcarm As Single

```

```

'material da armação em fios
Dim matearm As String
'função magnética da armação
Dim fm As String
'resistência dc da armação em fios à temperatura de operação
Dim resdcarm As Single
'área da fita de continuidade
Dim fcarea As Single
'resistência a 20°C da fita de continuidade
Dim res20dcfc As Single
'resistência dc à temperatura de operação da fita de continuidade
Dim resdcfc As Single
'factor de perdas da blindagem
Dim lamb1 As Double
'factor de perdas para instalações de blindagem ligadas nas duas extremidades
Dim lamb1l As Double
'factor de perdas para instalações de blindagem ligadas num ponto ou cruzada
Dim lamb1ll As Double
'diâmetro usado no cálculo da blindagem em fios
Dim de As Single
'resistência equivalente do cabo
Dim reseq As Single
'reactância da blindagem
Dim xaux As Single
'reactância mútua entre a blindagem e o cabo
Dim xauxm As Single
'factor de perdas para armação em fios
Dim lamb2 As Single
'profundidade de instalação
Dim L As Single
'distância entre grupos de cabos enterrados
Dim dg As Single
'resistividade térmica do solo
Dim ressolo As Single
'resistência térmica do meio envolvente ao cabo
Dim T4 As Single
'resistência térmica do espaço entre a superfície do cabo e a superfície
interna do tubo
Dim T4l As Single
'resistência térmica do tubo
Dim t4ll As Single
'diâmetro da isolação para o cálculo das resistências térmicas
Dim diso As Single
'resistência térmica da camada isolante
Dim T1 As Single
'resistividade térmica da isolação
Dim thermresiso As Single
'resistividade térmica da fita hidroexpansiva
Dim thermresfh As Single
'resistividade térmica da fita de enchimento
Dim thermresfe As Single
'resistividade térmica da bainha exterior
Dim thermresbe As Single
'resistividade térmica das bainhas não metálicas entre a camada isolante e a
armação
Dim T2 As Single
'diâmetro da fita hidroexpansiva
Dim dfh As Single
'material da fita hidroexpansiva
Dim matfitah As String
'material da fita de enchimento
Dim matfitae As String

```

```

'resistência térmica da bainha exterior
Dim T3 As Single
'material da bainha exterior
Dim matfitabe As String
'intensidade da corrente em regime permanente para formação em trevo
Dim iregpermtrevo As Single
'intensidade da corrente em regime permanente para formação em esteira com
transposição
Dim iregpermesteiract As Single = 0
'intensidade da corrente em regime permanente para formação em esteira sem
transposição
Dim iregpermesteirast As Single = 0
'intensidade da corrente em regime permanente para formação em trevo num ponto
ou blindagem cruzada
Dim iregpermtrevosp_cross As Single = 0
'intensidade da corrente em regime permanente para formação em esteira num
ponto ou blindagem cruzada
Dim iregpermesteirasp_cross As Single = 0
'corrente para a potência nominal
Dim Itecto As Single
'variável auxiliar para instalações em trevo
Dim trevo
'variável auxiliar para instalações em esteira com transposição
Dim esteiract
'variável auxiliar para instalações em esteira sem transposição
Dim esteirast
'variável auxiliar para instalações em trevo num ponto ou blindagem cruzada
Dim trevosp
'variável auxiliar para instalações em esteira num ponto ou blindagem cruzada
Dim esteirasp
'resistência equivalente auxiliar
Dim reseq12 As Single
'coeficiente solar para instalações directamente expostos à radiação solar
Dim coefsolar As Single
'radiação solar
Dim hsolar As Single
'variável auxiliar para tipos de instalação ao ar
Dim inst As String
'constantes para superfícies de cabos ao ar livre
Dim Z As Single
Dim Ea As Single
Dim d As Single
'intensidade de corrente em regime permanente para instalação em trevo ao ar
Dim iregpermtrefoilonly As Single
'intensidade de corrente em regime permanente para instalação em trevo
enconstrados a uma parede ao ar
Dim iregpermtrefoildirect As Single
'intensidade de corrente em regime permanente para instalação em esteira
juntiva horizontal com transposição
Dim iregpermflathtouchct As Single
'intensidade de corrente em regime permanente para instalação em esteira
espaçada horizontal com transposição
Dim iregpermflatvspacedct As Single
'intensidade de corrente em regime permanente para instalação em esteira
juntiva vertical com transposição
Dim iregpermflatvtouchct As Single
'intensidade de corrente em regime permanente para instalação em esteira
espaçada vertical com transposição
Dim iregpermflatvspacedct As Single
'intensidade de corrente em regime permanente para instalação em esteira
juntiva horizontal sem transposição
Dim iregpermflathtouchst As Single

```

```

'intensidade de corrente em regime permanente para instalação em esteira
espaçada horizontal sem transposição
Dim iregpermflat spacedst As Single
'intensidade de corrente em regime permanente para instalação em esteira
juntiva vertical sem transposição
Dim iregpermflatv touchst As Single
'intensidade de corrente em regime permanente para instalação em esteira
espaçada vertical sem transposição
Dim iregpermflatv spacedst As Single
'intensidade de corrente em regime permanente para instalação em esteira
juntiva horizontal num ponto ou blindagem cruzada
Dim iregpermflatsp_cross_touch As Single
'intensidade de corrente em regime permanente para instalação em esteira
espaçada horizontal num ponto ou blindagem cruzada
Dim iregpermflatsp_cross_spaced As Single
'intensidade de corrente em regime permanente para instalação em esteira
juntiva vertical num ponto ou blindagem cruzada
Dim iregpermverticalsp_cross_touch As Single
'intensidade de corrente em regime permanente para instalação em esteira
espaçada vertical num ponto ou blindagem cruzada
Dim iregpermverticalsp_cross_spaced As Single
'intensidade de corrente em regime permanente para instalação em trevo num
ponto ou blindagem cruzada
Dim iregpermtrefoilsp_cross As Single
'intensidade de corrente em regime permanente para instalação em trevo
encostada a uma parede num ponto ou blindagem cruzada
Dim iregpermtrefoil directsp_cross As Single
'variável auxiliar para instalações em trevo
Dim trefoilonly
'variável auxiliar para instalações em trevo encostados a uma parede
Dim trefoil direct
'variável auxiliar para instalações em esteira juntiva horizontal com
transposição
Dim flathtouchct
'variável auxiliar para instalações em esteira espaçada horizontal com
transposição
Dim flat spacedct
'variável auxiliar para instalações em esteira juntiva vertical com
transposição
Dim flatv touchct
'variável auxiliar para instalações em esteira espaçada vertical com
transposição
Dim flatv spacedct
'variável auxiliar para instalações em esteira juntiva horizontal sem
transposição
Dim flathtouchst
'variável auxiliar para instalações em esteira espaçada horizontal sem
transposição
Dim flat spacedst
'variável auxiliar para instalações em esteira juntiva vertical sem
transposição
Dim flatv touchst
'variável auxiliar para instalações em esteira espaçada vertical sem
transposição
Dim flatv spacedst
'variável auxiliar para instalações em esteira juntiva horizontal num ponto
ou blindagem cruzada
Dim flatsp_cross_touch
'variável auxiliar para instalações em esteira espaçada horizontal num ponto
ou blindagem cruzada
Dim flatsp_cross_spaced

```

```

'variável auxiliar para instalações em esteira conjunta vertical num ponto ou
blindagem cruzada
Dim verticalsp_cross_touch
'variável auxiliar para instalações em esteira espaçada vertical num ponto ou
blindagem cruzada
Dim verticalsp_cross_spaced
'variável auxiliar para instalações em trevo num ponto ou blindagem cruzada
Dim trefoils_cross
'variável auxiliar para instalações em trevo encostadas a uma parede num
ponto ou blindagem cruzada
Dim trefoildirectsp_cross
'variável auxiliar para a resistividade térmica do solo estado seco em
instalações onde ocorre parcial secagem do solo
Dim v1 As Single
'variável auxiliar para a resistividade térmica do solo estado húmido em
instalações onde ocorre parcial secagem do solo
Dim v2 As Single
'razão entre as resisitividades estado seco e húmido
Dim v As Single
'variável usada para seleccionar o tipo de solo
Dim selectsolo As Single
'variável representativa da percentagem da potência nominal mínima
Dim perc As Single
'array usado para guardar as secções existentes na base de dados
Dim seccoes() As String
'variável auxiliar para ciclos
Dim j As Single
'variável auxiliar para ciclos
Dim k As Single
'variável para cálculo dos cabos para uma só secção
Dim simplificado As Single
'tipo de alma pretendida para o cabo
Dim alma As String
'potência eléctrica pretendida pelo cliente
Dim Pel As Single
'factor de potência vista do lado da rede
Dim fp As Single
'número de segmentos da alma condutora no caso de segmentada
Dim nseg As Single
'factor de correcção para cabos em tubo de concreto
Dim correc As Single

'selecciona parâmetros do material da isolação
Sub Maiso()
    Select Case matiso
        Case "HDPE"
            tempop = 80
            permrelativa = 2.3
            facperdas = 0.001
            thermresiso = 3.5
        Case "XLPE(unfilled)"
            tempop = 90
            permrelativa = 2.5
            facperdas = 0.001
            thermresiso = 3.5
        Case "XLPE(filled)"
            tempop = 90
            permrelativa = 3
            facperdas = 0.005
            thermresiso = 3.5
        Case "LDPE"
            tempop = 70

```

```

        permrelativa = 2.3
        facperdas = 0.001
        thermresiso = 3.5
    End Select
End Sub

'selecciona coeficiente de temperatura para natureza da alma condutora
Sub coeftempMat()
    Select Case natureza
        Case "Aluminio"
            coeftemp = 0.00403
        Case "Cobre"
            coeftemp = 0.00393
    End Select
End Sub

'Função cálculo da resistência à temperatura de operação
Function rdcotemp(ByVal tempop As Single, ByVal coeftemp As Single, ByVal
rdc20 As Single)
    Return (rdc20 * (1 + coeftemp * (tempop - 20)))
End Function

'selecciona parâmetros do material da blindagem
Sub Matblindagem()
    Select Case matebli
        Case "Lead or lead alloy"
            resistividade = 214
            coeftemp2 = 0.004
        Case "Steel"
            resistividade = 138
            coeftemp2 = 0.0045
        Case "Bronze"
            resistividade = 35
            coeftemp2 = 0.003
        Case "Aluminium"
            resistividade = 28.4
            coeftemp2 = 0.00403
        Case "Aluminio"
            resistividade = 28.4
            coeftemp2 = 0.00403
        Case "Cobre"
            resistividade = 17.241
            coeftemp2 = 0.00393
    End Select
End Sub

'selecciona parâmetros do material da fita hidroexpansiva
Sub matefh()
    Select Case matfitah
        Case "XLPE"
            thermresfh = 2.5
        Case "Pe"
            thermresfh = 2.5
        Case "EPR"
            thermresfh = 3.5
    End Select
End Sub

'selecciona parâmetros do material da fita de enchimento
Sub matefe()
    Select Case matfitae
        Case "XLPE"

```

```

        thermresfe = 2.5
    Case "Pe"
        thermresfe = 2.5
    Case "EPR"
        thermresfe = 3.5
    Case "XLPE2"
        thermresfe = 3
    End Select
End Sub

'selecciona parâmetros do material da armação em fita
Sub Matarm()
    Select Case matearm
        Case "Lead or lead alloy"
            resistividade = 214
            coeftemp2 = 0.004
            fm = "nao"
        Case "Steel"
            resistividade = 138
            coeftemp2 = 0.0045
            fm = "sim"
        Case "Bronze"
            resistividade = 35
            coeftemp2 = 0.003
            fm = "nao"
        Case "Aluminium"
            resistividade = 28.4
            coeftemp2 = 0.00403
            fm = "nao"
        Case "Cobre"
            resistividade = 17.241
            coeftemp2 = 0.00393
            fm = "nao"
    End Select
End Sub

'selecciona parâmetros do material da bainha exterior
Sub matebe()
    Select Case matfitabe
        Case "PVC (ST1)"
            thermresbe = 6
            coefsolar = 0.6
        Case "PE (ST3)"
            thermresbe = 3.5
            coefsolar = 0.4
        Case "PE (ST7)"
            thermresbe = 3.5
            coefsolar = 0.4
        Case "PVC (ST2)"
            thermresbe = 6
            coefsolar = 0.6
    End Select
End Sub

'selecciona resistividade térmica do solo estado seco
Private Sub soloseco()
    Select Case selectsolo
        Case 0
            ressolo = 1.2
        Case 1
            ressolo = 1
        Case 2

```

```

        ressolo = 0.73
    Case 3
        ressolo = 1.05
    Case 4
        ressolo = 1.04
    Case 5
        ressolo = 0.96
    Case 6
        ressolo = 0.91
    Case 7
        ressolo = 0.88
    Case 8
        ressolo = 0.92
    Case 9
        ressolo = 1.33
    Case 10
        ressolo = 0.87
End Select
End Sub

'selecciona resistividade térmica do solo estado húmido
Private Sub solohumido()
    Select Case selectsolo
        Case 0
            ressolo = 0.45
        Case 1
            ressolo = 0.45
        Case 2
            ressolo = 0.31
        Case 3
            ressolo = 0.5
        Case 4
            ressolo = 0.52
        Case 5
            ressolo = 0.56
        Case 6
            ressolo = 0.47
        Case 7
            ressolo = 0.45
        Case 8
            ressolo = 0.52
        Case 9
            ressolo = 0.6
        Case 10
            ressolo = 0.5
    End Select
End Sub

'calculo factor de perdas da armação
Private Sub lambda2()
    '#####factor de perdas
12#####

    lamb2 = 0

    If estrutura_arm2 = "sim" Then
        'para cabos ligados nos dois lados

        'chama a função magnética para o material da armação ARM2
        Call Matarm()
    End If
End Sub

```

```

If fm = "sim" Then
    If espessuraarm2 > 5 Then
        reseq12 = 1.4 * reseq
    Else
        reseq12 = 1.2 * reseq
    End If

    Dim hs As Single
    Dim h1 As Single
    Dim h2 As Single
    Dim h3 As Single
    Dim ut As Single
    Dim dmed As Single
    dmed = dc

    dmed = dmed + 2 * esci + 2 * esiso + 2 * esce

    If estrutura_fs = "sim" Then
        dmed = dmed + 2 * efs
    End If
    If estrutura_fs2 = "sim" Then
        dmed = dmed + 2 * efs2
    End If
    If estrutura_em = "sim" Then
        dmed = dmed + 2 * dfem
    End If
    If estrutura_fm = "sim" Then
        dmed = dmed + 2 * espessurafm
    End If
    If estrutura_fc = "sim" Then
        dmed = dmed + 2 * espessurafc
    End If
    If estrutura_fh = "sim" Then
        dmed = dmed + 2 * efh
    End If
    If estrutura_fa = "sim" Then
        dmed = dmed + 2 * espessurafa
    End If
    If estrutura_fe = "sim" Then
        dmed = dmed + 2 * espessurafe
    End If
    dmed = dmed + espessuraarm2

    hs = 2 * 0.0001 * Log(2 * s / dmed)

    Dim alpha As Single, factor As Single
    alpha = Atan2(dmed, passoarm2)
    factor = 1 / Cos(alpha)

    h1 = PI * 400 * ((nfarm2 * (espessuraarm2) ^ 2) / (1000 * factor
* dmed)) * 0.0001 * Sin(alpha) * Cos(PI / 4)
    h2 = PI * 400 * ((nfarm2 * (espessuraarm2) ^ 2) / (1000 * factor
* dmed)) * 0.0001 * Sin(alpha) * Sin(PI / 4)
    If fcarm2 = "sim" Then
        ut = 10
    Else
        ut = 1
    End If
    h3 = 0.4 * (ut * ((Cos(alpha)) ^ 2) - 1) * (espessuraarm2 / dmed)
* 0.001

    Dim b1 As Single, b2 As Single

```

```

        b1 = 2 * PI * f * (hs + h1 + h3)
        b2 = 2 * PI * f * h2
        lamb2 = (reseq12 / (2 * resac)) * (((b2 ^ 2) + (b1 ^ 2) + reseq12
* b2) / (((reseq12 + b2) ^ 2) + (b1 ^ 2)))

        lamb1 = lamb2

    End If
End If
End Sub

'calcula as resistividades térmicas T1, T2 e T3
Private Sub resthermentrar()
    Call restherm1()
    Call restherm2()
    Call restherm3()
End Sub

'Função Resistência térmica isolamento + semicondutores interno e externo +
bainha impermeável à água
Function TR1(ByVal pt As Single, ByVal t1 As Single, ByVal dc As Single)
    Return ((pt / (2 * PI)) * Log(1 + (2 * t1 / dc)))
End Function

'calcula a resistividade térmica T1
Private Sub restherm1()

    '#####Calculo de T1#####
    Dim espiso As Single
    diso = dc

    If estrutura_fs2 = "sim" Then
        diso = diso + 2 * efs2
        espiso = efs2
    End If

    espiso = espiso + esiso + esce + esci

    T1 = TR1(thermresiso, espiso, diso)

End Sub

'calcula a resistividade térmica T2
Private Sub restherm2()

    '#####Calculo de T2#####
    If estrutura_fh = "nao" Then
        T2 = 0
    Else
        dfh = dc
        If estrutura_fs2 = "sim" Then
            dfh = dfh + 2 * efs2
        End If
        dfh = dfh + 2 * esci + 2 * esiso + 2 * esce
        If estrutura_fs = "sim" Then
            dfh = dfh + 2 * efs
        End If
        If estrutura_em = "sim" Then
            dfh = dfh + 2 * dfem
        End If
        If estrutura_fm = "sim" Then
            dfh = dfh + 2 * espessurafm
        End If
    End If
End Sub

```

```

End If
If estrutura_fc = "sim" Then
    dfh = dfh + 2 * espessurafc
End If

T2 = TR1(thermresfh, efh, dfh)

End If

If estrutura_fe = "sim" Then
    dfh = dc
    If estrutura_fs2 = "sim" Then
        dfh = dfh + 2 * efs2
    End If
    dfh = dfh + 2 * esci + 2 * esiso + 2 * esce
    If estrutura_fs = "sim" Then
        dfh = dfh + 2 * efs
    End If
    If estrutura_em = "sim" Then
        dfh = dfh + 2 * dfem
    End If
    If estrutura_fm = "sim" Then
        dfh = dfh + 2 * espessurafm
    End If
    If estrutura_fc = "sim" Then
        dfh = dfh + 2 * espessurafc
    End If
    If estrutura_fh = "sim" Then
        dfh = dfh + 2 * efh
    End If
    If estrutura_fa = "sim" Then
        dfh = dfh + 2 * espessurafa
    End If

    T2 = T2 + TR1(thermresfe, espessurafe, dfh)
End If

End Sub

'calcula a resisitivade térmica T3
Private Sub restherm3()
    '#####Calculo de T3#####
    T3 = TR1(thermresbe, esbe, dext - esbe)

End Sub

'calcula a resistividade térmica T4 para cabos em trevo afastados
Private Sub t4cabosafastadostrevo()

    '#####Calculo de T4 para cabos afastados#####

    L = updPinst.Value
    dg = updDg.Value

    If s >= 2 * dext Then
        'Calculo de T4 para cabos com cargas identicas para Buried Cables
        where drying out of the Soil does not ocur ou Buried Cables where partial drying-
        out of the soil occurs

        Dim u1 As Single
        Dim dlp1 As Single, dp1 As Single, dgrou As Single
    
```

```

u1 = (2 * L * 1000) / dext
dgru = dg / 1000

'para instalação em trevo
dlp1 = (((2 * L) ^ 2) + ((s / 1000) ^ 2)) ^ (0.5)
dp1 = s / 1000

If updNg.Value = 1 Then
    T4 = (1 / (2 * PI)) * (ressolo) * Log((u1 + ((u1 ^ 2) - 1) ^ 2) *
((dlp1 / dp1) ^ 2))
End If

If updNg.Value = 2 Then
    Dim dlp3 As Single, dlp4 As Single, dlp5 As Single, dp3 As
Single, dp4 As Single, dp5 As Single, d As Single
    d = (((s / 1000) ^ 2) - (((s / 1000) / 2) ^ 2)) ^ 0.5
    dlp3 = (((2 * L) ^ 2) + ((dgru - ((s / 1000) / 2)) ^ 2)) ^ (0.5)
    dp3 = (((dgru - (s / 1000) / 2) ^ 2) + (d ^ 2)) ^ 0.5
    dlp4 = (((2 * L - d) ^ 2) + ((dgru) ^ 2)) ^ 0.5
    dp4 = dgru
    dlp5 = (((2 * L) ^ 2) + ((dgru + ((s / 1000) / 2)) ^ 2)) ^ (0.5)
    dp5 = (((dgru + (s / 1000) / 2) ^ 2) + (d ^ 2)) ^ 0.5
    T4 = (1 / (2 * PI)) * (ressolo) * Log((u1 + ((u1 ^ 2) - 1) ^ 2) *
((dlp1 / dp1) ^ 2) * (dlp3 / dp3) * (dlp4 / dp4) * (dlp5 / dp5))
End If

End If
End Sub

'calcula a resistividade térmica T4 para cabos em esteira afastados
Private Sub t4cabosafastadosesteira()

    #####Calculo de T4 para cabos afastados#####

    L = updPinst.Value
    dg = updDg.Value

    If s >= 2 * dext Then
        'Calculo de T4 para cabos com cargas identicas para Buried Cables
        where drying out of the Soil does not ocur ou Buried Cables where partial drying-
        out of the soil occurs

        Dim u1 As Single
        Dim dlp1 As Single, dp1 As Single, dgru As Single
        u1 = (2 * L * 1000) / dext
        dgru = dg / 1000

        'para instalação em esteira

        dlp1 = (((2 * L) ^ 2) + ((s / 1000) ^ 2)) ^ (0.5)

        dp1 = s / 1000

        If updNg.Value = 1 Then
            T4 = (1 / (2 * PI)) * (ressolo) * (Log((u1 + ((u1 ^ 2) - 1) ^
0.5)) + Log(1 + ((2 * L * 1000 / s) ^ 2)))
        End If
    End If

```

```

        If updNg.Value = 2 Then
            Dim dlp3 As Single, dlp4 As Single, dlp5 As Single, dp3 As
Single, dp4 As Single, dp5 As Single, d As Single
            d = (((s / 1000) ^ 2) - (((s / 1000) / 2) ^ 2)) ^ 0.5
            dlp3 = (((dgru - (s / 1000)) ^ 2) + ((2 * L) ^ 2)) ^ 0.5
            dp3 = dgru - (s / 1000)
            dlp4 = (((dgru) ^ 2) + ((2 * L) ^ 2)) ^ 0.5
            dp4 = dgru
            dlp5 = (((dgru + (s / 1000)) ^ 2) + ((2 * L) ^ 2)) ^ 0.5
            dp5 = dgru + (s / 1000)
            T4 = (1 / (2 * PI)) * (ressolo) * Log((u1 + ((u1 ^ 2) - 1) ^ 2) *
((dlp1 / dp1) ^ 2) * (dlp3 / dp3) * (dlp4 / dp4) * (dlp5 / dp5))

        End If

    End If

```

End Sub

'calcula a resistividade térmica T4 para cabos em esteira juntos

Private Sub t4cabosajuntosesteira()

#####Calculo de T4 para cabos juntos#####

L = updPinst.Value

dg = updDg.Value

If s < 2 * dext Then

Dim u As Single

u = (2 * L * 1000) / dext

'cabos em esteira conjunta ou esteira

If estrutura_arm = "sim" Or estrutura_arm2 = "sim" Or estrutura_fa =
"sim" Then

T4 = (ressolo) * (0.475 * Math.Log(2 * u) - 0.346)

Else

T4 = (ressolo) * (0.475 * Math.Log(2 * u) - 0.142)

End If

#####Inserir grupos#####

If updNg.Value = 2 Then

Dim dt4 As Single, dp1 As Single, dlp1 As Single, dp2 As Single,
dlp2 As Single, dp3 As Single, dlp3 As Single

dp1 = dg - 2 * dc

dlp1 = ((dp1 ^ 2) + ((2 * L * 1000) ^ 2)) ^ 0.5

dp2 = dg - dc

dlp2 = ((dp2 ^ 2) + ((2 * L * 1000) ^ 2)) ^ 0.5

dp3 = dg

dlp3 = ((dp3 ^ 2) + ((2 * L * 1000) ^ 2)) ^ 0.5

Dim factln As Single

factln = (dlp1 * dlp2 * dlp3) / (dp1 * dp2 * dp3)

dt4 = (ressolo / (2 * PI)) * Log(factln)

T4 = T4 + dt4

End If

End If

```

End Sub

'calcula a resistividade térmica T4 para cabos em trevo juntos
Private Sub t4cabosajuntostrevo()

    '#####Calculo de T4 para cabos juntos#####

    L = updPinst.Value
    dg = updDg.Value

    If s < 2 * dext Then

        Dim u As Single
        u = (2 * L * 1000) / dext

        'cabos em trevo juntivo ou trevo
        'Blindagem em Fita

        If estrutura_arm = "sim" Or estrutura_arm2 = "sim" Then
            T4 = (1.5 / PI) * (ressolo) * (Log(2 * u) - 0.63)
            T3 = T3 * 1.6
        Else
            'Blindagem em fios
            If nfem * dfem < (dext * 0.5) * 2 * PI * 0.5 Then
                T4 = (1.5 / (PI)) * (ressolo) * (Log(2 * u) - 0.63)
                T1 = T1 * 1.16
                T3 = T3 * 1.6
            Else
                T4 = (1 / (2 * PI)) * (ressolo) * (Log(2 * u) + 2 * Log(u))
            End If
        End If

        '#####Inserir grupos#####
        If updNg.Value = 2 Then
            Dim dt4 As Single, dp1 As Single, dlp1 As Single, dp2 As Single,
            dlp2 As Single, dp3 As Single, dlp3 As Single

            dp1 = (((dg - dc / 2) ^ 2) + (dc ^ 2)) ^ 0.5
            dlp1 = (((2 * L * 1000) ^ 2) + ((dg - dc / 2) ^ 2)) ^ 0.5
            dp2 = (((dg + dc / 2) ^ 2) + (dc ^ 2)) ^ 0.5
            dlp2 = (((2 * L * 1000) ^ 2) + ((dg + dc / 2) ^ 2)) ^ 0.5
            dp3 = dg
            dlp3 = ((dp3 ^ 2) + ((2 * L * 1000 - dc) ^ 2)) ^ 0.5
            Dim factln As Single
            factln = (dlp1 * dlp2 * dlp3) / (dp1 * dp2 * dp3)
            dt4 = (ressolo / (2 * PI)) * Log(factln)
            T4 = T4 + dt4

        End If

    End If

End Sub

'calcula a resistividade térmica T4 para cabos entubados
Private Sub t4entubados()

    '#####calculo de T4 para cabos entubados ou em caleiras#####

```

```

Dim rb As Single, u As Single

rb = Exp(0.5 * (Tubo.rx / Tubo.ry) * ((4 / PI) - (Tubo.rx / Tubo.ry)) *
Log(1 + (Tubo.ry ^ 2) / (Tubo.rx ^ 2)) + Log(Tubo.rx / 2))

u = Tubo.Lg / rb

T4l = Tubo.U / (1 + 0.1 * (Tubo.V + Tubo.Y * Tubo.tetamedio) * dext)

t4l1 = (1 / (2 * PI)) * Tubo.thermres * Log(Tubo.Du / Tubo.Dd)

'selecciona a resistividade térmica do tubo - resistividade térmica do
solo
If Tubo.cmbTubo.Text = "Caleira de cimento enterrada" Then
    correc = (Tubo.Nr / (2 * PI)) * (Tubo.thermres - ressolo) * Log(u +
Sqrt(u ^ 2 - 1))
    T4 = T4 + T4l + t4l1 * correc
Else
    T4 = T4 + T4l + t4l1
End If

End Sub

'selecciona parâmetros para cabos ao ar
Sub tab_t42()
    Select Case inst
        Case "flat horizontal spaced"
            Z = 0.21
            Ea = 3.94
            d = 0.6
        Case "trefoil"
            Z = 0.96
            Ea = 1.25
            d = 0.2
        Case "flat horizontal touch"
            Z = 0.62
            Ea = 1.95
            d = 0.25
        Case "flat vertical touch"
            Z = 1.61
            Ea = 0.42
            d = 0.2
        Case "flat vertical spaced"
            Z = 1.31
            Ea = 2
            d = 0.2
        Case "trefoil direct"
            Z = 0.94
            Ea = 0.79
            d = 0.2
    End Select
End Sub

'calcula a resistividade térmica T4 para cabos ao ar
Private Sub t4laidfreeair()
    'Calculo de T4 para Cables laid in free air
    Dim h As Single, deltadetadv As Single, kav As Single

    h = (Z / ((dext / 1000) ^ d)) + Ea

```

```

    deltatatadv = (wdv / 1000) * (((1 / (1 + lamb1)) - 0.5) * T1)

    kav = ((PI * (dext / 1000) * h) / (1 + lamb1)) * (T1 + T2 * (1 + lamb1) +
T3 * (1 + lamb1))

    Dim dtetasn2 As Single = 0
    Dim dtetasn1 As Single = 2

    While dtetasn2 - dtetasn1 < 0.0001
        dtetasn2 = (((tempop + 273) - (updTa.Value + 273)) + deltatatadv) /
(1 + kav * dtetasn1)) ^ (0.25)
    End While

    T4 = 1 / (PI * (dext / 1000) * h * dtetasn2)

End Sub

Private Sub t4directsolarradiation()
    'Calculo de T4 para Cables directly exposed to solar radiation

    Dim h As Single, deltatatadv As Single, kav As Single, deltatatadv As
Single
    h = (Z / ((dext / 1000) ^ d)) + Ea

    deltatatadv = (wdv / 1000) * (((1 / (1 + lamb1)) - 0.5) * T1)

    deltatatadv = ((coefsolar * (dext / 1000) * hsolar) / (1 + lamb1)) * (T1
+ T2 * (1 + lamb1) + T3 * (1 + lamb1))

    kav = ((PI * (dext / 1000) * h) / (1 + lamb1)) * (T1 + T2 * (1 + lamb1) +
T3 * (1 + lamb1))

    Dim dtetasn2 As Single = 0
    Dim dtetasn1 As Single = 2

    While dtetasn2 - dtetasn1 < 0.0001
        dtetasn2 = (((tempop + 273) - (updTa.Value + 273)) + deltatatadv +
deltatatadv) / (1 + kav * dtetasn1)) ^ (0.25)
    End While

    T4 = 1 / (PI * (dext / 1000) * h * dtetasn2)

End Sub

'função das perdas dieléctricas no cabo
Function wd(ByVal f As Single, ByVal c As Single, ByVal u0 As Single, ByVal
tgo As Single)
    Return (2 * PI * f * c * (u0 ^ 2) * tgo)
End Function

Private Sub clfa()
    'Calculo da corrente máxima admissível para Cables laid in free air ou
Buried Cables where drying out of the Soil does not occur
    Dim numerador As Double

```

```

        Dim divisor As Double

        numerador = tempop - updTa.Value - (wdv / 1000) * (0.5 * T1 + T2 + T3 +
T4)
        divisor = (resac / 1000) * T1 + (resac / 1000) * (1 + lamb1) * T2 +
(resac / 1000) * (1 + lamb1 + lamb2) * (T3 + T4)
        iregperm = (numerador / divisor) ^ 0.5

    End Sub

    Private Sub cdesr()
        'Calculo da corrente máxima admissível para Cables directly exposed to
solar radiation

        Dim numerador As Double
        Dim divisor As Double

        numerador = tempop - updTa.Value - (wdv / 1000) * (0.5 * T1 + T2 + T3 +
T4) - (coefsolar * (dext / 1000) * hsolar * T4)
        divisor = (resac / 1000) * T1 + (resac / 1000) * (1 + lamb1) * T2 +
(resac / 1000) * (1 + lamb1 + lamb2) * (T3 + T4)
        iregperm = (numerador / divisor) ^ 0.5

    End Sub

    Private Sub bcpdso()
        'Calculo da corrente máxima admissível para Buried Cables where partial
drying-out of the soil occurs

        Dim numerador As Single
        Dim divisor As Single
        Dim v As Single, dtetax As Single

        dtetax = updTsolo.Value - updTa.Value
        v = v1 / v2

        numerador = tempop - updTa.Value - (wdv / 1000) * (0.5 * T1 + T2 + T3 +
T4) + (v - 1) * dtetax
        divisor = (resac / 1000) * (T1 + (1 + lamb1) * T2 + (1 + lamb1 + lamb2) *
(T3 + T4))
        iregperm = (numerador / divisor) ^ 0.5

    End Sub

    Private Sub bcdsa()
        'Calculo da corrente máxima admissível para Buried Cables where drying-
out of the soil is to be avoided

        Dim numerador As Single
        Dim divisor As Single
        Dim v As Single, dtetax As Single
        Dim iregperm1 As Single, iregperm2 As Single

        dtetax = updTsolo.Value - updTa.Value
        v = v1 / v2

        numerador = dtetax + (wdv / 1000) * (T4)
        divisor = (resac / 1000) * T4 * (1 + lamb1 + lamb2)
        iregperm1 = (numerador / divisor) ^ 0.5

        Dim numerador2 As Single

```

```

Dim divisor2 As Single

numerator2 = tempop - updTa.Value - (wdv / 1000) * (0.5 * T1 + T2 + T3 +
T4)
divisor2 = (resac / 1000) * T1 + (resac / 1000) * (1 + lamb1) * T2 +
(resac / 1000) * (1 + lamb1) * (T3 + T4)
iregperm2 = (numerator2 / divisor2) ^ 0.5

If iregperm2 <= iregperm1 Then
    iregperm = iregperm2
Else
    iregperm = iregperm1
End If

```

```
End Sub
```

```

Private Sub soptima_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles MyBase.Load, cmbResSoloSeco.SelectionChangeCommitted,
cmbResSoloHum.SelectionChangeCommitted, rbResHum.CheckedChanged,
rbResSeco.CheckedChanged, cmbAplicação.SelectionChangeCommitted

```

```

'combobox da aplicação
If cmbAplicação.Text = "" Then
    cmbAplicação.SelectedIndex = 0
End If

'combobox cabo entubado
If cmbEntubado.Text = "" Then
    cmbEntubado.SelectedIndex = 0
End If

'comentários na form
toolPinst.SetToolTip(updPinst, "Deve inserir um valor para a profundidade
>0 para o cálculo ser validado")
toolGrpPn.SetToolTip(GrpPn, "Gama de valores para a potência mínima
pretendida")

```

```

'#####
'função hide() faz desaparecer os formulários
'função show() faz aparecer os formulários
'#####

If cmbAplicação.Text = "Cabos expostos a radiacao solar" Or
cmbAplicação.Text = "Cabos ao ar livre protegidos da radiacao solar" Then
    dgvResult.Hide()
    dgvResult1.Show()

    txtHsolar.Hide()
    lblHsolar.Hide()

    If cmbAplicação.Text = "Cabos expostos a radiacao solar" Then
        txtHsolar.Show()
        lblHsolar.Show()
    End If

    lblPinst.Hide()
    updPinst.Hide()
    lblDg.Hide()
    updDg.Hide()
    lblNg.Hide()

```

```

        updNg.Hide()
        rbResHum.Hide()
        rbResSeco.Hide()
        updResSoloSeco.Hide()
        cmbResSoloSeco.Hide()
        updResSoloHum.Hide()
        cmbResSoloHum.Hide()
        lblTemsolo.Hide()
        updTsolo.Hide()
        lblRazao.Hide()
        txtRazao.Hide()

    If txtHsolar.Text = "" Then
        txtHsolar.Text = 1000
        hsolar = Val(txtHsolar.Text)
    Else
        hsolar = txtHsolar.Text
    End If

    ElseIf cmbAplicação.Text = "Cabos Enterrados onde nao ocorre a dessecação
do solo" Then

        dgvResult.Show()
        dgvResult1.Hide()

        txtHsolar.Hide()
        lblHsolar.Hide()
        hsolar = 0

        lblPinst.Show()
        updPinst.Show()
        lblDg.Show()
        updDg.Show()
        lblNg.Show()
        updNg.Show()
        rbResHum.Show()
        rbResSeco.Show()
        updResSoloSeco.Show()
        cmbResSoloSeco.Show()
        updResSoloHum.Show()
        cmbResSoloHum.Show()
        lblTemsolo.Hide()
        updTsolo.Hide()
        lblRazao.Hide()
        txtRazao.Hide()

    ElseIf cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde ocorre parcial
dissecação do solo" Or cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde se evita a
dissecação do solo" Then

        dgvResult.Show()
        dgvResult1.Hide()

        txtHsolar.Hide()
        lblHsolar.Hide()
        hsolar = 0

        lblPinst.Show()
        updPinst.Show()
        lblDg.Show()

```

```

        updDg.Show()
        lblNg.Show()
        updNg.Show()
        rbResHum.Show()
        rbResSeco.Show()
        updResSoloSeco.Show()
        cmbResSoloSeco.Show()
        updResSoloHum.Show()
        cmbResSoloHum.Show()
        lblTemsolo.Show()
        updTsolo.Show()
        lblRazao.Show()
        txtRazao.Show()

        If cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde se evita a dissecação
do solo" Then
            lblRazao.Hide()
            txtRazao.Hide()
        End If

    End If

'upd temperatura ambiente
If updTa.Value = 0 Then
    updTa.Value = 20
End If

'upd temperatura solo
If updTsolo.Value = 0 Then
    updTsolo.Value = 10
End If

'combobox da frequência inicia a 50Hz
If cmbFreq.Text = "" Then
    cmbFreq.SelectedIndex = 0
End If
f = cmbFreq.Text

'número de grupos
updNg.Minimum = 1
updNg.Maximum = 2

'profundidade de instalação
updPinst.Minimum = 0
updPinst.Maximum = 10000000000
updPinst.Increment = 0.1
updPinst.DecimalPlaces = 1

'distância entre grupos
updDg.Minimum = 1
updDg.Maximum = 10000000000
updDg.Increment = 0.1
updDg.DecimalPlaces = 1

'factor de potência
updCos.Minimum = 0
updCos.Maximum = 1
updCos.Increment = 0.01
updCos.DecimalPlaces = 2

'resistividades térmicas seco

```

```

updResSoloSeco.Minimum = 0
updResSoloSeco.Maximum = 10
updResSoloSeco.Increment = 0.01
updResSoloSeco.DecimalPlaces = 2

'resistividades térmicas húmido
updResSoloHum.Minimum = 0
updResSoloHum.Maximum = 10
updResSoloHum.Increment = 0.01
updResSoloHum.DecimalPlaces = 2

If upDNg.Value = 1 Then
    upDDg.Hide()
    lblDg.Hide()
End If

If cmbAplicação.Text = "Cabos Enterrados onde nao ocorre a dessecação do
solo" Or cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde se evita a dissecação do
solo" Then

    If rbResSeco.Checked = False And rbResHum.Checked = False Then
        rbResSeco.Checked = True
        cmbResSoloSeco.Enabled = True
        cmbResSoloHum.Enabled = False
    End If

    If cmbResSoloSeco.Text = "" And cmbResSoloHum.Text = "" Then
        cmbResSoloSeco.SelectedIndex = 0
        cmbResSoloHum.SelectedIndex = 0
        updResSoloHum.Value = 0.45

        'para aparecer um quociente válido na aplicação cabos enterrados
        onde ocorre parcial secagem do solo
        v2 = updResSoloHum.Value
    End If

    'manobra dos radiobutton
    If rbResSeco.Checked = True And rbResHum.Checked = False Then
        cmbResSoloSeco.Enabled = True
        updResSoloSeco.Enabled = True
        cmbResSoloHum.Enabled = False
        updResSoloHum.Enabled = False

        selectsolo = cmbResSoloSeco.SelectedIndex

        'selecciona a resistividade outro para o utilizador inserir o
        valor pretendido
        If selectsolo = 11 Then
            updResSoloSeco.Value = 0
            updResSoloSeco.Focus()
        Else
            updResSoloSeco.Enabled = False
            Call soloseco()
            updResSoloSeco.Text = ressolo
        End If

        'para aparecer um quociente válido na aplicação cabos enterrados
        onde ocorre parcial secagem do solo
        v1 = updResSoloSeco.Value

    ElseIf rbResHum.Checked = True And rbResSeco.Checked = False Then
        cmbResSoloHum.Enabled = True

```

```

        updResSoloHum.Enabled = True
        cmbResSoloSeco.Enabled = False
        updResSoloSeco.Enabled = False

        selectsolo = cmbResSoloHum.SelectedIndex

        'selecciona a resistividade outro para o utilizador inserir o
valor pretendido
        If selectsolo = 11 Then
            updResSoloHum.Enabled = True
            updResSoloHum.Value = 0
            updResSoloHum.Focus()
        Else
            updResSoloHum.Enabled = False
            Call solohumido()
            updResSoloHum.Value = ressolo
        End If

        'para aparecer um quociente válido na aplicação cabos enterrados
onde ocorre parcial secagem do solo
        v2 = updResSoloHum.Value
    End If

End If

If cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde ocorre parcial dissecação
do solo" Then

    'manobra dos radiobutton
    If rbResSeco.Checked = True And rbResHum.Checked = False Then
        cmbResSoloSeco.Enabled = True
        updResSoloSeco.Enabled = True
        cmbResSoloHum.Enabled = False
        updResSoloHum.Enabled = False

        selectsolo = cmbResSoloSeco.SelectedIndex

        'selecciona a resistividade outro para o utilizador inserir o
valor pretendido
        If selectsolo = 11 Then
            updResSoloSeco.Enabled = True
            updResSoloSeco.Value = 0
            updResSoloSeco.Focus()
        Else
            updResSoloSeco.Enabled = False
            Call soloseco()
            v1 = ressolo
            updResSoloSeco.Text = v1

            v = v1 / v2
            txtRazao.Text = v

        End If

    ElseIf rbResHum.Checked = True And rbResSeco.Checked = False Then
        cmbResSoloHum.Enabled = True
        updResSoloHum.Enabled = True
        cmbResSoloSeco.Enabled = False
        updResSoloSeco.Enabled = False
    End If

```

```

        selectsolo = cmbResSoloHum.SelectedIndex

        'selecciona a resistividade outro para o utilizador inserir o
valor pretendido
        If selectsolo = 11 Then
            updResSoloHum.Enabled = True
            updResSoloHum.Value = 0
            updResSoloHum.Focus()
        Else
            updResSoloHum.Enabled = False
            Call solohumido()
            v2 = ressolo
            updResSoloHum.Text = v2

            v = v1 / v2
            txtRazao.Text = v

            ressolo = v1
        End If

    End If

    End If

    'inicialização dos radiobutton da potência nominal
    If rbPn1.Checked = False And rbPn2.Checked = False And rbPn3.Checked =
False And rbPn4.Checked = False And rbPn5.Checked = False And rbPn6.Checked =
False And rbPn7.Checked = False And rbPn8.Checked = False And rbPn10.Checked =
False And rbPn100.Checked = False And rbPn200.Checked = False And rbPn250.Checked
= False And rbPn300.Checked = False And rbPn400.Checked = False And
rbPn500.Checked = False Then
        rbPn1.Checked = True
        perc = 0.01
    End If

    'inicialização dos radiobutton da potência aparente e eléctrica
    If rbS.Checked = False And rbP.Checked = False Then
        rbS.Checked = True
    End If

    'inicialização dos radiobutton da alma condutora
    If rbAmbas.Checked = False And rbAl.Checked = False And rbCu.Checked =
False Then
        rbAmbas.Checked = True
    End If

End Sub

'função para fazer o cálculo de todos os cabos
Private Sub calculo()

    'limpa a grelha dos resultados
    dgvResult.Rows.Clear()
    dgvResult1.Rows.Clear()

    'faz ligação à base de dados
    Dim Conn As New
OleDb.OleDbConnection("Provider=Microsoft.ACE.OLEDB.12.0;" & _
                        "Data Source="
Formprincipal.arranque.Rows(0)("directorio") & "baselocal.mdb")

```

Conn.Open()

```
Dim cmd1 As New OleDb.OleDbCommand("select * from
((((((((((((((tab_estrutura INNER JOIN tab_cabo_alma on
tab_estrutura.numero=tab_cabo_alma.numero) INNER JOIN tab_cabo_iso ON
tab_estrutura.numero = tab_cabo_iso.id) INNER JOIN tab_cabo_sci ON
tab_estrutura.numero = tab_cabo_sci.id) INNER JOIN tab_cabo_sce ON
tab_estrutura.numero=tab_cabo_sce.id) INNER JOIN tab_cabo_fs ON
tab_estrutura.numero=tab_cabo_fs.id) INNER JOIN tab_cabo_fs2 ON
tab_estrutura.numero=tab_cabo_fs2.id) INNER JOIN tab_cabo_em ON
tab_estrutura.numero=tab_cabo_em.id) INNER JOIN tab_cabo_fm ON
tab_estrutura.numero=tab_cabo_fm.id) INNER JOIN tab_cabo_fc ON
tab_estrutura.numero=tab_cabo_fc.id) INNER JOIN tab_cabo_fh ON
tab_estrutura.numero=tab_cabo_fh.id) INNER JOIN tab_cabo_fa ON
tab_estrutura.numero=tab_cabo_fa.id) INNER JOIN tab_cabo_FE ON
tab_estrutura.numero=tab_cabo_FE.id)INNER JOIN tab_cabo_arm ON
tab_estrutura.numero=tab_cabo_arm.id) INNER JOIN tab_cabo_arm2 ON
tab_estrutura.numero=tab_cabo_arm2.id) INNER JOIN tab_cabo_be ON
tab_estrutura.numero=tab_cabo_be.id) INNER JOIN tab_inst ON
tab_estrutura.numero=tab_inst.numero)", Conn, Conn.BeginTransaction)
```

Dim DR1 = cmd1.ExecuteReader

k = 1

ReDim seccoes(k)

Do While DR1.Read

ReDim Preserve seccoes(k)

If U = DR1.item("tensao") Then

If alma = "ambas" Then GoTo todas

If alma = DR1.item("natureza") Then

todas:

If simplificado = 1 Then

For j = 1 To UBound(seccoes)

If seccoes(j) = DR1.item("seccao") Then GoTo opcao

Next

End If

'diâmetro da alma

dc = DR1.item("dext")

'espessura semiconductor interno

esci = DR1.item("esci")

'espessura semiconductor externo

esce = DR1.item("esce")

'espessura isolamento

esiso = DR1.item("esiso")

```

'material isolamento
matiso = DR1.item("MatISO")

'espessura fita hidroexpansiva interior
efs = DR1.item("tab_cabo_fs.efs")

'espessura fita semicondutora
efs2 = DR1.item("tab_cabo_fs2.efs")

'blindagem em fios
dfem = DR1.item("dfem")
nfem = DR1.item("nfem")
passobem = DR1.item("tab_cabo_em.passo")

'blindagem em fita
espessurafm = DR1.item("tab_cabo_FM.espessura")
largurafm = DR1.item("tab_cabo_FM.largura")
passobfm = DR1.item("tab_cabo_FM.passo")
nffm = DR1.item("tab_cabo_FM.nf")

'fita de continuidade
espessurafc = DR1.item("tab_cabo_fc.espessura")
largurafc = DR1.item("tab_cabo_fc.largura")
passofc = DR1.item("tab_cabo_fc.passo")

'espessura fita hidroexpansiva
efh = DR1.item("tab_cabo_fh.efs")
'material da fita hidroexpansiva
matfitah = DR1.item("tab_cabo_fh.Material")

'espessura fita de alumínio
espessurafa = DR1.item("tab_cabo_fa.espessura")

'espessura fita de enchimento
espessurafe = DR1.item("tab_cabo_FE.espessura")
'material da fita de enchimento
matfitae = DR1.item("tab_cabo_FE.Material")

'armadura em fita
espessuraarm = DR1.item("tab_cabo_arm.espessura")
larguraarm = DR1.item("tab_cabo_arm.largura")
passoarm = DR1.item("tab_cabo_arm.passo")
nfarm = DR1.item("tab_cabo_arm.nf")

'armadura em fios
espessuraarm2 = DR1.item("df")
fcarm2 = DR1.item("tab_cabo_arm2.fc")
nfarm2 = DR1.item("tab_cabo_arm2.nf")
passoarm2 = DR1.item("tab_cabo_arm2.passo")

'espessura bainha exterior
esbe = DR1.item("esbe")
'material da bainha exterior
matfitabe = DR1.item("tab_cabo_be.Material")

'////////////////////////valores      tabelados
para cada cabo////////////////////////
estrutura_fs = DR1.item("FS")

estrutura_fs2 = DR1.item("FS2")

```

```

estrutura_em = DR1.item("EM")
estrutura_fm = DR1.item("FM")
estrutura_fc = DR1.item("tab_estrutura.FC")
estrutura_fh = DR1.item("FH")
estrutura_fa = DR1.item("FA")
estrutura_fe = DR1.item("FE")
estrutura_arm = DR1.item("ARM")
estrutura_arm2 = DR1.item("ARM2")

dext = dc

dext = dext + 2 * esci + 2 * esiso + 2 * esce

If estrutura_fs = "sim" Then
    dext = dext + 2 * efs
End If
If estrutura_fs2 = "sim" Then
    dext = dext + 2 * efs2
End If
If estrutura_em = "sim" Then
    dext = dext + 2 * dfem
End If
If estrutura_fm = "sim" Then
    dext = dext + 2 * espessurafm
End If
If estrutura_fc = "sim" Then
    dext = dext + 2 * espessurafc
End If
If estrutura_fh = "sim" Then
    dext = dext + 2 * efh
End If
If estrutura_fa = "sim" Then
    dext = dext + 2 * espessurafa
End If
If estrutura_fe = "sim" Then
    dext = dext + 2 * espessurafe
End If
If estrutura_arm = "sim" Then
    dext = dext + 2 * espessuraarm
End If
If estrutura_arm2 = "sim" Then
    dext = dext + 2 * espessuraarm2
End If
dext = dext + 2 * esbe

afastamento = Val(txtAfast.Text)
s = afastamento + dext

If s >= 2 * dext And s >= updDg.Value And updNg.Value = 2
Then
    MsgBox("Para o cabo " & DR1.item("tab_estrutura.numero")
& " a distância entre os eixos longitudinais dos cabos é de " & s & "

```

(Afastamento + Diâmetro do cabo)! Para espaçamentos entre eixos longitudinais maiores que 2x o diâmetro do cabo, a distância entre grupos deverá ser superior!", MsgBoxStyle.OkOnly + MsgBoxStyle.Critical, "ERRO")

```
    updDg.Value = 1
    txtAfast.Text = 0
```

```
Exit Sub
```

```
End If
```

```
'chama a temperatura em regime permanente da isolação tempop
Call Maiso()
```

```
'atribui à variável a natureza da alma
natureza = DR1.item("natureza")
```

```
'chama o coeficiente de temperatura do material coeftemp
Call coeftempMat()
```

```
'atribui à variável a resistência da alma
res20dc = DR1.item("res")
' txtRes20dc.Text = res20dc
```

```
'calcula a resistência à temperatura de operação
resdco = rdcotemp(tempop, coeftemp, res20dc)
' txtResdco.Text = resdco
```

```
'atribui à variável a forma
forma = DR1.item("forma")
```

```
If natureza = "Cobre" Then
    If forma = "Circular" Then
        ks = 1
        kp = 0.8
    ElseIf forma = "Circular Compacta" Then
        ks = 1
        kp = 0.8
    ElseIf forma = "Segmentada" Then
        ks = 0.435
        kp = 0.37
    End If
End If
```

```
End If
If natureza = "Aluminio" Then
    If forma = "Circular" Then
        ks = 1
        kp = 0.8
    End If
    If forma = "Circular Compacta" Then
        ks = 1
        kp = 0.8
    End If
    If forma = "Segmentada" Then
        nseg = DR1.item("nsegm")
        If nseg < 4 Then
            ks = 1
            kp = 0.8
        End If
        If nseg = 4 Then
            ks = 0.28
            kp = 0.37
        End If
    End If
End If
```

```

        If nseg = 5 Then
            ks = 0.19
            kp = 0.37
        End If
        If nseg >= 6 Then
            ks = 0.28
            kp = 0.12
        End If
    End If
End If

'cálculo da resistência a.c. à temperatura de operação

xs = (8 * PI * f * 0.0000001 * ks / (resdco / 1000))
ys = ((xs ^ 2) / (192 + 0.8 * (xs ^ 2)))

xp = (8 * PI * f * 0.0000001 * kp / (resdco / 1000))
yp = (((xp ^ 2) / (192 + 0.8 * (xp ^ 2))) * ((dc / s) ^ 2) *
(0.312 * ((dc / s) ^ 2) + 1.18 / (((xp ^ 2) / (192 + 0.8 * (xp ^ 2))) + 0.27)))

If cmbEntubado.Text = "Não" Then
    resac = resdco * (1 + ys + yp)
ElseIf cmbEntubado.Text = "Sim" Then
    resac = resdco * (1 + 1.5 * (ys + yp))
End If

'cálculo da resistência da blindagem em fios
If estrutura_em = "sim" Then

    emarea = PI * ((dfem / 2) ^ 2) * nfem

    Dim alpha As Single, factor As Single

    alpha = Atan2(PI, passobem)
    factor = 1 / Cos(alpha)

    matebli = DR1.item("tab_cabo_em.Material")

    'chama a resistividade para o material da blindagem em
fios
    Call Matblindagem()

    res20dcem = (resistividade / emarea) * factor

    'calcula a resistência à temperatura de operação
    resdcem = rdcotemp(tempop, coeftemp2, res20dcem)

End If

'#####Resistência da blindagem em fita#####

If estrutura_fm = "sim" Then

    fmarea = espessurafm * largurafm
    Dim alpha As Single, factor As Single

    alpha = Atan2(PI, passobfm)
    factor = 1 / Cos(alpha)

```

```

fita
    matebli = DR1.item("tab_cabo_FM.Material")
    'chama a resistividade para o material da blindagem em
    Call Matblindagem()
    res20dcfm = ((resistividade / fmarea) * factor) / nffm
    resdcfm = rdcotemp(tempop, coeftemp2, res20dcfm)

End If

'#####Resistência da fita de aluminio#####
If estrutura_fa = "sim" Then
    Dim areaext As Single, areaint As Single
    Dim dint As Single, dextfa As Single
    dint = dc
    dint = dint + 2 * esci + 2 * esiso + 2 * esce
    If estrutura_fs = "sim" Then
        dint = dint + 2 * efs
    End If
    If estrutura_fs2 = "sim" Then
        dint = dint + 2 * efs2
    End If
    If estrutura_em = "sim" Then
        dint = dint + 2 * dfem
    End If
    If estrutura_fm = "sim" Then
        dint = dint + 2 * espessurafm
    End If
    If estrutura_fc = "sim" Then
        dint = dint + 2 * espessurafc
    End If
    If estrutura_fh = "sim" Then
        dint = dint + 2 * efh
    End If
    dint = dint + espessurafa
    dextfa = dint + espessurafa

    areaint = PI * ((dint / 2) ^ 2)
    areaext = PI * ((dextfa / 2) ^ 2)
    faarea = areaext - areaint

    matebli = DR1.item("tab_cabo_fa.Material")
    'chama a resistividade para o material da fita de
    Call Matblindagem()
    res20dcfa = resistividade / faarea
aluminio

```

```

' Dim tempop2 As Single
' If iregperm = 0 Then
'tempop2 = tempop

'Else
'tempop2 = tempop - (((iregperm ^ 2) * (resac / 1000) +
0.5 * (wdv / 1000)) * T1 + ((iregperm ^ 2) * (resac / 1000) * (1 + lamb1) + (wdv
/ 1000)) * T2)

'End If

' txttempofa.Text = tempop
resdcfa = rdcotemp(tempop, coeftemp2, res20dcfa)
'xtres20dcfa.Text = resdcfa

```

End If

#####Resistência da armação em fita#####

If estrutura_arm = "sim" Then

armarea = espessuraarm * larguraarm

Dim alpha As Single, factor As Single

alpha = Atan2(PI, passoarm)

factor = 1 / Cos(alpha)

matearm = DR1.item("tab_cabo_arm.Material")

'chama a resistividade para o material da armação ARM

Call Matarm()

res20dcarm = ((resistividade / armarea) * factor) / nfarm

'txtRes20dcArm.Text = res20dcarm & (" (ohm/Km)")

'Dim tempop2 As Single

'If iregperm = 0 Then

'tempop2 = tempop

' Else

' tempop2 = tempop - (((iregperm ^ 2) * (resac / 1000) +
0.5 * (wdv / 1000)) * T1 + ((iregperm ^ 2) * (resac / 1000) * (1 + lamb1) + (wdv
/ 1000)) * T2)

' End If

'txtTem0Arm.Text = tempop

resdcarm = rdcotemp(tempop, coeftemp2, res20dcarm)

End If

#####Resistência da armação em fios#####

If estrutura_arm2 = "sim" Then

If fcarm2 = "sim" Then

armarea = PI * ((espessuraarm2 / 2) ^ 2) * nfarm2

End If

If fcarm2 = "nao" Then

armarea = PI * ((espessuraarm2 / 2) ^ 2)

End If

Dim alpha As Single, factor As Single

```

alpha = Atan2(PI, passoarm2)
factor = 1 / Cos(alpha)

matearm = DR1.item("tab_cabo_arm2.Material")

'chama a resistividade para o material da armação ARM2
Call Matarm()

If fcarm2 = "sim" Then
    res20dcarm = (resistividade / armarea) * factor
End If
If fcarm2 = "nao" Then
    res20dcarm = ((resistividade / armarea) * factor) /
nfarm2

End If

' Dim tempop2 As Single
'If iregperm = 0 Then
'tempop2 = tempop'
'Else
' tempop2 = tempop - (((iregperm ^ 2) * (resac / 1000) +
0.5 * (wdv / 1000)) * T1 + ((iregperm ^ 2) * (resac / 1000) * (1 + lamb1) + (wdv
/ 1000)) * T2)
'End If

resdcarm = rdcotemp(tempop, coeftemp2, res20dcarm)

End If

'#####Resistência da fita de continuidade#####

If estrutura_fc = "sim" Then

    fcarea = espessurafc * largurafc

    Dim alpha As Single, factor As Single

    alpha = Atan2(PI, passofc)
    factor = 1 / Cos(alpha)

    matebli = DR1.item("tab_cabo_fc.Material")

    'chama a resistividade para o material da fita de
continuidade

    Call Matblindagem()

    res20dcfc = (resistividade / fcarea) * factor

    'Dim tempop2 As Single
    'If iregperm = 0 Then
    'tempop2 = tempop
    'Else
    ' tempop2 = tempop - (((iregperm ^ 2) * (resac / 1000) +
0.5 * (wdv / 1000)) * T1
    ' End If

    resdcfc = rdcotemp(tempop, coeftemp2, res20dcfc)

```

```

Dim reseqtemp As Single, reseqtemp2 As Single

reseqtemp = (resdcem * resdcfc) / (resdcem + resdcfc)
reseqtemp2 = (res20dcfc * res20dcem) / (res20dcfc +
res20dcem)

End If

'cálculo da capacidade
diamiso = dc + 2 * esci + 2 * esiso
diamsci = dc + 2 * esci
capacidade = permrelativa / (18 * Log((dc + 2 * esci + 2 *
esiso) / (dc + 2 * esci)))

'perdas dielétricas
wdv = wd(f, capacidade * 0.000001, U * 10 ^ 3 / (3 ^ 0.5),
facperdas)

'#####factor de
perdas l1 início#####

de = dc
de = de + 2 * esci + 2 * esiso + 2 * esce

If estrutura_fs = "sim" Then
    de = de + 2 * efs
End If
If estrutura_fs2 = "sim" Then
    de = de + 2 * efs2
End If

If estrutura_em = "sim" Then
    If estrutura_fc = "sim" Then
        de = de + dfem + espessurafc
        reseq = (resdcem * resdcfc) / (resdcem + resdcfc)
    Else
        de = de + dfem
        reseq = resdcem
    End If
End If

If estrutura_fa = "sim" Then
    Dim reseq2 As Single
    reseq2 = (resdcfa * reseq) / (resdcfa + reseq)
    reseq = reseq2
End If
End If

If estrutura_fm = "sim" Then
    reseq = resdcfm
    If estrutura_fa = "sim" Then
        Dim reseq2 As Single
        reseq2 = (resdcfa * reseq) / (resdcfa + reseq)
        reseq = reseq2
    End If
End If

If estrutura_arm = "sim" Then

```

```

        If fm = "nao" Then
            Dim reseq2 As Double
            reseq2 = (resdcarm * reseq) / (resdcarm + reseq)
            reseq = reseq2
        End If
    End If

    If estrutura_arm2 = "sim" Then
        If fm = "nao" Then
            Dim reseq2 As Double
            reseq2 = (resdcarm * reseq) / (resdcarm + reseq)
            reseq = reseq2
        End If
    End If

    '#####factor de
perdas l1#####
    'factor de perdas l1'

    'three single-core cables (in trefoil formation), with
sheaths bonded at both ends of an electrical section
    lamb1 = 0
    lamb1l = 0
    lamb1ll = 0
    xaux = 0
    xaux = 2 * 2 * PI * f * 0.0001 * Log((2 * s) / (de))

    If cmbEntubado.Text = "Não" Then
        lamb1l = (reseq / resac) * (1 / (1 + ((reseq / xaux) ^
2)))
    ElseIf cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        lamb1l = (reseq / resac) * (1.5 / (1 + ((reseq / xaux) ^
2)))
    End If

    '#####soma total#####
    lamb1 = lamb1l + lamb1ll

    '#####factor de
perdas l2#####

    matearm = DR1.item("tab_cabo_arm2.Material")

    Call lambda2()

    Call Maiso()

    Call matefh()

    Call matefe()

    Call matebe()

    Call resthermentrar()

    If cmbAplicação.Text = "Cabos Enterrados onde nao ocorre a
dessecagem do solo" Or cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde ocorre parcial
dissecagem do solo" Or cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde se evita a
dissecagem do solo" Then

```

```

Call t4cabosafastadostrevo()

Call t4cabosajuntostrevo()

If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
    Call t4entubados()
End If

If cmbAplicação.Text = "Cabos Enterrados onde nao ocorre
a dessecação do solo" Then
    Call clfa()
End If
If cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde ocorre
parcial dessecação do solo" Then
    Call bcpdso()
End If
If cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde se evita a
dessecação do solo" Then
    Call bcda()
End If

iregpermtrevo = iregperm

End If

If cmbAplicação.Text = "Cabos ao ar livre protegidos da
radiação solar" Then

'trefoil
inst = "trefoil"
Call tab_t42()
Call t4laidfreeair()

If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
    Call t4entubados()
End If

Call clfa()

iregpermtrefoilonly = iregperm

'trefoil direct
inst = "trefoil direct"
Call tab_t42()
Call t4laidfreeair()

If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
    Call t4entubados()
End If

Call clfa()

iregpermtrefoildirect = iregperm

End If

If cmbAplicação.Text = "Cabos expostos a radiação solar" Then

```

```

'trefoil
inst = "trefoil"
Call tab_t42()
Call t4directsolarradiation()

If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
    Call t4entubados()
End If

Call cdesr()

iregpermtrefoilonly = iregperm

'trefoil direct
inst = "trefoil direct"
Call tab_t42()
Call t4directsolarradiation()

If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
    Call t4entubados()
End If

Call cdesr()

iregpermtrefoildirect = iregperm

End If

'#####factor de
perdas l1#####
'factor de perdas l1'

'three single-core cables in flat formation, with regular
transposition, sheaths bonded at both ends of an electrical section
lamb1 = 0
lamb1l = 0
lamb1ll = 0
xaux = 0
xaux = 2 * 2 * PI * f * 0.0001 * Log((s / de) * 2 * (2 ^ (1 /
3)))

If cmbEntubado.Text = "Não" Then
    lamb1l = (reseq / resac) * (1 / (1 + ((reseq / xaux) ^
2)))

ElseIf cmbEntubado.Text = "Sim" Then
    lamb1l = (reseq / resac) * (1.5 / (1 + ((reseq / xaux) ^
2)))

End If

'#####soma total#####
lamb1 = lamb1l + lamb1ll

'#####factor de
perdas l2#####

matearm = DR1.item("tab_cabo_arm2.Material")

Call lambda2()

```

```

Call resthermentrar()

If cmbAplicação.Text = "Cabos Enterrados onde nao ocorre a
dessecagem do solo" Or cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde ocorre parcial
dissecagem do solo" Or cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde se evita a
dissecagem do solo" Then

    Call t4cabosafastadosesteira()

    Call t4cabosajuntosesteira()

    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Call t4entubados()
    End If

    If cmbAplicação.Text = "Cabos Enterrados onde nao ocorre
a dessecagem do solo" Then
        Call clfa()
    End If
    If cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde ocorre
parcial dissecagem do solo" Then
        Call bcpdso()
    End If
    If cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde se evita a
dissecagem do solo" Then
        Call bcdsa()
    End If

    iregpermesteiract = iregperm

End If

If cmbAplicação.Text = "Cabos ao ar livre protegidos da
radiacao solar" Then

    'flat horizontal touch
    inst = "flat horizontal touch"
    Call tab_t42()
    Call t4laidfreeair()

    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Call t4entubados()
    End If
    Call clfa()

    iregpermflathtouchct = iregperm

    'flat horizontal spaced
    inst = "flat horizontal spaced"
    Call tab_t42()
    Call t4laidfreeair()

    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Call t4entubados()
    End If

    Call clfa()

    iregpermflathspacedct = iregperm

```

```

'flat vertical touch
inst = "flat vertical touch"
Call tab_t42()
Call t4laidfreeair()

If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
    Call t4entubados()
End If

Call clfa()

iregpermflatvtouchct = iregperm

'flat vertical spaced
inst = "flat vertical spaced"
Call tab_t42()
Call t4laidfreeair()

If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
    Call t4entubados()
End If

Call clfa()

iregpermflatvspacedct = iregperm

End If

If cmbAplicação.Text = "Cabos expostos a radiacao solar" Then

    'flat horizontal touch
    inst = "flat horizontal touch"
    Call tab_t42()
    Call t4directsolarradiation()

    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Call t4entubados()
    End If

    Call cdesr()

    iregpermflathtouchct = iregperm

    'flat horizontal spaced
    inst = "flat horizontal spaced"
    Call tab_t42()
    Call t4directsolarradiation()

    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Call t4entubados()
    End If

    Call cdesr()

    iregpermflathspacedct = iregperm

    'flat vertical touch
    inst = "flat vertical touch"
    Call tab_t42()
    Call t4directsolarradiation()

```

```

    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Call t4entubados()
    End If

    Call cdesr()

    iregpermflatvtouchct = iregperm

    'flat vertical spaced
    inst = "flat vertical spaced"
    Call tab_t42()
    Call t4directsolarradiation()

    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Call t4entubados()
    End If

    Call cdesr()

    iregpermflatvspacedct = iregperm

End If

'#####factor de
perdas l1#####
'factor de perdas l1'

'three single-core cables in flat formation, without
transposition, sheaths bonded at both ends of an electrical section
lamb1 = 0
lamb11 = 0
lamb111 = 0
iaux = 0
iauxm = 0
Dim p As Single
Dim q As Single

iaux = 2 * 2 * PI * f * 0.0001 * Log((2 * s) / (de))
iauxm = 2 * 2 * PI * f * 0.0001 * Log(2)

p = iaux + iauxm
q = iaux - (iauxm / 3)

'lamb11 = (reseq / resac) * (((0.75 * (p ^ 2)) / ((reseq ^ 2)
+ (p ^ 2))) + ((0.25 * (q ^ 2)) / ((reseq ^ 2) + (q ^ 2))) + ((2 * reseq * p * q
* iauxm) / ((3 ^ 0.5) * ((reseq ^ 2) + (p ^ 2)) * ((reseq ^ 2) + (q ^ 2)))))

If cmbEntubado.Text = "Não" Then
    lamb11 = (reseq / resac) * (((0.75 * (p ^ 2)) / ((reseq ^
2) + (p ^ 2))) + ((0.25 * (q ^ 2)) / ((reseq ^ 2) + (q ^ 2))) + ((2 * reseq * p *
q * iauxm) / ((3 ^ 0.5) * ((reseq ^ 2) + (p ^ 2)) * ((reseq ^ 2) + (q ^ 2)))))
ElseIf cmbEntubado.Text = "Sim" Then
    lamb11 = (reseq / resac) * (1.5 / (1 + ((reseq / iaux) ^
2)))
End If

'#####soma total#####
lamb1 = lamb11 + lamb111

```

```

#####factor      de
perdas l2#####

matearm = DR1.item("tab_cabo_arm2.Material")

Call lambada2()

Call resthermentrar()

If cmbAplicação.Text = "Cabos Enterrados onde nao ocorre a
dessecagem do solo" Or cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde ocorre parcial
dissecagem do solo" Or cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde se evita a
dissecagem do solo" Then

    Call t4cabosafastadosesteira()

    Call t4cabosajuntosesteira()

    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Call t4entubados()
    End If

    If cmbAplicação.Text = "Cabos Enterrados onde nao ocorre
a dessecagem do solo" Then
        Call clfa()
    End If
    If cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde ocorre
parcial dissecagem do solo" Then
        Call bcpdso()
    End If
    If cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde se evita a
dissecagem do solo" Then
        Call bcda()
    End If

    iregpermesteirast = iregperm

End If

If cmbAplicação.Text = "Cabos ao ar livre protegidos da
radiacao solar" Then

    'flat horizontal touch
    inst = "flat horizontal touch"
    Call tab_t42()
    Call t4laidfreeair()

    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Call t4entubados()
    End If

    Call clfa()

    iregpermflathtouchst = iregperm

    'flat horizontal spaced
    inst = "flat horizontal spaced"
    Call tab_t42()
    Call t4laidfreeair()

```

```

If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
    Call t4entubados()
End If

Call clfa()

iregpermflathspacedst = iregperm

'flat vertical touch
inst = "flat vertical touch"
Call tab_t42()
Call t4laidfreeair()

If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
    Call t4entubados()
End If

Call clfa()

iregpermflatvtouchst = iregperm

'flat vertical spaced
inst = "flat vertical spaced"
Call tab_t42()
Call t4laidfreeair()

If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
    Call t4entubados()
End If

Call clfa()

iregpermflatvspacedst = iregperm

End If

If cmbAplicação.Text = "Cabos expostos a radiacao solar" Then

    'flat horizontal touch
    inst = "flat horizontal touch"
    Call tab_t42()
    Call t4directsolarradiation()

    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Call t4entubados()
    End If

    Call cdesr()

    iregpermflathtouchst = iregperm

    'flat horizontal spaced
    inst = "flat horizontal spaced"
    Call tab_t42()
    Call t4directsolarradiation()

    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Call t4entubados()
    End If

    Call cdesr()

```

```

    iregpermflat spacedst = iregperm

    'flat vertical touch
    inst = "flat vertical touch"
    Call tab_t42()
    Call t4directsolarradiation()

    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Call t4entubados()
    End If

    Call cdesr()

    iregpermflatvtouchst = iregperm

    'flat vertical spaced
    inst = "flat vertical spaced"
    Call tab_t42()
    Call t4directsolarradiation()

    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Call t4entubados()
    End If

    Call cdesr()

    iregpermflatvspacedst = iregperm

End If

'#####factor de
perdas l1#####
'factor de perdas l1'
lamb1 = 0
lamb11 = 0
lamb111 = 0
'single-core cables, with sheaths bonded at a single point or
cross-bonded

Dim resistividadetempop As Single, espe As Single
Dim tempop2aux As Single
' If iregperm = 0 Then
tempop2aux = tempop

' Else
'tempop2aux = tempop - ((iregperm ^ 2) * (reseq2 / 1000) +
0.5 * (wdv / 1000)) * T1
'End If

If estrutura_em = "sim" Then
    matebli = DR1.item("tab_cabo_em.Material")
    'chama a resistividade para o material da blindagem em
fios

    Call Matblindagem()
    resistividadetempop = resistividade * (1 + coeftemp2 *
(tempop2aux - 20))
    espe = dfem
End If

If estrutura_fm = "sim" Then
    matebli = DR1.item("tab_cabo_fm.Material")

```

```

'chama a resistividade para o material da blindagem em
fita
Call Matblindagem()
resistividadetempop = resistividade * (1 + coeftemp2 *
(tempop2aux - 20))
espe = espessurafm
End If

Dim lamb0 As Single
Dim delta1 As Single = 0
Dim delta2 As Single = 0
Dim beta1 As Single
Dim ts As Single
Dim gs As Single
Dim m As Single

m = (2 * PI * f / reseq) * 0.0000001

'1.three single-core cables, flat formation
lamb1 = 0
lamb11 = 0
lamb111 = 0
lamb0 = 0
lamb0 = 1.5 * ((m ^ 2) / (1 + (m ^ 2))) * ((de / (2 * s)) ^
2)
delta1 = -1 * ((0.74 * (m + 2) * (m ^ 0.5)) / (2 + ((m - 0.3)
^ 2))) * ((de / (2 * s)) ^ (m + 1))
delta2 = (0.92 * (m ^ 3.7)) * ((de / (2 * s)) ^ (m + 2))

beta1 = ((4 * PI * 2 * PI * f) / (10000000 *
resistividadetempop)) ^ (0.5)
gs = 1 + ((espe / (de + espe)) ^ 1.74) * (beta1 * (de + espe)
* 0.001 - 1.6)

lamb111 = (reseq / resac) * (gs * lamb0 * (1 + delta1 +
delta2) + (((beta1 * ts) ^ 4) / 12 * 1000000000000))

'#####soma total#####
lamb1 = lamb11 + lamb111

'#####factor de
perdas l2#####

matearm = DR1.item("tab_cabo_arm2.Material")

Call lambda2()

Call resthermentrar()

If cmbAplicação.Text = "Cabos Enterrados onde nao ocorre a
dessecagem do solo" Or cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde ocorre parcial
dissecagem do solo" Or cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde se evita a
dissecagem do solo" Then

Call t4cabosafastadosesteira()

Call t4cabosajuntosesteira()

If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
Call t4entubados()

```

```

End If

If cmbAplicação.Text = "Cabos Enterrados onde nao ocorre
a dessecação do solo" Then
    Call clfa()
End If
If cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde ocorre
parcial dissecação do solo" Then
    Call bcpdso()
End If
If cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde se evita a
dissecação do solo" Then
    Call bcda()
End If

iregpermesteirasp_cross = iregperm

End If

If cmbAplicação.Text = "Cabos ao ar livre protegidos da
radiação solar" Then

    ' flat horizontal touch
    inst = "flat horizontal touch"
    Call tab_t42()
    Call t4laidfreeair()

    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Call t4entubados()
    End If

    Call clfa()

    iregpermflatasp_cross_touch = iregperm

    'flat horizontal spaced
    inst = "flat horizontal spaced"
    Call tab_t42()
    Call t4laidfreeair()

    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Call t4entubados()
    End If

    Call clfa()

    iregpermflatasp_cross_spaced = iregperm

    'flat vertical touch
    inst = "flat vertical touch"
    Call tab_t42()
    Call t4laidfreeair()

    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Call t4entubados()
    End If

    Call clfa()

    iregpermverticalasp_cross_touch = iregperm

```

```

'flat vertical spaced
inst = "flat vertical spaced"
Call tab_t42()
Call t4laidfreeair()

If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
    Call t4entubados()
End If

Call clfa()

iregpermverticalsp_cross_spaced = iregperm

End If

If cmbAplicação.Text = "Cabos expostos a radiacao solar" Then

    ' flat horizontal touch
    inst = "flat horizontal touch"
    Call tab_t42()
    Call t4directsolarradiation()

    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Call t4entubados()
    End If

    Call cdesr()

    iregpermflatsp_cross_touch = iregperm

    'flat horizontal spaced
    inst = "flat horizontal spaced"
    Call tab_t42()
    Call t4directsolarradiation()

    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Call t4entubados()
    End If

    Call cdesr()

    iregpermflatsp_cross_spaced = iregperm

    'flat vertical touch
    inst = "flat vertical touch"
    Call tab_t42()
    Call t4directsolarradiation()

    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Call t4entubados()
    End If

    Call cdesr()

    iregpermverticalsp_cross_touch = iregperm

    'flat vertical spaced
    inst = "flat vertical spaced"
    Call tab_t42()

```

```

Call t4directsolarradiation()

If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
    Call t4entubados()
End If

Call cdesr()

iregpermverticalsp_cross_spaced = iregperm

End If

'2.three single-core cables in trefoil formation
lamb1 = 0
lamb11 = 0
lamb111 = 0
lamb0 = 0
lamb0 = 3 * ((m ^ 2) / (1 + (m ^ 2))) * ((de / (2 * s)) ^ 2)
delta1 = (1.14 * (m ^ 2.45) + 0.33) * ((de / (2 * s)) ^ (0.92
* m + 1.66))
delta2 = 0

beta1 = ((4 * PI * 2 * PI * f) / (10000000 *
resistividadetempop)) ^ (0.5)
gs = 1 + ((espe / (de + espe)) ^ 1.74) * (beta1 * (de + espe)
* 0.001 - 1.6)

lamb111 = (reseq / resac) * (gs * lamb0 * (1 + delta1 +
delta2) + (((beta1 * ts) ^ 4) / 12 * 1000000000000))

'#####soma total#####
lamb1 = lamb11 + lamb111

'#####factor de
perdas l2#####

matearm = DR1.item("tab_cabo_arm2.Material")

Call lambda2()

Call resthermentrar()

If cmbAplicação.Text = "Cabos Enterrados onde nao ocorre a
dessecagem do solo" Or cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde ocorre parcial
dissecagem do solo" Or cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde se evita a
dissecagem do solo" Then

    Call t4cabosafastadostrevo()

    Call t4cabosajuntostrevo()

    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Call t4entubados()
    End If

    If cmbAplicação.Text = "Cabos Enterrados onde nao ocorre
a dessecagem do solo" Then
        Call clfa()
    End If

```

```

        If cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde ocorre
parcial dissecação do solo" Then
            Call bcpdso()
        End If
        If cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde se evita a
dissecação do solo" Then
            Call bcdda()
        End If

        iregpermtrevosp_cross = iregperm

    End If

    If cmbAplicação.Text = "Cabos ao ar livre protegidos da
radiação solar" Then

        'trefoil
        inst = "trefoil"
        Call tab_t42()
        Call t4laidfreeair()

        If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
            Call t4entubados()
        End If

        Call clfa()

        iregpermtrefoilsp_cross = iregperm

        'trefoil direct
        inst = "trefoil direct"
        Call tab_t42()
        Call t4laidfreeair()

        If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
            Call t4entubados()
        End If

        Call clfa()

        iregpermtrefoildirectsp_cross = iregperm

    End If

    If cmbAplicação.Text = "Cabos expostos a radiação solar" Then

        'trefoil
        inst = "trefoil"
        Call tab_t42()
        Call t4directsolarradiation()

        If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
            Call t4entubados()
        End If

        Call cdesr()

        iregpermtrefoilsp_cross = iregperm

        'trefoil direct

```

```

inst = "trefoil direct"
Call tab_t42()
Call t4directsolarradiation()

If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
    Call t4entubados()
End If

Call cdesr()

iregpermtrefoildirectsp_cross = iregperm

End If

If cmbAplicação.Text = "Cabos Enterrados onde nao ocorre a
dessecagem do solo" Or cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde ocorre parcial
dissecagem do solo" Or cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde se evita a
dissecagem do solo" Then

    If iregpermtrevo < I Then
        trevo = "Não admitido"
    Else
        trevo = iregpermtrevo
    End If

    If iregpermesteiract < I Then
        esteiract = "Não admitido"
    Else
        esteiract = iregpermesteiract
    End If

    If iregpermesteirast < I Then
        esteirast = "Não admitido"
    Else
        esteirast = iregpermesteirast
    End If

    If iregpermtrevosp_cross < I Then
        trevosp = "Não admitido"
    Else
        trevosp = iregpermtrevosp_cross
    End If

    If iregpermesteirasp_cross < I Then
        esteirasp = "Não admitido"
    Else
        esteirasp = iregpermesteirasp_cross
    End If

    If (iregpermtrevo >= I And iregpermtrevo <= Itecto) Or
(iregpermesteiract >= I And iregpermesteiract <= Itecto) Or (iregpermesteirast >=
I And iregpermesteirast <= Itecto) Or (iregpermtrevosp_cross >= I And
iregpermtrevosp_cross <= Itecto) Or (iregpermesteirasp_cross >= I And
iregpermesteirasp_cross <= Itecto) Then

        dgvResult.Rows.Add(DR1.item("tab_estrutura.numero"),
DR1.item("seccao"), DR1.item("tensao"), DR1.item("desig"), trevo, esteiract,
esteirast, trevosp, esteirasp)

        seccoes(k) = DR1.item("seccao")
        k = k + 1

```

```

End If

End If

If cmbAplicação.Text = "Cabos expostos a radiação solar" Or
cmbAplicação.Text = "Cabos ao ar livre protegidos da radiação solar" Then

    If iregpermtrefoilonly < I Then
        trefoilonly = "Não admitido"
    Else
        trefoilonly = iregpermtrefoilonly
    End If

    If iregpermtrefoildirect < I Then
        trefoildirect = "Não admitido"
    Else
        trefoildirect = iregpermtrefoildirect
    End If

    If iregpermflathtouchct < I Then
        flathtouchct = "Não admitido"
    Else
        flathtouchct = iregpermflathtouchct
    End If

    If iregpermflat spacedct < I Then
        flat spacedct = "Não admitido"
    Else
        flat spacedct = iregpermflat spacedct
    End If

    If iregpermflatvtouchct < I Then
        flatvtouchct = "Não admitido"
    Else
        flatvtouchct = iregpermflatvtouchct
    End If

    If iregpermflatv spacedct < I Then
        flatv spacedct = "Não admitido"
    Else
        flatv spacedct = iregpermflatv spacedct
    End If

    If iregpermflathtouchst < I Then
        flathtouchst = "Não admitido"
    Else
        flathtouchst = iregpermflathtouchst
    End If

    If iregpermflat spacedst < I Then
        flat spacedst = "Não admitido"
    Else
        flat spacedst = iregpermflat spacedst
    End If

    If iregpermflatvtouchst < I Then
        flatvtouchst = "Não admitido"
    Else
        flatvtouchst = iregpermflatvtouchst
    End If

```

```

If iregpermflatvspacedst < I Then
    flatvspacedst = "Não admitido"
Else
    flatvspacedst = iregpermflatvspacedst
End If

If iregpermflatsp_cross_touch < I Then
    flatsp_cross_touch = "Não admitido"
Else
    flatsp_cross_touch = iregpermflatsp_cross_touch
End If

If iregpermflatsp_cross_spaced < I Then
    flatsp_cross_spaced = "Não admitido"
Else
    flatsp_cross_spaced = iregpermflatsp_cross_spaced
End If

If iregpermverticalsp_cross_touch < I Then
    verticalsp_cross_touch = "Não admitido"
Else
    verticalsp_cross_touch
iregpermverticalsp_cross_touch
End If

If iregpermverticalsp_cross_spaced < I Then
    verticalsp_cross_spaced = "Não admitido"
Else
    verticalsp_cross_spaced
iregpermverticalsp_cross_spaced
End If

If iregpermtrefoilsp_cross < I Then
    trefoilsp_cross = "Não admitido"
Else
    trefoilsp_cross = iregpermtrefoilsp_cross
End If

If iregpermtrefoildirectsp_cross < I Then
    trefoildirectsp_cross = "Não admitido"
Else
    trefoildirectsp_cross = iregpermtrefoildirectsp_cross
End If

If (iregpermtrefoilonly >= I And iregpermtrefoilonly <=
Itecto) Or (iregpermtrefoildirect >= I And iregpermtrefoildirect <= Itecto) Or
(iregpermflathtouchct >= I And iregpermflathtouchct <= Itecto) Or
(iregpermflathspacedct >= I And iregpermflathspacedct <= Itecto) Or
(iregpermflatvtouchct >= I And iregpermflatvtouchct <= Itecto) Or
(iregpermflatvspacedct >= I And iregpermflatvspacedct <= Itecto) Or
(iregpermflathtouchst >= I And iregpermflathtouchst <= Itecto) Or
(iregpermflathspacedst >= I And iregpermflathspacedst <= Itecto) Or
(iregpermflatvtouchst >= I And iregpermflatvtouchst <= Itecto) Or
(iregpermflatvspacedst >= I And iregpermflatvspacedst <= Itecto) Or
(iregpermtrefoilsp_cross >= I And iregpermtrefoilsp_cross <= Itecto) Or
(iregpermtrefoildirectsp_cross >= I And iregpermtrefoildirectsp_cross <= Itecto)
Or (iregpermflatsp_cross_touch >= I And iregpermflatsp_cross_touch <= Itecto) Or
(iregpermflatsp_cross_spaced >= I And iregpermflatsp_cross_spaced <= Itecto) Or

```

```

(iregpermverticalsp_cross_touch >= I And iregpermverticalsp_cross_touch <=
Itecto) Or (iregpermverticalsp_cross_spaced >= I And
iregpermverticalsp_cross_spaced <= Itecto) Then

dgvResult1.Rows.Add((DR1.item("tab_estrutura.numero")), DR1.item("seccao"),
DR1.item("tensao"), DR1.item("desig"), trefoilonly, trefoildirect, flathtouchct,
flatvspacedct, flatvtouchct, flatvspacedct, flathtouchst, flatvspacedst,
flatvtouchst, flatvspacedst, trefoilsp_cross, trefoildirectsp_cross,
flatsp_cross_touch, flatsp_cross_spaced, verticalsp_cross_touch,
verticalsp_cross_spaced)

seccoes(k) = DR1.item("seccao")
k = k + 1
End If

End If

End If

'fecha tensão
End If
opcao:
Loop

seccoes.Initialize()

DR1.Close()
Conn.Close()

If cmbAplicação.Text = "Cabos Enterrados onde nao ocorre a dessecação do
solo" Or cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde ocorre parcial dissecação do
solo" Or cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde se evita a dissecação do
solo" Then
    If dgvResult1.Rows.Count = 0 Then

        MsgBox("A pesquisa não retornou cabos para as especificações
inseridas", MsgBoxStyle.OkOnly + MsgBoxStyle.Exclamation, "Sem resultados")

    End If

End If
If cmbAplicação.Text = "Cabos ao ar livre protegidos da radiação solar"
Then
    If dgvResult1.Rows.Count = 0 Then

        MsgBox("A pesquisa não retornou cabos para as especificações
inseridas", MsgBoxStyle.OkOnly + MsgBoxStyle.Exclamation, "Sem resultados")

    End If
End If

If cmbAplicação.Text = "Cabos expostos a radiação solar" Then
    If dgvResult1.Rows.Count = 0 Then

        MsgBox("A pesquisa não retornou cabos para as especificações
inseridas", MsgBoxStyle.OkOnly + MsgBoxStyle.Exclamation, "Sem resultados")

    End If
End If

```

```

End Sub

'combobox para a seleção da frequência
Private Sub cmbFreq_SelectedIndexChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles cmbFreq.SelectionChangeCommitted

    If cmbFreq.SelectedIndex = 0 Then

        f = cmbFreq.Text

    ElseIf cmbFreq.SelectedIndex = 1 Then

        f = cmbFreq.Text

    End If

End Sub

End Sub

'fecha a form
Private Sub Button2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles Button2.Click
    Me.Close()
End Sub

'função para cálculo da potência que o cliente pretende e a potência nominal mínima
Private Sub SU_TextChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles txtS.TextChanged, txtP.TextChanged, rbPn1.CheckedChanged, rbPn2.CheckedChanged, rbPn3.CheckedChanged, rbPn4.CheckedChanged, rbPn5.CheckedChanged, rbPn6.CheckedChanged, rbPn7.CheckedChanged, rbPn8.CheckedChanged, rbPn10.CheckedChanged, rbPn100.CheckedChanged, rbPn200.CheckedChanged, rbPn250.CheckedChanged, rbPn300.CheckedChanged, rbPn400.CheckedChanged, rbPn500.CheckedChanged, updCos.ValueChanged, rbS.CheckedChanged, rbP.CheckedChanged, cmbU.TextChanged

    If rbS.Checked = True Then
        txtS.Enabled = True
        txtS.Focus()
        txtP.Enabled = False
        updCos.Enabled = False
        lblUni.Text = "MVA"
    ElseIf rbP.Checked = True Then
        txtP.Enabled = True
        txtP.Focus()
        updCos.Enabled = True
        lblUni.Text = "kW"
        txtS.Enabled = False
    End If

    Sap = Val(txtS.Text)
    Pel = Val(txtP.Text)
    fp = updCos.Value
    U = Val(cmbU.Text)

    If rbS.Checked = True Then
        I = Sap * 10 ^ 6 / (U * 10 ^ 3 * Sqrt(3))
    End If
    If rbP.Checked = True Then
        I = Pel * 10 ^ 3 / (U * 10 ^ 3 * Sqrt(3) * fp)
    End If

    If txtS.Text = "" And txtP.Text = "" Then

```

```

        txtI.Text = ""
Else
    txtI.Text = Round(I, 1)

End If

If rbPn1.Checked = True Then
    perc = 0.01
ElseIf rbPn2.Checked = True Then
    perc = 0.02
ElseIf rbPn3.Checked = True Then
    perc = 0.03
ElseIf rbPn4.Checked = True Then
    perc = 0.04
ElseIf rbPn5.Checked = True Then
    perc = 0.05
ElseIf rbPn6.Checked = True Then
    perc = 0.06
ElseIf rbPn7.Checked = True Then
    perc = 0.07
ElseIf rbPn8.Checked = True Then
    perc = 0.08
ElseIf rbPn10.Checked = True Then
    perc = 0.1
ElseIf rbPn100.Checked = True Then
    perc = 1
ElseIf rbPn200.Checked = True Then
    perc = 2
ElseIf rbPn250.Checked = True Then
    perc = 2.5
ElseIf rbPn300.Checked = True Then
    perc = 3
ElseIf rbPn400.Checked = True Then
    perc = 4
ElseIf rbPn500.Checked = True Then
    perc = 5
End If

If rbS.Checked = True Then
    Sapn = Sap * perc + Sap
    Itecto = Sapn * 10 ^ 6 / (U * 10 ^ 3 * Sqrt(3))
End If
If rbP.Checked = True Then
    Sapn = Pel * perc + Pel
    Itecto = Sapn * 10 ^ 3 / (U * 10 ^ 3 * Sqrt(3) * fp)
End If

If txtS.Text = "" And txtP.Text = "" Then
    txtSapn.Text = ""
Else
    txtSapn.Text = Sapn
End If

End Sub

'combobox cabo entubado
Private Sub cmbEntubado_SelectionChangeCommitted(ByVal sender As Object,
ByVal e As System.EventArgs) Handles cmbEntubado.SelectionChangeCommitted
    If cmbEntubado.Text = "Sim" Then
        Tubo.ShowDialog()
    End If
End Sub
End Sub

```

```

'numeric updown para o número de grupos enterrados
Private Sub updNg_ValueChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles updNg.ValueChanged
    If updNg.Value = 1 Then
        updDg.Hide()
        lblDg.Hide()
    ElseIf updNg.Value = 2 Then
        updDg.Show()
        lblDg.Show()
    End If
End Sub

'mostra apenas os cabos de uma só secção
Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button1.Click
    simplificado = 1
    Button1.Cursor = Cursors.WaitCursor
    Call calculo()
    Button1.Cursor = Cursors.Arrow
End Sub

'mostra todos os resultados
Private Sub Button3_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button3.Click
    simplificado = 0
    Button3.Cursor = Cursors.WaitCursor
    Call calculo()
    Button3.Cursor = Cursors.Arrow
End Sub

'função para os eventos criados quando de manobra os radiobutton do tipo de
almas para os cabos
Private Sub rbCheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles rbAmbas.CheckedChanged, rbAl.CheckedChanged,
rbCu.CheckedChanged
    If rbAmbas.Checked = True Then
        alma = "ambas"

    ElseIf rbAl.Checked = True Then
        alma = "Aluminio"

    ElseIf rbCu.Checked = True Then
        alma = "Cobre"

    End If
End Sub

'ao pressionar o botão Help aparece a form do Help
Private Sub Button4_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button4.Click
    Help.Show()
End Sub

'quando a textbox da resistividade perde o focus a a variável ressolo é
atribuida com o valor inserido
'numeric updown para a resistividade do solo estado seco
Private Sub updResSoloSeco_ValueChanged(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles updResSoloSeco.ValueChanged

    If cmbAplicação.Text = "Cabos Enterrados onde nao ocorre a dessecação do
solo" Or cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde se evita a dissecação do
solo" Then
        ressolo = updResSoloSeco.Value
    End If
End Sub

```

```

        v1 = ressolo
    End If
    If cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde ocorre parcial dissecação
do solo" Then
        ressolo = updResSoloSeco.Value
        updResSoloSeco.Value = ressolo
        v1 = ressolo
        v = v1 / v2
        txtRazao.Text = v

    End If
End Sub

'numeric updown para a resistividade do solo estado húmido
Private Sub updResSoloHum_ValueChanged(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles updResSoloHum.ValueChanged
    If cmbAplicação.Text = "Cabos Enterrados onde nao ocorre a dessecação do
solo" Or cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde se evita a dissecação do
solo" Then
        ressolo = updResSoloHum.Value
    End If
    If cmbAplicação.Text = "Cabos enterrados onde ocorre parcial dissecação
do solo" Then
        ressolo = updResSoloHum.Value
        v2 = ressolo
        v = v1 / v2
        txtRazao.Text = v
        ressolo = v1
    End If
End Sub

End Class

```

D.2- Form Tubo

```

Public Class Tubo

    'variável tipo de tubo
    Dim tubo As String
    'constantes U, V, Y do tipo do tubo
    Public U As Single
    Public V As Single
    Public Y As Single
    'resistividade térmica do material do tubo
    Public thermres As Single
    'diâmetro externo do tubo
    Public Du As Single
    'diâmetro interno do tubo
    Public Dd As Single
    'distância do centro ao solo
    Public Lg As Single
    'raio mais curto
    Public rx As Single
    'raio mais longo
    Public ry As Single
    'temperatura média entre o cabo e o tubo
    Public tetamedio As Single
    'número de cabos dentro do tubo
    Public Nr As Single

    Sub mattubo()

```

```

Select Case tubo
    Case "Caleira de cimento enterrada"
        U = 5.2
        V = 1.1
        Y = 0.011
        thermres = 4.8
    Case "Caleira de cimento no ar"
        U = 5.2
        V = 1.2
        Y = 0.006
        thermres = 4.8
    Case "Caleira de fibra"
        U = 5.2
        V = 0.83
        Y = 0.006
        thermres = 4.8
    Case "Caleira de fibra enterrada"
        U = 5.2
        V = 0.91
        Y = 0.01
        thermres = 4.8
    Case "Caleira de plastico"
        U = 1.87
        V = 0.312
        Y = 0.0037
        thermres = 5
    Case "Conduta Metalica"
        U = 5.2
        V = 1.4
        Y = 0.011
        thermres = 0
    Case "Earthenware ducts"
        U = 1.87
        V = 0.28
        Y = 0.0036
        thermres = 1.2
    Case "PEAD"
        U = 1.87
        V = 0.28
        Y = 0.0036
        thermres = 2.5
End Select

```

```
End Sub
```

```

Private Sub Tubo_change(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles MyBase.Load, cmbTubo.SelectionChangeCommitted

```

```

    If cmbTubo.Text = "" Then
        cmbTubo.SelectedIndex = 0
    End If

```

```
tubo = cmbTubo.Text
```

```

'chama propriedades para meterial do tubo
Call mattubo()

```

```
End Sub
```

```

Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button1.Click
    'fecha form
    Me.Close()
End Sub
Private Sub txtNrC_Validating(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.ComponentModel.CancelEventArgs) Handles txtNrC.Validating
    'se campo número de cabos estiver vazia dá erro
    If txtNrC.Text = "" Then
        e.Cancel = True
        ErrorProvider1.SetError(txtNrC, "Deve inserir o número de cabos no
tubo")
    Exit Sub
    End If
    ErrorProvider1.SetError(txtNrC, "")

    Nr = txtNrC.Text
End Sub

Private Sub txtTempm_Validating(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.ComponentModel.CancelEventArgs) Handles txtTempm.Validating
    'se campo temperatura média entre o cabo e o tubo estiver vazia dá erro
    If txtTempm.Text = "" Then
        e.Cancel = True
        ErrorProvider1.SetError(txtTempm, "Deve inserir uma temperatura média
entre o cabo e o tubo")
    Exit Sub
    End If
    ErrorProvider1.SetError(txtTempm, "")

    tetamedio = txtTempm.Text

End Sub

Private Sub txtDext_Validating(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.ComponentModel.CancelEventArgs) Handles txtDext.Validating
    'se campo inserir diâmetro externo estiver vazio dá erro
    If txtDext.Text = "" Then
        e.Cancel = True
        ErrorProvider1.SetError(txtDext, "Deve inserir um diâmetro externo")
    Exit Sub
    End If
    ErrorProvider1.SetError(txtDext, "")

    Du = txtDext.Text

End Sub

Private Sub txtDint_Validating(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.ComponentModel.CancelEventArgs) Handles txtDint.Validating
    'se campo inserir diâmetro interno estiver vazio dá erro
    If txtDint.Text = "" Then
        e.Cancel = True
        ErrorProvider1.SetError(txtDint, "Deve inserir um diâmetro interno")
    Exit Sub
    End If
    ErrorProvider1.SetError(txtDint, "")
    Dd = txtDint.Text
End Sub

Private Sub txtDist_Validating(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.ComponentModel.CancelEventArgs) Handles txtDist.Validating

```

```

        'se campo inserir distância ao centro do solo estiver vazio dá erro
        If txtDist.Text = "" Then
            e.Cancel = True
            ErrorProvider1.SetError(txtDist, "Deve inserir uma distância do
centro ao solo")
            Exit Sub
        End If
        ErrorProvider1.SetError(txtDist, "")

        Lg = txtDist.Text

    End Sub

    Private Sub txtRl_Validating(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.ComponentModel.CancelEventArgs) Handles txtRl.Validating
        'se campo inserir o raio mais longo estiver vazio dá erro
        If txtRl.Text = "" Then
            e.Cancel = True
            ErrorProvider1.SetError(txtRl, "Deve inserir o raio mais longo")
            Exit Sub
        End If
        ErrorProvider1.SetError(txtRl, "")

        ry = txtRl.Text
    End Sub

    Private Sub txtRc_Validating(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.ComponentModel.CancelEventArgs) Handles txtRc.Validating
        'se campo inserir o raio mais curto estiver vazio dá erro
        If txtRc.Text = "" Then
            e.Cancel = True
            ErrorProvider1.SetError(txtRc, "Deve inserir o raio mais curto")
            Exit Sub
        End If
        ErrorProvider1.SetError(txtRc, "")

        rx = txtRc.Text
    End Sub

End Class

```

D.3- Form Help

```

Public Class Help

    Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button1.Click
        'fecha form help
        Me.Close()
    End Sub

End Class

```