

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

**Projecto de Linha Aérea de Alta Tensão com
Estudo do Comportamento Longitudinal das
Cadeias de Isoladores**

Márcio Rúben de Figueiredo

Versão Final

Projecto realizado no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. José Neves dos Santos
Co-Orientador: Eng. Ricardo Júlio Flores Pina
Junho 2009

Resumo

Este Relatório de Projecto consiste na apresentação do trabalho realizado com o objectivo de projectar uma Linha Aérea, assim como a realização de um estudo com o intuito de analisar o comportamento de conjuntos de cadeias de isoladores em suspensão.

Este relatório está assim dividido em sete capítulos.

O primeiro destina-se a uma introdução e a um enquadramento geral de do trabalho realizado.

No segundo capítulo é feita uma abordagem sobre conceitos gerais que envolvem o cálculo de Linhas Aéreas, desde o conceito de linha eléctrica, passando pelos isoladores, pela escolha da tensão nominal e pela definição traçado da linha.

O terceiro capítulo destina-se à apresentação dos cálculos eléctricos e mecânicos a realizar no projecto de uma Linha Aérea de Alta Tensão. Também são feitas referências aos dimensionamentos de apoios, fundações e redes de terras e condições que as mesmas devem verificar.

O quarto capítulo centra-se numa perspectiva mais global do projecto de uma Linha Aérea, sendo abordadas as características gerais do projecto, as competências e a experiência do projectista e as entidades envolvidas no licenciamento. Neste mesmo capítulo, faz-se ainda uma referência à perspectiva orçamental.

No quinto capítulo encontra-se a Memória Descritiva e Justificativa do projecto da Linha Aérea de Alta Tensão que faz a segunda ligação do Parque Eólico de S. Macário ao Posto de Corte de Cabril (S. Macário II - PC Cabril).

No sexto capítulo apresenta-se um pequeno estudo sobre o comportamento das cadeias de isoladores em suspensão com o intuito de se compreender o comportamento das mesmas quando suportam vãos desiguais.

O sétimo e último capítulo consiste num apanhado das conclusões mais importantes retiradas durante a realização do trabalho perspectivando-se ainda futuros desenvolvimentos que o mesmo apresentar.

Nos dois capítulos seguintes, nossa atenção centra-se no projecto de uma linha eléctrica de alta tensão. No 2º capítulo apresentam-se as bases teóricas do projecto e os passos a seguir. No 3º capítulo descrevem-se as várias etapas do processo do projecto de uma linha eléctrica de alta tensão e apresentam-se alguns comentários sobre o papel do projectista, ao longo do processo.

Todo o projecto, assim como este relatório, foram realizados nas instalações da EDP Distribuição, Departamento de Infra-estruturas Norte, em Vila Nova de Gaia.

Abstract

This report consists in the presentation of the Project made that had as main goals to study how to do a Project of a Power Transmission Line and also to study if there's or not a common behaviour of isolation chains.

This report is divided in seven chapters.

The first one is a small introduction and an overview about the project and the objectives.

The second chapter is an approach on the general concepts involving the project of a Power Transmission Line, starting on the concept of what's a Power Transmission Line, giving an overview about the types of insulator chains, referring the way to choose the nominal voltage of the line and the path that the line should have, in order to fulfil the regulations.

The third chapter presents the electric and mechanic calculations involved in a Power Transmission Line Project as well as some comments and conditions set on the calculation of foundations of the towers and on the calculations of the earth resistance grid.

The fourth chapter is a global perspective on the Project of a Power Transmission Line with some comments on the general characteristics of a Power Transmission Line Project and the qualifications and experience needed for an Engineer in this area. It's also given a global idea of how to make a project from the financial side and the institutions involved in the process of licensing a line.

The fifth chapter is a Power Transmission Line project, Power Transmission Line at 60kV connecting one of the wind farms of S. Macário (PE S. Macário II) and Cabril switching station (PC Cabril) applying the theory studied in the previous chapter and experience shared by the other Engineers.

The sixth chapter is a study about the behaviour of the insulators chains and the influence of not having balanced sag in the displacement of them. We will see why the sag should be balanced and realize the extra force that the tower has to support and the displacement caused to the insulator chains. This will be all supported with examples.

The seventh and last chapter is dedicated to summarise all the work done and predict future developments of what has been done until this moment.

Agradecimentos

Começo por agradecer ao Professor José Neves dos Santos, docente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e ao Engenheiro Ricardo Pina, da EDP Distribuição, Departamento de Projecto e Construção de Linhas Aéreas, por me terem aceitado co-orientar este Projecto e pelo apoio e disponibilidades prestados ao longo do mesmo, factor que contribuiu decisivamente para o sucesso deste projecto.

Agradeço também a toda a Equipa do Departamento de Projecto e Construção de Linhas Aéreas, mais concretamente aos Engenheiros António Carvalho, Ângela Moura, António Coelho, Carlos Aguiar, Fernando Duarte, Fernando Galvão e Luís Moreira, aos desenhadores Carlos Alfredo, João Soares e Júlio Fortuna, aos topógrafos Manuel Senra e Manuel Capela e aos fiscais Carmindo Alves e João Rocha por toda a disponibilidade, paciência e acima de tudo por me terem feito sentir em casa.

Deixo também um especial obrigado ao Professor Doutor António Machado e Moura pela ajuda prestada antes mesmo de ter iniciado este projecto e por toda a documentação que me facilitou durante a realização do mesmo.

Índice

RESUMO	III
ABSTRACT.....	V
AGRADECIMENTOS	VII
ÍNDICE	IX
LISTA DE FIGURAS.....	XIII
LISTA DE TABELAS	XV
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS	XVII
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2.....	3
CONCEITOS GERAIS SOBRE LINHAS AÉREAS.....	3
2.1. LINHAS ELÉCTRICAS	3
2.2. CLASSIFICAÇÃO DE LINHAS	4
2.3. CONDUTORES	4
2.4. ISOLADORES.....	5
2.5. CADEIAS DE ISOLADORES	5
2.6. TENSÃO NOMINAL.....	7
2.7. TRAÇADO DE UMA LINHA AÉREA.....	8
CAPÍTULO 3.....	9
CÁLCULO DE LINHAS AÉREAS	9
3.1. CÁLCULO ELÉCTRICO.....	9
3.1.1. Resistência eléctrica	9
3.1.2. Coeficiente de auto-indução	11

3.1.3.	Capacidade	11
3.1.4.	Condutância	12
3.1.5.	Reactância	12
3.1.6.	Susceptância	13
3.1.7.	Impedância	13
3.1.8.	Admitância	13
3.1.9.	Impedância característica	14
3.1.10.	Intensidade de corrente	14
3.1.11.	Perda de energia	15
3.1.12.	Queda de tensão	15
3.2.	CÁLCULO MECÂNICO	15
3.2.1.	Tensão Mecânica aplicada aos Cabos	16
3.2.2.	Estados atmosféricos e coeficientes de sobrecarga	16
3.2.3.	Equação de estados	20
3.2.4.	Curvas representativas de um vão	20
3.3.	CÁLCULO DE APOIOS	24
3.4.	CÁLCULO DA REDE DE TERRAS	25
3.5.	CÁLCULO DE FUNDAÇÕES	25
CAPÍTULO 4.....		27
EXECUÇÃO DO PROJECTO		27
4.1.	ENTIDADES ENVOLVIDAS NO LICENCIAMENTO DE UMA LINHA	27
4.2.	CARACTERÍSTICAS DO PROJECTO DE UMA LINHA AÉREA DE ALTA TENSÃO	28
4.2.1.	Definição do traçado da linha	28
4.2.2.	Cálculo do comprimento da linha	28
4.2.3.	Determinação das características eléctricas	29
4.2.4.	Cálculo das características mecânicas	29
4.2.5.	Cálculo das Características Eléctricas	30
4.2.6.	Aspectos Construtivos	31
4.3.	O FACTOR “EXPERIÊNCIA DO PROJECTISTA”	32
4.4.	COMPETÊNCIAS DO PROJECTISTA	32
4.5.	ESTIMATIVA ORÇAMENTAL E CADERNO DE ENCARGOS	33
CAPÍTULO 5.....		35
MEMÓRIA DESCRITIVA E JUSTIFICATIVA		35
5.1.	CARACTERÍSTICAS DA LINHA	35
5.2.	CÁLCULO MECÂNICO	36
5.2.1.	Cálculos Prévios	36

5.2.2.	Determinação do estado atmosférico e coeficientes de sobrecarga	37
5.2.3.	Determinação da Tensão de Montagem e da Flecha Máxima para o condutor Al-Aço 326	39
5.2.4.	Determinação da tensão de montagem e flecha máxima para o cabo de guarda AL-AÇO 127	41
5.2.5.	Definição do tipo de fixação dos condutores	43
5.2.6.	Dimensionamento de Apoios	44
5.3.	DISTÂNCIAS LEGAIS A RESPEITAR	52
5.3.1.	Distância dos condutores aos apoios	52
5.3.2.	Distância dos condutores ao solo	52
5.3.3.	Distância dos condutores às árvores	52
5.3.4.	Distância dos condutores aos Edifícios	53
5.3.5.	Distância dos condutores a travessia de estradas	53
5.3.6.	Cruzamento com linhas aéreas de BT e MT:	53
5.3.7.	Distâncias entre condutores	53
5.4.	DESVIO TRANSVERSAL DAS CADEIAS DE ISOLADORES	54
5.5.	CÁLCULO ELÉCTRICO	55
5.5.1.	Resistência da Linha	55
5.5.2.	Distância Geométrica entre fases	55
5.5.3.	Cálculo da Reactância	56
5.5.4.	Cálculo da Susceptância	57
5.5.5.	Cálculo da Impedância e Admitância	57
5.5.6.	Cálculo da Queda de Tensão entre fases	57
5.5.7.	Cálculo das Perdas	58
CAPÍTULO 6		59
ESTUDO DO COMPORTAMENTO LONGITUDINAL DAS CADEIAS DE ISOLADORES EM SUSPENSÃO		59
6.1.	INTRODUÇÃO	59
6.2.	OBJECTIVO DO ESTUDO	59
6.3.	CASOS DE ESTUDO	60
6.3.1.	Cantão com uma cadeia de isoladores em suspensão	60
6.3.2.	Cantão com duas cadeias de isoladores em suspensão	65
6.4.	FORMULAÇÃO DE UM MÉTODO GERAL DE CÁLCULO	72
CAPÍTULO 7		77
CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO		77
REFERÊNCIAS		79

ANEXOS.....	81
ANEXO 1 -APOIOS DE ALINHAMENTO.....	81
ANEXO 2 - APOIOS DE ÂNGULO.....	83
ANEXO 3 - APOIOS DE FIM-DE-LINHA.....	84
ANEXO 4 - DESVIO TRANSVERSAL DAS CADEIAS DE ISOLADORES EM SUSPENSÃO	85
ANEXO 5 - DESENHOS	87

Lista de figuras

Figura 2.1 - Condutores Multifilares	5
Figura 2.2 - Cadeia de isoladores em amarração	6
Figura 2.3 - Cadeia de isoladores em suspensão	6
Figura 2.4 - Flecha Enforcada	7
Figura 3.5 - Sobrecarga de gelo num condutor	17
Figura 3.6 - Árvore de decisão.....	19
Figura 3.7 - Representação da curva da catenária.....	21
Figura 3.8 - Representação de um vão em desnível	22
Figura 5.9 - Representação de um apoio de Fim-de-Linha	45
Figura 6.1 - Representação de 1 cantão com 2 vãos	60
Figura 6.2 - Forças resultantes de diferentes tensões mecânicas.....	63
Figura 6.3 - Representação do deslocamento da cadeia de isoladores em suspensão.....	64
Figura 6.4 - Representação de um cantão com 3 vãos	66
Figura 6.5 - Etapas para o cálculo do desvio transversal de cadeias de isoladores em suspensão	73
Figura 6.6 - Evolução dos deslocamentos das cadeias de isoladores consoante a temperatura e diferença entre os vãos contíguos.....	75

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Caracterização dos estados atmosféricos-tipo.....	17
Tabela 5.2 - Características do condutor e cabo de guarda	35
Tabela 5.3 - Tensões máximas e mangas de gelo consideradas para os diferentes cantões ...	36
Tabela 5.4 - Altitude e manga de gelo associada	36
Tabela 5.5 - Caracterização dos estados atmosféricos.....	37
Tabela 5.6 - Coeficientes de Sobrecarga	38
Tabela 5.7 - Características dos cantões do Projecto para o condutor	41
Tabela 5.8 - Características dos cantões do Projecto para o cabo de guarda	43
Tabela 5.9 - Apoios e Fixação dos condutores.....	44
Tabela 5.10 - Características dos isoladores.....	44
Tabela 6.1 - Tensões mecânicas de montagem dos condutores para o cantão	62
Tabela 6.2 - Deslocamentos das cadeias em função da temperatura	65
Tabela 6.3 - Tensões mecânicas de montagem do cantão para os condutores	68
Tabela 6.4 - Tensões mecânicas nos vãos depois da montagem.....	69
Tabela 6.5 - Deslocamento da cadeia de isoladores ao suportar os vãos de 325 metros e 250 metros.....	70
Tabela 6.6 - Deslocamento da cadeia de isoladores ao suportar os vãos de 325 metros e 400 metros.....	71
Tabela 6.7 - Deslocamento da cadeia de isoladores ao suportar os vãos de 250 metros e 400 metros.....	72
Tabela 6.8 - Tensões mecânicas de montagem dos condutores para o cantão	74

Lista de Siglas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

ANA	Aeroportos de Portugal
CAD	Computer Aided Design
EDP	Energias de Portugal
EP	Estradas de Portugal
IDAD	Instituto do Ambiente e Desenvolvimento
INAG	Instituto Nacional da Água
IPPA	Instituto Português do Património Arquitectónico
REN	Rede Eléctrica Nacional
R.S.L.E.A.T	Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão

Lista de símbolos

i	Ângulo formado entre cadeia de isoladores e apoio
$F_{V,CD}$	Força do vento no condutor
$F_{V,CG}$	Força do vento no cabo de guarda
P_{CD}	Peso do condutor
P_{CG}	Peso do cabo de guarda
U_{ec}	Tensão económica de transporte
P	Potência a transmitir na linha
L_l	Comprimento da linha
R	Resistência eléctrica
R_k	Resistência eléctrica, por quilómetro
ρ	Resistividade eléctrica
D	Diâmetro d
S	Secção do cabo
P	Resistividade por quilómetro
Θ	Temperatura
μ	Permeabilidade magnética
f	Frequência

C_k	Capacidade por quilómetro
G_k	Condutância por quilómetro
U_s	Tensão simples
X_k	Reactância por quilómetro
L_k	Coefficiente de auto-indução por quilómetro
B_k	Susceptância por quilómetro
Z_k	Impedância por quilómetro
Y_k	Admitância por quilómetro
Z_c	Impedância característica
U	Tensão composta
U_s	Tensão simples
σ	Secção do cabo
p	perdas por efeito de Joule
I	Corrente
R	Resistência
ω_g	Peso específico do gelo
ω_{CD}	Peso específico do condutor
ω_{CG}	Peso específico do cabo-de-guarda
d	Diâmetro do condutor
e	Espessura da manga de gelo
c	Coefficiente de forma
q	Pressão dinâmica
α	Coefficiente de redução
f	Vão crítico
L	Comprimento de um vão
m	Coefficiente de sobrecarga
l	Comprimento da cadeia de isoladores
L_{eq}	Vão fictício equivalente
t	Tensão mecânica por mm^2
$f_{m\acute{a}x}$	Flecha máxima
E	Módulo de Young
α_d	Coefficiente de dilatação
P_c	Parâmetro da catenária
T_{CD}	Tracção exercida pelo condutor
T_{CG}	Tracção exercida pelo cabo de guarda
$F_{V,CD}$	Força do vento no condutor
$F_{V,CG}$	Força do vento no cabo de guarda
P_{Iso}	Peso da cadeia de isoladores
$F_{v,Iso}$	Força do vento na cadeia de isoladores
$T_{CD,X}$	Tracção exercida pelo condutor no eixo longitudinal
$T_{CD,Y}$	Tracção exercida pelo condutor no eixo transversal
$T_{CG,X}$	Tracção exercida pelo cabo-de-guarda no eixo longitudinal
$T_{CG,Y}$	Tracção exercida pelo cabo-de-guarda no eixo transversal
B	Ângulo entre apoios

Capítulo 1

Introdução

O objectivo deste projecto, centrou-se na realização de um projecto de uma Linha Aérea de Alta Tensão e de um estudo complementar sobre o comportamento longitudinal das cadeias de isoladores em suspensão.

O desafio lançado foi bastante interessante, uma vez que permitiu uma aplicação dos conhecimentos adquiridos durante o percurso académico e uma vez que pertence à área de projecto, e ao mesmo tempo permitiu-me explorar um tema, com o estudo efectuado, que não tem grande sido alvo de grande desenvolvimento no passado recente.

A realização do projecto em ambiente de empresa, foi também um passo que se revelou importante, uma vez que me deu a oportunidade de conhecer mais a fundo a realidade do mundo de trabalho assim como de deu um conhecimento mais profundo sobre o projecto e construção de Linhas Aéreas de Alta Tensão, combinando o conhecimento teórico com a experiência do terreno e com a visão de pessoas que já trabalham na área há bastantes anos.

Capítulo 2

Conceitos gerais sobre Linhas Aéreas

2.1. Linhas Eléctricas

Designa-se por linha eléctrica, um circuito constituído por um certo número de condutores e que tem como objectivo realizar o transporte de energia eléctrica entre dois pontos distintos. O transporte pode ser efectuado em corrente contínua ou corrente alternada, sendo a segunda opção a mais usual.

Estando nós perante circuitos de corrente contínua, o cálculo é bastante simples, uma vez que é possível tratar o sistema como um sistema de corrente alternada de frequência nula, sendo que, em regime permanente, tanto a reactância e a impedância não são consideradas.

Quando o transporte é realizado em corrente alternada é possível o transporte ser feito de em sistemas monofásicos ou polifásicos. Nestes casos, e desde que exista um sistema equilibrado de fases, apenas se considera uma fase, sabendo sempre que o mesmo se irá verificar para as restantes fases.

Nas linhas de transporte de energia existem quatro grandezas típicas, designadas por constantes físicas eléctricas por quilómetro de comprimento.[6] Estas constantes físicas são a resistência (R_k), o coeficiente de auto-indução (L_k), a capacidade (C_k) e condutância (G_k), sendo os seus valores por quilómetro de linha.

As linhas de eléctricas possuem também constantes eléctricas características por quilómetro de linha que se referem à reactância, susceptância, impedância e admitância e que se deduzem a partir das constantes físicas eléctricas.

O departamento de planeamento e gestão da rede é quem gere a rede actual e projecta futuras expansões, sendo depois o departamento de projecto e construção o responsável pela execução do planeamento. Estas necessidades podem advir da ligação de novos clientes, modificações de traçados já existentes, ou de reforços da rede que sejam necessários de forma a garantir a qualidade de serviço.

2.2. Classificação de Linhas

As linhas aéreas estão divididas em linhas curtas, médias e longas [1][3]. É usual considerar que as linhas de comprimento superior a 100 km e cujo nível de tensão seja superior a 100 kV como linhas longas. Quanto às linhas curtas, elas caracterizam-se por serem linhas onde o nível de tensão é inferior a 100 kV e por serem inferiores a 100 km. Para o seu cálculo, não é necessário o mesmo nível de rigor ao utilizado nas linhas longas sendo neste caso uma das aproximações realizadas, desprezar a capacidade.

As linhas médias, como facilmente se pode perceber, são as linhas que apresentam características mistas das linhas curtas e longas (por exemplo, uma linha de 150 kV de 50 km). Neste tipo de linhas continua a ser possível realizar algumas aproximações, embora não seja possível desprezar a capacidade.

Esta caracterização pode ser feita de forma mais precisa recorrendo ao ângulo característico. Este depende do comprimento da linha, da admitância e da impedância que a caracteriza. As linhas curtas apresentam um ângulo característico inferior a 0,1; o ângulo característico das linhas médias está entre os 0,1 e os 0,5; as linhas longas apresentam um ângulo característico superior a 0,5[12].

As linhas estão ainda classificadas como linhas de 1ª classe, 2ª classe e 3ª classe[13]. As linhas de 1ª classe são aquelas cuja tensão nominal da instalação é inferior a 1 kV em corrente alternada e 1,5 kV em corrente contínua. Estas estão englobadas nas redes de distribuição de baixa tensão, estando regulamentadas através do Regulamento de Segurança de Redes de Distribuição de Energia Eléctrica em Baixa Tensão. As linhas de 2ª classe são aquelas cuja tensão nominal da instalação, é superior aos valores das linhas de primeira classe e inferior a 40 kV. As linhas de 3ª classe englobam o resto das linhas, ou seja, as linhas onde tensão de instalação é superior a 40 kV.

2.3. Condutores

Nas linhas Aéreas de alta tensão, os condutores utilizados podem ser constituídos por um único metal (condutores homogêneos) ou por uma liga composta por mais do que um metal (condutores heterogêneos). Usualmente, os condutores homogêneos são constituídos por cobre, alumínio ou ligas de cobre e alumínio. Em relação aos condutores heterogêneos, o mais utilizado é o condutor de alumínio-aço.

Os condutores podem ainda ser unifilares ou multifilares. Os condutores unifilares são constituídos por um único filamento e apresentam um diâmetro menor e um peso maior que os cabos multifilares. No sentido oposto, os cabos multifilares apresentam um diâmetro maior mas ao mesmo tempo uma secção menor e uma resistência mecânica superior, visto serem mais flexíveis que os condutores unifilares. Na Figura 2.1 podemos observar 2 condutores multifilares.

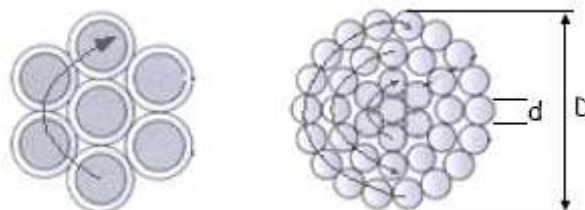


Figura 2.1 - Condutores Multifilares

2.4. Isoladores

Os isoladores são os elementos que têm como função isolar os condutores dos apoios aos quais estão ligados, sendo fabricados em material cerâmico. O seu correcto dimensionamento serve para evitar o contornamento do isolamento. Eis os incidentes que poderão decorrer de um mau dimensionamento e deficiente manutenção:

- Condutividade através da massa do isolador: a corrente eléctrica circula pela massa do isolador até ao apoio; este incidente não é grave, uma vez que o valor da corrente é desprezável
- Perfuração da massa do isolador: este incidente já é bastante grave uma vez que a corrente que circula já não é desprezável; com o aumento do nível de tensão, este tipo de incidente tem maior a probabilidade de acontecer.
- Condutividade superficial: devido ao depósito de impurezas na superfície dos condutores, poderá dar-se o caso de se estabelecer uma corrente eléctrica pela superfície do condutor
- Descarga disruptiva e contornamento: este incidente ocorre quando se forma um arco eléctrico através do ar entre o isolador e o apoio. Este incidente dependente das condições atmosféricas e em consequência da rigidez dieléctrica do ar.

A escolha dos isoladores é condicionada pela zona onde a linha será implantada no que diz respeito à poluição, uma vez que este é um parâmetro que agrava o perigo de contornamento, obrigando a um dimensionamento mais cuidado da linha de fugas.

Quanto ao tipo de isolador, ele poderá ser um isolador fixo ou poderemos estar em presença de uma cadeia de isoladores. Embora mais baratos, os isoladores fixos têm caído em desuso, em detrimento do uso de cadeias de isoladores, uma vez que em caso de defeito no isolamento, é necessário substituir o isolador completo. Nas cadeias de isoladores, pelo contrário, apenas é necessário substituir o disco que apresenta defeito.

2.5. Cadeias de Isoladores

As vantagens das cadeias de isoladores, usadas em Linhas Aéreas de Alta Tensão, são o facto de possuírem alguma flexibilidade, amortecendo certos esforços mecânicos da linha.

6 Conceitos gerais sobre Linhas Aéreas

Apresentam ainda a vantagem de no caso de ruptura de um isolador, apenas ser necessário substituir esse, em vez da cadeia completa.

Numa linha aérea de alta tensão, aplicam-se dois tipos de cadeias de isoladores: Cadeias de amarração e cadeias de suspensão.

As cadeias de isoladores em amarração fazem a ligação entre o condutor e o apoio numa posição praticamente horizontal sendo normalmente utilizadas nos apoios sujeitos a esforços elevados, nomeadamente nos apoios de ângulo, nos apoios de fim-de-linha, nos apoios em reforço.

Dado que as cadeias de isoladores em amarração, representadas na Figura 2.2 são de mais difícil montagem e de custo mais elevado, a tendência é a utilização de cadeias de suspensão no isolamento das linhas nos apoios de alinhamento.

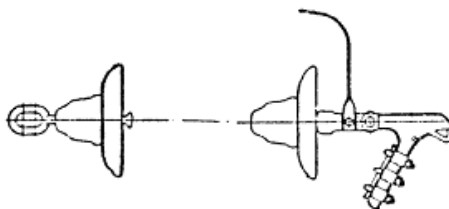


Figura 2.2 - Cadeia de isoladores em amarração

As cadeias de isoladores em suspensão são ligadas ao braço do apoio e dispõem-se na vertical, paralelas ao apoio, sendo que na extremidade inferior está preso o condutor. São utilizadas quando estamos na presença de apoios em alinhamento e sempre que os vãos contíguos aos apoios em causa exerçam esforços semelhantes no apoio. As cadeias de isoladores em suspensão apresentam como vantagem o facto de ser apenas necessário usar uma em cada apoio havendo poupança a nível económico.

No entanto as cadeias de isoladores em suspensão, representadas na Figura 2.3, têm o problema de estarem suspensas no apoio e de darem mais liberdade de movimentos aos condutores. Isto significa que em situações de vento extremo, os condutores podem aproximar-se perigosamente uns dos outros ou dos apoios.

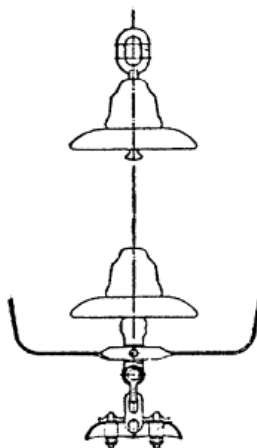


Figura 2.3 - Cadeia de isoladores em suspensão

É então necessário calcular o desvio transversal máximo a que as cadeias de isoladores poderão estar sujeitas. Matematicamente, o desvio transversal é calculado através da equação 2.1.

$$i = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{F_{v,CD} + \frac{F_{v,CG}}{2}}{P_{CD} + \frac{P_{CG}}{2}} \right) \text{ [}^\circ\text{].} \quad (2.1)$$

Quando o ângulo i é superior a 70° adoptam-se cadeias de isoladores em amarração, uma vês que os condutores já poderão ficar bastante próximos dos apoios em certas situações.

No que diz respeito às cadeias de amarração elas tendem a dar menos liberdade aos condutores mantendo-os mais fixos ao poste. A opção por cadeias de isoladores em amarração é também uma opção mais dispendiosa pois é necessário sempre o dobro dos isoladores quando estamos em presença de uma cadeia em amarração, comparativamente às cadeias de isoladores em suspensão.

Uma das situações em que é frequente o uso de cadeias de isoladores em amarração nos apoios de alinhamento é quando se está na presença de locais de acentuado declive. Neste tipo de terreno, pode dar-se o caso de termos cadeias de isoladores enforcadas. Significa isto que a cadeia de isoladores está sujeita a uma força resultante ascendente e não descendente como seria de esperar [2].

Na Figura 2.4, encontra-se um exemplo de uma cadeia enforcada:

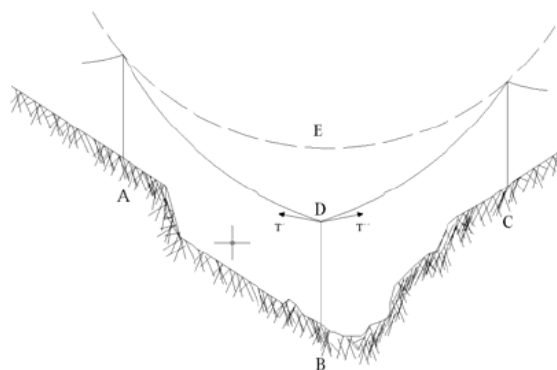


Figura 2.4 - Flecha Enforcada

2.6. Tensão Nominal

A escolha da tensão nominal da linha é um factor muito importante no projecto da mesma. Será mesmo um dos pontos fulcrais do projecto pois muitas das acções seguintes estão intimamente associadas ao nível de tensão escolhido para exploração da linha.

Como se sabe, à subida da tensão de transporte corresponde uma redução da secção pois para a mesma potência transmitida a intensidade de corrente a circular nas linhas é

inferior. A isto iria corresponder supostamente uma redução dos custos com a linha. No entanto, é necessário pensar um pouco mais a nível global, pois se estivermos em presença de um projecto para ampliação de uma rede existente, é bastante provável que a nossa opção mais económica não a seja na realidade devido às instalações necessárias caso a linha a projectar, funcione a um nível de tensão diferente da rede existente.

Para calcular de um modo rápido a tensão mais económica de uma linha, pode ser utilizada a expressão de Still, que relaciona a Tensão mais económica com a Potência (P em kW) a transmitir e o comprimento da linha (L em km) como descrito na equação 2.2[3].

$$U_{ec} = 5,5 \cdot \sqrt{\frac{P}{100} + \frac{L}{1,069}} \quad [kV]. \quad (2.2)$$

2.7. Traçado de uma Linha Aérea

Numa linha aérea de Alta Tensão, o traçado é escolhido após definição do nível de tensão e de quais os pontos que se pretendem ligar.

A primeira fase passa por um trabalho de estudo do terreno e da sua envolvente de forma a perceber qual será o melhor traçado. Este trabalho de estudo, passa pela utilização de meios informáticos, de cartas militares e de uma prévia visita ao terreno antes de se começar a definir o traçado.

Numa segunda fase, e já depois de se ter deslocado ao terreno, o projectista começa a definir o traçado da linha, cruzando as informações que obteve no terreno, com as cartas militares e as ferramentas informáticas que tem ao seu dispor. O traçado escolhido deverá sempre ser o mais recto possível de forma a reduzir ao máximo o comprimento da linha, reduzindo assim os custos de instalação, manutenção e exploração. Nesta fase, são marcados os pontos onde está proibida a passagem da linha:

- Recintos escolares e desportivos,
- Depósitos de combustíveis líquidos ou gasosos,
- Zonas militares,
- Zonas de servidão de aeródromos,
- Depósitos de explosivos,
- Pedreiras,
- Postos de extracção ou refinação de petróleo,
- Campos de antenas de comunicação e de radiodifusão.

Capítulo 3

Cálculo de Linhas Aéreas

3.1. Cálculo Eléctrico

Nas Linhas Aéreas o cálculo eléctrico é uma etapa bastante importante uma vez que nos permite definir os parâmetros de funcionamento da linha, sendo possível calcular a queda de tensão e as perdas de energia na mesma, verificando desta forma a viabilidade económica da mesma e as condições regulamentares

As linhas eléctricas possuem então um conjunto de características eléctricas que, uma vez definido o traçado final, e conseqüente comprimento da linha, deverão ser calculados.

3.1.1. Resistência eléctrica

A resistência eléctrica de uma linha é o parâmetro que condiciona as perdas por efeito de Joule e o seu valor é dada pela equação seguinte:

$$R = \frac{\rho \cdot L_l}{S} \quad [\Omega], \quad (3.3)$$

onde:

ρ - Resistividade do condutor [$\Omega \text{ mm}^2 / \text{km}$];

L_l - Comprimento do condutor [km];

S - Secção do condutor [mm^2].

Assim, a resistência por quilómetro é:

$$R_k = \frac{R}{L} \quad [\Omega / \text{km}]. \quad (3.4)$$

No cálculo da resistência, há ainda certas correcções que deverão ser efectuadas.

10 Conceitos gerais sobre Linhas Aéreas

a) Correção por efeito da temperatura

Para temperaturas diferentes de 20° C, a resistividade de um condutor é dado pela expressão:

$$\rho_{\theta} = \rho_{20} \cdot [1 + \beta \cdot (\theta - 20)] \quad [\Omega / \text{km}], \quad (3.5)$$

onde:

ρ_{θ} - Resistividade a uma temperatura θ [Ω / km];

ρ_{20} - Resistividade a 20°C [Ω / km].

b) Correção devido ao efeito pelicular

A resistência que normalmente aparece associada a um condutor é a resistência aplicada em corrente contínua.

Em corrente alternada, a resistência é no entanto diferente da verificada em corrente contínua, devido ao efeito pelicular. Este efeito é agravado quando estamos em presença de condutores de diâmetros elevados ou quando a transmissão de energia é feita a frequências elevadas, sendo praticamente nula a sua influência quando em presença de cabos de diâmetros usuais e frequências na ordem dos 50 Hz[4].

No caso concreto dos condutores de Alumínio e alma de Aço, o seu comportamento é idêntico a condutores tubulares, uma vez que a alma de aço não intervêm na condução da corrente eléctrica. Neste tipo de condutores, e para a secção de 326 mm², o aumento da resistência é inferior aos 2%, à frequência de 50Hz.

Em seguida, apresentam-se duas formas diferentes de se calcular o aumento da resistência:

Segundo a lei Lord Rayleigh [2]:

$$\frac{R_{ca}}{R_{cc}} = 1 + \frac{10^{-8}}{12} \cdot \left(\frac{w \cdot \mu}{R_{cc}} \right)^2 - \frac{10^{-16}}{180} \cdot \left(\frac{w \cdot \mu}{R_{cc}} \right)^4, \quad (3.6)$$

sendo,

R_{ca} - Resistência em corrente alternada [Ω / km];

R_{cc} - Resistência em corrente contínua [Ω / km];

μ - Permeabilidade magnética do condutor;

w - Pulsação da corrente alternada ($W = 2\pi \cdot f$) [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$].

Segundo Still [2]:

$$\frac{R_{ca}}{R_{cc}} = 1 + \frac{\sqrt{1 + (a \cdot D^2 \cdot f)^2} - 1}{2}, \quad (3.7)$$

sendo,

a - Constante igual a 0,0105 para o cobre e 0,0063 para o alumínio;

D - Diâmetro do condutor em polegadas (1 polegada = 25,4 mm);

f - Frequência da corrente alternada [Hz].

c) Correção devido às perdas magnéticas na alma de aço

Quando se está na presença de condutores de alumínio-aço, cada fio de alumínio induz uma magnetização na alma de aço. Por esse motivo, as diferentes camadas de fios de alumínio são enroladas alternadamente em direcções opostas, de forma a reduzir o efeito de magnetização.

Na presença de uma camada de fios, o aumento da resistência por efeito de magnetização ronda os 25%. No entanto, o valor é praticamente nulo quando estamos na presença de duas camadas de fios e na ordem dos 2% a 3% quando estamos na presença de 3 camadas[1][6].

3.1.2. Coeficiente de auto-indução

O seu valor, por fase e por quilómetro, é dado pela expressão 3.8:

$$L_k = \left(\frac{\mu}{2 \cdot n} + 4,6 \cdot \log\left(\frac{D}{r'}\right) \right) \cdot 10^{-4} \quad [\text{H/km}], \quad (3.8)$$

onde,

μ - Permeabilidade do condutor [H/km];

n - Número de condutores por fase;

D - Separação média geométrica entre fases, geralmente em milímetros;

r' - Raio fictício, geralmente em milímetros, definido através da expressão 3.9:

$$r' = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot R^{n-1}} \quad [\text{mm}], \quad (3.9)$$

em que:

r - Raio do condutor [mm];

R - Raio da circunferência que passa pelos condutores que formam a fase [mm].

3.1.3. Capacidade

A capacidade define-se como o quociente entre a carga capacitiva electrostática do condutor, por unidade de comprimento, e a diferença de potencial existente, em cada

12 Conceitos gerais sobre Linhas Aéreas

instante, entre o condutor e o seu invólucro, quando os respectivos condutores são sujeitos a um sistema polifásico simétrico de diferenças de potencial em relação a esse invólucro.

No caso das linhas aéreas, a terra é considerada o invólucro; para os cabos armados considera-se o invólucro a armadura.

Sendo a linha simétrica, todos os condutores têm a mesma capacidade linear de serviço e esse valor comum é também por definição a capacidade linear de serviço da linha.

Para uma linha trifásica, a capacidade eléctrica por fase e por quilómetro (C_k) é dada pela expressão[6]:

$$C_k = \frac{24,2}{\log \frac{D}{r'}} \cdot 10^{-9} \quad [\text{F/km}], \quad (3.10)$$

onde,

D - separação média geométrica entre fases, geralmente em milímetros.

A presença de um cabo de guarda vem afectar as capacidades de uma linha aérea; no entanto, o seu efeito é pequeno e pode desta forma ser desprezado[6][7].

3.1.4. Condutância

Condutância de uma linha é a condutância do meio dieléctrico que envolve os condutores. O valor da condutância aparece por quilómetro e por fase, é calculado da seguinte forma[3]:

$$G_k = \frac{p}{U_s^2} \cdot 10^{-3} \quad [\text{S/km}], \quad (3.11)$$

onde,

p - Energia perdida [W/m];

U_s - Tensão simples [kV].

A condutância é devida à corrente de fugas entre os condutores e a terra, a qual flui essencialmente através das cadeias de isoladores. É bastante influenciada pelas condições atmosféricas, em especial a humidade e a poluição que provocam a sujidade dos condutores. É por este motivo que a condutância é calculada em razão das perdas de energia na linha.

3.1.5. Reactância

A reactância é dada pelo produto da pulsação da corrente alternada pelo coeficiente de auto-indução, sendo esse coeficiente igual à relação entre o fluxo magnético e a intensidade de corrente eléctrica que o produz.

A reactância é dos parâmetros mais importantes pois influencia a capacidade de transporte da linha assim como a queda de tensão na mesma.

A reactância calcula-se com recurso à seguinte expressão:

$$X_k = L_k \cdot \omega \quad [\Omega / \text{km}], \quad (3.12)$$

onde,

ω - velocidade angular, em radianos por segundo, dada por $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ [rad/s], sendo f a frequência, em Hz.

3.1.6. Susceptância

A susceptância calcula-se da seguinte recorrendo é equação 3.13:

$$B_k = C_k \cdot \omega \quad [\text{S} / \text{km}], \quad (3.13)$$

3.1.7. Impedância

A impedância é uma grandeza complexa que se calcula da seguinte forma:

$$\underline{Z}_k = R_k + jX_k \quad [\Omega / \text{km}]. \quad (3.14)$$

O módulo $|Z_k|$ e a fase $\angle Z_k$ são calculados através das equações 3.15 e 3.16, respectivamente.

$$|Z_k| = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}, \quad (3.15)$$

$$\angle Z_k = \arctg \frac{X_k}{R_k}. \quad (3.16)$$

3.1.8. Admitância

A admitância é também uma grandeza complexa, calculada através da equação 3.17:

$$\underline{Y}_k = G_k + jB_k, \quad (3.17)$$

cujo módulo $|Y_k|$ e fase $\angle Y_k$ são dados, respectivamente, pelas equações 3.18 e 3.19.

$$Y_k = \sqrt{G_k + jB_k} , \quad (3.18)$$

$$\angle Y_k = \arctg \frac{B_k}{G_k} . \quad (3.19)$$

3.1.9. Impedância característica

A impedância característica é a relação entre a tensão e a intensidade da corrente em todos os pontos de uma linha. O seu valor é dado pela equação 3.20, apresentada em seguida:

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + jX}{G + jB}} = \sqrt{\frac{l \cdot (R_k + jX_k)}{l \cdot (G_k + jB_k)}} = \sqrt{\frac{R_k + jX_k}{G_k + jB_k}} \quad [\Omega] . \quad (3.20)$$

Como se pode verificar, o valor da impedância característica é constante ao longo de toda a linha e é independente do seu comprimento.

3.1.10. Intensidade de corrente

O cálculo da intensidade de corrente faz-se da seguinte recorrendo à equação 3.21 apresentada a seguir:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} \quad [A] , \quad (3.21)$$

onde,

U - tensão composta nominal (kV);

P - potência a transportar (kW);

cos φ - factor de potência.

Conhecida a intensidade de corrente, a densidade de corrente “d”, dada por:

$$d = \frac{I}{\sigma} \quad [A / mm^2] , \quad (3.22)$$

onde,

σ - Secção dos condutores.

3.1.11. Perda de energia

As perdas de energia por efeito de Joule calculam-se da seguinte recorrendo à equação 3.23:

$$p = 3.R.I^2 \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW}], \quad (3.23)$$

sendo a resistência (R) da linha dada pela equação 3.24,

$$R = R_k \cdot L_l \quad [\Omega], \quad (3.24)$$

onde,

L_l - comprimento da linha [km].

3.1.12. Queda de tensão

A queda de tensão entre as extremidades da linha é dada por:

$$\Delta V = \sqrt{3}.I.(R.\cos\varphi + X.\sin\varphi) \quad [V], \quad (3.25)$$

onde, $X = X_k \cdot L \quad [\Omega]$.

3.2. Cálculo Mecânico

O cálculo mecânico de uma linha aérea de alta tensão é realizado com o intuito de garantir que a mesma estará em condições de suportar todos os esforços mecânicos a que está sujeita em diferentes condições atmosféricas.

Estes cálculos e análises, servem para projectar os esforços a que os apoios estão sujeitos e qual a altura que os mesmos deverão possuir de forma a cumprirem o Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão (R.S.L.E.A.T.). Mais concretamente, pretende-se com este cálculo, obter as tensões mecânicas de montagem dos cabos, verificar a estabilidade dos apoios e verificar que os condutores respeitam as distâncias mínimas de segurança aos diferentes elementos existentes em redor (habitações, estradas, cursos de água, outras linhas existentes etc...).

3.2.1. Tensão Mecânica aplicada aos Cabos

Usualmente, consideram-se para os condutores tensões mecânicas máximas compreendidas entre os 7 e 12 (daN/mm²), sendo que as tracções dos cabos de guarda terão de ser superiores de modo a que a sua flecha seja inferior à flecha dos condutores. Para este efeito, como regra prática, consideram-se tensões mecânicas entre os 10 e os 16 (daN/mm²).

Estes valores são fixados pelos projectistas pois dependem em grande parte do traçado da linha, distâncias a edifícios, distâncias/cruzamentos com outras Linhas Eléctricas, definidas no R.S.L.E.A.T. A definição das tensões máximas também é influenciada pelas condições atmosféricas (existência de neve na região), pois elas irão aumentar a sobrecarga e consequentemente as forças a que os cabos estão sujeitos.

3.2.2. Estados atmosféricos e coeficientes de sobrecarga

Definidas as tensões mecânicas máximas a que os cabos deverão estar sujeitos, é necessário perceber qual a o estado atmosférico que será mais desfavorável. Consideram-se para o efeito dois estados-tipo: o estado de *Inverno* e o estado de *Primavera*, sendo que um destes, será considerado o estado mais desfavorável.

O estado-tipo *Inverno* é caracterizado pela temperatura reduzida, sendo de -5° C em condições normais e de -10° C em zonas onde existe a formação de gelo, e pelo chamado “vento reduzido”.

O estado-tipo *Primavera* é caracterizado pela temperatura amena, considerando-se 15° C, e pela existência de grandes rajadas de vento, considerando-se desta forma o estado de “vento máximo”. O estado-tipo *Primavera* engloba as estações de Primavera e de Outono, pois as características de um e de outro são semelhantes.

O terceiro estado-tipo considerado, o *Verão*, é caracterizado pela ausência de vento e pelas temperaturas elevadas que se fazem sentir e que influenciam as temperaturas dos condutores. Neste estado, o coeficiente de sobrecarga é nulo. Dependendo da classe em que se encontram as linhas a projectar, a temperatura máxima a considerar dos condutores, varia entre os 50° C e os 75° C conforme os artigos 21° e 22° do R.S.L.E.A.T. O estado de Verão, não é considerado para encontrar o estado atmosférico mais desfavorável, mas sim para determinar a flecha máxima que os cabos irão apresentar. O estado-tipo *Verão* serve também para obter a tensão mecânica de montagem, uma vez que se considera a sobrecarga nula e apenas é necessário corrigir a temperatura para a temperatura na altura de montagem.

A Tabela 3.1, apresentada em seguida, mostra os diferentes estados atmosféricos considerados e suas características:

Tabela 3.1 - Caracterização dos estados atmosféricos-tipo

Estados Climáticos		Temperatura [°C]		Pressão dinâmica do vento [Pa]		
		Zonas sem gelo	Zonas de gelo	Cabos a menos de 30 m altura	Cabos entre os 30 e os 50 m altura	Cabos a mais de 50 m altura
Vento reduzido (Inverno)		-5	-10	300	360	420
Vento máximo (Primavera)		15		750	900	1050
Flecha máxima (Verão)	Linhas de 2ª Classe	50		0		
	Linhas de 3ª Classe até 100 KV	65				
	Linhas de 3ª Classe superiores a 100KV	75				

Para se definir qual o estado-tipo atmosférico mais desfavorável é necessário calcular os coeficientes de sobrecarga para o estados-tipo *Inverno* e *Primavera*. Estes coeficientes pretendem reflectir a influência do vento e da temperatura sob a forma de um aumento do peso próprio do condutor.

Na figura 3.5 podemos ver a influência do vento e da manga de gelo, se esta existir, no condutor:

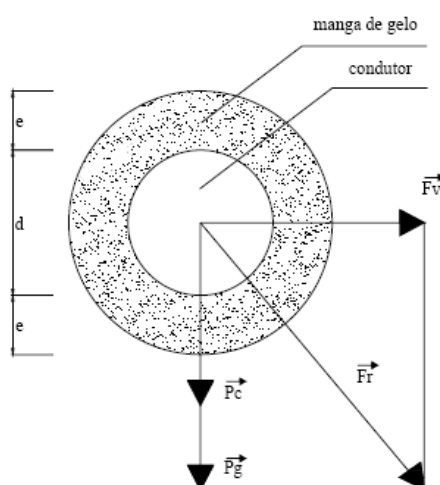


Figura 3.5 - Sobrecarga de gelo num condutor

18 Conceitos gerais sobre Linhas Aéreas

Em zonas de gelo é necessário considerar o peso do gelo que se acumula nos condutores, conforme está explicitado na figura anterior. Esta sobrecarga, causada pelo gelo, é modelizada da seguinte forma:

$$P_g = \frac{\omega_g \cdot \pi}{4} \cdot [(d + 2 \cdot e)^2 - d^2] \quad [\text{daN}], \quad (3.26)$$

onde,

P_g - peso do gelo;

ω_g - peso específico do gelo.

Quanto ao vento, é considerado horizontal em relação ao condutor, afectando desta forma a superfície do condutor e da manga de gelo. O cálculo é feito utilizando a equação 3.27.

$$F_v = \alpha \cdot c \cdot q \cdot S = \alpha \cdot c \cdot q \cdot (d + 2 \cdot e) \quad [\text{daN}]. \quad (3.27)$$

Como se pode concluir ao observar a Figura 3.5, a força resultante (F_r) irá ser igual a:

$$F_r = \sqrt{\left\{ P_c + \frac{\omega_g \cdot \pi}{4} \cdot [(d + 2 \cdot e)^2 - d^2] \right\}^2 + [\alpha \cdot c \cdot q \cdot (d + 2 \cdot e)]^2} \quad [\text{daN}]. \quad (3.28)$$

O coeficiente de sobrecarga, causada pelos estados atmosféricos, obtém-se dividindo a força obtida pelo peso próprio do condutor.

$$m = \frac{\sqrt{\left\{ \omega_c + \frac{\omega_g \cdot \pi}{4} \cdot [(d + 2 \cdot e)^2 - d^2] \right\}^2 + [\alpha \cdot c \cdot q \cdot (d + 2 \cdot e)]^2}}{\omega_{CD}}. \quad (3.29)$$

Observando a expressão anterior com atenção verifica-se que, no estado-tipo *Verão*, caracterizado pela ausência de vento e gelo, o coeficiente de sobrecarga é unitário, como seria de esperar.

Para se definir o estado-tipo mais desfavorável poderá ainda ser necessário calcular o chamado vão crítico.

O vão crítico é o valor do vão para o qual os condutores, submetidos à tensão máxima num dos estados-tipo, (*Inverno* ou *Primavera*) adquirem a tensão mecânica máxima do outro estado-tipo.[2][3] O cálculo do vão crítico é feito através da expressão seguinte:

$$f = \frac{\sigma * t_{\max}}{\omega_c} \sqrt{\frac{24 * \alpha * (\theta_1 - \theta_2)}{m_2^2 - m_1^2}} \quad [m]. \quad (3.30)$$

Caso se esteja na presença de um cantão (conjunto de vãos entre cadeias de amarração) composto por mais de 1 vão, é necessário encontrar o vão equivalente do conjunto de vãos. O cálculo do vão equivalente é feito de acordo com a expressão seguinte:

$$L_{eq} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n L_i^3}{\sum_{i=1}^n L_i}} \quad [m]. \quad (3.31)$$

Conhecidos o vão equivalente, o vão crítico e ainda os coeficientes de sobrecarga, através da consulta de uma árvore de decisão como a que se encontra na Figura 3.6, é possível determinar o estado atmosférico mais desfavorável[8].

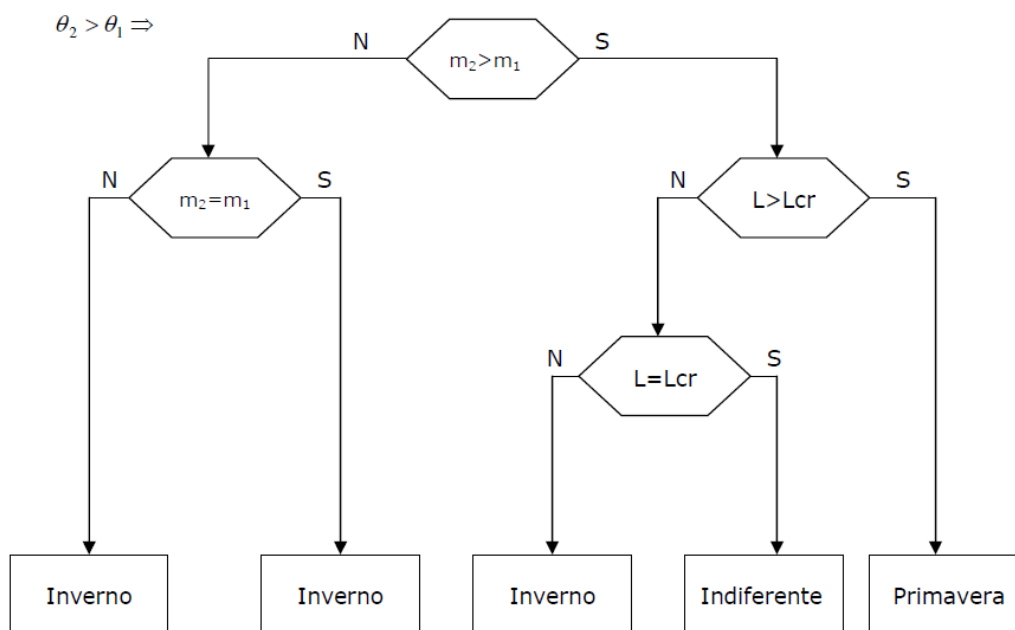


Figura 3.6 - Árvore de decisão

O estado 1 representa o estado-tipo *Inverno* e o estado 2 corresponde ao estado-tipo *Primavera*. A partir deste diagrama, e com os dados acima referidos, é possível determinar o estado-tipo mais desfavorável ao qual a linha estará sujeita.

3.2.3. Equação de estados

A equação de estados é uma equação de equilíbrio mecânico, que traduz sob a forma de variações do comprimento e de tensão mecânica dos cabos, as características próprias dos cabos, assim como as condições atmosféricas a que os mesmos estão sujeitos. Mais concretamente, a equação de estados, equação 3.32, modela as variações da tensão mecânica como consequência de diferentes temperaturas.

$$\theta_i + \frac{t_i}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_i^2 \cdot \omega^2 \cdot L_{eq}^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_i^2} = \theta_k + \frac{t_k}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_k^2 \cdot \omega^2 \cdot L_{eq}^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_k^2} \quad (3.32)$$

No projecto de linhas aéreas, esta equação tem essencialmente dois objectivos: o cálculo da tensão mecânica de montagem dos condutores e cabo-de-guarda e o cálculo da flecha máxima, a qual ocorre, como se compreende bem, para o estado-tipo *Verão*. No entanto, o cálculo da flecha é feito de forma indirecta, uma vez que é calculado através do valor da tensão mecânica de montagem. Em ambos os casos, para o estado-tipo que nos interessa calcular as tensões mecânicas, consideram-se condições de vento. Isso, e o facto de não existirem mangas de gelo quer no estado-tipo *Verão*, quer no estado de montagem (devido às temperaturas positivas) faz com que o coeficiente de sobrecarga seja unitário para os cálculos a efectuar em qualquer uma das situações acima mencionadas.

No primeiro caso, quando nos interessa conhecer a tensão mecânica de montagem dos condutores, é necessário efectuar o cálculo para a temperatura que se verifica na altura de montagem, de forma a se obter a correcta tensão mecânica de montagem a fim de evitar que o cabo caia com a contracção no tempo mais frio.

O cálculo para o estado-tipo *Verão*, serve, ainda que de forma indirecta, para garantir que os cabos respeitam quer as distâncias ao solo, quer as distâncias a edifícios, cruzamentos com outras linhas de transporte de energia. Neste caso adoptam-se temperaturas elevadas podendo variar entre os 50° e os 65°, dependendo sempre da classe em que a linha de alta tensão se inclui.

3.2.4. Curvas representativas de um vão

A catenária, representada na Figura 3.7, é a curva que melhor representa a realidade de um vão, sendo modelizada pela equação 3.33, onde P_c é o parâmetro da catenária. O cálculo do parâmetro da catenária é feito através da equação 3.34.

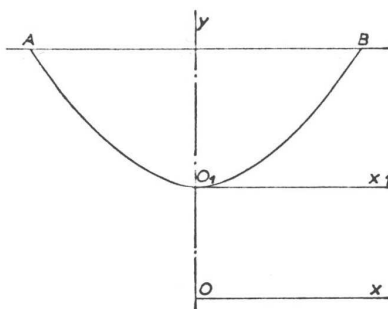


Figura 3.7 - Representação da curva da catenária

$$y = P_c \cdot \left(\cosh\left(\frac{x}{P}\right) - 1 \right), \quad (3.33)$$

Embora esta aproximação seja bastante boa para as condições acima referidas, o grande entrave para o uso da mesma reside no facto ser necessário o cálculo da função coseno hiperbólico, o que a nível matemático não é muito fácil de fazer. Considera-se P_c calculado desta forma:

$$P_c = \frac{t \cdot \sigma}{\omega} \quad [\text{m}]. \quad (3.34)$$

Por este motivo, optou-se por simplificar a equação 3.33, desenvolvendo-a através de uma série de MacLaurin: [2] [3]

$$\begin{aligned} y &= P_c \cdot \left(\cosh\left(\frac{x}{P}\right) - 1 \right), \\ y &= P_c \cdot \left[\left(1 + \frac{x^2}{2 \cdot P^2} + \frac{x^4}{2 \cdot P^4} + \dots \right) - 1 \right], \\ \Leftrightarrow y &= P_c \cdot \left(\frac{x^2}{2 \cdot P^2} + \frac{x^4}{2 \cdot P^4} + \dots \right). \end{aligned} \quad (3.35)$$

De forma a facilitar o cálculo, e devido ao erro associado ser pequeno, opta-se por desprezar as potências de ordem igual ou superior a 4. [2]

$$\begin{aligned} y &= P_c \cdot \left(\frac{x^2}{2 \cdot P_c^2} \right), \\ \Leftrightarrow y &= \frac{x^2}{2 \cdot P_c}. \end{aligned} \quad (3.36)$$

Saliente-se que esta aproximação é válida para linhas eléctricas de vãos não muito grandes, sendo que normalmente se aceita esta representação para vãos até aos 500m, uma

22 Conceitos gerais sobre Linhas Aéreas

vez que a representação do cabo pela parábola introduz erros importantes quando consideramos vãos de tamanho elevados[3].

De referir ainda que, tanto a catenária, curva definida pela equação 3.33 como a parábola, definida pela equação 3.36, não são perfeitas, uma vez que os cabos não apresentam uma flexibilidade ideal, definida na curva da catenária e se consideraram as curvas estáveis, situação que não se verifica na realidade, uma vez que os cabos encontram-se expostos ao vento.

Depois de calculada a equação que traduz a curva, é fácil calcular a flecha. Sabendo que a flecha máxima ocorre a meio do vão, sabe-se que:

$$x = \frac{L}{2}.$$

e portanto,

$$y = \frac{\left(\frac{L}{2}\right)^2}{2.P_c}$$

$$\Leftrightarrow f_{\text{máx}} = y = \frac{L^2}{8.P_c} \quad [\text{m}] \quad (3.37)$$

Estas considerações são válidas no caso de se estar na presença de vãos em patamar, ou cuja diferença não seja muito significativa. No caso dos vãos em desnível, que apresentem declives consideráveis, é necessário adaptar a equação da catenária à nova situação.

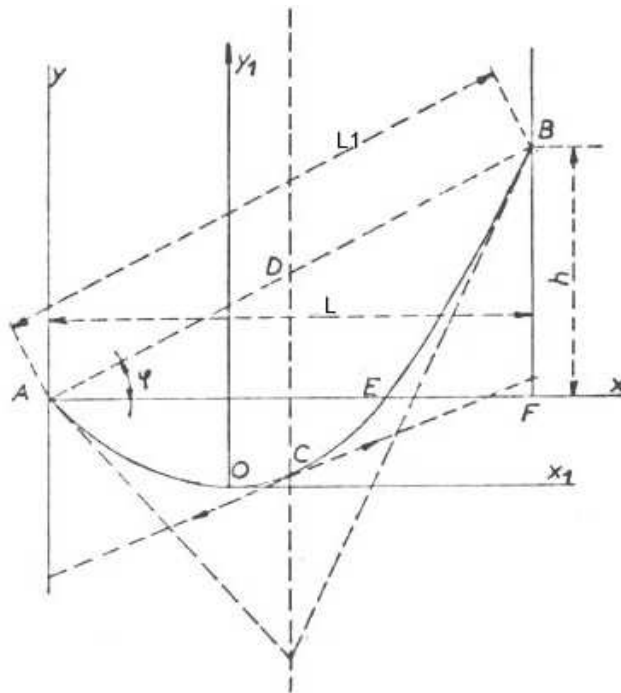


Figura 3.8 - Representação de um vão em desnível

Utilizando novamente como base a curva da catenária (representada pela equação 3.33) e considerando o ponto O a origem temos que [10]:

$$y_1 = P_c \cdot \cosh\left(\frac{x_1}{P_c}\right)$$

Realizando-se uma mudança de coordenadas, obtém-se a seguinte expressão:

$$y - y_1 = P_c \cdot \left(\cosh\left(\frac{x - x_1}{P_c}\right) \right)$$

Substituindo y_1 pela sua expressão temos:

$$y = P_c \cdot \left(\cosh\left(\frac{x - x_1}{P_c}\right) - \cosh\left(\frac{x_1}{P_c}\right) \right) \quad (3.38)$$

Estando novamente em presença de uma curva de difícil tratamento, desenvolve-se novamente a expressão em série, considerando apenas o primeiro termo:

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot P_c} - \frac{x \cdot x_1}{P_c}$$

Sendo as coordenadas do ponto B, (L, h), pode-se então calcular o valor do ponto mais baixo da curva x_1 .

$$h = \frac{L^2}{2 \cdot P_c} - \frac{L \cdot x_1}{P_c} \Leftrightarrow x_1 = \frac{L}{2} - P_c \cdot \frac{h}{L}$$

Ao substituir x_1 na expressão, a seguinte equação 3.39 que representa a parábola para vãos desnivelados:

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot P_c} - \left(\frac{L}{2 \cdot P_c} - \frac{h}{L} \right) \cdot x \quad (3.39)$$

Para se obter uma aproximação mais rigorosa da flecha para os vãos em desnível, utiliza-se para o cálculo o peso linear de cabo nos segmentos AF e AB, de comprimentos L e L_1 respectivamente [10].

$$L = L_1 \cdot \cos \varphi \Leftrightarrow \omega \cdot L = \omega \cdot L_1 \cdot \cos \varphi$$

O peso linear do cabo, referido ao segmento AF é dado por $\frac{\omega}{\cos \varphi}$.

Substituindo $P_c = \frac{t \cdot \sigma}{\omega}$ por $P_c \cdot \cos \varphi$ na expressão da flecha, e sabendo que $L = L_1 \cdot \cos \varphi$, chega-se a uma nova expressão, que será utilizada para vãos desnivelados [10]:

$$f = \frac{L \cdot L_1}{8P_c}. \quad (3.40)$$

3.3. Cálculo de Apoios

Os apoios no projecto de uma linha eléctrica de alta tensão são escolhidos de forma a assegurar certas condições impostas pelo R.S.L.E.A.T., nomeadamente as seguintes:

- Garantir as distâncias mínimas dos condutores ao solo;
- Garantir a distância entre condutores;
- Garantir que o apoio suporta os esforços exercidos por parte dos condutores, cabo de guarda, isoladores;
- Garantir que o apoio suporta outros equipamentos como são o caso de seccionadores e isoladores.

Os apoios obedecem também a factores económicos sendo que depois de cumpridas as funções acima mencionadas, tendem a ser utilizadas soluções normalizadas de forma a reduzir os custos com os mesmos.

Quanto à sua função, os apoios podem ser de diferentes tipos, a saber:

- Apoios de alinhamento;
- Apoios de ângulo;
- Apoios de derivação;
- Apoios de reforço em alinhamento;
- Apoios de reforço em ângulo;
- Apoios de reforço em derivação;
- Apoios de fim de linha.

Em relação ao material, o R.S.L.E.A.T. autoriza que os apoios sejam feitos de betão armado ou aço, sendo que outros materiais terão de ser previamente licenciados antes da sua aplicação na construção dos apoios.

Comparando os apoios metálicos e os apoios em betão armado pode-se referir que os apoios de betão armado possuem como vantagens, o facto de serem mais baratos que os apoios metálicos e ocuparem menos espaço. O facto de estes terem de ser transportados já na sua configuração final é um problema pois em certas situações, e devido ao tamanho necessário para alguns postes, é bastante complicado o transporte dos mesmos para o local de destino. Os apoios metálicos apresentam como vantagem o facto de serem montados no

local necessitando, no entanto, de bastante mais espaço para a sua montagem e sendo o seu preço superior.

3.4. Cálculo da rede de terras

Os condutores de terra devem possuir boa condutibilidade eléctrica sendo feitos em aço galvanizado, cobre ou outro material resistente à corrosão. No caso da ligação à terra dos descarregadores de sobretensão, há ainda que acrescentar o facto de os condutores de terra não poderem ser feitos de material magnético.

Os eléctrodos de terra devem ser enterrados em terrenos húmidos (de forma a facilitar a condutibilidade), afastados de locais de passagem e afastados de depósitos de substâncias corrosivas que possam comprometer as características do terreno. Devem ainda ter-se em conta as correntes de defeito que circulam pelos eléctrodos de terra de forma a prevenir a tensão de passo, perigosa para as pessoas que tenham acesso ao local.

Os apoios metálicos ou fabricados em betão armado devem ser ligados de forma individual à rede de terra, através de um eléctrodo de terra, sendo que no caso dos apoios de betão armado, os suportes metálicos dos isoladores também o devem ser. Existem no entanto excepções devidamente explicitadas no regulamento. Em relação à ligação dos outros equipamentos à rede de terra, é de salientar que a estrutura metálica dos aparelhos de corte, ou de manobra, estabelecidos nos apoios, deve ser ligada à terra dos apoios ou dos componentes metálicos dos isoladores, sendo que na base dos apoios, deve existir uma malha ou plataforma equipotencial com o punho de comando colocado debaixo da aparelhagem de corte ou manobra[5].

3.5. Cálculo de fundações

As fundações dos apoios de uma linha devem ser dimensionadas de forma a garantir a estabilidade do apoio ao nível do solo quando este é submetido a esforços mecânicos elevados. A função das fundações de um apoio é a de dissipar para o solo a energia que circula pelo apoio, de forma a garantir a estabilidade do mesmo e em último caso, evitar o derrube.

As fundações são escolhidas mediante as características do terreno, o tipo de apoio que estamos a projectar, os esforços a que está sujeito e a altura que o apoio possui.

Capítulo 4

Execução do projecto

Neste capítulo serão abordadas as diferentes etapas presentes no projecto de uma Linha Aérea de Alta Tensão, comentando-se alguns aspectos em que a teoria e a prática tendem a separar-se.

4.1. Entidades envolvidas no licenciamento de uma linha

A necessidade do projecto e da construção de nova uma linha de AT pode partir de uma necessidade imediata de exploração (necessidade de um cliente, por exemplo) ou pode vir da própria EDP, numa estratégia de exploração da rede [2]. Em qualquer uma das situações, é necessário o licenciamento junto do Ministério da Economia e Inovação, onde é obrigatória a apresentação do projecto para construção da Linha Aérea.

Quando recebe o Projecto, o Ministério remete-o às entidades que poderão ter interesse no mesmo a saber:

- Câmaras Municipais envolvidas,
- ANA - Aeroportos de Portugal,
- INAG - Instituto Nacional da Água,
- EP - Estradas de Portugal,
- IDAD - Instituto do Ambiente e Desenvolvimento,
- IPPA - Instituto Português do Património Arquitectónico

Se nenhuma destas entidades se pronunciar contra, o ministério emite uma licença que autoriza a construção, sendo que quando a mesma estiver concluída, será sujeita a vistoria. Caso esteja tudo em condições, é finalmente dado o aval final por parte do Ministério da Economia sendo assim atribuída a exploração.

4.2. Características do projecto de uma linha aérea de alta tensão

4.2.1. Definição do traçado da linha

Além das condições legais a que o traçado deve obedecer, há mais informações necessárias e relevantes a definir para o traçado de uma linha aérea. Após a definição de uma ideia de traçado, é necessário um levantamento topográfico do terreno, consistindo o mesmo no levantamento das características naturais do mesmo (relevo, cursos de água, declives acentuados, rochedos,...) assim como outras características (outras linhas eléctricas, linhas telefónicas, edifícios, parques, muros,...) que poderão condicionar o projecto e que poderão não estar devidamente assinaladas.

Esta tarefa é executada por uma equipa de topografia que acumula a responsabilidade do 1º contacto com os proprietários dos terrenos cujo traçado é abrangido pela linha.

Estas informações obtidas no terreno serão transmitidas ao Engenheiro que, estando na posse de todos os elementos, elabora um traçado provisório que será sujeito a aprovação por parte das entidades públicas e privadas envolvidas no processo.

Existem também certas recomendações que se devem seguir de forma a minimizar o impacto que envolve a construção de uma nova linha aérea. Devem-se ter em conta os acessos, o comprimento dos vãos (devem ser o mais uniformes possível), o cruzamento com linhas de água e com caminhos-de-ferro, e os limites das propriedades onde irão ser implementados os apoios (de forma a não inutilizar o terreno com um poste no meio do mesmo, por exemplo). Devem-se também ter em conta as características físicas do solo onde irão ser colocados os apoios, de forma a facilitar a implantação dos mesmos (evitar a colocação em formações rochosas, por exemplo). No entanto, o trajecto deve ser o mais rectilíneo, sempre que possível, utilizando vãos em patamar, situação que permite um melhor aproveitamento da resistência mecânica dos condutores e apoios, assim com a utilização de vãos maiores, resultando assim numa maior economia[9].

De referir, ainda, que na altura da construção o traçado da linha poderá sofrer algumas pequenas alterações, face ao previamente definido, fruto de situações que são imprevistas na altura do projecto.

4.2.2. Cálculo do comprimento da linha

Definido o traçado é possível determinar o comprimento da linha a projectar. Quanto maior for a linha, maiores serão as quedas de tensão e as perdas na linha, considerando condutores e níveis de tensão iguais.

4.2.3. Determinação das características eléctricas

A determinação da tensão de transporte, assim como a secção dos condutores é da responsabilidade do Planeamento da Gestão da Rede, estando definida no Artigo nº 83 do Decreto - Lei 43335, de 19 de Novembro de 1960.

Após a obtenção do traçado final da linha, calculam-se os valores da corrente em regime permanente, da resistência e indutância. Com estes dados, é possível calcular a queda de tensão e as perdas de energia na linha. Os apoios utilizados no projecto poderão ser apoios de betão ou apoios metálicos, consoantes os esforços aplicados nos apoios e as características do local onde os mesmos irão ser implantados. Calculam-se também os valores do campo eléctrico e campo magnético a 1,8m do nível do solo de forma a obedecer à Portaria n.º 1421/2004, de 23 de Novembro que regula os valores máximos destas duas grandezas ao nível da cabeça de um adulto (considerada a 1,8m do solo).

4.2.4. Cálculo das características mecânicas

- Estados atmosféricos e coeficientes de sobrecarga

Os estados atmosféricos considerados no projecto e dimensionamento mecânico da linha são caracterizados pelas condições climatéricas típicas de cada região atravessada (como a existência de gelo ou não), nível acima do mar, e velocidade do vento que habitualmente se faz sentir. Estas condições estão todas definidas no Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão e permitem o cálculo dos coeficientes de sobrecarga considerados para o estado-tipo de *Inverno* (estado em que a sobrecarga se deve às baixas temperaturas que causam a contracção dos condutores e a possível presença de gelo) e o estado de *Primavera* (estado em que a sobrecarga se deve ao aumento do vento).

- Vão crítico

O vão crítico (assim como os coeficientes de sobrecarga) deverá ser calculado, sempre que necessário, para os diferentes tipos de zonas existentes no nosso traçado de forma a ser definida em cada zona, qual o estado atmosférico mais desfavorável.

- Vão médio

O vão médio a utilizar no início do projecto da linha, é definido com base no conhecimento empírico do projectista ou por comparação com outros projectos já elaborados. O projectista deverá analisar o perfil e distribuir os apoios de forma equidistante. Esta distribuição deverá ainda ter em conta os diversos cantões formados, numa tentativa de no mesmo cantão, não obterem vãos muito desnivelados, equilibrando assim os esforços que cada apoio irá suportar.

Quando não é possível, por impossibilidade no terreno ou por conveniência em termos de projecto, deve-se no mínimo garantir que o desvio é inferior a 25% do vão médio do cantão.

- Parâmetro da curva e Transparências associadas

Como numa primeira fase o projecto é executado sem auxílio do programa ¹Clinhas, é necessário escolher as curvas que melhor se adaptam às condições atmosféricas existentes em cada zona e para vários valores de vão. Depois de definidos os vãos médios a utilizar, escolhem-se os parâmetros que melhor se adaptam aos vãos por nós escolhidos. As transparências utilizadas no projecto representam a curva da catenária, com parâmetros diferentes, sendo escolhidas diferentes curvas para as diferentes zonas obtidas. Estas transparências representam a flecha máxima verificada no cabo sujeito a uma determinada tensão mecânica, possibilitando a observação, e a garantia, de que as distâncias mínimas regulamentares ao solo e aos restantes obstáculos são cumpridas.

- Tensão mecânica nos cabos

Como foi referido no capítulo anterior, as tensões mecânicas máximas escolhidas para os condutores estão, normalmente, compreendidas entre os 7 e os 12 daN/mm². No entanto, os apoios de fim de linha irão estar sujeitos a esforços bastante elevados, pelo que poderá não haver apoios com capacidade para suportar o esforço aplicado. E mesmo que existam apoios disponíveis, não é aconselhável concentrar os esforços nestes 2 apoios.

Como solução para este problema, adopta-se o seguinte procedimento. Para os condutores adjacentes aos apoios de fim-de-linha (ou seja, no primeiro e no último vão) considera-se uma tensão mecânica inferior à utilizada no resto do projecto, resultando que o esforço aplicado, a apenas um apoio, será repartido por dois apoios (o apoio de fim-de-linha e o apoio seguinte).

- Afastamento dos condutores

A distância mínima de segurança entre condutores nus está definida por lei no Artigo nº 31 do R.S.L.E.A.T. Esta distância poderá ter implicações no tipo de apoios escolhidos e no tamanho dos vãos a utilizar. Uma vez que a distância entre condutores vem, usualmente, pré-definida nos catálogos dos fabricantes de apoios e como a distância entre condutores é função da flecha, poderá ser necessário reduzir o comprimento dos vãos, por forma a reduzir a flecha.

- Escolha dos apoios

Os apoios utilizados no projecto poderão ser apoios de betão ou apoios metálicos, consoantes os esforços aplicados aos mesmos e as características do local onde os mesmos irão ser implantados.

4.2.5. Cálculo das Características Eléctricas

Após a obtenção do traçado final da linha, calculam-se os valores da corrente em regime permanente, da resistência e indutância. Com estes dados, é possível calcular a queda

¹ Aplicação informática que nos permite realizar o cálculo mecânico e dimensionamento de apoios.

de tensão e as perdas de energia na linha. Calculam-se também os valores do campo magnético e eléctrico a 1,8m do nível do solo de forma a obedecer à portaria nº 1421/2004, de 23 de Novembro, que regula os valores máximos destas duas grandezas ao nível da cabeça de um adulto, considerada a 1,8m do solo.

4.2.6. Aspectos Construtivos

- Apoios

Durante a fase de construção da linha, os apoios são implantados no solo com recurso a fundações em maciços de betão enterrados em valas.

- Valas

A abertura das valas para a realização das fundações deve ser efectuada mediante uma prévia marcação do espaço. Aquando do fecho das mesmas, deve verificar-se o estado de compactação do terreno, de forma a garantir a estabilidade do terreno e a protecção das fundações.

- Condutores

Na montagem dos condutores, as seguintes precauções devem ser tomadas:

- Os condutores devem estar armazenados em locais isentos poeiras e fumos de forma a evitar a contaminação dos condutores por impurezas;
- Ao desenrolar os condutores devem evitar-se torções ou nós, assim como o contacto com o solo, evitando assim a sua danificação;
- A regulação dos condutores é feita através das flechas, cujos valores calculados são calculados para as temperaturas ambiente;
- As flechas podem apresentar uma tolerância de 3% durante a sua regulação. Se durante a montagem, as distâncias ao solo ou outros objectos for inferior à regulamentar, a situação deve ser reportada aos responsáveis pelo projecto.

- Regulação Mecânica

Durante o trabalho de montagem e regulação dos condutores, considera-se a ausência de gelo e de vento. Por este motivo, o coeficiente de sobrecarga é unitário e a tensão de montagem é obtida consoante a temperatura verificada.

Como durante a fase de projecto não se conhece o estado atmosférico que se irá verificar na altura da montagem dos condutores, calculam-se várias tensões mecânicas abrangendo uma vasta gama de temperaturas, consoante a região onde se encontra a linha.

Uma vez não ser possível medir directamente a tensão a que os condutores se encontram sujeitos, a regulação é efectuada com recurso à regulação da flecha, calculada com base na tensão mecânica obtida.

- Isoladores

A montagem dos isoladores deve seguir as indicações do fabricante dos mesmos sendo também necessária a limpeza dos mesmos, antes de serem colocados.

- Placas de advertência, numeração e sinalização de apoios

Os apoios devem ter afixado, em sítio visível, placas advertindo para o perigo de morte das instalações, sendo também obrigatório apresentarem a informação da posição do apoio em relação à linha.

Para vãos superiores a 500m, os apoios devem ser pintados e os vãos devem possuir bolas de sinalização, tipicamente nos cabos de guarda.

4.3. O factor “Experiência do projectista”

No projecto de linhas aéreas de alta tensão, o regulamento de segurança serve para impor como condições limites mínimas legais às quais o projecto necessita de obedecer de forma a ser aprovado e que levará depois ao licenciamento da linha. No entanto, o projecto não se rege apenas pelo regulamento e sim pelas condições definidas pelo projectista. Como exemplo, pode-se referir que no projecto realizado, a correcção da temperatura é realizada para 80° C e não para os 65° C impostos pelo regulamento. Estes limites tendem assim a aumentar as margens de segurança do projecto e a uniformizar procedimentos, salvaguardando ao mesmo tempo situações excepcionais.

No entanto em certas situações, as condições por nós impostas poderão não ser as ideais. Quando estamos perante uma destas ocasiões, a o truque é garantir que a solução escolhida respeita a legislação imposta pelo regulamento. No entanto estas situações deverão ocorrer pontualmente e deverão ser evitadas, uma vez que quando se realiza um projecto, deverá manter-se a coerência e os princípios adoptados deverão ser uniformes para todo o projecto.

4.4. Competências do Projectista

O projectista, durante o projecto e execução de uma obra, assume o papel de técnico e de gestor de equipa. Além de lhe pertencer a responsabilidade técnica do projecto, ele assume também a gestão de uma equipa, desde a equipa de topografia, até aos fiscais que estão a acompanhar a obra no terreno.

Está à sua responsabilidade o contacto com proprietários e entidades que sejam parte interessada nos projectos que estão a seu cargo (Câmaras Municipais, Juntas de Freguesia,

Proprietários privados) assim como a submissão dos projectos ao Ministério da Economia e Inovação para aprovação dos mesmos.

Durante a fase de projecto e durante a fase de construção, é usual o Engenheiro deslocar-se ao terreno para tirar dúvidas sobre o traçado (na fase de projecto) e para acompanharem a evolução dos trabalhos (na fase de construção).

Como se pode perceber, a tarefa do Engenheiro, é mais do que realizar apenas o projecto, englobando áreas como a gestão de recursos humanos assim como a gestão de obra.

4.5. Estimativa orçamental e caderno de encargos

Seguidamente ao projecto, é necessário determinar o custo global da obra, procedendo-se desta forma a uma estimativa orçamental que engloba quantidades de materiais e custos dos mesmos, mão-de-obra e os custos de instalação. Estes valores não se consideram fixos podendo variar de zona para zona em diferentes projectos.

Em seguida, é criado um caderno de encargos, fundamental para que se possa abrir concurso destinado a empresas que se queiram candidatar à construção da linha. Além das condições técnicas que se exigem aos concorrentes, é também explicitado quais as condições jurídicas, financeiras e administrativas a que o concurso, e conseqüentemente os concorrentes se encontram sujeitos e terão de respeitar.

Capítulo 5

Memória Descritiva e Justificativa

5.1. Características da Linha

A linha em estudo terá um comprimento total de 8074 metros. É uma linha dupla constituída por 6 condutores Alumínio-Aço com 326,6 mm² (AL-AÇO 326) e cabo de guarda também em Alumínio-Aço com 127,5 mm² (Guinea AL-Aço 127), em toda a extensão. Nos documentos em anexo encontram-se as plantas do perfil longitudinal, designadas por “Perfil Longitudinal e Planta Parcelar” que contêm o perfil da linha e a planta topográfica do terreno que contêm o traçado da linha.

Na Tabela 5.2 encontram-se as características principais dos dois cabos a utilizar no projecto:

Tabela 5.2 - Características do condutor e cabo de guarda

Designação	AL-AÇO326		AL-AÇO 127	
Secção [mm ²]	326,6		127,5	
Diâmetro [mm]	23,45		14,93	
Peso [daN/m]	1,219		0,59	
Módulo de Young [daN/mm ²]	7850		10546	
Coef. Dil. Linear [°C ⁻¹]	1,77E-05		1,53E-05	
Tensão de Ruptura [daN]	11270		0,589	
Tensão Máxima [daN/mm ²]	12		18	
Resistência a 20°C [Ω/km]	0,1093		0,3578	
Constituição	Alumínio	Aço	Alumínio	Aço
	30x3,35	7x3,35	12x2,92	7x2,92
Secção [mm ²]	264,4	61,7	80,4	46,9
Diâmetro [mm]	3,35	3,35	2,92	2,92

5.2. Cálculo Mecânico

5.2.1. Cálculos Prévios

O condutor e o cabo de guarda deverão ser montados de modo a que a tracção máxima a que fiquem sujeitos não ultrapasse, nas condições mais desfavoráveis, descritas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Tensões máximas e mangas de gelo consideradas para os diferentes cantões

Zonas	Tensões mecânicas máximas [daN/mm ²]		Manga de gelo [mm ²]
	Condutor	Cabo de guarda	
Entre os apoios 1 e 2	5	9	18
Entre os apoios 2 e 24	8	14	18
Entre os apoios 24 e 32	8	14	16
Entre os apoios 32 e 33	8	14	14
Entre os apoios 33 e 43	8	14	16
Entre os apoios 43 e 47	8	14	18
Entre os apoios 43 e 48	5	9	18

No projecto, utilizou-se como tensão mecânica máxima para os condutores, o valor de 8 daN/mm² uma vez que nos encontramos perante um traçado bastante irregular, agravado pelo facto de a linha se desenvolver integralmente em zona de gelo. Note-se que estamos em presença de uma linha de montanha, pelo que não existem vantagens em aumentar a tensão mecânica uma vez que os vãos não poderão ser muito longos.

A tensão mecânica utilizada entre os vãos adjacentes aos apoios de fim-de-linha foi fixada em 5 [daN/mm²], para os condutores, e em 9 [daN/mm²] para o cabo de guarda. Foram utilizados estes valores de forma a repartir o esforço dos apoios de fim-de-linha pelo apoio seguinte.

Tratando-se de uma zona de gelo, é preciso especificar a manga de gelo presente em cada uma das zonas, uma vez que a manga de gelo a considerar depende da altura do local em relação ao nível do mar. Os valores das mangas de gelo associadas às alturas correspondentes encontram-se na Tabela 5.4:

Tabela 5.4 - Altitude e manga de gelo associada

Cota [m]	Espessura da manga de gelo [mm ²]
Entre os 700m e os 900m	14
Entre os 900m e os 1100m	16
Entre os 1100m e os 1300m	18

De seguida, é necessário calcular o estado atmosférico mais desfavorável, para cada uma das diferentes zonas. A Tabela 5.5 apresenta os 3 estados atmosféricos considerados e a caracterização dos mesmos

Tabela 5.5 - Caracterização dos estados atmosféricos

Estados atmosféricos	Temperatura [°C]	Pressão dinâmica do vento [Pa]
1 - Inverno	-10	432
2 - Primavera	15	1080
3 - Verão	80	0

5.2.2. Determinação do estado atmosférico e coeficientes de sobrecarga

Determinação do estado atmosférico mais desfavorável entre os 700 e os 900 metros de altitude:

Através da equação 3.27, transcrita do capítulo 3 para este, calcula-se a força do vento sobre um condutor:

$$F_v = \alpha \cdot c \cdot q \cdot d \quad [\text{daN/m}],$$

$$F_{1,CD} = 0,6 * 1,0 * 43,2 * (23,45 + 2 * 14) \times 10^{-3} = 1,333 \quad [\text{daN/m}],$$

$$F_{2,CD} = 0,6 * 1,0 * 108 * 23,45 * 10^{-3} = 1,519 \quad [\text{daN/m}].$$

onde:

$F_{1,CD}$ - Força do vento sobre o condutor no estado-tipo de *Inverno*,

$F_{2,CD}$ - Força do vento sobre o condutor no estado-tipo de *Primavera*,

Pela equação 3.29, o coeficiente de sobrecarga é:

$$m = \frac{\sqrt{\left(\omega + \frac{\omega_{\text{gelo}} \cdot \pi}{4} \cdot ((d + 2 \cdot e)^2 - d^2)\right)^2 + F^2}}{\omega},$$

$$m_{1,CD} = \frac{\sqrt{\left(1,219 + \frac{900 \cdot \pi}{4} \cdot ((23,45 + 2 * 14) * 10^{-3})\right)^2 + 1,333^2}}{1,219} = 2,471,$$

$$m_{2,CD} = \frac{\sqrt{1,219^2 + 1,519^2}}{1,219} = 1,598,$$

considerando que:

$m_{1,CD}$ - Sobrecarga no condutor no estado-tipo de *Inverno*,

$m_{2,CD}$ - Sobrecarga no condutor no estado-tipo de *Primavera*.

De forma análoga, teremos para o cabo de guarda:

Força do vento sobre Cabo de Guarda:

$$F_v = \alpha \cdot c \cdot q \cdot d \quad [daN / m]$$

$$F_{1,CG} = 0,6 * 1,1 * 43,2 * (14,63 + 2 * 14) \times 10^{-3} = 1,215 \quad [daN / m],$$

$$F_{2,CG} = 0,6 * 1,1 * 108 * 14,63 * 10^{-3} = 1,043 \quad [daN / m],$$

onde:

$F_{1,CG}$ - Força do vento sobre o cabo de guarda no estado-tipo de *Inverno*,

$F_{2,CG}$ - Força do vento sobre o cabo de guarda no estado-tipo de *Primavera*,

Coefficiente de Sobrecarga:

$$m = \frac{\sqrt{\left(\omega + \frac{\omega_g \cdot \pi}{4} \cdot ((d + 2 \cdot e)^2 - d^2)\right)^2 + F^2}}{\omega},$$

$$m_{1,CG} = \frac{\sqrt{\left(1,219 + \frac{900 \cdot \pi}{4} \cdot ((14,63 + 2 \cdot 14) \cdot 10^{-3})\right)^2 + 1,215^2}}{1,219} = 2,172,$$

$$m_{2,CG} = \frac{\sqrt{1,219^2 + 1,043^2}}{1,219} = 1,316.$$

em que:

$m_{1,CG}$ - Sobrecarga no cabo de guarda no estado-tipo de *Inverno*,

$m_{2,CG}$ - Sobrecarga no cabo de guarda no estado-tipo de *Primavera*.

Em seguida, na Tabela 5.6, apresenta-se um quadro-resumo, com o resultado dos diferentes coeficientes de sobrecarga para as diferentes zonas e estados atmosféricos do cabo de guarda e do condutor:

Tabela 5.6 - Coeficientes de Sobrecarga

Cota [m]	Estado Atmosférico			
	Condutor		Cabo de guarda	
	Inverno	Primavera	Inverno	Primavera
entre os 700m e os 900m	2,471	1,519	3,574	2,031
entre os 900m e os 1100m	2,732		4,036	
entre os 1100m e os 1300m	3,009		4,532	

Cálculo do vão crítico:

O vão crítico é calculado recorrendo à equação 3.30:

$$f = \frac{\sigma \cdot t_{\max}}{\omega} \sqrt{\frac{24 \cdot \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{m_2^2 - m_1^2}} \quad [\text{m}]$$

No nosso caso não é necessário o cálculo do vão crítico, uma vez que através da consulta da árvore da decisão, presente na Figura 3.6, na página 19, facilmente se percebe que o estado mais desfavorável para as três zonas será o estado de Inverno ($m_1 > m_2$).

5.2.3. Determinação da Tensão de Montagem e da Flecha Máxima para o condutor Al-Aço 326

Como no nosso exemplo temos um cantão, é necessário calcular primeiro o vão fictício equivalente do cantão de pela expressão 3.31, utilizada novamente neste capítulo:

$$L_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{\sum_i L_i^3}{\sum_i L_i}} \quad [\text{m}].$$

De seguida apresenta-se o cálculo do vão fictício equivalente para o cantão nº 6, formado pelos vãos desde o apoio nº 17, até ao apoio nº 24:

$$L_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{195^3 + 195^3 + 188^3 + 195^3 + 172^3 + 137^3 + 170^3}{195 + 195 + 188 + 195 + 172 + 137 + 170}} = 181,98 \quad [\text{m}].$$

Para o mesmo cantão, e recorrendo à equação 3.32, eis o cálculo da tracção para o estado tipo *Verão*:

$$\theta_i + \frac{t_i}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_i^2 \cdot \omega_{\text{CD}}^2 \cdot L_{\text{eq}}^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_i^2} = \theta_k + \frac{t_k}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_k^2 \cdot \omega_{\text{CD}}^2 \cdot L_{\text{eq}}^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_k^2}$$

Estado tipo *Verão*:

$$m_i = 1$$

$$\theta_i = 80 \quad [^\circ\text{C}]$$

$$t_i = ?$$

Estado mais Desfavorável:

$$m_k = m_1 = 3,009$$

$$\theta_k = -10 \quad [^\circ\text{C}]$$

$$t_k = t_{\max} = 8 \quad [\text{daN}/\text{mm}^2]$$

Substituindo na equação de estados, os valores dos parâmetros pelos valores adequados, temos:

$$80 + \frac{t_i}{1,77 * 10^{-5} * 7850} - \frac{1 * 1,219^2 * 181,98^2}{24 * 1,77 * 10^{-5} * 326,6^2 * t_i^2} =$$

$$= -10 + \frac{8}{1,77 * 10^{-5} * 7580} - \frac{3,009^2 * 1,219^2 * 181,98^2}{24 * 1,77 * 10^{-5} * 326,6^2 * 8^2} \Leftrightarrow t_i = 2,31 \text{ [daN/mm}^2\text{]}$$

Neste caso escolheu-se a temperatura de 80°C, temperatura que representa o estado tipo *Verão*. No entanto, se necessitarmos de obter as tensões mecânicas de montagem, as mesmas calculam-se para o valor de temperatura a considerar no estado de montagem.

Obtida a tensão a que o cabo está sujeito no estado-tipo *Verão*, é possível obter o parâmetro do vão fictício equivalente e a distância mínima a que os condutores estarão do solo por forma a verificar se é ou não cumprida a condição regulamentar.

Recorrendo à equação 3.34 calculamos o parâmetro da curva:

$$P_c = \frac{t_i \cdot \sigma}{\omega} \text{ [m]},$$

$$P_c = \frac{2,31 * 326,6}{1,219} = 619,27 \text{ [m]}.$$

Então, a equação da parábola é dada pela seguinte equação:

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot P_c} = \frac{x^2}{2 * 619,27}$$

Determinação da Flecha Máxima

A Flecha Máxima é obtida no estado-tipo *Verão* porque é nesse estado que ela é mais desfavorável, devido à dilatação dos cabos. Ela é dada pela seguinte expressão:

$$f = \frac{m \cdot w \cdot L^2}{8 \cdot \sigma \cdot t} \text{ [m]}$$

Assim, para o nosso caso vem:

$$f_{\text{máx}} = \frac{1 * 1,219 * 181,98^2}{8 * 326,6 * 2,31} = 7,68 \text{ [m]}$$

Em seguida apresenta-se um quadro com os resultados obtidos para todos os cantões:

Tabela 5.7 - Características dos cantões do Projecto para o condutor

Cantão	Formação	Vão fictício [m]	t _{mec} [daN/mm ²]	Parâmetro [m]	² Flecha Máxima [m]
1	do apoio 1 ao 2	100,00	1,34	359,22	5,57
2	do apoio 2 ao 5	158,54	2,23	598,62	5,55
3	do apoio 5 ao 8	177,41	2,39	640,43	7,42
4	do apoio 8 ao 14	181,86	2,31	620,03	7,67
5	do apoio 14 ao 17	199,01	2,36	632,36	7,91
6	do apoio 17 ao 24	180,90	2,31	619,27	7,68
7	do apoio 24 ao 32	170,40	2,43	651,62	7,29
8	do apoio 32 ao 33	214,00	2,77	742,32	7,71
9	do apoio 33 ao 36	193,49	2,52	674,49	7,79
10	do apoio 36 ao 41	175,74	2,45	657,46	7,61
11	do apoio 41 ao 42	203,00	2,55	682,34	7,55
12	do apoio 42 ao 43	203,00	2,55	682,34	7,55
13	do apoio 43 ao 47	138,13	2,14	573,92	4,90
14	do apoio 47 ao 48	123,00	1,43	123,00	4,95

5.2.4. Determinação da tensão de montagem e flecha máxima para o cabo de guarda AL-AÇO 127

De forma análoga ao que se fez anteriormente, e uma vez que o valor do vão fictício equivalente é o mesmo para o cabo de guarda, apresenta-se o cálculo da tensão para o estado de flecha máxima, ou seja, para o estado tipo *Verão*, para o mesmo cantão.

$$\theta_i + \frac{t_i}{\alpha \cdot E} - \frac{m_i^2 \cdot \omega_{CG}^2 \cdot L_{eq}^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_i^2} = \theta_k + \frac{t_k}{\alpha \cdot E} - \frac{m_k^2 \cdot \omega_{CG}^2 \cdot L_{eq}^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_k^2}$$

² Flecha máxima do maior vão presente no cantão

Estado de Montagem:

$$\begin{aligned} m_i &= 1 \\ \theta_i &= 80 \text{ [}^\circ\text{C]} \\ t_i &= ? \end{aligned}$$

Estado mais Desfavorável:

$$\begin{aligned} m_k &= m_1 = 4,53 \\ \theta_k &= -10 \text{ [}^\circ\text{C]} \\ t_k &= t_{\max} = 14 \text{ [daN/mm}^2\text{]} \end{aligned}$$

Substituindo na Equação de Estados,

$$\begin{aligned} 80 + \frac{t_i}{1,53 \cdot 10^{-5} \cdot 10546} - \frac{1 \cdot 0,59^2 \cdot 181,98^2}{24 \cdot 1,53 \cdot 10^{-5} \cdot 127,5^2 \cdot t_i^2} &= \\ = -10 + \frac{14}{1,53 \cdot 10^{-5} \cdot 10546} - \frac{4,53^2 \cdot 0,59^2 \cdot 181,98^2}{24 \cdot 1,53 \cdot 10^{-5} \cdot 127,5^2 \cdot 14^2} &\Leftrightarrow t_i = 2,94 \text{ [daN/mm}^2\text{]}. \end{aligned}$$

Depois de se obter a tensão mecânica a que o cabo está sujeito no estado tipo *Verão*, é possível obter o parâmetro do vão fictício equivalente e a flecha máxima apresentada pelos cabos de guarda irão de forma a verificar se é ou não cumprida a condição regulamentar.

Parâmetro da Parábola:

$$\begin{aligned} P_c &= \frac{t_i \cdot \sigma}{\omega}, \\ P_c &= \frac{2,94 \cdot 127,5}{0,59} = 634,44 \text{ [m]}. \end{aligned}$$

Então, a equação da parábola é dada pela seguinte equação:

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot P_c} = \frac{x^2}{2 \cdot 634,44}.$$

Determinação da Flecha Máxima

A flecha máxima é obtida no estado-tipo *Verão* porque é nesse estado que ela é mais desfavorável, devido à dilatação dos cabos. Ela é dada pela seguinte 3.37, a transcrita para facilitar a compreensão:

$$f_{\max} = \frac{m \cdot w \cdot L^2}{8 \cdot \sigma \cdot t} \text{ [m]}$$

Assim, para o nosso caso vem:

$$f_{\max} = \frac{1 \cdot 0,59 \cdot 181,98^2}{14 \cdot 127,5 \cdot 2,94} = 7,49 \text{ [m]}$$

Em seguida apresenta-se um quadro com os resultados obtidos para os restantes vãos:

Tabela 5.8 - Características dos cantões do Projecto para o cabo de guarda

Cantão	Formação	Vão fictício [m]	t _{mec} [daN/mm ²]	Parâmetro [m]	¹ Flecha Máxima [m]
1	do apoio 1 ao 2	100,00	1,74	375,77	5,32
2	do apoio 2 ao 5	158,54	2,90	625,81	5,31
3	do apoio 5 ao 8	177,41	3,03	655,68	7,25
4	do apoio 8 ao 14	181,86	2,94	634,75	7,49
5	do apoio 14 ao 17	199,01	2,96	639,66	7,82
6	do apoio 17 ao 24	180,90	2,94	634,44	7,49
7	do apoio 24 ao 32	170,40	3,21	694,63	6,84
8	do apoio 32 ao 33	214,00	3,65	789,81	7,25
9	do apoio 33 ao 36	193,49	3,26	705,39	7,45
10	do apoio 36 ao 41	175,74	3,23	697,43	7,17
11	do apoio 41 ao 42	203,00	3,28	708,95	7,27
12	do apoio 42 ao 43	203,00	3,28	708,95	7,27
13	do apoio 43 ao 47	138,13	2,85	614,81	4,57
14	do apoio 47 ao 48	123,00	1,81	391,25	4,83

5.2.5. Definição do tipo de fixação dos condutores

Para determinarmos os pontos de implantação dos apoios, utilizar-se-á o Método do Transparente. Este método consiste em aplicar o transparente com a parábola de forma a traçar as curvas da linha.

Após determinar os pontos onde serão implantados apoios é necessário definir o tipo de fixação dos condutores. Para o nosso caso, a situação é a mostrada na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Apoios e Fixação dos condutores

Apoios	Tipo de apoio	Fixação dos condutores
1,48	Fim-de-Linha	Amarração
5,14,17,33,42	Ângulo	Amarração
2,8,24,32,36,41,43,47	Alinhamento	Amarração
4,7,9,10-13,15,16,18-23,26-31,34,35,37-40,44-46	Alinhamento	Suspensão

As Cadeias de amarração terão 6 isoladores do tipo U100BS. Na tabela seguinte estão apresentadas as características dos mesmos:

Tabela 5.10 - Características dos isoladores

Tipo de isolador		UBS100BS
Dimensões [mm]	Diâmetro do espigão	16
	Passo	130
	Diâmetro	255
	Comprimento da linha de fugas	320
Características Eléctricas [kV]	Tensão Suportável a seco	70
	Tensão Suportável a sob a chuva	40
	Tensão de perfuração	100
Peso		4,1
Cor		Cinzento

5.2.6. Dimensionamento de Apoios

No nosso caso, como se viu na Tabela 5.9 teremos os seguintes tipos de apoios:

- Apoios de Fim-de-Linha,
- Apoios de Alinhamento,
- Apoios de Ângulo.

Para o dimensionamento de apoios, é necessário calcular os esforços que estão presentes em cada apoio.

Dimensionamento de um apoio de Fim-de-Linha.

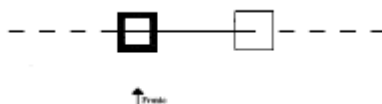


Figura 5.9 - Representação de um apoio de Fim-de-Linha

Para o cálculo foi escolhido o Apoio nº1:

Esforços actuantes considerados:

A tracção exercida por um condutor no apoio calcula-se da seguinte forma:

$$T_{CD_x} = t_{max} \cdot \sigma \quad [\text{daN}]. \quad (5.1)$$

A influência no apoio da força do vento exercida no condutor é dada por:

$$F_{V_CD} = \alpha \cdot c \cdot q \cdot S \quad [\text{daN}].$$

A influência no apoio do peso do condutor é dada por:

$$P_{CD} = \left(\omega_{CD} + \frac{\omega_g \cdot \pi}{4} \cdot ((d + 2 \cdot e)^2 - d^2) \right) \cdot \frac{L}{2} \quad [\text{daN}].$$

Para o cabo de guarda a formulação é a mesma; apenas a designação é diferente sendo a tracção, a força do vento e o peso, representados por T_{CG_x} , F_{V_CG} , P_{CG} respectivamente. Para as cadeias de isoladores, F_{V_ISO} e P_{ISO} representam a influência no apoio da força do vento sobre a cadeia de isoladores e o peso da cadeia de isoladores.

- Esforços no apoio relativamente ao eixo do x, sentido longitudinal da linha.

Para um condutor temos:

$$T_{CD_x} = t_{max} \cdot \sigma = 5 \cdot 326,6 = 1633 \quad [\text{daN}].$$

Analogamente, no cabo de guarda temos:

$$T_{CG_x} = t_{max} \cdot \sigma = 9 \cdot 127,5 = 1147,50 \quad [\text{daN}].$$

- Esforços relativamente ao eixo y, sentido transversal à linha.

Para um condutor temos:

$$F_{V_CD} = \alpha.c.q.S = 0,6 * 1 * 108 * 0,02345 * \frac{100}{2} = 75,98 \quad [\text{daN}].$$

Para o cabo de guarda temos:

$$F_{V_CG} = \alpha.c.q.S = 0,6 * 1,1 * 108 * 0,01463 * \frac{100}{2} = 52,14 \quad [\text{daN}].$$

Para uma cadeia de isoladores temos:

$$F_{V_isol} = 30 \quad [\text{daN}].$$

- Esforços relativamente ao eixo z, direcção vertical.

Para um condutor:

$$P_{CD} = \left(\omega + \frac{\omega_{\text{gelo}} \cdot \pi}{4} \cdot ((d + 2 \cdot e)^2 - d^2) \right) \cdot \frac{L}{2} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow P_{CD} = \left(1,219 + \frac{900 \cdot \pi}{4} \cdot ((0,2345 + 2 \cdot 0,018)^2 - 0,02345^2) \right) \cdot \frac{100}{2} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow P_{CD} = 166,43 \quad [\text{daN}].$$

Para o cabo de guarda:

$$P_{CG} = \left(\omega + \frac{\omega_{\text{gelo}} \cdot \pi}{4} \cdot ((d + 2 \cdot e)^2 - d^2) \right) \cdot \frac{L}{2} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow P_{CG} = \left(0,59 + \frac{900 \cdot \pi}{4} \cdot ((0,01463 + 2 \cdot 0,018)^2 - 0,01463^2) \right) \cdot \frac{100}{2} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow P_{CG} = 112,53 \quad [\text{daN}].$$

Para uma cadeia de isoladores temos:

$$P_{isol} = 30 \quad [\text{daN}].$$

Para o cálculo dos esforços totais no apoio, com o intuito de se escolher o mesmo, o R.S.L.E.A.T impõe que se calculem os esforços causados considerando duas hipóteses distintas. A escolha do apoio deve ser feita de modo a suportar a situação mais desfavorável:

Hipótese 1:

$$F_{x1} = n^{\circ}_{CD} \cdot T_{CD} + T_{CG} = 6 \cdot 1633 + 1147,50 = 10945,50 \quad [\text{daN}] \quad (5.2)$$

$$F_{y1} = n^{\circ}_{CD} \cdot F_{CD} + n^{\circ}_{Isol} \cdot F_{Isol} + F_{CG} = 6 \cdot 75,98 + 6 \cdot 30 + 52,14 = 688,01 \quad [\text{daN}] \quad (5.3)$$

$$F_{z1} = n^{\circ}_{CD} \cdot P_{CD} + n^{\circ}_{Isol} \cdot P_{Isol} + P_{CG} = 6 \cdot 166,43 + 6 \cdot 30 + 112,53 = 1471,10 \quad [\text{daN}] \quad (5.4)$$

F_{x1} , F_{y1} e F_{z1} são respectivamente os somatórios dos esforços longitudinais, transversais e verticais no apoio, considerados na hipótese 1.

Hipótese 2

$$F_{x2} = \frac{1}{5} \cdot (n^{\circ}_{CD} \cdot F_{CD} + F_{CG}) = \frac{1}{5} \cdot (6 \cdot 75,98 + 52,14) = 91,17 \quad [\text{daN}]$$

$$F_{y2} = 0 \quad [\text{daN}]$$

$$F_{z2} = n^{\circ}_{CD} \cdot P_{CD} + n^{\circ}_{Cad.Isol} \cdot P_{Isol} + P_{CG} = 6 \cdot 166,43 + 6 \cdot 30 + 112,53 = 1471,10 \quad [\text{daN}]$$

F_{x2} , F_{y2} e F_{z2} são respectivamente os somatórios dos esforços longitudinais, transversais e verticais no apoio, considerados na hipótese 2.

A hipótese 1 é a pior das duas hipóteses, então o esforço total será:

$$F_H = F_{x1} + F_{y1} = 10945,50 + 688,01 = 11633,51 \quad [\text{daN}],$$

$$F_V = F_{z1} = 1471,10 \quad [\text{daN}],$$

sendo F_H e F_V respectivamente os esforços horizontais e verticais no apoio.

O apoio escolhido foi o P12000/20 EV3 cujos esforços horizontais e verticais suportados são respectivamente 12000 daN e 4900 daN. Foi ainda verificado que em nenhum ponto de aplicação dos condutores ou cabo de guarda excede é excedido o valor de 700 daN, esforço máximo permitido por ponto de aplicação.

Dimensionamento de um Apoio em Alinhamento

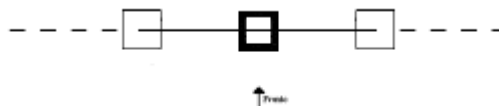


Figura 5.10 - Representação de um apoio em Alinhamento

Para o cálculo foi escolhido o Apoio 2:

Esforços actuantes considerados:

Esforços relativamente ao eixo x

Para um condutor temos:

$$T_{CD_x} = \sigma \cdot |t_{\max 1} - t_{\max 2}| = 326,6 * |5 - 8| = 979,8 \quad [\text{daN}].$$

Para o cabo de guarda:

$$T_{CG_x} = \sigma \cdot |t_{\max 1} - t_{\max 2}| = 127,5 * |8 - 14| = 673,5 \quad [\text{daN}].$$

Esforços relativamente ao eixo y

Para um condutor:

$$F_{V_CD} = \alpha \cdot c \cdot q \cdot S = 0,6 * 108 * 0,02345 * \frac{100 + 152}{2} = 191,46 \quad [\text{daN}].$$

Para cabo de guarda:

$$F_{V_CG} = \alpha \cdot c \cdot q \cdot S = 0,6 * 1,1 * 108 * 0,01463 * \frac{100 + 152}{2} = 131,40 \quad [\text{daN}].$$

Para uma cadeia de isoladores:

$$F_{V_isol} = 30[\text{daN}].$$

Esforços relativamente ao eixo z

Para um condutor:

$$P_{CD} = \left(\omega + \frac{\omega_{\text{gelo}} \cdot \pi}{4} \cdot ((d + 2 \cdot e)^2 - d^2) \right) \cdot \frac{L}{2} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow P_{CD} = \left(1,219 + \frac{900 * \pi}{4} * ((0,2345 + 2 * 0,018)^2 - 0,02345^2) \right) \cdot \frac{100 + 152}{2} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow P_{CD} = 419,40 \quad [\text{daN}].$$

Para o cabo de guarda:

$$P_{CG} = \left(\omega + \frac{\omega_{\text{gelo}} \cdot \pi}{4} \cdot ((d + 2 \cdot e)^2 - d^2) \right) \cdot \frac{L}{2} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow P_{CG} = \left(0,59 + \frac{900 * \pi}{4} * ((0,01463 + 2 * 0,018)^2 - 0,01463^2) \right) \cdot \frac{100 + 152}{2} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow P_{CG} = 283,58 \quad [\text{daN}].$$

Para uma cadeia de isoladores:

$$P_{\text{isol}} = 30 \quad [\text{daN}].$$

Os esforços totais relativamente aos eixos x, y e z são:

Hipótese 1

$$F_{x1} = n^{\circ}_{\text{CD}} \cdot T_{\text{CD}} + T_{\text{CG}} = 6 \cdot 979,80 + 637,50 = 6516,30 \quad [\text{daN}]$$

$$F_{y1} = n^{\circ}_{\text{CD}} \cdot F_{\text{CD}} + n^{\circ}_{\text{isol}} \cdot F_{\text{isol}} + F_{\text{CG}} = 6 \cdot 191,46 + 6 \cdot 2 \cdot 30 + 131,40 = 1640,18 \quad [\text{daN}]$$

$$F_{z1} = n^{\circ}_{\text{CD}} \cdot P_{\text{CD}} + n^{\circ}_{\text{isol}} \cdot P_{\text{isol}} + P_{\text{CG}} = 6 \cdot 419,40 + 2 \cdot 6 \cdot 30 + 283,58 = 3159,97 \quad [\text{daN}]$$

Hipótese 2

$$F_{x2} = \frac{1}{5} (n^{\circ}_{\text{CD}} \cdot F_{\text{CD}} + F_{\text{CG}}) = \frac{1}{5} (6 \cdot 191,46 + 131,40) = 256,03 \quad [\text{daN}]$$

$$F_{y2} = 0 \quad [\text{daN}]$$

$$F_{z2} = n^{\circ}_{\text{CD}} \cdot P_{\text{CD}} + n^{\circ}_{\text{isol}} \cdot P_{\text{isol}} + P_{\text{CG}} = 6 \cdot 419,40 + 2 \cdot 6 \cdot 30 + 283,58 = 3159,97 \quad [\text{daN}]$$

A hipótese 1 é a pior das duas hipóteses, então o esforço total será:

$$F_H = F_{x1} + F_{y1} = 6516,30 + 1640,18 = 8156,48 \quad [\text{daN}],$$

$$F_V = F_{z1} = 3159,97 \quad [\text{daN}].$$

O apoio escolhido foi o P9000/18 EV3 cujos esforços horizontais e verticais suportados são respectivamente 9000 daN e 4900 daN. Foi ainda verificado que em nenhum ponto de aplicação dos condutores ou cabo de guarda é excedido o valor de 700 daN, esforço máximo permitido por ponto de aplicação.

Apoios de Ângulo

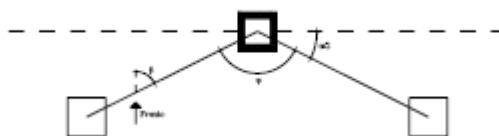


Figura 5.11 - Representação de um apoio de ângulo

Cálculos dos ângulos:

Φ - ângulo entre os apoios,

$$\frac{\alpha}{2} = \frac{180^{\circ} - \beta}{2} \quad [^{\circ}],$$

$$\beta = 90^\circ - \frac{\alpha}{2} \quad [^\circ].$$

Para o cálculo foi escolhido o Apoio 5

Ângulos:

$$\varphi = 153,801^\circ,$$

$$\beta = 76,900^\circ,$$

$$\alpha_l / 2 = 13,099^\circ.$$

Esforços actuantes considerados:

Esforços relativamente ao eixo x

Para cada condutor temos:

$$T_{CG_x} = \sigma \cdot \cos(\alpha / 2) \cdot |t_{\max 1} - t_{\max 2}| = 326,1 * \cos(13,099^\circ) * (8 - 8) = 0 \quad [\text{daN}].$$

Para o cabo de guarda temos:

$$T_{CG_x} = \sigma \cdot \cos(\alpha / 2) \cdot |t_{\max 1} - t_{\max 2}| = 127,2 * \cos(13,099^\circ) * (14 - 14) = 0 \quad [\text{daN}].$$

Esforços relativamente ao eixo y

Para um condutor temos:

$$F_{V_CD} = \alpha \cdot c \cdot q \cdot S \cdot \sin^2(\beta) = 0,6 * 1 * 108 * 0,02345 * \frac{160 + 195}{2} * \sin^2(76,900^\circ) = 255,87 \quad [\text{daN}],$$

$$T_{CD_y} = \sigma \cdot \cos(\alpha / 2) \cdot (t_{\max 1} + t_{\max 2}) = 326,6 * \sin(13,099^\circ) * (8 + 8) = 1184,34 \quad [\text{daN}].$$

Para o cabo de guarda:

$$F_{V_CG} = \alpha \cdot c \cdot q \cdot S \cdot \sin^2(\beta) = 0,6 * 1,1 * 108 * 0,01463 * \frac{160 + 195}{2} * \sin^2(76,900^\circ) = 175,59 \quad [\text{daN}],$$

$$T_{CG_y} = \sigma \cdot \cos(\alpha_l / 2) \cdot (t_{\max 1} + t_{\max 2}) = 127,5 * \sin(13,099^\circ) * (14 + 14) = 809,11 \quad [\text{daN}].$$

Para cada cadeia de isoladores:

$$F_{V_Isol} = [30] \text{ daN}$$

Esforços relativamente ao eixo z

Para cada condutor, temos:

$$P_{CD} = \left(\omega + \frac{\omega_{\text{gelo}} \cdot \pi}{4} \cdot ((d + 2 \cdot e)^2 - d^2) \right) \cdot \frac{L}{2} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow P_{CD} = \left(1,219 + \frac{900 \cdot \pi}{4} \cdot ((0,2345 + 2 \cdot 0,018)^2 - 0,02345^2) \right) \cdot \frac{160 + 195}{2} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow P_{CD} = 590,82 \quad [\text{daN}].$$

Para o cabo de guarda:

$$P_{CG} = \left(\omega + \frac{\omega_{\text{gelo}} \cdot \pi}{4} \cdot ((d + 2 \cdot e)^2 - d^2) \right) \cdot \frac{L}{2} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow P_{CG} = \left(0,59 + \frac{900 \cdot \pi}{4} \cdot ((0,01463 + 2 \cdot 0,018)^2 - 0,01463^2) \right) \cdot \frac{160 + 195}{2} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow P_{CG} = 399,49 [\text{daN}].$$

Para cada cadeia de isoladores, temos:

$$P_{\text{isol}} = 30 \quad [\text{daN}].$$

Os esforços totais relativamente aos eixos x, y e z:

Hipótese 1

$$F_{x1} = n^{\circ}_{CD} \cdot T_{CD} + T_{CG} = 0 \quad [\text{daN}],$$

$$F_{y1} = n^{\circ}_{CD} \cdot (F_{CD} + T_{CD_y}) + n^{\circ}_{\text{isol}} \cdot F_{\text{isol}} + (F_{CG} + T_{CG_y}) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow F_{y1} = 6 \times (255,87 + 1184,34) + 2 \cdot 6 \cdot 30 + (175,59 + 809,11) = 9985,98 \quad [\text{daN}],$$

$$F_{z1} = n^{\circ}_{CD} \cdot P_{CD} + n^{\circ}_{\text{isol}} \cdot P_{\text{isol}} + P_{CG} = 6 \cdot 590,82 + 6 \cdot 2 \cdot 30 + 399,49 = 4304,40 \quad [\text{daN}].$$

Hipótese 2

$$F_{x2} = \frac{1}{5} (n^{\circ}_{CD} \cdot F_{CD} + F_{CG}) = \frac{1}{5} (6 \cdot 255,87 + 175,59) = 346,16 \quad [\text{daN}],$$

$$F_{y2} = 0 \quad [\text{daN}],$$

$$F_{z2} = n^{\circ}_{CD} \cdot P_{CD} + n^{\circ}_{\text{isol}} \cdot P_{\text{isol}} + P_{CG} = 6 \cdot 590,82 + 6 \cdot 2 \cdot 30 + 399,49 = 4304,40 \quad [\text{daN}]$$

A hipótese 1 é a pior das duas hipóteses, então o esforço total será:

$$F_H = F_{x1} + F_{y1} = 9985,98 \quad [\text{daN}],$$

$$F_V = F_{z1} = 4304,40 \quad [\text{daN}].$$

O apoio escolhido foi o P12000/20 EV3 cujos esforços horizontais e verticais suportados são respectivamente 12000 daN e 4900 daN. Foi ainda verificado que em nenhum ponto de aplicação dos condutores ou cabo de guarda excede é excedido o valor de 700 daN, esforço máximo permitido por ponto de aplicação.

5.3. Distâncias legais a respeitar

5.3.1. Distância dos condutores aos apoios

Para condutores em repouso, a distância mínima é dada pela seguinte expressão:

$D = 0,10 + 0,0065.U$ [m], onde U é a tensão nominal da linha, expressa em kV.

$D = 0,10 + 0,0065 * 60 = 0,49$ [m]

Considerando que nos apoios do tipo P utilizados (P2000, P3000, P6000, P9000 e P12000) a distância mínima entre condutores é sempre superior a este valor (a distância menor são 1,20 metros correspondentes à cadeia de isoladores) em repouso, a condição está verificada.

Para condutores nus desviados pelo vento, a distância mínima é dada da seguinte forma:

$D = 0,0065.U$ [m], onde U é a tensão nominal da linha, expressa em kV.

$D = 0,0065 * 60 = 0,39$ [m]

Se nos apoios em que são utilizadas cadeias de amarração esta condição é verificada, nas cadeias de isoladores em suspensão, é preciso verificar se os condutores não se aproximam em demasia apoios.

5.3.2. Distância dos condutores ao solo

$D = 6,0 + 0,005.U$ [m], onde U é a tensão nominal da linha, expressa em kV.

$D = 6,0 + 0,005 * 60 = 6,3$ [m] imposto pelo regulamento, neste caso, de 7,0 metros.

5.3.3. Distância dos condutores às árvores

$D = 2,0 + 0,0075.U$ [m], onde U a tensão nominal da linha expressa em kV.

$D = 2,0 + 0,0075 \cdot 60 = 2,45$ [m], sendo o mínimo imposto pelo regulamento, neste caso, de 2,5 metros.

5.3.4. Distância dos condutores aos Edifícios

$D = 3,0 + 0,0075 \cdot U$ [m], onde U a tensão nominal da linha expressa em kV.

$D = 6,0 + 0,0075 \cdot 60 = 3,45$ [m], sendo o mínimo imposto pelo regulamento, neste caso, de 4 metros.

5.3.5. Distância dos condutores a travessia de estradas

$D = 6,3 + 0,01 \cdot U$ [m], onde U a tensão nominal da linha expressa em kV.

$D = 6,3 + 0,01 \cdot 60 = 6,9$ [m], sendo o mínimo imposto pelo regulamento, neste caso, de 7,0 metros.

A distância mínima ao solo, edifícios e travessias de estradas foi considerada em 7 metros

5.3.6. Cruzamento com linhas aéreas de BT e MT:

$D = 1,5 + 0,01 \cdot U + 0,005 \cdot L$ [m],

onde U a tensão nominal da linha expressa em kV e L a distância do ponto de cruzamento ao apoio mais próximo da linha superior.

$D = 1,5 + 0,01 \cdot 60 + 0,005 \cdot 10 = 2,15$ [m].

5.3.7. Distâncias entre condutores

A distância mínima entre condutores, para linhas de 3ª classe, linhas de tensão nominal superior a 40kV obtém-se da seguinte forma:

$$D = k\sqrt{f+d} + \frac{U}{150} \text{ [m].}$$

Isto implica que a flecha máxima será:

$$f = \left(\frac{D - \frac{U}{150}}{k} \right)^2 - d \text{ [m],}$$

$$f = \left(\frac{2,2 - \frac{60}{150}}{0,6} \right)^2 - 1,2 = 7,8 \text{ [m].}$$

onde:

$k = 0,6$ para condutores de Alumínio-Aço;

f é a flecha máxima dos condutores, em metros;

d é o comprimento da cadeia de suspensão, em metros;

U a tensão nominal da linha, em kilovolts;

D é a distância entre condutores pré definida pelo apoio.

Como no projecto apenas utilizamos os apoios do tipo P, a distância entre condutores foi-nos imediatamente imposta pela estrutura do apoio, sendo esta mesma distância de 2,2 metros. Desta forma, foi possível calcular a flecha máxima que se poderia obter e que situou nos 7,8 metros. Através da tabela 5.7 presente na página 41, vemos que, existe apenas um cantão, o cantão número 5, que não verifica a condição da flecha máxima, imposta pela distância entre condutores. Para este caso, convém então uma temperatura para 65° C em vez dos 80°C. A flecha máxima situou-se então nos 7,66 metros para o mesmo cantão.

Sendo esta a condição obrigatória e presente no regulamento, depois de verificada, podemos concluir que as distâncias entre condutores estão verificadas.

5.4. Desvio Transversal das Cadeias de Isoladores

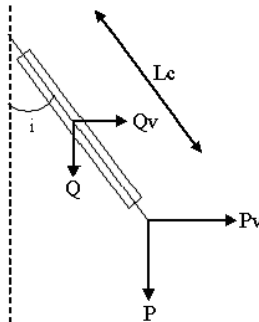


Figura 5.12 - Deslocamento transversal de uma cadeia de isoladores

Considerando que a cadeia de isoladores apresenta um tamanho de 1,2 metros, o ângulo máximo que a cadeia poderá apresentar de forma a respeitar a distância dos condutores aos apoios é o seguinte

$$i = 90^\circ - \sin^{-1}\left(\frac{0,39}{1,2}\right) = 71,03 \quad [^\circ]$$

Por uma questão de folga, o valor considerado a partir no projecto foram 70°.

Para o apoio nº 15, o cálculo é o seguinte:

$$i = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{F_{v,CD} + \frac{F_{v,Iso}}{2}}{P_{CD} + \frac{P_{Iso}}{2}} \right) [^\circ],$$

$$i = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{302,39 + \frac{15}{2}}{263,30 + \frac{15}{2}} \right) = 48,85 [^\circ].$$

Como podemos observar, o ângulo é inferior a 70° significando isto que a condição se verifica.

5.5. Cálculo Eléctrico

5.5.1. Resistência da Linha

$$R = R_k \cdot L_l = 0,1093 \cdot 8,704 = 0,951 [\Omega]$$

Como se trata de uma linha dupla, a resistência total será metade da calculada:

$$R = R_T = \frac{0,951}{2} = 0,475 [\Omega].$$

5.5.2. Distância Geométrica entre fases

A Distância Geométrica entre fases, para o caso de uma linha simples e estrutura em “Esteira Vertical”, pode ser calculada da seguinte forma:

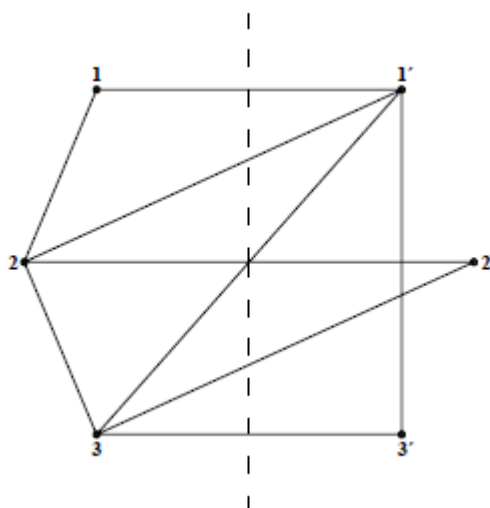


Figura 5.13 - Distâncias entre condutores numa linha dupla

Eis a expressão da distância geométrica entre fases[6]:

$$D = \sqrt[3]{D_1 \times D_2 \times D_3} \quad [\text{m}],$$

onde:

$$D_1 = \frac{\sqrt{D_{1-2} \times D_{1-2'} \times D_{1-3} \times D_{1-3'}}}{D_{1-1'}} = \frac{\sqrt{2,23 * 5,51 * 4,41 * 6,70}}{4,7} = 4,05 \quad [\text{m}],$$

$$D_2 = \frac{\sqrt{D_{2-1} \times D_{2-1'} \times D_{2-3} \times D_{2-3'}}}{D_{2-2'}} = \frac{\sqrt{2,23 * 5,51 * 2,23 * 5,51}}{5,4} = 2,27 \quad [\text{m}]$$

$$D_3 = \frac{\sqrt{D_{3-1} \times D_{3-1'} \times D_{3-2} \times D_{3-2'}}}{D_{3-3'}} = \frac{\sqrt{2,23 * 5,51 * 4,41 * 6,70}}{4,7} = 4,05 \quad [\text{m}]$$

$$D = \sqrt[3]{D_1 \times D_2 \times D_3} = \sqrt[3]{4,05 \times 2,27 \times 4,05} = 3,34 \quad [\text{m}]$$

5.5.3. Cálculo da Reactância

A expressão para o cálculo da reactância é a seguinte:

$$X_k = w * L_k = 2\pi.f.L_k \quad [\Omega / \text{km}],$$

em que:

$$L_k = \left[\frac{1}{2} + 4,6 \cdot \log(D/r) \right] * 10^{-4} \quad [\text{H} / \text{km}].$$

Logo:

$$L_k = \left[\frac{1}{2} + 4,6 \times \log(3,34 / (0,02345 / 2)) \right] \times 10^{-4} = 11,80 * 10^{-4} \quad [\text{H} / \text{km}],$$

$$X_k = w.L_k = 2\pi * 50 * 11,80 * 10^{-4} = 0,37 \quad [\Omega / \text{km}],$$

$$X = X_k.L = 0,37 * 8,074 = 2,99 \quad [\Omega].$$

5.5.4. Cálculo da Susceptância

O cálculo da Susceptância é dado por:

$$B_k = w.C_k = 2\pi.f.C_k \quad [S / km] ,$$

em que:

$$C_k = \frac{24,2}{\log(D/r)} * 10^{-9} \quad [F / km] .$$

Logo:

$$C_k = \frac{24,2}{\log(3,34 / (23,45 * 10^{-3} / 2))} * 10^{-9} = 9,86 * 10^{-9} \quad [F / km] ,$$

$$B_k = w * C_k = 2\pi * 50 * 9,86 * 10^{-9} = 3,10 * 10^{-6} \quad [S / Km] ,$$

$$B = B_k * L = 3,10 * 10^{-6} * 8,074 = 25,01 * 10^{-6} \quad [S] .$$

5.5.5. Cálculo da Impedância e Admitância

$$\underline{Z}_k = R + jX = 0,951 + j2,99 = 3,14 \angle 72.35^\circ \quad [\Omega]$$

$$\underline{Y}_k = G_k + jB_k = 0 + j25,01 * 10^{-6} = 25,01 \angle 90^\circ \quad [\mu S]$$

5.5.6. Cálculo da Queda de Tensão entre fases

A linha é projectada para que possa realizar o transporte de 120MVA. Considerando que opera à tensão de 63kV, à frequência de 50 kHz e com factor de potência indutivo médio de 0,9 indutivo. Teremos então:

Intensidade de corrente:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}.U} = \frac{120 * 10^6}{\sqrt{3} * 63 * 10^3} = 1100 \quad [A] .$$

A queda de tensão é dada pela expressão seguinte:

$$\Delta U = \sqrt{3}.I.(R.\cos\theta + X.\sin\theta) \quad [V].$$

Como se trata de um paralelo idealmente perfeito, a corrente a circular em cada um dos circuitos é metade da total.

Então:

$$\Delta U = \sqrt{3} * 550 * (0,475 * 0,9 + 2,99 * 0,436) = 1650 \quad [V],$$

ou seja, 2,61% da tensão de serviço.

5.5.7. Cálculo das Perdas

As perdas de energia, nomeadamente as perdas por dissipação térmica, podem ser determinadas a partir da equação 3.23 transcrita para este capítulo de forma a facilitar a consulta:

$$p = 3.R.I^2 \quad [W].$$

Então:

$$p = 3 * 0,475 * 192^2 = 0,052 \quad [MW],$$

ou seja, 0,04% da potência total transportada.

Capítulo 6

Estudo do comportamento Longitudinal das Cadeias de isoladores em Suspensão

6.1. Introdução

No capítulo 2 e no capítulo 4, foi abordado o deslocamento transversal das cadeias de isoladores, qual a sua possível variação e consequências. Neste capítulo vamos abordar o problema do deslocamento longitudinal e quais as implicações do mesmo no projecto de Linhas Aéreas.

Quando estamos na presença de um cantão composto por 2 ou mais vãos, existe normalmente o cuidado, na fase de projecto, de tentar que o tamanho dos vãos que o compõem seja aproximadamente o mesmo. Este cuidado é ainda mais importante nas cadeias de isoladores em suspensão, pois o condutor apresenta uma maior liberdade de movimentos e, com as variações de temperatura induzidas pelas condições atmosféricas, poderá estar a sujeitar a cadeia e o apoio a esforços extra, não dimensionados.

6.2. Objectivo do estudo

O objectivo deste estudo é perceber o que acontece às cadeias de isoladores quando estamos na presença de cantões compostos por vãos desiguais.

Aquando da montagem dos cabos, as cadeias de isoladores encontram-se alinhadas com o apoio, por via da regulação que é feita. A partir deste momento, deixa-se de considerar o efeito de cada cantão e cada vão é considerado independente um do outro. No entanto, com a variação das condições atmosféricas, existe uma contracção e uma distensão dos condutores levando à deslocação das cadeias de isoladores em suspensão que lhes estão associadas.

No caso concreto do estudo, concentramo-nos no deslocamento das cadeias de isoladores em suspensão. Para melhor se compreender este efeito, vamos analisar 2 casos de estudo:

6.3. Casos de estudo

6.3.1. Cantão com uma cadeia de isoladores em suspensão

Neste primeiro caso de estudo, considerou-se um cantão composto por 2 vãos de tamanhos diferentes, em zona sem gelo, em que o primeiro mede 250 metros e o segundo mede 350 metros, estando ligados entre si por intermédio de uma cadeia de isoladores. A figura 6.1 esquematiza a situação, com a barra azul a representar a cadeia de isoladores em suspensão.

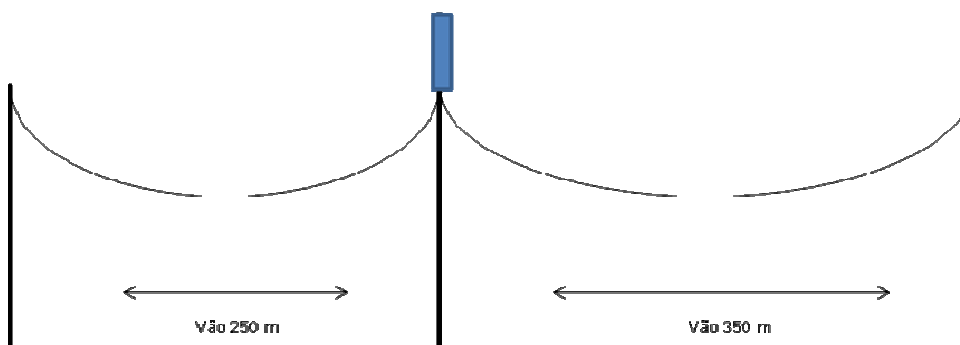


Figura 6.1- Representação de 1 cantão com 2 vãos

Através das equações 3.25, 3.27, 3.28 e 3.29, transcritas do capítulo 3 para este capítulo e ainda da Figura 3.6, determinou-se do estado-tipo mais desfavorável para este cantão:

Cálculo da força do vento sobre um condutor, recorrendo à equação 3.25:

$$F_{V,CD} = \alpha \cdot c \cdot q \cdot d \text{ [daN/m]},$$

$$F_{1,CD} = 0,6 * 1,0 * 36 * 23,45 \times 10^{-3} = 0,506 \text{ [daN/m]},$$

$$F_{2,CD} = 0,6 * 1,0 * 90 * 23,45 * 10^{-3} = 1,266 \text{ [daN/m]}.$$

Cálculo do coeficiente de sobrecarga através da equação 3.27:

$$m = \frac{\sqrt{\left(\omega + \frac{\omega_{\text{gelo}} \cdot \pi}{4} \cdot ((d + 2 \cdot e)^2 - d^2)\right)^2 + F^2}}{\omega},$$

$$m_{1,CD} = \frac{\sqrt{1,219^2 + 0,506^2}}{1,219} = 1,083 \quad ,$$

$$m_{2,CD} = \frac{\sqrt{1,219^2 + 1,266^2}}{1,219} = 1,442.$$

Determinação do vão crítico por meio da equação 3.28:

$$L_{Cr} = \frac{\sigma \cdot t_{\max}}{\omega} \sqrt{\frac{24 \cdot \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{m_2^2 - m_1^2}},$$

$$L_{Cr} = \frac{326,6 \cdot 8}{1,219} \sqrt{\frac{24 \cdot 1,77 \cdot 10^{-5} \cdot (15 - (-5))}{1,442^2 - 1,083^2}} = 207,51 \quad [\text{m}].$$

Cálculo do vão equivalente pela equação 3.29 é:

$$L = \sqrt{\frac{250^3 + 350^3}{250 + 350}} = 312,25$$

Como é possível observar, consultando a árvore de decisão que se encontra na Figura 3.6, o estado-tipo mais desfavorável, é a *Primavera*. Ora, para essa condição, e através da equação de 3.30, a equação de estados, obtiveram-se várias tensões de montagem, consoante as temperaturas por consideradas.

Estado de montagem:

$$m_i = 1$$

$$\theta_i = 15 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$t_i = ?$$

Estado mais Desfavorável (Primavera):

$$m_k = m_2 = 1,442$$

$$\theta_k = 15 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$t_k = t_{\max} = 8 \quad [\text{daN}/\text{mm}^2]$$

Equação de estados:

$$\theta_i + \frac{t_i}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_i^2 \cdot \omega^2 \cdot L^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_i^2} = \theta_k + \frac{t_k}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_k^2 \cdot \omega^2 \cdot L^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_k^2}$$

Substituindo na equação de estados os valores por nós considerados, temos:

62 Estudo do comportamento Longitudinal das Cadeias de isoladores em Suspensão

$$15 + \frac{t_i}{1,77 * 10^{-5} * 7850} - \frac{1 * 1,219^2 * 312,25^2}{24 * 1,77 * 10^{-5} * 326,6^2 * t_i^2} =$$

$$= 15 + \frac{8}{1,77 * 10^{-5} * 7850} - \frac{1,442^2 * 1,219^2 * 312,25^2}{24 * 1,77 * 10^{-5} * 326,6^2 * 8^2} \Leftrightarrow t_i = 5,990 \text{ [daN/mm}^2\text{]}$$

Na tabela seguinte, apresentam-se as tensões mecânicas obtidas para as diferentes temperaturas:

Tabela 6.1- Tensões mecânicas de montagem dos condutores para o cantão

Temperatura [°C]	t_{mec} [daN/mm ²]
-10	6,771
-5	6,596
0	6,431
5	6,276
10	6,129
15	5,990
20	5,858
25	5,733
30	5,615
35	5,502
40	5,395
45	5,293
50	5,196
55	5,104
60	5,015
65	4,931
70	4,850
75	4,773
80	4,699

Para este exemplo, decidiu-se considerar como estado de montagem os 15 °C, salientado na tabela 6.1, a cor verde. Assumindo que os cabos se encontram de montados e regulados, cada vão passa a funcionar como um vão independente, não se considerando a partir de agora o cantão. Vamos então analisar o comportamento de cada um dos vãos considerando apenas como parâmetro de variação a temperatura.

Considera-se então que não existe sobrecarga em nenhum dos estados e o vão a considerar passa a ser o vão real.

Novamente utilizando a equação 3.30, a equação de estados, calcula-se a tensão mecânica a que o vão de 250m se encontra sujeito como demonstrado em seguida:

$$0 + \frac{t_i}{1,77 \cdot 10^{-5} \cdot 7850} - \frac{1^2 \cdot 1,219^2 \cdot 250^2}{24 \cdot 1,77 \cdot 10^{-5} \cdot 326,6^2 \cdot t_i^2} =$$

$$= 15 + \frac{5,990}{1,77 \cdot 10^{-5} \cdot 7850} - \frac{1^2 \cdot 1,219^2 \cdot 250^2}{24 \cdot 1,77 \cdot 10^{-5} \cdot 326,6^2 \cdot 5,990^2} \Leftrightarrow t_i = 6,625 \text{ [daN/mm}^2\text{]}.$$

Para o vão de 350 metros, o método seguido é o mesmo:

$$0 + \frac{t_i}{1,77 \cdot 10^{-5} \cdot 7850} - \frac{1^2 \cdot 1,219^2 \cdot 350^2}{24 \cdot 1,77 \cdot 10^{-5} \cdot 326,6^2 \cdot t_i^2} =$$

$$= 15 + \frac{5,990}{1,77 \cdot 10^{-5} \cdot 7850} - \frac{1^2 \cdot 1,219^2 \cdot 350^2}{24 \cdot 1,77 \cdot 10^{-5} \cdot 326,6^2 \cdot 5,990^2} \Leftrightarrow t_i = 6,351 \text{ [daN/mm}^2\text{]}.$$

$$t_{res} = t_{i(350)} - t_{i(250)} \Leftrightarrow t_{res} = -0,273 \text{ [daN/mm}^2\text{]}$$

Como se pode observar pelo resultado do cálculo anterior, as tensões mecânicas a que cada um dos vãos se encontra sujeito são diferentes. Por este motivo, na cadeia de isoladores já não se verifica um equilíbrio de forças. Esta variação de tensões a que os condutores estão sujeitos tem como provoca o afastamento das cadeias de isoladores em suspensão do seu ponto de equilíbrio que se verifica para a temperatura de montagem dos condutores.

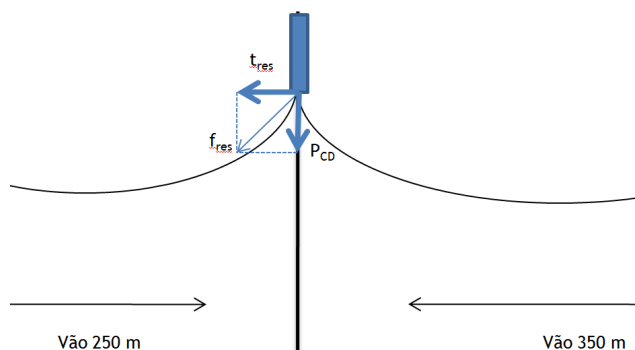


Figura 6.2 - Forças resultantes de diferentes tensões mecânicas

O passo seguinte é o cálculo, do afastamento verificado pela cadeia de isoladores em suspensão. Em primeiro lugar, é necessário calcular o ângulo formado pela cadeia de isoladores em suspensão, quando estamos a 0°C, em relação ao estado de montagem, situação em que se verifica um equilíbrio e a cadeia de isoladores está na vertical.

O ângulo formado pela cadeia de isolares com o eixo vertical é calculado através da expressão 6.1:

$$\theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{t_{\text{res}}}{P_{\text{cond}}}\right) \quad [^\circ], \quad (6.1)$$

$$\theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{0,273 * 326,6}{\frac{350 + 250}{2} * 1,219}\right) = 13,714 \quad [^\circ].$$

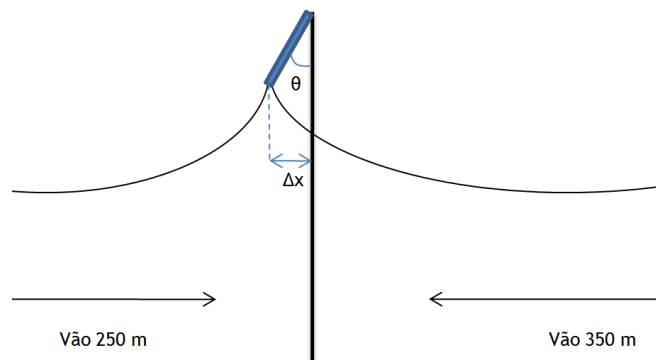


Figura 6.3 - Representação do deslocamento da cadeia de isoladores em suspensão

Depois, através do tamanho da cadeia de isoladores e do ângulo, calcula-se o deslocamento da cadeia. O cálculo é feito da seguinte forma:

$$\Delta x = l \cdot \operatorname{sen}(\theta) \quad [\text{m}],$$

$$\Delta x = 1,2 * \operatorname{sen}(13,71^\circ) = 0,284 \quad [\text{m}]$$

Como se pode concluir, com a contração dos cabos resultante da descida da temperatura em relação ao estado de montagem, a cadeia irá sofrer um deslocamento. A cadeia de isoladores em suspensão desloca-se no sentido do vão de 250 metros, uma vez que este é o mais pequeno, sendo que apresenta maior dificuldade em lidar com a contração do cabo, resultado da redução da temperatura.

Na tabela 6.2 apresenta-se uma lista das variações de deslocamento em função de diferentes temperaturas, estando destacadas as variações a 0°C, calculadas por nós no exemplo acima demonstrado, e a 15°C, correspondente ao estado de montagem.

Tabela 6.2- Deslocamentos das cadeias em função da temperatura

Temperatura [°C]	t_{res} (350-250) [daN/mm ²]	Ângulo [°]	Deslocamento [m]
-10	-0,504	-24,253	-0,493
-5	-0,383	-18,905	-0,389
0	-0,273	-13,714	-0,284
5	-0,173	-8,786	-0,183
10	-0,082	-4,200	-0,088
15	0,000	0,000	0,000
20	0,074	3,798	0,079
25	0,141	7,201	0,150
30	0,202	10,230	0,213
35	0,257	12,914	0,268
40	0,306	15,288	0,316
45	0,351	17,383	0,359
50	0,391	19,233	0,395
55	0,427	20,866	0,427
60	0,459	22,310	0,456
65	0,489	23,587	0,480
70	0,515	24,718	0,502
75	0,539	25,721	0,521
80	0,561	26,613	0,538

Como se pode observar, pela tabela anterior, para a temperatura em que decorre montagem o deslocamento é nulo, uma vez que os cabos se encontram à mesma tensão mecânica. Quando a temperatura é inferior à temperatura de montagem dos cabos, o deslocamento da cadeia de isoladores ocorre no sentido do vão mais curto, uma vez que a contracção dos cabos é mais difícil de ser compensada no vão mais curto. Quando a temperatura de montagem é superior, a dilatação dos cabos faz com que a força resultante seja no sentido do vão maior, obrigando a cadeia de isoladores em suspensão a deslocar-se no sentido do vão de maior comprimento.

O próximo passo é analisar o comportamento das cadeias de isoladores em suspensão quando estamos na presença de cantões com mais de dois vãos.

6.3.2. Cantão com duas cadeias de isoladores em suspensão

Neste segundo caso de estudo, considerou-se um cantão composto por 3 vãos de tamanhos diferentes, em zona sem gelo, em que os vãos medem 250 metros, 325 metros e 400 metros. A figura 6.4 representa a situação acima indicada. No entanto, para este exemplo, apenas nos interessa a o tamanho dos vãos e não a forma como eles se dispõem no cantão, razão pela qual se despreza a ordem dos vãos.

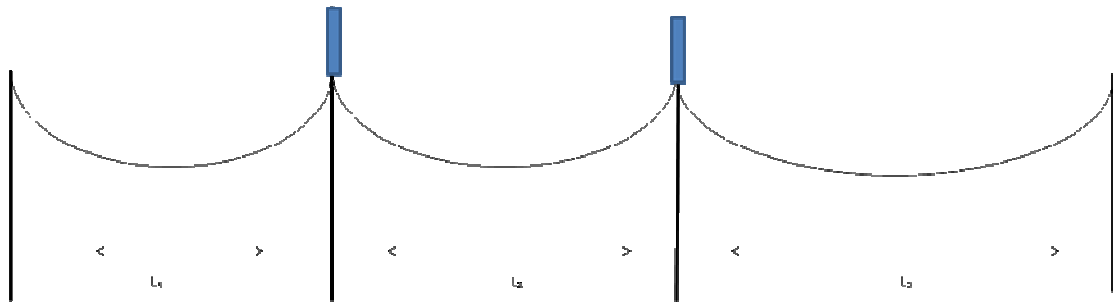


Figura 6.4 - Representação de um cantão com 3 vãos

Mais uma vez, e socorrendo-nos das equações 3.25, 3.27, 3.28 e 3.29, transcritas do capítulo 3 para este exemplo e ainda da Figura 3.6, determinou-se do estado-tipo mais desfavorável para este cantão:

Cálculo da força do vento sobre um condutor, recorrendo à equação 3.25:

$$F = \alpha \cdot c \cdot q \cdot d \quad [\text{daN/m}],$$

$$F_{1,CD} = 0,6 * 1,0 * 36 * 23,45 \times 10^{-3} = 0,506 \quad [\text{daN/m}],$$

$$F_{2,CD} = 0,6 * 1,0 * 90 * 23,45 * 10^{-3} = 1,266 \quad [\text{daN/m}].$$

Cálculo do coeficiente de sobrecarga através da equação 3.27:

$$m = \frac{\sqrt{\left(\omega + \frac{\omega_{\text{gelo}} * \pi}{4} * ((d + 2 * e)^2 - d^2)\right)^2 + F^2}}{\omega},$$

$$m_1 = \frac{\sqrt{1,219^2 + 0,506^2}}{1,219} = 1,083,$$

$$m_2 = \frac{\sqrt{1,219^2 + 1,266^2}}{1,219} = 1,442.$$

Determinação do vão crítico por meio da equação 3.28:

$$L_{cr} = \frac{\sigma \cdot t_{\max}}{\omega} \sqrt{\frac{24 \cdot \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{m_2^2 - m_1^2}},$$

$$L_{cr} = \frac{326,6 * 8}{1,219} \sqrt{\frac{24 \cdot 1,77 * 10^{-5} * (15 - (-5))}{1,442^2 - 1,083^2}} = 207,51 \quad [\text{m}].$$

Cálculo do vão equivalente pela equação 3.29 é:

$$l = \sqrt{\frac{250^3 + 325^3 + 400^3}{250 + 325 + 400}} = 341,87 \quad [\text{m}].$$

Consultando a árvore de decisão que se encontra na Figura 3.6, o estado-tipo mais desfavorável, é a *Primavera*. Ora, para essa condição, e recorrendo à equação de estados, a equação 3.30, obtiveram-se várias tensões de montagem, consoante as temperaturas por consideradas.

Estado de Verão:

$$m_i = 1$$

$$\theta_i = 15^\circ \text{C}$$

$$t_i = ?$$

Estado mais Desfavorável (Primavera):

$$m_k = m_2 = 1,442$$

$$\theta_k = 15^\circ \text{C}$$

$$t_k = t_{\max} = 8 \text{ daN} / \text{mm}^2$$

Substituindo na equação de estados, as variáveis, temos:

$$80 + \frac{t_i}{1,77 * 10^{-5} * 7850} - \frac{1 * 1,219^2 * 341,87^2}{24 * 1,77 * 10^{-5} * 326,6^2 * t_i^2} =$$

$$= 15 + \frac{8}{1,77 * 10^{-5} * 7580} - \frac{1,442^2 * 1,219^2 * 341,87^2}{24 * 1,77 * 10^{-5} * 326,6^2 * 8^2} \Leftrightarrow t_i = 5,923 \quad [\text{daN} / \text{mm}^2]$$

Na tabela seguinte, apresentam-se as tensões mecânicas de montagem obtidas para o cantão, considerando diferentes temperaturas:

Tabela 6.3- Tensões mecânicas de montagem do cantão para os condutores

Temperatura [°C]	t_{mec} [daN/mm ²]
-10	6,567
-5	6,425
0	6,290
5	6,162
10	6,040
15	5,923
20	5,813
25	5,707
30	5,606
35	5,510
40	5,417
45	5,329
50	5,244
55	5,163
60	5,085
65	5,011
70	4,939
75	4,869
80	4,803

Para este exemplo, decidiu-se considerar novamente como estado de montagem os 15 °C, salientado na tabela 6.3 a cor verde. Assumindo que os cabos se encontram de montados e regulados, considera-se novamente que cada vão passa a funcionar como um vão independente, não se considerando a partir de agora o cantão. Vamos então analisar o comportamento de cada um dos vão considerando apenas como parâmetro de variação a temperatura.

Os cálculos, sendo semelhantes aos já realizados, serão omitidos e apenas se apresentam os resultados.

Para os vão de 250, 325 e 400 metros, a tabela 6.4 mostra as variações de tensões mecânicas, em função da temperatura.

Tabela 6.4- Tensões mecânicas nos vãos depois da montagem

Temperatura [°C]	t_{mec} [daN/mm ²]		
	Vão 250m	Vão 325m	Vão 400m
-10	7,035	6,630	6,403
-5	6,780	6,473	6,299
0	6,543	6,324	6,199
5	6,322	6,183	6,104
10	6,116	6,050	6,012
15	5,923	5,923	5,923
20	5,744	5,803	5,838
25	5,576	5,689	5,756
30	5,419	5,580	5,678
35	5,272	5,476	5,601
40	5,135	5,377	5,528
45	5,005	5,283	5,457
50	4,884	5,193	5,389
55	4,769	5,106	5,322
60	4,661	5,024	5,258
65	4,559	4,945	5,196
70	4,463	4,869	5,136
75	4,372	4,796	5,078
80	4,285	4,726	5,022

Observa-se então que quanto maior for a diferença entre o tamanho dos vãos, maior será a diferença das tensões mecânicas a que a cadeia de isoladores numa primeira fase, e posteriormente o apoio que ao qual está ligada, irá estar sujeito.

Em seguida, vamos analisar o comportamento das cadeias de isoladores em suspensão. De referir, mais uma vez, que apenas nos interessa o tamanho entre vãos contíguos e não propriamente a disposição que os mesmos apresentam, tendo sido exploradas as três situações possíveis de vãos contíguos, no cantão em causa.

Tabela 6.5- Deslocamento da cadeia de isoladores ao suportar os vãos de 325 metros e 250 metros

Temperatura [°C]	t_{res} (325-250)[daN/mm ²]	Ângulo [°]	Deslocamento [m]
-10	-0,405	-19,890	-0,408
-5	-0,308	-15,360	-0,318
0	-0,219	-11,061	-0,230
5	-0,138	-7,049	-0,147
10	-0,066	-3,358	-0,070
15	0,000	0,000	0,000
20	0,059	3,028	0,063
25	0,113	5,741	0,120
30	0,161	8,162	0,170
35	0,204	10,314	0,215
40	0,243	12,225	0,254
45	0,278	13,920	0,289
50	0,309	15,422	0,319
55	0,337	16,755	0,346
60	0,362	17,937	0,370
65	0,385	18,986	0,390
70	0,406	19,918	0,409
75	0,424	20,746	0,425
80	0,441	21,483	0,439

Tabela 6.6- Deslocamento da cadeia de isoladores ao suportar os vãos de 325 metros e 400 metros

Temperatura [°C]	t_{mec} (400-325)[daN/mm ²]	Ângulo [°]	Deslocamento [m]
-10	-0,227	-11,465	-0,239
-5	-0,174	-8,826	-0,184
0	-0,125	-6,363	-0,133
5	-0,080	-4,075	-0,085
10	-0,038	-1,956	-0,041
15	0,000	0,000	0,000
20	0,035	1,802	0,038
25	0,068	3,460	0,072
30	0,098	4,984	0,104
35	0,125	6,383	0,133
40	0,151	7,668	0,160
45	0,174	8,847	0,185
50	0,196	9,930	0,207
55	0,216	10,924	0,227
60	0,235	11,838	0,246
65	0,252	12,677	0,263
70	0,268	13,450	0,279
75	0,283	14,160	0,294
80	0,296	14,814	0,307

Tabela 6.7 - Deslocamento da cadeia de isoladores ao suportar os vãos de 250 metros e 400 metros

Temperatura [°C]	t_{mec} (400-250)[daN/mm ²]	Ângulo [°]	Deslocamento [m]
-10	-0,632	-29,449	-0,590
-5	-0,481	-23,266	-0,474
0	-0,344	-17,067	-0,352
5	-0,218	-11,028	-0,230
10	-0,104	-5,303	-0,111
15	0,000	0,000	0,000
20	0,094	4,822	0,101
25	0,180	9,147	0,191
30	0,258	12,987	0,270
35	0,329	16,376	0,338
40	0,393	19,356	0,398
45	0,452	21,973	0,449
50	0,505	24,272	0,493
55	0,553	26,292	0,532
60	0,597	28,071	0,565
65	0,637	29,640	0,593
70	0,674	31,027	0,619
75	0,707	32,256	0,640
80	0,737	33,347	0,660

Como podemos observar pelas três tabelas que se encontram acima, a tabela 6.5, 6.6 e 6.7, quanto maior forem as distâncias entre vãos contíguos, maior será o esforço a que está sujeita a cadeia de isoladores em suspensão e conseqüentemente maior será o deslocamento da mesma. Neste caso, constata-se que, quando existe maior diferença entre os vãos contíguos, a cadeia de isoladores apresenta um deslocamento na ordem dos 0,66 metros. Esta diferença foi verificada para as linhas de 60kV em que o comprimento da cadeia de isoladores é de aproximadamente 1,2 metros.

6.4. Formulação de um método geral de cálculo

Para um cantão com n vãos, há que sistematizar uma forma de cálculo de para se obterem os deslocamentos que as cadeias de isoladores poderão estar sujeitas. Em seguida, na figura 6.5, apresenta-se um fluxograma que resume as etapas para se calcularem os deslocamentos evidenciados pelas cadeias de isoladores em suspensão, considerando os vãos que se encontram ligados à mesma.

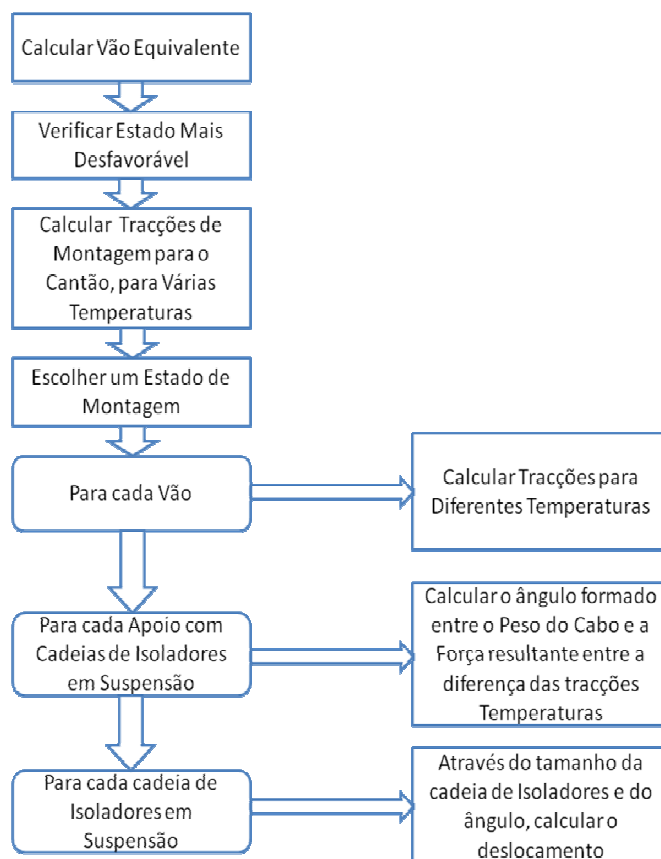


Figura 6.5 - Etapas para o cálculo do desvio transversal de cadeias de isoladores em suspensão

Numa perspectiva de perceber como evoluem os deslocamentos das cadeias de isoladores, criamos um cantão fictício composto por 8 vãos, numa zona com ausência de gelo. O tamanho dos vãos encontra-se compreendido entre os 100 metros e os 450 metros, em intervalos de 50 metros. Também foram consideradas 4 temperaturas, escolhidas pelo facto de serem temperaturas que facilmente se podem verificar em Portugal, sendo estas 0°C, 15°C, 20°C e 35°C. Através de este exemplo, obtivemos a evolução da variação de deslocamentos, considerando as diferentes temperaturas e os diferentes vãos que consideramos poder ser contíguos ao vão de 100 metros.

Em seguida apresentam-se os resultados das tracções para as diferentes temperaturas do cantão fictício por nós considerado:

Tabela 6.8- Tensões mecânicas de montagem dos condutores para o cantão

Temperatura [°C]	t_{mec} [daN/mm ²]
-10	6,584
-5	6,439
0	6,302
5	6,171
10	6,047
15	5,929
20	5,816
25	5,695
30	5,602
35	5,513
40	5,427
45	5,345
50	5,266
55	5,190
60	5,117
65	5,047
70	4,979
75	4,913
80	4,794

Para este cantão, a tensão mecânica de montagem escolhida, foi novamente a obtida a 15°C. Adicionalmente, e como acima mencionado, escolhemos outras três temperaturas, sinalizadas a amarelo na tabela 6.8, de forma a avaliar a evolução das tracções e consequentemente dos deslocamentos das cadeias de isoladores em suspensão. Em seguida, apresenta-se um gráfico que mostra a evolução dos deslocamentos, considerando o vão de 100m contíguo aos outros vãos escolhidos.

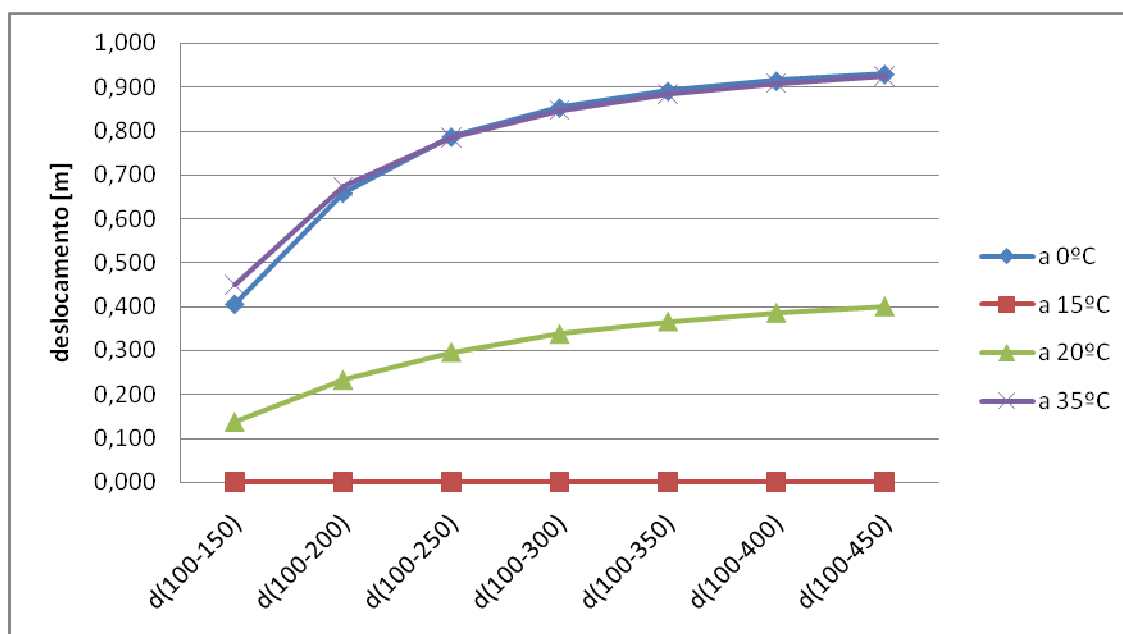


Figura 6.6- Evolução dos deslocamentos das cadeias de isoladores consoante a temperatura e diferença entre os vãos contíguos

Como se pode concluir pelo gráfico, quanto maior forem as distâncias entre os vãos contíguos, maiores serão os deslocamentos sofridos pelas cadeias de isoladores. E considerando que o tamanho da cadeia de isoladores considerada para este exemplo tem como comprimento 1,2m, verifica-se que ao deslocar quase um metro no sentido horizontal, o esforço extra exercido já é bastante considerável, sendo que em situações limite, poderá levar à queda do da cadeia de isoladores, juntamente com o cabo, ou mesmo à queda do próprio apoio.

Por outro lado, quanto mais afastados do estado de montagem estiverem os vãos contíguos, maior será a diferença obtida nas tracções. Para o nosso exemplo consideramos como estado de montagem, os 15°C. Obviamente, para esta temperatura, a diferença de tracções é nula, considerando que no estado de montagem e regulação, os condutores apresentam a mesma tracção de montagem. No entanto, para os 20°C, podemos observar que a amplitude dos deslocamentos não é tão elevada como para os 0°C ou os 35°C.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalho Futuro

Este trabalho, numa primeira fase, consistiu no projecto de uma linha aérea dupla de 60kV, com o intuito de ligar um segundo Parque eólico em S. Macário, ao posto de corte de Cabril, sendo ambas as localidades pertencentes ao conselho de Cinfães.

Sendo que numa primeira fase a linha foi projectada com recurso ao método transparente, e só posteriormente se utilizou o software disponível, o CLINHAS, foi possível verificar que a aproximação parabólica poderá ser utilizada desde que estejamos na presença de vãos pequenos, situação na qual o projecto realizado se inclui perfeitamente, uma vez que o tamanho dos vãos não excedeu os 215 metros. Outra conclusão importante retirada do projecto foi a especificidade do projecto realizado em zonas de gelo, onde é necessário ser bastante rigoroso devido aos esforços adicionais a que as cadeias de isoladores e os apoios estão sujeitos.

Ao longo do projecto, verificou-se a extrema importância do trabalho de topografia, uma vez que é necessário garantir as distâncias regulamentares ao solo e a objectos vizinhos. Numa zona de gelo, o trabalho de topografia reveste-se de uma importância fulcral, uma vez que normalmente serão zonas de montanha em que não temos grande margem de manobra.

Ao longo das visitas realizadas, foi possível constatar a grande dificuldade e ao mesmo tempo o rigor presente no trabalho de topografia. Estas equipas têm ainda a seu cargo o levantamento dos proprietários do terreno e aqui se encontra outra das grandes dificuldades pelas quais o Engenheiro responsável pela obra se depara: o contacto com os proprietários. Sendo que ninguém deseja ter um apoio ou mesmo uma linha eléctrica de alta tensão a cruzar o seu terreno, o Engenheiro responsável e a sua equipa, têm aqui um papel pedagógico, explicando de forma clara as necessidades da obra e mostrando que não advém perigo de saúde pela passagem da mesma. Outra observação feita durante as visitas, é o rigor e imposto durante a construção da linha, obrigando para isso os Fiscais e os Engenheiros responsáveis pela obra, a várias deslocações ao terreno durante a fase de construção, de forma a acompanhar de forma contínua a evolução dos trabalhos.

Numa segunda fase, e como complemento ao projecto, foi realizado um estudo sobre o comportamento das cadeias de isoladores em suspensão, quando as mesmas estão a suspender vãos de tamanhos diferentes.

Com este estudo pretendia-se combinar ao mesmo tempo o efeito da temperatura nos cabos e o efeito dos vãos desequilibrados, de forma a perceber de que forma é que as cadeias de isoladores reagem à desigualdade dos vãos. Como conclusão, verificou-se que em vãos contíguos desequilibrados, e à excepção do estado de montagem e regulação, são introduzidas forças resultantes extra nos apoios, que levarão a deslocações das cadeias de isoladores em suspensão, dependendo o sentido da deslocação, da variação de temperatura induzida e do tamanho dos vãos. Como regra prática, e de forma a não introduzir esforços exagerados, considera-se a nível de projecto na EDP que os vãos no mesmo cantão não devem exceder a diferença de 25% do vão médio do cantão.

Sendo que este tópico ainda está pouco estudado e desenvolvido existem várias áreas que poderão ser exploradas. Mais concretamente, este estudo pode ser continuado, na perspectiva dos esforços extra que são transmitidos ao apoio, desenvolvendo-se uma pequena aplicação prática que poderá ser desenvolvida seria a realização de uma aplicação informática a incluir no CLINHAS que calcule, com base numa temperatura de montagem pré-definida, os esforços extra a que os apoios estão sujeitos, e incluísse esses esforços extra no dimensionamento dos apoios, de forma ao traçado desenhado em

Referências

- [1] Távora, F. *Linhas de transmissão de energia eléctrica*.
- [2] Leite, Hélder (2008). *Elaboração de Projectos de Linhas Aéreas de Energia*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [3] Machado e Moura, A. *Cálculo eléctrico e mecânico - Apontamentos teóricos*.
- [4] Avril, Charles (1974). *Construction des lignes aériennes a haute tension*. 1ª Edição,
- [5] DRE-C11-040/N, *Guia Técnico de Terras*.
- [6] Checa, Luis M. (1973). *Linhas de transporte de energia*. 2ª Edição, Edições CETOP, Lisboa.
- [7] Zoppetti, G. (1978). *Redes eléctricas da alta y baja tensión*. 6ª Edición, Editorial Gustavo Gili, Barcelona.
- [8] Neves dos Santos. J.E. *Formulário - Cálculo Eléctrico e Mecânico*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [9] Almeida, Joana (2007). *Relatório de estágio profissional - Projecto e Construção*.
- [10] Marques, Ana (2004). *Projecto de Linhas Aéreas de Alta Tensão*.
- [11] Ramires, Joel (2008). *Projecto de linha de Alta Tensão - Comportamento Eléctrico*.
- [12] Ferreira, José Rui (2004). Apontamentos sobre linhas de Transmissão de Energia da disciplina de Sistemas Eléctricos de Energia
- [13] *Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão*. (1993) Edição DGE. EDP (2001), *Apoios do tipo P - Catálogo de utilização*.
- de Almeida, Márcio; Labegalini, José Ayrton; Roberto, Paulo. *Projectos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão*. 2ª Edição. Editora Edgard Blücher.
- do Vale, Almeida. *Cálculo Mecânico - Apontamentos teóricos*.
- Sucena Paiva, José P. (2005). *Redes de Energia Eléctrica - Uma Análise Sistemática*. *Guia Técnico do Projectista de Linhas Aéreas de Transporte de Energia*.
- Laskoski, Gustavo Theodoro. *Fórmulas de Taylor e MacLaurin - Cálculo diferencial e Integral I*. Universidade Federal Tecnológica do Paraná (2007)
- Topografia, Definições e Conceitos Fundamentais*

Anexos

Anexo 1 - Apoios de Alinhamento

nº do Apoio	Cadeia de Isoladores		Apoio escolhido	Armação	Altura do Apoio
	Amarração	Suspensão			
2	x		P9000/18	EV3	18,8
3		x	P2000/20	EV3	20,7
4		x	P2000/20	EV3	20,7
6		x	P3000/33	EV3	34,3
7		x	P2000/26	EV3	27,1
8	x		P2000/22	EV3	22,7
9		x	P2000/24	EV3	24,8
10		x	P2000/22	EV3	22,7
11		x	P2000/24	EV3	24,8
12		x	P3000/18	EV3	18,8
13		x	P6000/20	EV3	21
15		x	P6000/18	EV3	18,8
16		x	P3000/22	EV3	22,7
18		x	P3000/22	EV3	22,7
19		x	P3000/24	EV3	24,8
20		x	P3000/24	EV3	24,8
21		x	P2000/33	EV3	34,3
22		x	P2000/33	EV3	34,3
23		x	P2000/26	EV3	27,1
24	x		P6000/28	EV3	29,2
25		x	P2000/16	EV3	17
26		x	P2000/16	EV3	17
27		x	P3000/20	EV3	20,6
28		x	P3000/36	EV3	36,8
29		x	P2000/24	EV3	24,8
30		x	P2000/20	EV3	20,7
31		x	P2000/30	EV3	30,8
32	x		P6000/28	EV3	29,2
34		x	P2000/28	EV3	29,5
35		x	P2000/26	EV3	27,1
36	x		P2000/26	EV3	27,1
37		x	P2000/26	EV3	27,1
38		x	P2000/24	EV3	24,8
39		x	P2000/24	EV3	24,8
40		x	P2000/24	EV3	24,8
41	x		P6000/18	EV3	18,8

82 Estudo do comportamento Longitudinal das Cadeias de isoladores em Suspensão

Nº do Apoio	Cadeia de Isoladores		Apoio Escolhido	Armação	Altura do Apoio
	Amarração	Suspensão			
43	x		P9000/14	EV3	14,4
44		x	P2000/24	EV3	24,8
45		x	P2000/28	EV3	29,5
46		x	P2000/22	EV3	22,7
47	x		P9000/24	EV3	6,6

Anexo 2 - Apoios de Ângulo

nº do Poste	Cadeia de Isoladores	Apoio escolhido	Altura do Apoio
5	Amarração	P12000/20	6,6
14		2*P12000/20	21,6
17		P9000/24	24,8
33		P12000/16	17,1
42		2*P9000/26	27,7

Anexo 3 - Apoios de Fim-de-Linha

nº do Poste	Cadeia de Isoladores	Apoio escolhido	Altura do Apoio
1	Amarração	P12000/20	21,6
48		P12000/28	6,6

Anexo 4 - Desvio Transversal das cadeias de Isoladores em Suspensão

nº do Apoio	L1	L2	Peso do condutor	Força do vento no Condutor	θ
1	-38	-50	-107,272	209,69928	-62,9079
2	-38	-50	-107,272	191,46456	-60,7394
3	35	55	109,71	239,3307	64,59883
4	105	57	197,478	245,40894	50,97588
5	-38	-50	-107,272	294,79464	-71,7346
6	117	67	224,296	287,95662	51,88458
7	108	178	348,634	244,64916	35,29917
8	10	-12	-2,438	209,69928	88,66492
9	200	40	292,56	249,20784	40,54771
10	150	23	210,887	276,55992	52,4467
11	150	190	414,46	280,35882	34,3016
12	17	68	103,615	294,79464	69,81799
13	130	87	264,523	285,67728	47,14346
14	103	105	253,552	294,79464	49,18716
15	92	124	263,304	302,39244	48,85094
16	77	101	216,982	303,15222	54,14755
17	5	53	70,702	303,15222	75,87024
18	42	153	237,705	288,7164	50,38238
19	38	116	187,726	290,99574	56,814
20	72	95	203,573	290,99574	54,73502
21	100	253	430,307	284,9175	33,73952
22	-80	225	176,755	240,85026	53,42769
23	-100	362	319,378	233,25246	36,37242
24	-188	187	-1,219	253,76652	88,62284
25	-25	153	156,032	257,56542	58,32751
26	22	94	141,404	272,00124	61,95359
27	97	135	282,808	287,19684	45,42984
28	70	247	386,423	288,7164	36,94189
29	-73	173	121,9	246,9285	63,04253
30	-23	170	179,193	230,21334	51,85496
31	-10	176	202,354	226,41444	48,10345
32	-270	50	-268,18	265,16322	-46,2871
33			0	294,03486	88,57519
34	332	-190	173,098	281,1186	57,96445
35	360	93	552,207	294,03486	28,31299
36	108	-121	-15,847	270,48168	-88,2801
37	258	57	383,985	252,24696	33,56393
38	102	15	189	275,04036	55,18232

86 Estudo do comportamento Longitudinal das Cadeias de isoladores em Suspensão

39	175	88	320,597	275,04036	40,73335
40	76	163	291,341	275,80014	43,47079
nº do Apoio	L1	L2	Peso do condutor	Força do vento no Condutor	e
41	48	29	93,863	288,7164	71,10944
42			0	252,24696	88,34609
43	119	-52	81,673	256,80564	71,35633
44	203	-70	162,127	197,5428	50,39986
46	192	-50	173,098	208,9395	50,15824
46	200	-25	213,325	219,57642	45,79963
47	163	-67	117,024	199,06236	58,91676
48	163	-67	117,024	199,06236	58,91676

- A preto: Apoios que se consideraram à partida, por motivos de projecto, como apoios com cadeias de isoladores em amarração
- A vermelho: Apoios que, pelo cálculo do desvio transversal das cadeias de isoladores, tiveram de passar de apoios com cadeias de Isoladores em suspensão para apoios com cadeias de isoladores em amarração
- A branco: Apoios com cadeias de isoladores em suspensão

Anexo 5 - Desenhos

5.1 - Traçado da linha,

5.2 - Perfil longitudinal e planta parcelar, desenhados em autoCAD

