

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Projecto de Linha Aérea de Alta Tensão
conforme a norma EN50341**

Nuno João Falcão Sequeira

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

Orientador: Professor Doutor António Carlos Sepúlveda Machado e Moura
Co-orientador: Engenheiro Ricardo Júlio Flores Pina

22/07/09

© Nuno João Falcão Sequeira, 2009

A Dissertação intitulada

“Projecto de Linha Aérea de Alta Tensão Conforme Norma EN 50341-1”

foi aprovada em provas realizadas em 17 /Julho/2009

o júri

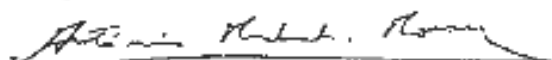
Presidente Professor Doutor Fernando Pires Maciel Barbosa
Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Electrotécnica e
de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor Manuel da Ressurreição Cordeiro
Professor Catedrático do Departamento de Engenharias II da
Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

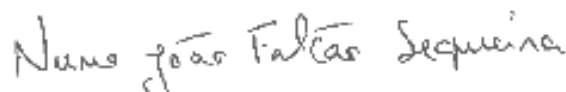


Professor Doutor António Carlos Sepúlveda Machado e Moura
Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Electrotécnica e
de Computadores da Universidade do Porto



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

Autor – Nuno João Falcão Sequeira



Resumo

Este relatório teve por base um estágio realizado na EDP Distribuição Energia SA, no departamento de infra-estruturas Norte, em Vila Nova de Gaia.

O objectivo deste estágio foi a realização de um projecto de uma linha aérea de alta tensão, em conformidade com a nova norma europeia EN50341-1 intitulada *Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV - General requirements - Common specifications* e tendo em conta os aspectos normativos nacionais para Portugal referentes à mesma. A linha aérea em questão consiste numa linha dupla a 60 kilovolts ligando a subestação de Vila Fria à subestação da Portucel ambas situadas no Concelho de Viana do Castelo.

Apresentam-se inicialmente, as bases teóricas referentes ao projecto de linhas aéreas, nomeadamente ao seu cálculo eléctrico e mecânico, assim como os aspectos normativos relevantes que a norma introduz ou simplesmente altera relativamente ao Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão.

Seguidamente, expõe-se a memória descritiva e justificativa do projecto da linha aérea Vila Fria - Portucel.

É também apresentada uma pequena análise do projecto realizado, do ponto de vista do projectista, onde se inclui a descrição sequencial do trabalho desenvolvido, métodos adoptados, e resolução dos desafios encontrados.

Abstract

This report is based on an internship at *EDP Distribuição Energia SA*, namely in the *departamento de infra-estruturas Norte*, in *Vila Nova de Gaia*.

The goal of this internship was the to develop a project of an overhead high-voltage electrical line based on the new European Standard EN50341-1 entitled “Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV - General requirements - Common specifications and taking into consideration the national normative aspects for Portugal referred to it. The overhead line consists on a 60 kilovolt double line connecting the *Vila Fria* substation to the Portucel substation, both situated in the *Viana do Castelo* area.

Firstly, it's given the theoretical basis concerning the overhead lines project, namely its electrical and mechanical calculations, as well as the relevant normative aspects introduced or simply changed by the standard relatively to the present active regulation in Portugal, *Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão* .

Next, it's presented the descriptive memory of the Vila Fria - Portucel overhead line project.

It's then given a short analysis of the developed project, from the project manager point of view, which includes a sequential description of the work done, applied methods, and how to overcome the challenges that came up in the process.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, um forte agradecimento ao meu orientador Prof. Dr. António Machado e Moura, pela confiança depositada em mim e pelo esforço que possibilitou a realização deste estágio numa empresa como a EDP Distribuição, SA.

Ao meu co-orientador Engº Ricardo Pina, pelo acolhimento na empresa e pelo apoio e excelente orientação prestados na realização deste trabalho.

A toda a equipa do departamento de Projecto e Construção da EDP Distribuição, Vila Nova de Gaia, pela simpatia em especial ao técnico de desenho Sr. Júlio Fortuna pela enorme ajuda dispensada na fase final do projecto.

Aos meus pais, que sempre me proporcionaram as melhores condições para atingir os meus objectivos, pela compreensão e apoio com que nunca me faltaram.

Aos meus amigos, por todo o apoio e preocupação.

À Andreia, pelas palavras de incentivo e motivação nos momentos mais difíceis.

Índice

Resumo	v
Abstract.....	vii
Agradecimentos	ix
Índice.....	xi
Lista de figuras	xiv
Lista de tabelas	xvi
Abreviaturas e Símbolos	xvii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1. Descrição e Objectivo do Projecto	1
1.2. Introdução da Norma Europeia EN50341-1	1
Capítulo 2	3
Linhas Aéreas de Alta Tensão - Bases Teóricas e Aspectos Normativos	3
2.1. Generalidades	3
2.2. Elementos Constituintes das Linhas	4
2.2.1. Condutores	4
2.2.2. Secção dos Condutores	5
2.2.2.1. Efeito Coroa	5
2.2.3. Cabo de Guarda.....	6
2.2.4. Isoladores	8
2.2.5. Apoios	10
2.2.6. Fundações.....	10
2.2.7. Rede de Terras.....	12
2.3. Cálculo Eléctrico	14
2.3.1. Objectivo	14
2.3.2. Tensão Nominal	15
2.3.3. Geometria dos Condutores da Linha	15
2.3.4. Constantes Físicas	16
2.3.4.1. Resistência	16
2.3.4.2. Coeficiente de Auto-indução	18
2.3.4.3. Capacidade	18
2.3.4.4. Condutância	19

2.3.5.Constantes Eléctricas	19
2.3.5.1.Reactância	19
2.3.5.2.Susceptância	20
2.3.5.3.Impedância	20
2.3.5.4.Admitância.....	21
2.3.6.Transmissão de Energia em Regime Permanente.....	21
2.3.6.1.Impedância Característica	21
2.3.6.2.Ângulo Característico	21
2.3.6.3.Fórmulas Gerais.....	22
2.3.6.4.Fórmulas Aproximadas.....	23
2.3.6.5.Intensidade e Densidade de Corrente	23
2.3.6.6.Perdas de Energia	24
2.3.6.7.Queda de Tensão	24
2.3.7.Campo Electromagnético	24
2.4. Cálculo Mecânico	25
2.4.1.Objectivo	25
2.4.2.Tensões Mecânicas Máximas.....	25
2.4.3.Acções sobre as Linhas	26
2.4.3.1.Acção do Vento	26
2.4.3.2.Velocidade e Pressão Dinâmica do Vento	26
2.4.3.3.Forças do Vento sobre os Elementos da Linha	28
2.4.3.4.Acção do Gelo.....	29
2.4.3.5.Acção da Variação da Temperatura	29
2.4.3.6.Temperaturas Mínima e Máxima de Projecto.....	30
2.4.4.Estados Atmosféricos	30
2.4.5.Coefficientes de Sobrecarga	30
2.4.6.Equação dos Estados	32
2.4.7.Cantão e Vão Equivalente Fictício	34
2.4.8.Vão Crítico.....	36
2.4.9.Estado mais Desfavorável	36
2.4.10.Geometria das Linhas	37
2.4.10.1.Aproximação Parabólica	38
2.4.10.2.Vãos Desnívelados.....	39
2.4.10.3.Vãos em Patamar	44
2.4.10.4.Apoio Enforcado.....	45
2.4.11.Desvio Transversal das Cadeias de Isoladores	46
2.4.12.Distâncias de Isolamento	48
2.4.13.Distâncias Mínimas Admissíveis.....	50
2.4.14.Apoios.....	52
2.4.14.1.Apoios de Alinhamento.....	52
2.4.14.2.Apoios de Ângulo	53
2.4.14.3.Apoios Fim de Linha	54
Capítulo 3	55
Projecto linha Vila Fria - Portucel - Memória Descritiva e Justificativa	55
3.1. Objectivo.....	55
3.2. Regulamentação	55
3.3. Corrente e Tensão	55
3.4. Cálculo Eléctrico	56
3.4.1.Características dos Cabos.....	56
3.4.2.Intensidade de Corrente	56
3.4.3.Perdas de Energia	57
3.4.4.Queda de Tensão	57
3.4.5.Capacidade	61
3.4.6.Susceptância	61
3.4.7.Condutância	61
3.4.8.Admitância	62
3.4.9.Impedância	62
3.4.10.Impedância Característica	63

3.4.11. Isoladores.....	63
3.5. Cálculo Mecânico	64
3.5.1. Tensões Mecânicas Máximas	64
3.5.2. Coeficientes de Sobrecarga	65
3.5.3. Parâmetro da Catenária e Flecha máxima	67
3.5.4. Apoios	71
3.5.5. Verificação da Estabilidade dos Apoios.....	71
3.5.5.1. Apoio Fim de Linha	73
3.5.5.2. Apoio em Alinhamento.....	75
3.5.5.3. Apoio de Ângulo.....	78
3.5.6. Desvio Transversal das Cadeias de Isoladores	80
3.5.7. Distâncias entre Condutores.....	81
3.5.8. Cruzamentos com Linhas de Telecomunicações	83
3.5.9. Cruzamentos com Linhas Eléctricas de Baixa Tensão.....	83
3.5.10. Cruzamentos com Linhas Eléctricas Média Tensão.....	83
3.5.11. Cruzamentos com Linhas Eléctricas Alta Tensão	83
3.5.12. Cruzamentos com Estradas e Caminhos de Ferro	83
Capítulo 4	84
Execução e Análise do Projecto	84
4.1. Objectivo	84
4.2. Cabo Condutor e Cabo de Guarda.....	84
4.3. Perfil Longitudinal da Linha.....	84
4.4. Coeficientes de Sobrecarga	85
4.5. Vãos de Cálculo	85
4.6. Traçado da Linha.....	85
4.6.1. Exemplo	86
4.7. Cantões	87
4.8. Verificação do Desvio Transversal das Cadeias de Isoladores.....	88
4.8.1. Exemplo 1.....	88
4.8.2. Exemplo 2.....	89
4.9. Escolha dos Apoios.....	89
4.9.1. Apoios Fim de Linha.....	90
4.9.2. Apoios de Ângulo	90
4.9.3. Apoios de Alinhamento	90
4.10. Distâncias entre Condutores	90
4.11. Conclusão do Projecto	90
Capítulo 5	92
Conclusões e Trabalhos Futuros	92
5.1. Conclusões Gerais.....	92
5.2. Comparação EN50341-1 vs RSLEAT.....	93
5.3. Trabalhos Futuros.....	96
Referências	97
Anexo A - Parâmetro da catenária e flecha do condutor	99
Anexo B - Parâmetro da catenária e flecha do cabo de guarda	100
Anexo C - Peso real dos Condutores P, Desvio Transversal das Cadeias de Suspensão θ e Distância Mínima entre Condutores D	101
Anexo D - Esforços nos Apoios em daN e escolha do Tipo de Apoio	102
Anexo E- Distâncias Externas admissíveis segundo o RSLEAT	103
Anexo F - Linha Vila Fria - Portucel - Planta Topográfica	104
Anexo G - Linha Vila Fria - Portucel - Perfil Longitudinal e Planta Parcelar	105

Lista de figuras

Figura 2.1 - Geometria do cabo de guarda (Ângulo de protecção externa), adaptado de [Távora]	7
Figura 2.2 - Cadeia de isoladores em suspensão	8
Figura 2.3 - Cadeia de isoladores em amarração	8
Figura 2.4 - Abordagem ao projecto da rede de terras, tendo em conta as tensões de toque. .	14
Figura 2.5 - Geometria dos condutores de uma linha dupla, adaptado de [Rodrigues]	15
Figura 2.6 - Esquema das forças aplicadas num condutor, adaptado de [Vale]	31
Figura 2.7 - Deslocamento longitudinal das cadeias de isoladores, [Távora]	35
Figura 2.8 - Ilustração de um cantão composto por três vãos, [Távora].....	35
Figura 2.9 - Árvore de decisão para determinação do estado mais desfavorável, [Leite]	37
Figura 2.10 - Posições relativas das curvas catenária e parábola a), adaptado de [Vale]	39
Figura 2.11 - Posições relativas das curvas catenária e parábola b), adaptado de [Checa]	39
Figura 2.12 - Representação de um vão desnivelado, adaptado de [Vale]	40
Figura 2.13 - Vão em patamar, adaptado de [Távora]	44
Figura 2.14 - Apoio enforcado, adaptado de [Távora]	45
Figura 2.15 - Desvio Transversal da cadeia de isoladores, adaptado de [Checa].	46
Figura 2.16 - Ilustração de dois vãos desnivelados, [Avril]	47
Figura 3.1 - Topo de um apoio tipo FB30ADN e respectivas distâncias entre pontos de fixação dos cabos expressas em metros	58
Figura 3.2 - Topo de um apoio tipo FB95ADN e FB165ADN e respectivas distâncias entre pontos de fixação dos cabos expressas em metros	58
Figura 3.3 - Representação das forças nos apoios segundo as direcções consideradas	72
Figura 3.4 - Apoio Fim de Linha de Ângulo.....	73

Figura 3.5 - Apoio em Alinhamento.....	75
Figura 3.6 - Apoio de Ângulo.....	78
Figura 4.1 - Troço da linha com cruzamentos de outras linhas.....	86
Figura 4.2 - Apoio Enforcado.....	87
Figura 4.3 - Troço da linha com desnível acentuado	88
Figura 4.4 - Troço da linha com desnível pouco acentuado.....	89

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Características mecânicas e eléctricas do alumínio-aço.....	5
Tabela 2.2 - Linha de fuga específica mínima em função do nível de poluição da região atravessada pela linha	9
Tabela 2.3 - Coeficiente de compressibilidade a 2 m de profundidade consoante o tipo de terreno [Leite]	11
Tabela 2.4 - Tensões de toque admissíveis	13
Tabela 2.5 - Velocidades do vento em Zona A e Zona B , ...	27
Tabela 2.6 - Pressão dinâmica do vento em função da altura e da zona de vento, [EN50341-3-17].....	28
Tabela 2.7 - Distâncias externas admissíveis	51
Tabela 2.8 - Casos de carga normalizados	52
Tabela 3.1 - Características do cabo condutor e cabo de guarda.....	56
Tabela 3.2 - Características dos Isoladores U70BL.....	64
Tabela 3.3 - Tensões mecânicas máximas para os diferentes vãos	64
Tabela 3.4 - Forças do vento e coeficientes de sobrecarga para os diferentes estados atmosféricos	67
Tabela 3.5 - Parâmetro da catenária e flecha do condutor para os vão médios considerados ..	69
Tabela 3.6 - Parâmetro da catenária e flecha do cabo de guarda para os vão médios considerados.....	70
Tabela 3.7 - Esforços nominais suportados pelo apoios em cada caso de carga em daN	72
Tabela 3.8 - Distâncias eléctricas Del e Dpp.....	82

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CENELEC	<i>Comité Européen de Normalisation Électrotechnique</i>
DGEG	Direcção Geral de Energia e Geologia
RSLEAT	Regulamento de Segurança de Linha Eléctricas de Alta Tensão
ICNIRP	<i>International Commission on Non Ionizing Radiation Protection</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1. Descrição e Objectivo do Projecto

O presente documento consiste no relatório de projecto que visa descrever o trabalho desenvolvido em ambiente de estágio na EDP Distribuição Energia SA, no departamento de infra-estruturas Norte em Vila Nova de Gaia. Foi-me, assim dada a oportunidade de realizar um projecto de uma Linha Aérea de Alta Tensão tendo por base a nova norma europeia EN50341-1 *“Overhead Electrical Lines exceeding 45 kV”*.

Nos projectos actuais, a norma não é ainda aplicada neste departamento da EDP, sendo que está numa fase de transição, com a adaptação e reprogramação de software usado nos projectos de modo a ficar em conformidade com os novos aspectos normativos. Por este motivo, foi um trabalho aliciante, na medida em que foi realizado algo de novo e útil para este departamento. Assim, numa fase inicial foi imprescindível uma leitura e estudo da norma de modo a captar principais diferenças, semelhanças e modificações relativas ao Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão.

Com a realização deste trabalho, pretendeu-se demonstrar as competências adquiridas no estudo de linhas aéreas de alta tensão e no seu respectivo projecto. Os conhecimentos adquiridos, assim como os aspectos normativos introduzidos pela norma foram aplicados na realização de um projecto real que diz respeito a uma linha dupla de transmissão de energia, ligando a subestação de Vila Fria à subestação da Portucel em Viana do Castelo.

1.2. Introdução da Norma Europeia EN50341-1

A norma europeia na qual o projecto realizado se baseia foi preparada pelo subcomité CTE-11 e aprovada pelo CENELEC como EN50341-1 *Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV* em 1 de Janeiro de 2001. Foi estipulada a obrigatoriedade de implementação a nível

nacional através da publicação de um documento nacional idêntico até 1 de Maio de 2002 e a retirada de documentos normativos nacionais em conflito com a norma até 1 de Janeiro de 2004.

A norma aplica-se a linhas eléctricas de tensão superior a 45 kilovolts, especificando os requisitos gerais no projecto e construção de novas linhas aéreas que assegurem o desempenho da sua função, garantindo a segurança de pessoas e respeitando as condições ambientais.

Assim, consiste numa parte denominada *General Requirements - Common specifications*, sendo este o documento principal, onde se inclui as cláusulas comuns a todos os países cujos comités electrotécnicos pertencem ao CENELEC e uma parte referida como *NNA's (national normative aspects)*, preparada pelos comités nacionais de cada país e que reflecte a prática nacional e respectivos aspectos normativos específicos.

O documento além de ser muito completo, abordando todos os aspectos relevantes nas linhas aéreas, tem ainda um carácter bastante didáctico, apresentando vários anexos, seja de carácter normativo ou informativo com metodologias de cálculo e dimensionamento.

A leitura e estudo da norma, foi indispensável para a realização deste trabalho, tendo sido o ponto de partida para a realização do projecto.

Uma vez que, até então o projecto de linhas aéreas é realizado de acordo com o RSLEAT (Regulamento de Segurança de Linha Eléctricas de Alta Tensão), tentou-se estabelecer uma certa comparação dos dois documentos. À partida verificou-se que não existem situações de conflito marcante, mas sim pequenas alterações ou mesmo mudança de métodos de dimensionamento, que, alterando os resultados finais, não representa uma revolução total no que diz respeito a resultados obtidos. As principais diferenças e semelhanças serão discutidas na secção das conclusões deste trabalho.

Capítulo 2

Linhas Aéreas de Alta Tensão - Bases Teóricas e Aspectos Normativos

2.1. Generalidades

Designa-se por linha, um circuito simples constituído por um certo número de condutores adequado ao tipo de corrente a transmitir (corrente contínua ou corrente alternada). Quando se fala em linha aérea de alta tensão trata-se de um circuito de corrente alternada polifásico, estando a linha suportada por postes ao longo do seu trajecto. Como, a maior parte do isolamento é feito pelo ar, as linhas aéreas de alta tensão são de uma modo geral o método mais barato de transmissão de energia a larga escala. Os postes que sustentam os condutores são geralmente metálicos ou de betão de acordo com os esforços que têm que suportar e os condutores são em alumínio ou alumínio reforçado com aço.

São diversos os factores que condicionam o projecto de linhas aéreas de alta tensão. Estes poderão ser de natureza eléctrica, mecânica, ambiental e económica. Em relação aos dois últimos, é na generalidade dos casos difícil satisfazer plenamente nos dois domínios, no entanto, é sempre objectivo atender aos dois factores justamente e encontrar uma solução que represente a melhor possível neste problema multi-critério.

Os factores eléctricos são os que levam à determinação do tipo de condutor, a secção utilizada, tipo de isoladores e número de condutores por fase.

Os factores mecânicos têm a ver com as forças mecânicas resultantes da acção dos agentes atmosféricos (temperatura, vento, gelo) nos elementos constituintes da linha e os pesos próprios desses elementos.

2.2. Elementos Constituintes das Linhas

2.2.1. Condutores

Os condutores a empregar nas linhas aéreas deverão, regra geral, ser nus (sem isolamento), pois a experiência tem demonstrado que para tensões iguais ou superiores a 60 kV , os condutores isolados nem sempre oferecem garantia quanto à sua inalterabilidade e acrescentando-se o facto de serem mais caros conclui-se que a sua utilização não se justifica, excepto em circunstâncias em que seja efectivamente aconselhado, como em zonas muito urbanizadas [Távora].

Na execução de linhas aéreas são, então, usados condutores multifilares, homogéneos ou heterogéneos dependendo se são constituídos por um só metal ou mais que um metal. Os metais geralmente utilizados num cabo condutor são o cobre, as ligas de cobre, o alumínio e as ligas de alumínio. Actualmente, os cabos empregues são na maioria das vezes em alumínio-aço designados por A.C.S.R (Aluminium Cable Steel Reinforced da literatura anglo-saxónica), sendo, constituídos por uma alma de aço zincado, revestida por uma ou mais camadas de fios de alumínio. Assim, a condutividade eléctrica é assegurada pelo revestimento de alumínio enquanto a alma de aço contribui para uma maior resistência mecânica do cabo.

É comum, neste tipo de condutor que os fios de alumínio tenham o mesmo diâmetros que os de aço, exceptuando casos em que é necessário reforçar a alma de aço para uma resistência mecânica superior [Zoppetti].

Quanto à temperatura dos cabos, a cláusula 5.2.2/PT.4 da EN50341-3-17 diz que a temperatura máxima admissível no curto circuito para os condutores de fase é de 160°C , sendo para os cálculos de aquecimento sofridos pelos condutores considerada uma temperatura inicial de 60°C . No entanto, a norma recomenda que essa temperatura máxima não ultrapasse os 125°C , uma vez que acima deste valor os cálculos de flechas são imprecisos devido à ocorrência de forças de compressão nos fios de alumínio dos condutores.

De acordo com [Ferreira], da comparação entre o cabo de cobre e o de alumínio-aço com as mesma resistência, logo com as mesmas perdas:

- O cabo de alumínio-aço apresenta um diâmetro 40% superior o que permite reduzir o efeito coroa, bastante útil nas linhas de alta e muito alta tensão;
- O cabo de alumínio-aço apresenta uma maior resistência mecânica e é mais leve o que permite reduzir as flechas e aumentar os vãos, consequentemente reduzindo a altura dos apoios e o seu número assim como número de isoladores e ferragens

A tabela 2.1 apresenta algumas características mecânicas e eléctricas do alumínio-Aço.

Tabela 2.1 - Características mecânicas e eléctricas do alumínio-aço

		Cabo alumínio-aço	
Características Eléctricas	Resistividade a 20°C	0,02896	[$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]
	Coeficiente de temperatura de resistividade	400×10^{-5}	-
Características Mecânicas	Peso específico a 20°C	3,47	[Kg/dm ³]
	Tensão de ruptura	31	[Kg/mm ²]
	Módulo de elasticidade	$7,8 \times 10^3$	[Kg/mm ²]
	Coeficiente de dilatação linear	19×10^{-6}	-

2.2.2. Secção dos Condutores

No que diz respeito à escolha da secção dos condutores a adoptar, são vários os critérios a considerar. É, no entanto, de referir que em última análise a escolha da secção está limitada às secções normalizadas existentes. Assim, analisados os critérios e efectuados os cálculos que conduzem a um valor de secção transversal, deve ser escolhida a secção normalizada imediatamente superior. A escolha do tipo de condutores e a secção a utilizar está a cargo do Planeamento da Gestão da Rede.

Os critérios a considerar são os seguintes [Ferreira]:

- Intensidade de corrente admissível em regime permanente
- Queda de tensão
- Aquecimento
- Características mecânicas dos condutores
- Intensidade de curto-circuito admissível
- Efeito Coroa
- Aparelhagem de protecção
- Perdas de energia
- Preço

2.2.2.1. Efeito Coroa

Se os condutores de uma linha atingem um potencial suficientemente grande que passe a correspondente rigidez dieléctrica do ar produzem-se perdas de energia devido à corrente que se forma no meio, correspondendo a uma corrente de fuga, análoga à da condutância de isolamento [Checa]. Assim, as manifestações do efeito coroa dependem do gradiente

potencial nas imediações dos condutores, aumentam com o nível das tensões e diminuem com o aumento da secção dos condutor. Isto faz com que, para linhas de tensões superiores a 200kV, a minimização das manifestações dos efeitos coroa seja um critério de grande relevância. Nos condutores aéreos o efeito é visível na escuridão da noite, sendo que os condutores são envolvidos num arco luminoso azulado, de secção transversal circular em forma de coroa e daí o nome deste fenómeno.

Há que distinguir tensão crítica disruptiva e tensão critica visível. As perdas por efeito coroa começam a produzir-se consideravelmente a partir do momento em que a tensão da linha é superior à tensão crítica disruptiva, à qual se dá disrupção do dieléctrico (ar) [Zoppetti]. A tensão crítica visível (de valor superior ao da tensão crítica disruptiva) é a tensão a partir da qual os efeitos luminosos se começam a manifestar efectivamente. Isto é, as perdas por efeito coroa podem ocorrer mesmo sem que o fenómeno seja já visível.

A fórmula geral da tensão crítica deve-se ao Engenheiro americano Peek e é a seguinte:

$$U_{cr} = \frac{29,8}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{3} \cdot m_c \cdot \delta \cdot m_t \cdot r \cdot n \cdot \log\left(\frac{D}{r'}\right) \quad [kV] \quad (2.1)$$

Onde:

29,8 é o valor em kilovolts por centímetro da rigidez dieléctrica do ar a 25°C e à pressão barométrica de 76 cm de mercúrio. Encontra-se dividido por $\sqrt{2}$ para se operar com valores eficazes;

m_c é o coeficiente de rugosidade do condutor $m_c \in [0,83;0,87]$ para cabos;

m_t é coeficiente que mede o efeito da chuva e vale 1 com tempo seco e 0,8 com tempo chuvoso;

r é o raio do condutor em centímetros;

n é o número de condutores de cada fase;

r' é o raio fictício em centímetros;

D é a distância entre condutores em cm;

δ é o factor de correcção da densidade do ar, em que $\delta = \frac{3,926 \cdot h}{273 + \theta}$ h é a

pressão barométrica em centímetros de mercúrio e θ é a temperatura do ar em °C.

O cálculo da tensão crítica disruptiva considera-se necessário geralmente apenas para tensões de serviço superiores a 100 kV, uma vez que para tensões inferiores, a tensão crítica disruptiva ultrapassa sempre a de serviço [Távora].

2.2.3. Cabo de Guarda

A função principal dos cabos de guarda nas linhas aéreas de transmissão, é a de interceptar as descargas atmosféricas e evitar que atinjam os condutores, reduzindo assim as possibilidades de ocorrerem interrupções no fornecimento de energia [Almeida]. Além disso, contribuem na redução da indução (da ordem dos 15% a 25%) em circuitos de telecomunicações estabelecidos nas vizinhanças da linha, fazem a interligação dos circuitos

de ligação à terra dos apoios e podem ainda incluir circuitos de comunicação (voz, dados) com fibras ópticas. Os cabos de guarda são executados com cabos de aço zincado ou inoxidável, ou de qualquer dos materiais admitidos para os condutores. A sua secção é estabelecida por forma a que a sua temperatura não ultrapasse 170°C quando atravessada, durante 0,5 s por uma corrente igual a 75% da corrente de defeito fase-terra. Segundo a cláusula 5.2.2/PT.3 da EN50341-3-17 a temperatura final máxima admissível no curto-circuito para cabos de guarda em alumínio-aço é de 200°C e para cabos em aço é de 400°C, sendo que nos cálculos de aquecimento sofrido pelos cabos será considerada uma temperatura inicial de 30°C.

Os cabos de guarda são, geralmente, estabelecidos na parte mais alta dos apoios e ligados à terra através desses apoios, de acordo com as seguintes recomendações:

- Havendo um só cabo de guarda, é estabelecido por forma a que os pontos de fixação de todos os condutores fiquem dentro de um ângulo de 20° com vértice no ponto de fixação do cabo de guarda e a bissectriz vertical com mostra a figura 2.1 (cláusula 5.3.3.5/PT1 da EN50341-3-17);
- Havendo dois cabos de guarda, são estabelecidos por forma a que cada um dos condutores fique relativamente a algum dos cabos de guarda, nas condições do ponto anterior.

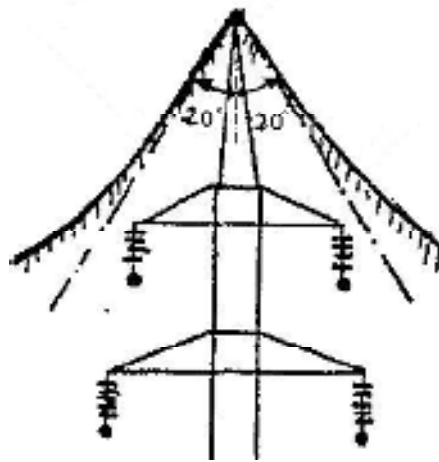


Figura 2.1 - Geometria do cabo de guarda (Ângulo de protecção externa), adaptado de [Távora]

A geometria adoptada dos cabos de guarda deve assegurar que os contornamentos resultantes de descargas atmosféricas directas sobre os condutores de fase é reduzida a um por 100 km de linha e por ano.

2.2.4. Isoladores

Os isoladores têm como função evitar a passagem de corrente dos condutores para o apoio, e sustentar mecanicamente os cabos [Leite]. Em linhas aéreas de alta tensão, são geralmente usados isoladores na forma de cadeia, quer em cadeias de suspensão normalmente usadas em apoios de alinhamento, quer em cadeias de amarração no caso de apoios de ângulo, reforço, fim de linha e derivação. As cadeias de isoladores são concebidas de modo a serem fixadas articuladamente às armações dos apoios. As cadeias são constituídas por vários isoladores de campânula de porcelana, vidro, ou resina artificial, por componentes metálicos e pelo material ligante que as justapõe. Além disso, poderão ser ainda providas de anéis de guarda (também designados anéis de Nicholson), isto é, anéis metálicos colocados num ou noutro extremo da cadeia, ou em ambos, para assegurar uma protecção contra os arcos de descarga eléctrica e uma melhor repartição de potência pelos elementos da cadeia. A utilização de hastes de descarga dispostas do mesmo modo permite atingir o mesmo objectivo. As figuras 2.2 e 2.3 representam cadeias de isoladores em suspensão e amarração respectivamente.

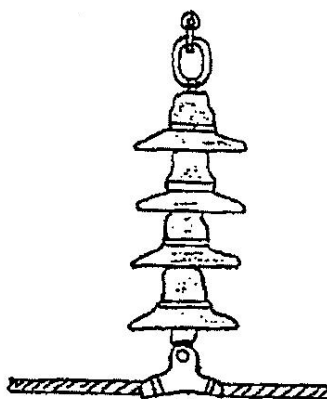


Figura 2.2 - Cadeia de isoladores em suspensão

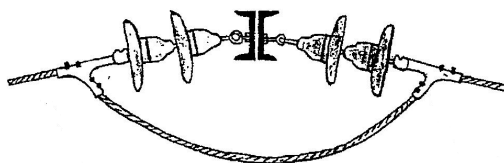


Figura 2.3 - Cadeia de isoladores em amarração

Independentemente da sua constituição ou configuração, os isoladores devem estar suficientemente dimensionados para resistir aos esforços mecânicos actuantes, nomeadamente a acção do vento sobre os próprios isoladores e os esforços transmitidos pelos condutores (peso próprio, resultante da acção do vento e tensão mecânica de tracção).

Como requisito mecânico, a cláusula 10.7/PT.1 da EN50341-3-17 impõe que cadeias de isoladores devem ter uma carga mínima de ruptura mecânica ou electromecânica pelo menos igual à tracção de ruptura dos condutores.

O nível de isolamento adoptado é definido pela tensão suportada por um isolador sob chuva, durante um minuto e à frequência de 50 Hz. A tensão de contornamento sob chuva dos

isoladores, deverá ser superior pelo menos em 10% à respectiva tensão de ensaio e deve ser pelo menos 4 vezes maior que a tensão simples da linha aérea, pois as máximas sobretensões de manobra numa rede não ultrapassarão cerca de 3 a 3,5 vezes a respectiva tensão simples [Távora].

Em redes trifásicas a tensão de contornamento sob chuva U_{ch} não deverá ser inferior a:

$$3 \cdot \left(\frac{\sqrt{2} \cdot U_m}{\sqrt{3}} \right) = 2,45 \cdot U_m \quad [kV]$$

em que U_m é a tensão mais elevada.

Define-se grau de isolamento pela relação entre o comprimento da linha de fuga de uma cadeia de isoladores e a tensão da linha [Checa]. O comprimento da linha de fuga de um isolador mede-se sobre a sua superfície, e geralmente encontra-se indicado na tabela das suas características electromecânicas.

Na tabela 2.2 indicam-se os valores mínimos da linha de fuga para cadeias de isoladores consoante o nível de poluição das regiões atravessadas por linhas.

Tabela 2.2 - Linha de fuga específica mínima em função do nível de poluição da região atravessada pela linha

Classe	Nível de poluição	Linha de fuga específica mínima [cm/kV]
1	Fraca	1,6
2	Média	2,0
3	Forte	2,5
4	Muito Forte	3,1

Quando os isoladores falham na sua função de não permitir a passagem de corrente dos condutores aos apoios, é geralmente devido aos seguintes fenómenos [Távora]:

- Condutividade através da massa dos isoladores - com os materiais actualmente utilizados no fabrico de isoladores, é insignificante a corrente eléctrica devida a este fenómeno;
- Condutividade superficial - está associada à acumulação de humidade, poeiras e depósitos salinos (se perto do mar) à superfície dos isoladores. É possível atenuar este fenómeno, conferindo aos isoladores formas e dimensões adequadas de modo a aumentar os comprimentos das linhas de fuga;
- Perfuração da massa do isolador - resulta da presença de impurezas no seio da massa do isolador;

- Descarga disruptiva - resulta do estabelecimento de um arco eléctrico entre o condutor e o apoio, através do ar que os separa, cuja rigidez dieléctrica, em determinadas situações não é suficiente para evitá-lo. O afastamento conveniente dos condutores e apoios é um modo de evitar este fenómeno.

2.2.5. Apoios

Os apoios desempenham dupla função nas linhas aéreas de transmissão [Almeida]:

- Proporcionam os pontos de fixação dos cabos condutores, garantindo as distâncias de segurança entre condutores, entre os condutores e o próprio apoio e entre os condutores e o solo e obstáculos diversos no trajecto da linha;
- “Amarram” as linhas ao terreno através das suas fundações, transmitindo ao terreno as forças resultantes de todas as solicitações a que são submetidos os elementos dos apoios.

Nas linhas aéreas de alta tensão são utilizados apoios metálicos e/ou apoios de betão.

Os apoios metálicos apresentam a vantagem de poderem ser transportados divididos em partes, sendo montados e aparafusados no local, o que facilita a sua colocação principalmente em locais de difícil acesso. No entanto, são apoios com uma base de grande dimensão, tanto maior quanto maior a altura do apoio e têm um preço elevado relativamente aos de betão. Estes últimos, ocupam menos espaço no solo, facilitando a sua aceitação pelos proprietários dos terrenos onde são implantados e além disso são mais baratos. A sua desvantagem prende-se com a maior dificuldade no seu transporte (já montados) e tornando muito difícil ou mesmo impossível a sua implantação em locais de difícil acesso.

Os apoios, no que diz respeito à sua função, podem ser de:

- Alinhamento;
- Ângulo;
- Reforço em alinhamento;
- Reforço em ângulo;
- Derivação em alinhamento;
- Derivação em ângulo;
- Reforço em derivação em alinhamento;
- Reforço em derivação em ângulo;
- Fim de linha.

2.2.6. Fundações

Como já referido, é através das fundações que são transmitidos ao solo os esforços resultantes de todas as solicitações exteriores que lhe estão aplicadas. Assim, o maciço de fundação deve ser dimensionado de modo a que, sob o efeito das solicitações máximas a que possa vir a ser submetido, não ocorram aumentos perigosos da flecha dos condutores e muito menos o derrubamento do apoio. Os critérios para o dimensionamento do maciço de fundação

são:

- Natureza dos terrenos;
- Responsabilidade da linha;
- Função do apoio;
- Esforços envolvidos;
- Altura do apoio.

As fundações poderão constituir, um maciço único ou então dois ou quatro maciços separados de acordo com o apoio a que se destinam. No caso de maciço único, as fundações são dimensionadas pelo método de Sulzberger que se baseia nas reacções horizontais do terreno. As fundações constituídas por dois ou quatro maciços independentes, sendo as mais comuns para os postes de linhas de alta tensão, são dimensionados pelo método do terreno deslizante.

As características do terreno nos locais de implantação das fundações têm assim, influência no seu dimensionamento. Assim, um factor que caracteriza cada terreno é o seu coeficiente de compressibilidade, que traduz o esforço necessário, em daN, para enterrar de 1 cm, uma placa com 1 cm² de área de superfície.

Na tabela 2.3 são indicados valores habituais do coeficiente de compressibilidade a 2 m de profundidade para terrenos de diferente natureza e composição.

Tabela 2.3 - Coeficiente de compressibilidade a 2 m de profundidade consoante o tipo de terreno [Leite]

Tipo de Terreno	Coeficiente de compressibilidade a 2 m de profundidade (daN. Cm⁻³)
Lodo, turfa e terreno pantanoso em geral	0
Areia fina e média, até 1mm de tamanho de grão	6 a 8
Areia grossa até 3 mm de tamanho de grão e areia com pelo menos 1/3 do volume de calhau rolado com 70 mm de diâmetro	8 a 10
Terreno Coerente (barro, argila) muito mole	0
Terreno Coerente (barro, argila) mole facilmente amassável	2 a 4
Terreno Coerente (barro, argila) consistente dificilmente amassável	5 a 7
Terreno Coerente (barro, argila) médio	8
Terreno Coerente (barro, argila) rijo	9

O cálculo deverá conduzir á satisfação das seguintes condições (cláusula 8.5.2/PT.1 da EN50341-3-17):

- As fundações de blocos separados, onde as cargas predominantes são verticais de compressão ou arrancamento, devem ser dimensionadas para resistir pelo menos a 1,5 vezes as cargas não acidentais de projecto resultantes dos apoios e 1,25 vezes as cargas acidentais resultantes dos apoios;
- As fundações e bloco único onde a carga predominante é o momento derrubante, devem ser projectadas por forma a que a inclinação máxima do eixo longitudinal seja de 1%

O cálculo do dimensionamento das fundações não será aqui objecto de maior pormenorização, uma vez que não é geralmente realizado pelo projectista, sendo que as dimensões das fundações vêm já especificadas para o respectivo apoio a que se destinam no catálogo do fabricante.

2.2.7. Rede de Terras

A instalação e teste da rede de terras, são realizados de tal modo a que realize a sua função em qualquer condição e mantenha as tensões de passo e de toque dentro de níveis aceitáveis.

A rede de terras deve, então, garantir os seguintes requisitos segundo a [EN50341-1]:

- Resistência mecânica e à corrosão;
- Suportar termicamente a maior corrente de defeito possível;
- Evitar danos nos equipamentos;
- Garantir segurança de pessoas;
- Assegurar um determinado nível de fiabilidade da linha.

Os apoios devem ser individualmente ligados à terra por intermédio de um eléctrodo de terra. Tratando-se de apoios de betão armado, os suportes metálicos dos isoladores devem ser ligados à terra do próprio apoio. Devem ainda ser ligados à terra dos apoios as estruturas metálicas dos aparelhos de corte ou de manobra. Na base do apoio, deverá ainda existir, ligada à terra do apoio, uma malha ou plataforma equipotencial colocada por debaixo do punho de comando da aparelhagem de corte ou de manobra [EDP]. Segundo a cláusula 6.2.2.2 da EN50341-3-17, a secção mínima dos condutores de terra e de ligação em cobre será de 16 mm² em instalação aérea ou de 35 mm² em instalação enterrada. No caso de condutores de terra e de ligação feitos de outros materiais, deve ser assegurada uma secção electricamente equivalente. Nos apoios de betão armado, a armadura longitudinal pode fazer parte do circuito de terra, se a secção for electricamente adequada.

Quanto à tensões de toque, define-se como a diferença de potencial entre as mãos e os pés de uma pessoa em contacto com um objecto ou estrutura energizada. A tensão de passo, é a tensão entre os pés de uma pessoa perto de um objecto ou estrutura energizada e ligada à terra.

A cláusula 6.2.4.1 da EN50341-3-17 estabelece os limites para as tensões de toque de acordo com a localização da seguinte forma:

- Zonas públicas
- Zonas frequentadas
- Zonas pouco frequentadas
- Zonas não frequentadas

As zonas referidas encontram-se devidamente caracterizadas na cláusula 6.2.4.3 da EN50341-3-17.

Sendo assim, as tensões de toque admissíveis em função da duração do defeito são, para zonas públicas e zonas frequentadas, as apresentadas na tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Tensões de toque admissíveis

Duração do defeito [s]	Tensões de toque admissíveis [V]	
	Zona pública	Zona frequentada
0,10	422	571
0,20	298	404
0,30	244	330
0,50	189	255
0,70	159	216
1.00	133	181
2.00	94	128

Não estão definidos limites para as zonas pouco frequentadas e não frequentadas com as seguintes condições:

- Para zonas pouco frequentadas, o tempo de eliminação do defeito deve ser sempre não superior a 0,5 segundos, caso contrário, devem ser tratadas como zonas frequentadas;
- Para zonas não frequentadas, o tempo de eliminação do defeito deve ser não superior a 3 segundos, caso contrário devem ser tratadas como zonas pouco frequentadas.

Quanto a tensões de passo, a norma não define valores admissíveis.

Posto isto, a figura 2.4 mostra um diagrama representativo da abordagem para o dimensionamento e estabelecimento da rede de terras com vista a garantir que as tensões de toque U_T não ultrapassem o limite admissível U_{TP} .

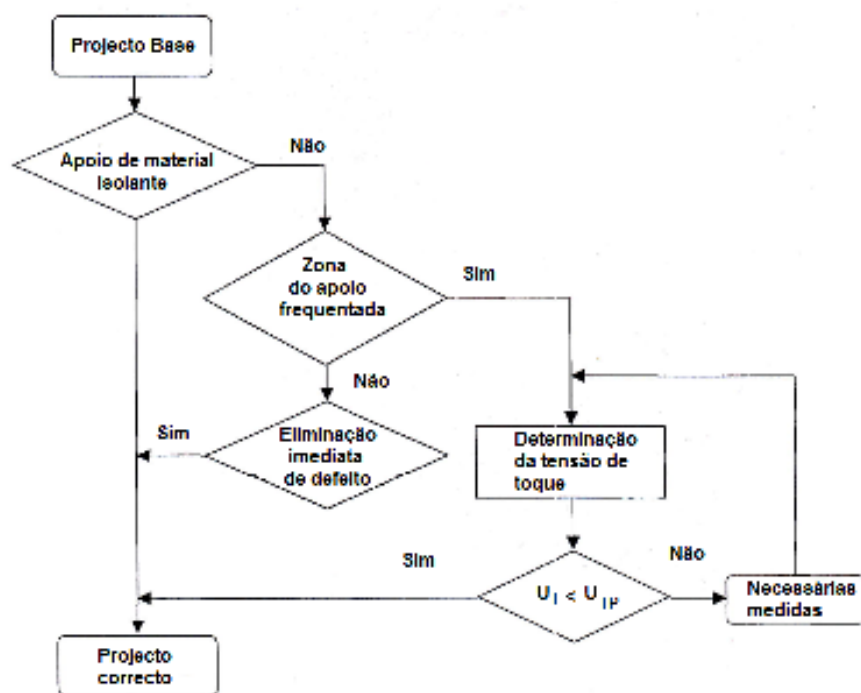


Figura 2.4 - Abordagem ao projecto da rede de terras, tendo em conta as tensões de toque.

Relativamente à figura 2.4, importa referir que:

- Por eliminação imediata de defeito, entende-se que a eliminação está assegurada em pelo menos 0,5 segundos.
- Nos cálculos ou medidas de campo, o sujeito de uma tensão de toque será considerado como situado a 1 metro de distância da estrutura do apoio, na direcção mais desfavorável, tendo em conta características geométricas do eléctrodo de terra e do solo.
- Nos casos em que a tensão de toque é maior que a admissível, são permitidas medidas para a sua redução através do nivelamento do potencial, como o uso de anéis condutores à volta do apoio e uso de uma camada superficial de solo isolante tal como gravilha ou asfalto.

2.3. Cálculo Eléctrico

2.3.1. Objectivo

O cálculo eléctrico tem como objectivo a determinação da tensão nominal da linha e da secção transversal dos condutores que a constituem de a forma a assegurar que não sejam excedidas as limitações técnicas impostas pelos condutores, nomeadamente as intensidades de corrente máximas admissíveis, quedas de tensão, perdas de energia e também a resistência mecânica.

2.3.2. Tensão Nominal

O Artigo nº 83 do Decreto - Lei 43335, de 19 de Novembro de 1960 diz:

Os valores nominais das tensões a adoptar no transporte ou na grande distribuição serão de 6000 V, 15 000 V, 30 000 V, 60 000 V, 100 000 V, 150 000 V e 220 000 V, devendo o material ser dimensionado para as tensões eficazes máximas definidas pela Comissão Electrotécnica Internacional.

A escolha da tensão de transporte deve, então, recair sobre uma das tensões normalizadas e geralmente aquela que minimize os custos. O aspecto económico é de grande importância no projecto de linhas aéreas. Quanto maior for a tensão nominal, associada a uma dada potência a transmitir, menor será a secção dos condutores a aplicar, mantendo-se o valor das perdas. Ora a diminuição da secção dos condutores contribui para a redução dos custos da linha, não só pelo facto de condutores de menor secção serem mais baratos, mas também porque desta maneira se diminui o peso da linha e consequentemente os esforços sobre os apoios, permitindo usar apoios mais baratos. No entanto, com o aumento da tensão, aumenta significativamente o custo dos isoladores a aplicar na linha. A tensão de transporte mais económica é, assim, definida por uma condição de equilíbrio e como já referido a escolha deve recair sobre a tensão normalizada mais próxima do valor calculado, seja esta inferior ou superior.

No caso em que uma linha se destina a ampliar uma rede existente, ou se admite que futuramente venha a ligar-se a ela, a solução mais corrente e mais económica está em adoptar a mesma tensão, sendo que as vantagens que eventualmente podem resultar da utilização de uma dada tensão diferente, são atenuadas pelos encargos de instalação e de exploração de estações transformadoras.

2.3.3. Geometria dos Condutores da Linha

A figura 2.5 mostra a geometria dos condutores de uma linha dupla, isto é, formada por dois ternos ligados em paralelo.

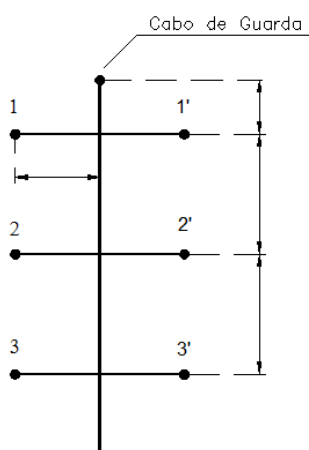


Figura 2.5 - Geometria dos condutores de uma linha dupla, adaptado de [Rodrigues]

A distância equivalente entre condutores D é dada por:

$$D = \sqrt[3]{D_1 \times D_2 \times D_3} \quad (2.2)$$

Com:

$$D_1 = \frac{\sqrt{D_{1-2} \times D_{1-2'} \times D_{1-3} \times D_{1-3'}}}{D_{1-1'}}$$

$$D_2 = \frac{\sqrt{D_{2-1} \times D_{2-1'} \times D_{2-3} \times D_{2-3'}}}{D_{2-2'}}$$

$$D_3 = \frac{\sqrt{D_{3-1} \times D_{3-1'} \times D_{3-2} \times D_{3-2'}}}{D_{3-3'}}$$

O cálculo da distância D foi aqui introduzido, pois é um dado necessário para cálculo de alguns parâmetros das linhas como se verificará mais a frente.

2.3.4. Constantes Físicas

As linhas de transmissão de energia são caracterizadas pelos seus parâmetros lineares, isto é, constantes físicas eléctricas por quilómetro de comprimento de linha. Os seus valores dependem das características físicas da linha como a secção dos condutores, disposição geométrica dos mesmos, existência ou não de condutores múltiplos, tipo de isolamento.

2.3.4.1. Resistência

A resistência eléctrica de um condutor é dada por:

$$R = \frac{\rho_\theta \cdot l}{S} [\Omega] \quad (2.3)$$

onde:

ρ_θ é resistividade do condutor a uma temperatura θ em Ω / km ;

l é o comprimento do condutor em km ;

S é a secção do condutor em mm^2 .

Assim, a resistência quilométrica é:

$$R_k = \frac{R}{l} = \frac{\rho_\theta}{S} [\Omega / km] \quad (2.4)$$

A resistividade de um condutor à temperatura θ é dado pela expressão:

$$\rho_{\theta} = \rho_{20} \cdot [1 + \beta(\theta - 20)] \quad [\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{km}] \quad (2.5)$$

Onde:

ρ_{θ} é resistividade do condutor a uma temperatura θ em $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{km}$;

ρ_{20} é a resistividade do condutor a 20°C em $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{km}$;

β é o coeficiente de temperatura da resistividade.

A resistividade a 20°C do condutor, assim como o coeficiente de temperatura de resistividade são dados conhecidos, característicos de cada tipo de condutor.

O valor da resistência eléctrica pode ainda sofrer uma correcção devido a duas outras influências. [Távora] expõe-nas da seguinte forma:

➤ Efeito pelicular ou de Kelvin

Salvo indicação em contrário, a resistência eléctrica atribuída a um condutor refere-se a corrente contínua. Porém, quando o condutor é atravessado por uma corrente alternada, o efeito pelicular (ou efeito Kelvin) faz aumentar essa resistência, embora para diâmetros de condutores usuais, este efeito seja pouco significativo.

Existem várias fórmulas empíricas que dão a relação entre os valores de resistência em corrente alternada R_a e em corrente contínua R_c . Uma delas diz que, num condutor unifilar a resistência linear em corrente alternada é dada por:

$$\frac{R_a}{R_c} = f(x) \quad \text{sendo} \quad x = \pi \cdot d \sqrt{\frac{2 \cdot f \cdot \mu_r}{\rho}} \quad (2.6)$$

onde:

d é o diâmetro do condutor em cm;

ρ é a resistividade eléctrica do condutor em $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m} \times 10^{-5}$;

f é a frequência da corrente alternada, em Hz;

μ_r é a permeabilidade magnética relativa do condutor (igual a 1 para cobre, alumínio e respectivas ligas).

Os condutores de alumínio-aço funcionam como se fossem tubulares, dado que a alma de aço não participa na condução de corrente. Neste tipo de condutores, para as dimensões usuais (secção de alumínio não superior a 600 mm^2) e à frequência de 50 Hz, o aumento da resistência devido ao efeito pelicular é geralmente inferior a 6%.

➤ Perdas magnéticas na alma de aço

Nos condutores de alumínio-aço, cada fio de alumínio comporta-se com um solenóide de grande passo que produz na alma de aço uma magnetização alternada. Como as diferentes camadas de fios de alumínio são alternadamente enroladas num sentido e no outro, se o condutor tiver duas camadas, o efeito dessa magnetização é quase nulo. Se tiver três camadas, o efeito é sensível, mas ainda pequeno, não excedendo 2 a 3% o aumento da resistência aparente.

2.3.4.2. Coeficiente de Auto-indução

O coeficiente de auto-indução para um condutor de uma linha é dado pela seguinte expressão:

$$L = \left[\frac{\mu}{2n} + 4,6 \cdot \log\left(\frac{D}{r'}\right) \right] \times 10^{-4} \text{ [H / km]} \quad (2.7)$$

onde:

μ é a permeabilidade do condutor (toma o valor 1 para condutores de cobre, alumínio, ligas de alumínio e cabos de alumínio-aço ou toma o valor 200 para condutores de aço galvanizado;

n é o número de condutores por fase;

D é distância equivalente entre condutores;

r' é o raio fictício definido por $r' = \sqrt[n]{nrR^{n-1}}$

sendo:

r o raio do condutor;

R o raio da circunferência que passa pelos condutores que formam a fase.

Assim, no caso de fase simples vem: $n = 1$ e $r' = r$ logo o coeficiente de auto-indução é dado por:

$$L = \left[0,5 + 4,6 \cdot \log\left(\frac{D}{r}\right) \right] \times 10^{-4} \text{ [H / km]} \quad (2.8)$$

2.3.4.3. Capacidade

A capacidade linear de serviço de um condutor de linha, é por definição, a relação entre a carga capacitiva electrostática desse condutor, sobre um comprimento unitário e a diferença de potencial existente, em cada instante, entre o condutor e o seu invólucro (terra para linhas aéreas), quando os condutores respectivos são sujeitos a um sistema polifásico

simétrico de diferenças de potencial em relação a esse invólucro [Távora].

Em linhas trifásicas, a capacidade por fase é dada por:

$$C = \frac{24,2}{\log\left(\frac{D}{r'}\right)} \times 10^{-9} \quad [F / km] \quad (2.9)$$

onde :

r' é o raio fictício em mm ;

D é a distância equivalente entre condutores em mm .

2.3.4.4. Condutância

Se o isolamento das linhas fosse perfeito, não haveria nenhuma corrente entre os condutores e os apoios, nem superficialmente nem através do isolamento. Neste caso a condutância seria nula. Mas na realidade, existe uma corrente, ainda que muito pequena porque a resistência do isolamento não é infinita [Checa]. A existência de uma corrente de perditância pode resultar da presença transitória de depósitos condutores à superfície dos isoladores ou do fenómeno de efeito de coroa. Assim, o valor da condutância varia com as condições atmosféricas, tipo de isolamento, número de isoladores na cadeia, apoios por quilómetro de linha e estado da superfície do condutor. Numa linha bem isolada e com tempo seco a condutância é praticamente nula.

O seu cálculo é dado por:

$$G = \frac{p}{Us^2} \times 10^{-3} \quad [S / km] \quad (2.10)$$

onde:

p é a energia perdida em kW / km ;

Us é a tensão eficaz simples em kV .

2.3.5. Constantes Eléctricas

2.3.5.1. Reactância

A reactância é dada pelo produto da frequência angular ω (rad/s) da corrente alternada pelo coeficiente de auto-indução sendo este último igual à relação entre o fluxo magnético e a intensidade de corrente eléctrica que o produz. Ora num qualquer sistema trifásico, o fluxo magnético que terá que ser considerado não será o produzido por um condutor, mas sim produzido pelos vários condutores quando percorridos por determinados valores de corrente [Rodrigues]. Considerando como forma de simplificação de cálculos, que as linhas são percorridas por correntes trifásicas equilibradas e de sequência directa, alimentadas por um

sistema de tensões trifásicas equilibradas e de sequência directa, poder-se-á então determinar o valor da reactância indutiva dada pela seguinte expressão:

$$X = \omega \cdot L \quad [\Omega / km] \quad (2.11)$$

Isto é:

$$X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \left[\frac{\mu}{2n} + 4,6 \log \left(\frac{D}{r'} \right) \right] \times 10^{-4} \quad [\Omega / km] \quad (2.12)$$

onde:

f é a frequência da corrente alternada em Hz;

μ é a permeabilidade do condutor (toma o valor 1 para condutores de cobre, alumínio, ligas de alumínio e cabos de alumínio-aço ou toma o valor 200 para condutores de aço galvanizado;

n é o número de condutores por fase;

D é distância equivalente entre condutores;

r' é o raio fictício definido por $r' = \sqrt[n]{nrR^{n-1}}$

sendo:

r o raio do condutor;

R o raio da circunferência que passa pelos condutores que formam a fase.

2.3.5.2. Susceptância

A susceptância é dada por:

$$B = \omega \cdot C \quad [S / km] \quad (2.13)$$

onde:

ω é a frequência angular da corrente alternada em rad / s ;

C é a capacidade da linha em F / km .

2.3.5.3. Impedância

A impedância é dada por:

$$Z = R + jX \quad [\Omega / km] \quad (2.14)$$

onde:

R é a resistência em Ω / km ;

X é a reactância em Ω / km .

2.3.5.4. Admitância

A admitância é dada por:

$$Y = G + jB \quad [S / km] \quad (2.15)$$

onde:

G é a Condutância em S / km ;

B é a Susceptância em S / km .

2.3.6. Transmissão de Energia em Regime Permanente

2.3.6.1. Impedância Característica

A impedância característica é a relação entre a tensão e a intensidade de corrente em todos os pontos de uma linha de comprimento infinito, relação que tem valor constante ao longo da transmissão [Checa]. A impedância característica é independente do comprimento da linha e é calculada pela expressão:

$$\bar{Z}_c = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}} \quad [\Omega] \quad (2.16)$$

onde:

$\bar{Z}$ é a impedância em Ω / km ;

$\bar{Y}$ é a admitância em Ω / km .

Em linhas aéreas, o módulo da impedância característica pode variar entre 300 e 450 Ω , e o respectivo argumento, designado desfasagem característica, é sempre negativo, situando-se, geralmente, entre -4° e -11° [Távora].

2.3.6.2. Ângulo Característico

Uma linha fechada sobre a sua impedância característica $\bar{Z}_c$, a tensão e a intensidade de corrente decrescem desde a origem da linha até ao final, seguindo uma lei exponencial ligada à quantidade complexa $\bar{\theta}$ que se designa por ângulo característico ou constante de propagação da linha [Checa].

Este é dado por:

$$\bar{\theta} = \sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}} \quad (2.17)$$

onde:

$\bar{Z}$ é a impedância em S / km ;

$\bar{Y}$ é a admitância em S / km .

2.3.6.3. Fórmulas Gerais

Nem todas as linhas de transmissão de energia exigem métodos precisos de cálculo, daí a classificação habitual das linhas em curtas, médias e longas [Távora].

Considera-se uma linha curta, a linha de comprimento inferior a 100 km e de tensão inferior a 100 kV, correspondendo-lhe um ângulo característico ($\bar{\theta}$) cujo módulo, à frequência de 50 Hz, é inferior a 0,1. O seu cálculo é efectuado através de soluções aproximadas, resultantes de desprezar o efeito da capacidade, o que conduz a considerar como concentradas as restantes características.

Considera-se uma linha longa, a linha de comprimento superior a 100 km e de tensão igual ao superior a 100 kV, correspondendo-lhe um ângulo característico cujo módulo, geralmente, é igual ao superior a 0,5. Em tais linhas justifica-se o recurso a soluções precisas, considerando o caso real de constantes distribuídas.

Considera-se uma linha média, toda a linha que se situe próximo da fronteira que separa as duas categorias anterior (uma vez que existem linhas com mais de 100 km e menos de 100 kV, ou linhas com menos de 100 km e mais de 100 kV), correspondendo-lhe um ângulo característico cujo módulo está, geralmente, compreendido entre 0,1 e 0,5. O seu cálculo é efectuado através de soluções aproximadas, mas sem desprezar a capacidade.

Admitindo que uma linha constitui um componente equilibrado e simétrico, as suas constantes físicas e eléctricas terão valores idênticos nas três fases. A partir destas constantes foram então definidos os valores por fase da impedância linear complexa $\bar{Z}$, e da admitância linear complexa $\bar{Y}$, como mostram as expressões 2.14 e 2.15 respectivamente.

A linha é um quadripolo simétrico e passivo com dois terminais de entrada (origem) e dois terminais de saída (recepção), sendo os valores da tensão e da corrente na recepção funções lineares das mesmas grandezas na origem.

Designando por $\bar{V}_0$ e $\bar{V}$ as tensões simples na origem e na recepção (fim da linha) respectivamente, e por $\bar{I}_0$ e $\bar{I}$ as intensidades de corrente correspondentes é possível obter as seguintes relações seguindo o método das quantidades imaginárias de Steinmetz [Zoppetti]:

$$\bar{V} = \bar{V}_0 \cdot \cosh(\sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}) + \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}} \cdot \bar{I}_0 \cdot \sinh(\sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}) \quad (2.18)$$

$$\bar{I} = \bar{I}_0 \cdot \cosh(\sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}) + \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}} \cdot \bar{V}_0 \cdot \sinh(\sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}) \quad (2.19)$$

De onde se relembra que:

$\sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}} = \bar{\theta}$, isto é o ângulo característico ou constante de propagação;
 $\sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}} = \bar{Z}_c$, isto é a impedância característica.

2.3.6.4. Fórmulas Aproximadas

As funções $\cosh(\sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}})$ e $\sinh(\sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}})$ podem ser desenvolvidas em série de Mac-Laurin obtendo-se [Zoppetti]:

$$\cosh(\sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}) = 1 + \frac{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}{2!} + \frac{(\bar{Z} \cdot \bar{Y})^2}{4!} + \dots + \frac{(\bar{Z} \cdot \bar{Y})^n}{2n!} \quad (2.20)$$

$$\sinh(\sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}) = \sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}} \cdot \left[1 + \frac{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}{3!} + \frac{(\bar{Z} \cdot \bar{Y})^2}{5!} + \dots + \frac{(\bar{Z} \cdot \bar{Y})^n}{(2n+1)!} \right] \quad (2.21)$$

Substituindo nas equações gerais 2.18 e 2.19 tem-se:

$$\bar{V} = \bar{V}_0 \cdot \left[1 + \frac{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}{2!} + \frac{(\bar{Z} \cdot \bar{Y})^2}{4!} + \dots + \frac{(\bar{Z} \cdot \bar{Y})^n}{2n!} \right] + \bar{Z} \cdot \bar{I}_0 \cdot \left[1 + \frac{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}{3!} + \frac{(\bar{Z} \cdot \bar{Y})^2}{5!} + \dots + \frac{(\bar{Z} \cdot \bar{Y})^n}{(2n+1)!} \right] \quad (2.22)$$

$$\bar{I} = \bar{I}_0 \cdot \left[1 + \frac{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}{2!} + \frac{(\bar{Z} \cdot \bar{Y})^2}{4!} + \dots + \frac{(\bar{Z} \cdot \bar{Y})^n}{2n!} \right] + \bar{Y} \cdot \bar{V}_0 \cdot \left[1 + \frac{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}{3!} + \frac{(\bar{Z} \cdot \bar{Y})^2}{5!} + \dots + \frac{(\bar{Z} \cdot \bar{Y})^n}{(2n+1)!} \right] \quad (2.23)$$

Para linhas curtas (comprimento inferior a 100 km) podem desprezar-se os termos em $\bar{Z} \cdot \bar{Y}$ e assim:

$$\bar{V} = \bar{V}_0 + \bar{Z} \cdot \bar{I}_0 = \bar{V}_0 + (R + jX) \cdot \bar{I}_0 \quad (2.24)$$

$$\bar{I} = \bar{I}_0 + \bar{Y} \cdot \bar{V}_0 = \bar{I}_0 + (G + jB) \cdot \bar{V}_0 \quad (2.25)$$

2.3.6.5. Intensidade e Densidade de Corrente

A intensidade de corrente de uma linha aérea de alta tensão pode ser determinada pela expressão seguinte:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos(\varphi)} \quad [A] \quad (2.26)$$

onde:

P é a potência transmitida pela linha em VA ;

U_n é a tensão nominal da linha em V ;

$\cos(\varphi)$ é o factor de potência que é habitualmente 0,9.

A densidade de corrente na linha, por fase, é obtida pela expressão seguinte:

$$d = \frac{I}{S} \left[A/mm^2 \right] \quad (2.27)$$

onde:

I é a corrente nominal da linha em A ;

S é a secção do condutor em mm^2 .

2.3.6.6. Perdas de Energia

As perdas de energia por efeito de joule numa linha são dadas pela seguinte expressão:

$$p = n \cdot R \cdot I^2 \left[W \right] \quad (2.28)$$

Onde:

n é o número de condutores da linha;

R é a resistência eléctrica da linha em Ω ;

I é a corrente nominal da linha em A .

2.3.6.7. Queda de Tensão

A queda de tensão entre fases numa linha aérea de alta tensão é dada por:

$$\Delta V = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cdot \cos(\varphi) + X \cdot \sin(\varphi)) \left[V \right] \quad (2.29)$$

Onde:

R é a resistência eléctrica da linha em Ω ;

I é a corrente nominal da linha em A ;

$\cos(\varphi)$ é o factor de potência.

A queda de tensão não deverá ser superior a 5 % da tensão nominal da linha.

2.3.7. Campo Electromagnético

O projecto de linhas deve ter em conta a necessidade de limitar os campos eléctrico e magnético produzidos por condutores energizados. Estes campos, podem induzir correntes e tensões em objectos ou estruturas perto da linha com capacidade condução. Torna-se relevante esta indução em casos de, por exemplo, estruturas metálicas compridas, instalações de comunicação, vedações, telhados com materiais condutores, etc. Além disso, os circuitos de telecomunicação podem sofrer interferências eléctricas por parte de linhas de transporte.

Mais ainda, terá que se ter consideração a possibilidade de indução de tensões que podem representar perigo para as pessoas. A EN50341-1 não estabelece valores limites para os

campos eléctrico e magnético deixando, no entanto, referido que tal deve ser especificado pelos aspectos normativos nacionais de cada país. No caso português, são considerados os valores limites recomendados pelo ICNIRP (*International Commission on Non Ionizing Radiation Protection*) para os campos a 50Hz (cláusula 5.6.1/PT.1 da EN50341-3-17):

- 5 kV/m para o campo eléctrico;
- 0,1 mT para o campo magnético.

Estes valores são igualmente adoptados e recomendados pela União Europeia. O critério base é limitar as densidades de corrente induzida na cabeça e tronco durante a exposição contínua a campos eléctrico e magnético a um limite absoluto de 10 mA/m².

2.4. Cálculo Mecânico

2.4.1. Objectivo

Os objectivos fundamentais do cálculo mecânico são os seguintes [Leite]:

- Determinar as tensões mecânicas de montagem dos condutores, à qual estes devem ser submetidos no acto de montagem da linha, conforme as condições climatéricas que se verificarem nesse momento;
- Dimensionar os apoios, de modo a suportar os esforços transmitidos pelos condutores sujeitos à acções dos agentes atmosféricos e garantir que os condutores nunca se aproximam do solo ou objectos vizinhos da linha mais do que permitido pelos regulamentos;

2.4.2. Tensões Mecânicas Máximas

A definição dos valores de tracção máxima a aplicar nos vãos da linha é algo importante, uma vez que vai condicionar todo o restante projecto. Para um melhor aproveitamento dos condutores, o valor máximo a fixar é aquele a que os cabos irão estar sujeitos quando se verificarem as condições atmosféricas mais desfavoráveis, incluindo a máxima pressão dinâmica do vento [Fernandes]. De acordo com a cláusula 9.2.4/PT.1 da EN50341-3-17 o projecto da linha deve garantir que a tracção máxima admissível nos condutores não exceda 40% da tracção de ruptura dos mesmos. Assim, o limite máximo de tensão que os condutores aguentam sem risco de ruptura será:

$$t_{seg} = \frac{0,4 \times T_R}{\sigma} \left[daN / mm^2 \right] \quad (2.30)$$

Onde:

T_R é a tensão de ruptura dos condutores em daN

σ é a secção do condutor em mm²

Embora seja importante este cálculo, a tensão a fixar como máxima tanto para os condutores como cabo de guarda, será geralmente inferior à de segurança e a sua escolha tem em conta as irregularidade no traçado da linha, passagem ou não por zonas propícias à formação de manga de gelo, existência ou não de ângulos pronunciados, etc. A experiência adquirida em anteriores projectos, tem normalmente grande influência na escolha da tensão máxima.

2.4.3. Acções sobre as Linhas

De acordo com a sua variação no tempo as acções são classificadas da seguinte forma [EN50341-1]:

- Acções permanentes - Acções horizontais devidas às componentes horizontais das tracções máximas a que os condutores estão sujeitos, e às acções verticais devidas ao seu peso próprio
- Acções variáveis - Acções do vento e do gelo, assim como as variações de temperatura que ocorrem ao longo do dia e de estação para estação

2.4.3.1. Acção do Vento

A acção do vento sobre os condutores e restantes elementos constituintes da linha, manifesta-se sobre a forma de pressão resultante da resistência que o vento encontra quando bate na superfície dos elementos da linha [Almeida]. Esta pressão, é proporcional à velocidade do vento, que para efeitos de dimensionamento se considera actuando na direcção horizontal normal à superfície onde incide, e transmite aos apoios uma acção transversal.

Com o objectivo de quantificar as acções do vento para linhas aéreas o território Português é considerado dividido em duas zonas segundo a cláusula 4.2.2 da EN50341-3-17:

- Zona A - A totalidade do território, com a excepção das regiões pertencentes à zona B;
- Zona B - As regiões autónomas dos Açores e da madeira e as regiões continentais situadas no interior de uma faixa de 5 km de largura ao longo da costa ou em altitudes acima dos 600 m.

2.4.3.2. Velocidade e Pressão Dinâmica do Vento

São definidas seguidamente as diferentes velocidades do vento, assim como a pressão dinâmica do vento consideradas na EN30541-1:

Velocidade média do vento $V_{média}$ - É a velocidade média do vento em m/s ao longo de um período de 10 minutos a uma altura de 10 metros acima do solo em terreno relativamente aberto.

Velocidade do vento de rajada V_g - É um valor máximo característico da turbulência momentânea do vento baseado na velocidade média do vento ao longo de 2 segundos:

$$V_g = k_g \cdot V_{média} \quad (2.31)$$

onde:

k_g é o factor de velocidade do vento de rajada que vale 1,5

Velocidade do vento de referência V_R - É a velocidade do vento a ter em conta a 10 metros acima do solo no local em questão medido no local de medição mais próximo.

Velocidade do vento a uma altura arbitrária h acima do solo V_h - Dada por pela seguinte lei exponencial:

$$V_h = V_R \cdot \left(\frac{h}{10} \right)^{0,2} \quad (2.32)$$

A tabela 2.5 mostra os valores das velocidades consideradas em Portugal consoante a zona segundo a EN50341-3-17.

Tabela 2.5 - Velocidades do vento em Zona A e Zona B ,

	Zona A	Zona B
$V_{média}$	20 m/s	22 m/s
V_g	30 m/s	33 m/s
V_R	30 m/s	33 m/s

Pressão dinâmica do vento q_h - Dada pela seguinte expressão:

$$q_h = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_h^2 \quad (2.33)$$

Onde:

ρ é a densidade do ar de valor 1,225 kg/m³ a 15°C e pressão atmosférica de 1013 hPa;

V_h é a velocidade do vento a uma altura h acima do solo.

Assim sendo, a tabela 2.6 apresenta alguns valores da pressão dinâmica do vento em função da altura acima do solo e Zona de vento.

Tabela 2.6 - Pressão dinâmica do vento em função da altura e da zona de vento, [EN50341-3-17]

	q_h [Pa]	
h [m]	Zona A	Zona B
0	727	880
10	727	880
20	727	880
30	855	1035
40	960	1161
50	1049	1270
60	1129	1366
70	1201	1453
80	1266	1532
90	1328	1606

2.4.3.3. Forças do Vento sobre os Elementos da Linha

O valor da força exercida pelo vento Q_w que incide perpendicularmente em qualquer elemento da linha é dado por:

$$Q_w = G_x \cdot G_q \cdot C_x \cdot q_h \cdot A \text{ [daN / m]} \quad (2.34)$$

Onde:

q_h é a pressão dinâmica do vento em daN / m^2 ;

G_q é o factor de rajada e tem valor 1;

G_x é o factor de ressonância estrutural do elemento da linha considerado;

C_x é o coeficiente de forma do elemento da linha considerado;

A é a área do elemento da linha considerado, projectada num plano perpendicular a direcção do vento em m^2 .

Uma vez que para efeitos de dimensionamento neste projecto, importa apenas calcular a força do vento sobre os condutores e cabo de guarda tem-se para estes elementos [EN50341-1]:

$$G_q = 1;$$

$$G_x = G_c = 0,6;$$

$C_x = C_c$ cujo valor depende do diâmetro d dos condutores ou cabo de guarda sendo:

$$1,2 \text{ para } d \leq 12,5 \text{ mm}$$

$$1,1 \text{ para } 12,5 \leq d \leq 15,8 \text{ mm}$$

$$1,0 \text{ para } d \leq 15,8 \text{ mm}$$

$$A = d \cdot \frac{L_1 + L_2}{2}, \text{ sendo } L_1 \text{ e } L_2 \text{ o comprimento de vãos adjacentes.}$$

2.4.3.4. Acção do Gelo

A formação de uma manga de gelo que envolve os condutores e cabos de guarda contribui para um aumento do seu peso, do seu diâmetro aparente e consequentemente da superfície batida pelo vento. A consideração de cargas de gelo no dimensionamento de linhas aéreas tem em conta a temperatura, humidade do ar e a altitude dos locais atravessados pela linha. Assim, no território português, devem ser consideradas cargas de gelo nas zonas a altitudes superiores a 600 m nos distritos indicados na cláusula 3.2.3/PT.1 da EN30541-3-17.

O modelo para cargas de gelo é consistente com a deposição de neve húmida ou de gelo duro sobre condutores e cabos de guarda. Para efeito de projecto não são consideradas cargas de gelo sobre estruturas ou isoladores.

A carga de gelo característica para o território português é dada por (cláusula 4.2.3/PT.2 da EN50341-3-17):

$$I_k = \frac{11 \cdot (10 + d)}{40} \quad [N / m] \quad (2.35)$$

onde:

d é diâmetro do condutor em mm .

A carga mínima de gelo pode também ser modelizada como uma manga uniforme de gelo de espessura e igual a 10 mm e densidade ρ_i igual a 900 kg/m³. Podem ser consideradas cargas de gelo de valor superior, não como um critério geral de dimensionamento mas em casos especiais confinados ao cantão da linha situado na zona geográfica onde os dados foram recolhidos.

2.4.3.5. Acção da Variação da Temperatura

Os condutores das linhas de transmissão estão sujeitos a variações de temperatura bastante acentuadas. A temperatura dos condutores, depende, a cada instante, do equilíbrio entre o calor ganho e o calor cedido ao meio ambiente. O ganho de calor deve-se principalmente ao efeito de joule assim como ao aquecimento pelo calor solar, já as perdas de calor para o meio ambiente dão-se por irradiação e convecção.

Os coeficientes de dilatação térmica linear que caracterizam os materiais que constituem os cabos têm valores significativos, e sendo assim, a variação da temperatura provoca contracções e dilatações consideráveis nestes alterando o seu comprimento e a tracção a que ficam sujeitos [Almeida].

2.4.3.6. Temperaturas Mínima e Máxima de Projecto

Segundo a cláusula 4.2.5/PT.1 da EN50341-3-17 a temperatura mínima de projecto na ausência de outra acção climática deve ser de -5°C ou -10°C se em zona de gelo. Estas temperaturas devem ser usadas para o cálculo de flechas mínimas tanto para os condutores como para os cabos de guarda.

A temperatura máxima de projecto, considerada para o cálculo de flechas máximas e para efeitos de distribuição dos apoios não deve ser inferior a 75°C para condutores e 50°C para cabos de guarda.

2.4.4. Estados Atmosféricos

Tendo em conta que os agentes atmosféricos exercem acções diferentes sobre os componentes das linhas de acordo com as características da região e variam nas diversas estações do ano, é usual definir três estados atmosféricos para considerar as circunstâncias que se apresentam como mais desfavoráveis sob os diversos pontos de vista [Vale]. Estes são:

- Estado de Inverno - caracterizado por vento reduzido, temperatura mínima (-5°C) e possibilidade de formação de manga de gelo na qual a temperatura mínima é de -10°C . Também chamado estado de vento reduzido,
- Estado de Primavera - caracterizado por vento máximo, temperatura moderada (15°C) e ausência de gelo. Também chamado de estado de vento máximo;
- Estado de Verão - caracterizado por ausência de vento, temperatura máxima (75°C) e ausência de gelo. Também chamado estado de flecha máxima.

O Estado de Inverno é caracterizado por vento reduzido, traduzindo-se, de acordo com cláusula 4.2.7/PT.1 da EN50341-3-17, em considerar a pressão dinâmica do vento de valor igual a 40% da pressão dinâmica do vento q_h (ver tabela 2.6) para efeitos de cálculo das tensões mecânicas.

2.4.5. Coeficientes de Sobrecarga

A consideração dos agentes atmosféricos no estudo do comportamento mecânico dos condutores das linhas é feita através do coeficiente de sobrecarga. Este coeficiente traduz a acção do vento e do gelo pelo agravamento do peso próprio dos condutores. Assim, as acções exercidas sobre um condutor a considerar são apresentadas na figura 2.6:

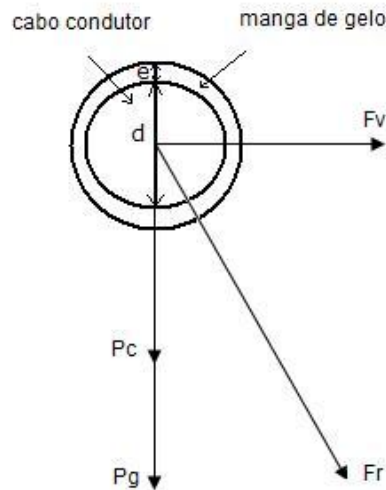


Figura 2.6 - Esquema das forças aplicadas num condutor, adaptado de [Vale]

A força resultante F_r é, então, dada por:

$$F_r = \sqrt{(P_c + P_g)^2 + F_v^2} \quad (2.36)$$

onde:

P_c é o peso próprio do condutor em daN / m ;

P_g peso da manga de gelo em daN / m ;

F_v é a força do vento sobre o condutor em daN / m .

O peso da manga de gelo P_g é dado por:

$$P_g = \frac{\omega_g \times \pi}{4} [(d + 2e)^2 - d^2] \quad (2.37)$$

onde:

ω_g é o peso específico volumétrico do gelo de valor $900 \text{ kgf} / m^3$;

d é o diâmetro do condutor;

e é a espessura da manga de gelo.

A força do vento F_v é dada por:

$$F_v = G_c \cdot G_q \cdot C_c \cdot q_h \cdot (d + 2e) \text{ [daN / m]} \quad (2.38)$$

Estando o significado da notação já exposto na expressão 2.34.

Tem-se finalmente:

$$F_r = \sqrt{\left\{ P_c + \frac{\omega_g \times \pi}{4} [(d + 2e)^2 - d^2] \right\}^2 + [G_c \cdot G_q \cdot C_c \cdot q_h \cdot (d + 2e)]^2} \quad (2.39)$$

Define-se coeficiente de sobrecarga m relativo a um dado estado atmosférico, como a relação entre a intensidade da solicitação resultante F_r e o peso próprio linear do condutor P_c vindo finalmente:

$$m = \frac{F_r}{P_c} = \frac{\sqrt{\left\{ P_c + \frac{\omega_g \times \pi}{4} [(d + 2e)^2 - d^2] \right\}^2 + [G_c \cdot G_q \cdot C_c \cdot q_h \cdot (d + 2e)]^2}}{P_c} \quad (2.40)$$

É, assim, possível calcular os coeficientes de sobrecarga associado a cada estado atmosférico, tendo em conta as diferentes condições climatéricas que caracterizam cada estado.

A expressão pode, desde já, apresentar-se simplificada:

- Para o estado de Primavera ou Inverno sem formação de manga de gelo;

$$m = \frac{\sqrt{P_c^2 + (G_c \cdot G_q \cdot C_c \cdot q_h \cdot d)^2}}{P_c} \quad (2.41)$$

- Para o estado de Verão em que não se considera o vento;

$$m = \frac{\sqrt{P_c^2}}{P_c} = 1 \quad (2.42)$$

2.4.6. Equação dos Estados

A equação dos estados é uma equação de equilíbrio mecânico que relaciona a tensão mecânica nos condutores de uma linha aérea, num determinado estado atmosférico a partir da tensão existente nos condutores num estado atmosférico conhecido, supondo-se conhecidos o comprimento do vão e as características mecânicas dos condutores [Távora].

Assim, consideram-se as diferentes grandezas relativas a dois estados atmosféricos distintos E e E_k:

θ e θ_k temperatura

m e m_k coeficiente de sobrecarga

S e S_k comprimento do arco realizado pelo condutor

T e T_k tracção a que o cabo se encontra submetido

t_m e t_{mk} tensão por unidade de superfície no ponto médio do vão

T_m e T_{mk} tracção por unidade de superfície no ponto médio do vão

É possível, então, fazer a dedução da equação dos estados demonstrada seguidamente segundo [Távora]:

Quando o condutor passa do estado E_k ao estado E , alonga-se termicamente e elasticamente. O alongamento térmico é dado por:

$$\Delta S_\theta = \alpha \cdot S_k \cdot (\theta - \theta_k) \quad (2.43)$$

onde:

α é o coeficiente de dilatação linear do condutor.

O alongamento elástico, em consequência da variação da tensão mecânica aplicada ao condutor, resulta da variação de comprimento de cada elemento dS que constitui o condutor, isto é:

$$\Delta S_e = \int_0^{S_k} \frac{T - T_k}{\sigma \cdot E} ds \quad (2.44)$$

onde:

σ é a secção do condutor;

E é módulo de elasticidade do condutor.

Para vãos não muito longos (<500 m) e declives pouco acentuados, a tracção T sofre uma variação pouco significativa ao longo do comprimento do condutor. Assim, admite-se a tensão constante ao longo do vão e de valor igual ao seu valor no ponto médio do vão. Pode-se então traduzir o alongamento elástico por:

$$\Delta S_e = \int_0^{S_k} \frac{T_m - T_{mk}}{\sigma \cdot E} ds = \frac{T_m - T_{mk}}{\sigma \cdot E} \int_0^{S_k} ds = \frac{(t_m - t_{mk}) \cdot S_k}{E} \quad (2.45)$$

Somando o alongamento térmico e elástico tem-se o alongamento total da passagem do estado E_k ao estado E :

$$\Delta S_T = S - S_k = \Delta S_\theta + \Delta S_e = \alpha \cdot S_k \cdot (\theta - \theta_k) + \frac{(t_m - t_{mk}) \cdot S_k}{E} \quad (2.46)$$

Considerando agora a aproximação parabólica [Vale]:

$$S = L_1 + \frac{m^2 \cdot \omega^2 \cdot L_1 \cdot L^2}{24 \cdot \sigma^2 \cdot t_m^2} \quad (2.47)$$

$$S_k = L_1 + \frac{m_k^2 \cdot \omega^2 \cdot L_1 \cdot L^2}{24 \cdot \sigma^2 \cdot t_{mk}^2} \quad (2.48)$$

vem:

$$S - S_k = \left(L_1 + \frac{m^2 \cdot \omega^2 \cdot L_1 \cdot L^2}{24 \cdot \sigma^2 \cdot t_m^2} \right) - \left(L_1 + \frac{m_k^2 \cdot \omega^2 \cdot L_1 \cdot L^2}{24 \cdot \sigma^2 \cdot t_{mk}^2} \right) = \frac{\omega^2 \cdot L_1 \cdot L^2}{24 \cdot \sigma^2} \left(\frac{m^2}{t_m^2} - \frac{m_k^2}{t_{mk}^2} \right) \quad (2.49)$$

Igualando as expressões 2.46 e 2.49:

$$\frac{\omega^2 \cdot L_1 \cdot L^2}{24 \cdot \sigma^2} \left(\frac{m^2}{t_m^2} - \frac{m_k^2}{t_{mk}^2} \right) = \alpha \cdot S_k \cdot (\theta - \theta_k) + \frac{(t_m - t_{mk}) \cdot S_k}{E} \quad (2.50)$$

Considerando que $L_1 \cong S_k$ e dividindo ambos os membros por $\alpha \cdot S_k$, obtém-se finalmente a equação de estados:

$$\theta_k + \frac{t_{mk}}{\alpha \cdot E} - \frac{m_k^2 \cdot \omega^2 \cdot L^2}{24 \cdot \alpha \cdot \sigma^2 \cdot t_{mk}^2} = \theta + \frac{t_m}{\alpha \cdot E} - \frac{m^2 \cdot \omega^2 \cdot L^2}{24 \cdot \alpha \cdot \sigma^2 \cdot t_m^2} \quad (2.51)$$

2.4.7. Cantão e Vão Equivalente Fictício

Como já foi referido, a fixação dos condutores de uma linha nos apoios é realizado por cadeias de isoladores em amarração ou suspensão, sendo vários os factores a considerar para a escolha do tipo de fixação para cada apoio. Considera-se que com cadeias de amarração os pontos de fixação dos condutores são rigorosamente imóveis no espaço, independentemente das condições de solicitação mecânica dos condutores. Já no caso de cadeias em suspensão, os pontos de fixação dos condutores nos extremos dessas mesmas cadeias verticais, deixam de ser imóveis no espaço, e podem deslocar-se angularmente. Este deslocamento, verifica-se devido a desníveis na linha, variações de temperatura, alteração das condições meteorológicas na zona da linha, e será no sentido do momento dominante, de modo a aumentar a flecha no vão que determina maior momento, e diminui-la no vão contíguo. A figura 2.7 mostra esse deslocamento.

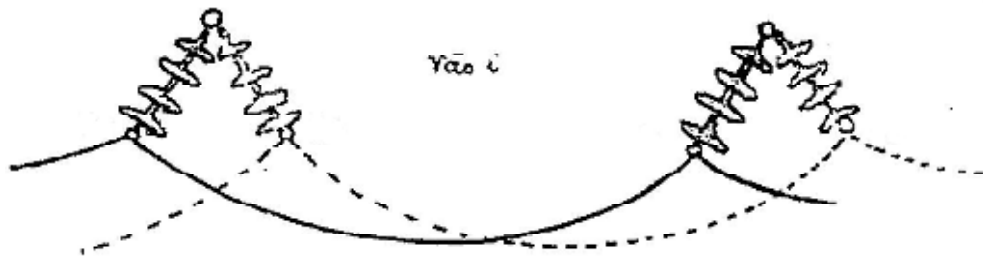


Figura 2.7 - Deslocamento longitudinal das cadeias de isoladores, [Távora]

Como consequência deste deslocamento angular e com desprezo do momento devido aos esforços verticais, as componentes horizontais das tensões tornam-se iguais.

Posto isto, pode-se introduzir o conceito de cantão, que corresponde a um conjunto de vãos contíguos entre dois apoios de amarração (figura 2.8).

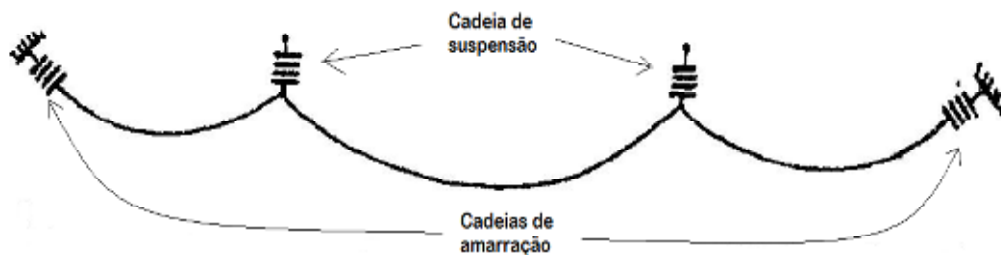


Figura 2.8 - Ilustração de um cantão composto por três vãos, [Távora]

Assim, define-se vão equivalente fictício $\mathfrak{L}$ de um cantão, isto é, o vão que se existisse no cantão, deixaria as cadeias de suspensão sempre verticais para qualquer estado atmosférico. Este é dado por:

$$\mathfrak{L} = \sqrt{\frac{\sum_i L_i^3}{\sum_i L_i}} \quad (2.52)$$

onde:

L_i é o comprimento dos vãos i incluídos num mesmo cantão.

Uma vez que, num cantão as componentes horizontais das tensões são dadas como iguais, a equação dos estados para a determinação das tensões mecânicas nos condutores é aplicável a cada cantão separadamente, sendo que para isso, substitui-se o vão L da equação pelo vão equivalente fictício $\mathfrak{L}$ do cantão em questão.

O vão equivalente fictício também chamado vão ideal de regulação [Checa], é importante

na regulação mecânica da linha aérea, isto é, na escolha adequada da tensão de montagem dos condutores, a efectuar no estado atmosférico mais desfavorável, de modo a que essa tensão não ultrapasse o valor máximo admissível estabelecido.

Importa aqui referir duas regras de boa prática do projectista:

- Projectar sempre que possível vãos suportados por cadeias de suspensão, mas não projectar cantões de mais do que quinze vãos, isto é, no mínimo utilizar um apoio de amarração a cada quinze vãos;
- Verificar que os vãos que compõe cada cantão não tenham valor inferior ou superior a 25% do vão equivalente fictício do cantão.

2.4.8. Vão Crítico

Chama-se vão crítico L_{cr} , relativo a uma dada tensão t_{max} , ao vão para qual os condutores, supostos esticados e fixados sob essa tensão, num dos dois estados atmosféricos Inverno ou Primavera, adquirem a mesma tensão t_{max} quando ficam sujeitos às condições do outro desses dois estados.

Assim, o vão crítico é obtido da equação dos estados aplicada aos estados de Inverno e Primavera, considerando $t_m = t_{mk} = t_{max}$ e $L = L_{cr}$ resultando:

$$\theta_1 + \frac{t_{max}}{\alpha \cdot E} - \frac{m_1^2 \cdot \omega^2 \cdot L_{cr}^2}{24 \cdot \alpha \cdot \sigma^2 \cdot t_{max}^2} = \theta_2 + \frac{t_{max}}{\alpha \cdot E} - \frac{m_2^2 \cdot \omega^2 \cdot L_{cr}^2}{24 \cdot \alpha \cdot \sigma^2 \cdot t_{max}^2} \quad (2.53)$$

O vão crítico será então dado por:

$$L_{cr} = \frac{\sigma \cdot t_{max}}{\omega} \sqrt{\frac{24 \cdot \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{m_2^2 - m_1^2}} \quad [m] \quad (2.54)$$

Onde as grandezas com índice 1 e 2 estão associadas aos estados de Inverno e Primavera respectivamente com a restante notação já conhecida (expressões 2.43 e 2.44).

O vão crítico poderá ser necessário para determinar qual estado mais desfavorável entre o estado de Inverno e o de Primavera como se irá ver de seguida.

2.4.9. Estado mais Desfavorável

No cálculo da tensão de montagem recorrendo à equação dos estados, é necessário determinar qual o estado mais desfavorável entre o de Inverno ou Primavera para, então, aplicá-lo na equação relacionando-o com o estado de montagem e, assim, determinar qual a

tensão mecânica máxima a que os condutores poderão ficar sujeitos na pior das hipóteses.

Definindo o estado de Inverno caracterizado por coeficiente de sobrecarga m_1 e temperatura θ_1 e o estado de Primavera por coeficiente m_2 e temperatura θ_2 ($\theta_2 > \theta_1$), pode ser determinado facilmente o estado mais desfavorável através da árvore de decisão apresentada na figura 2.9:

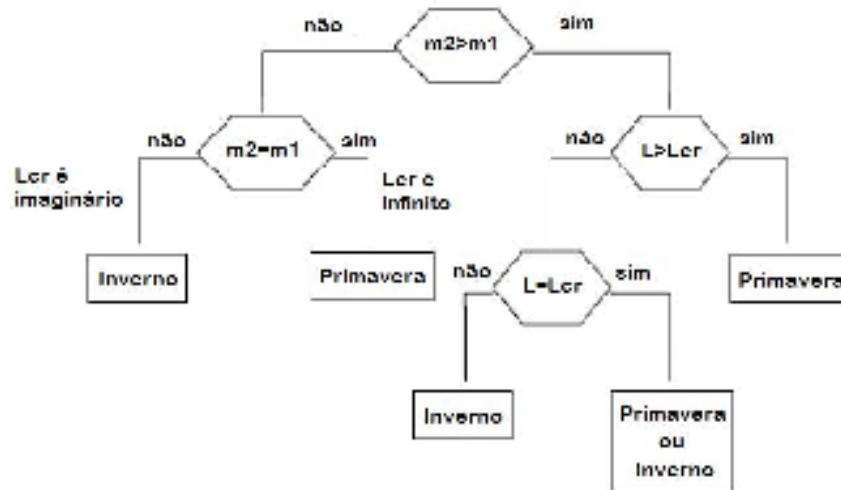


Figura 2.9 - Árvore de decisão para determinação do estado mais desfavorável, [Leite]

2.4.10. Geometria das Linhas

O estudo do equilíbrio dos cabos condutores suspensos das linhas aéreas é realizado, adoptando-se certas hipóteses simplificativas. Admite-se, assim, que os condutores são perfeitamente flexíveis e inextensíveis, e deste modo define-se a curva de equilíbrio de um cabo suspenso em dois dos seus pontos como sendo uma catenária homogénea. A equação da catenária é dada pela seguinte expressão [Vale]:

$$y = P \cdot \cosh \frac{x}{P} - P \quad (2.55)$$

onde:

P é o parâmetro da catenária dado por:

$$P = \frac{t \cdot \sigma}{\omega} \quad [m] \quad (2.56)$$

sendo:

t a tensão de montagem em daN/mm^2

σ a secção do condutor em mm^2

ω o peso linear próprio do condutor em daN/m

O parâmetro P da catenária, representa geometricamente o raio de curvatura no ponto x onde a tangente à curva é horizontal.

A curva adoptada não deixa de ser uma aproximação, uma vez que na realidade os materiais usados nos condutores de linhas aéreas não são perfeitamente flexíveis e são

elasticamente deformáveis. Além disso, os ventos actuam nos condutores, geralmente, em forma de rajadas irregulares impondo curvatura dupla e movimento, a uma curva que se supõe plana e em equilíbrio. A adopção da catenária como curva de equilíbrio resulta, então, numa aproximação por excesso e embora o erro associado não seja exageradamente grande, não é de esperar um elevado grau de rigor no cálculo mecânico das linhas aéreas [Távora; Vale].

2.4.10.1. Aproximação Parabólica

Com o objectivo de facilitar e tornar mais rápido o cálculo mecânico de linhas aéreas, é considerada ainda outra aproximação, isto é, a substituição da catenária pela parábola oscultriz, sendo esta uma curva mais simples. Esta aproximação é válida dentro de certos limites sem ocorrer perda excessiva de rigor. De acordo com [Zoppetti] para vãos inferiores a 300 metros com flechas inferiores a 6% do vão, o erro cometido na determinação da flecha usando a aproximação parabólica é da ordem de 0,5%, sendo que para flechas na ordem de 10% do vão o erro aumenta para aproximadamente 2%. [Távora; Vale] consideram que a aproximação parabólica é aceite para os cálculos de linhas considerando vãos inferiores a 500 m.

Retomando a equação da catenária (expressão 2.55) tem-se:

$$y = P \cdot \cosh \frac{x}{P} - P \quad (2.57)$$

O co-seno hiperbólico pode ser desenvolvido numa série de Mac-Laurin de modo análogo a como já foi demonstrado na expressão 2.22 obtendo-se:

$$y = P \cdot \left(1 + \frac{x^2}{2!P^2} + \frac{x^4}{4!P^4} + \dots \right) - P \quad (2.58)$$

O valor do parâmetro P é função da tensão de montagem e da secção e peso linear dos condutores. Considerando os materiais usados correntemente nos condutores de linhas aéreas, os valores assumidos pelo parâmetro P virão compreendidos entre algumas centenas de metros e cerca de 3000 metros. Nestas condições o parâmetro P será muito grande comparado ao valor da maior parte dos vãos L empregues em linhas aéreas sendo a razão L/P da ordem das décimas. Deste modo, poderá desprezar-se os termos com potência de expoente superior a 2 na expressão 2.58 obtendo-se finalmente a equação da parábola oscultriz:

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot P} \quad (2.59)$$

Coincidindo os pontos mais baixos das curvas, verifica-se que a curva catenária é interior à da parábola como mostra a figura 2.10. Mas para uma melhor comparação, importa fazer a

intersecção das duas curvas nos pontos que representariam os pontos de fixação do condutor I e S como mostra a figura 2.11. Donde se conclui que as flechas correspondentes à catenária têm valor superior às da parábola.

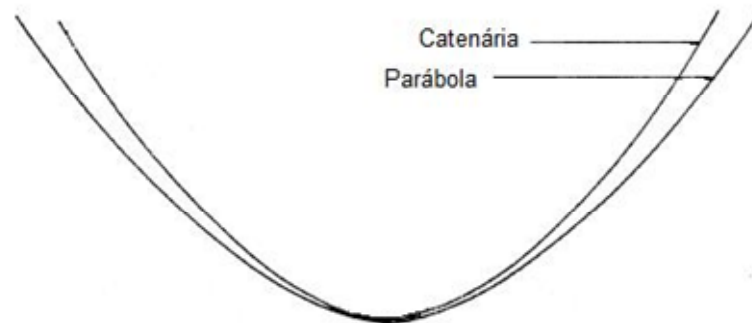


Figura 2.10 - Posições relativas das curvas catenária e parábola a), adaptado de [Vale]

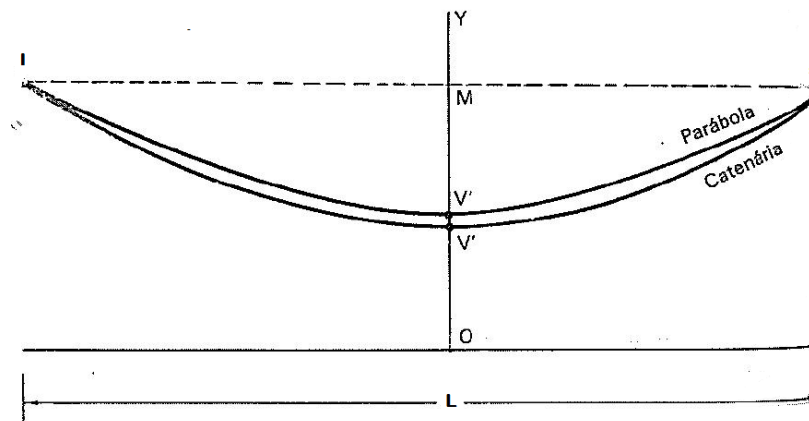


Figura 2.11 - Posições relativas das curvas catenária e parábola b), adaptado de [Checa]

2.4.10.2. Vãos Desnívelados

Os vãos desnivelados ou vãos em declive são aqueles nos quais os pontos de fixação dos condutores encontram-se a níveis diferentes, sendo bastante comuns nas linhas aéreas. Para este caso geral serão estabelecidas algumas relações necessárias ao cálculo mecânico. A partir da figura 2.12 e tendo em conta a equação da catenária é possível estabelecer as seguintes relações que servirão como ponto de partida:

Equações da catenária:

$$\begin{cases} y_a = P \cdot ch \frac{x_a}{P} - P \\ y_b = P \cdot ch \frac{x_b}{P} - P \end{cases}$$

onde, ch representa a função co-seno hiperbólico.

Distâncias e relações trigonométricas:

$$\begin{cases} L = x_a - x_b \\ h = y_a - y_b \\ x_m = \frac{x_a + x_b}{2} \\ tg \alpha = \frac{h}{L} \\ L = L_1 \cdot \cos \alpha \end{cases}$$

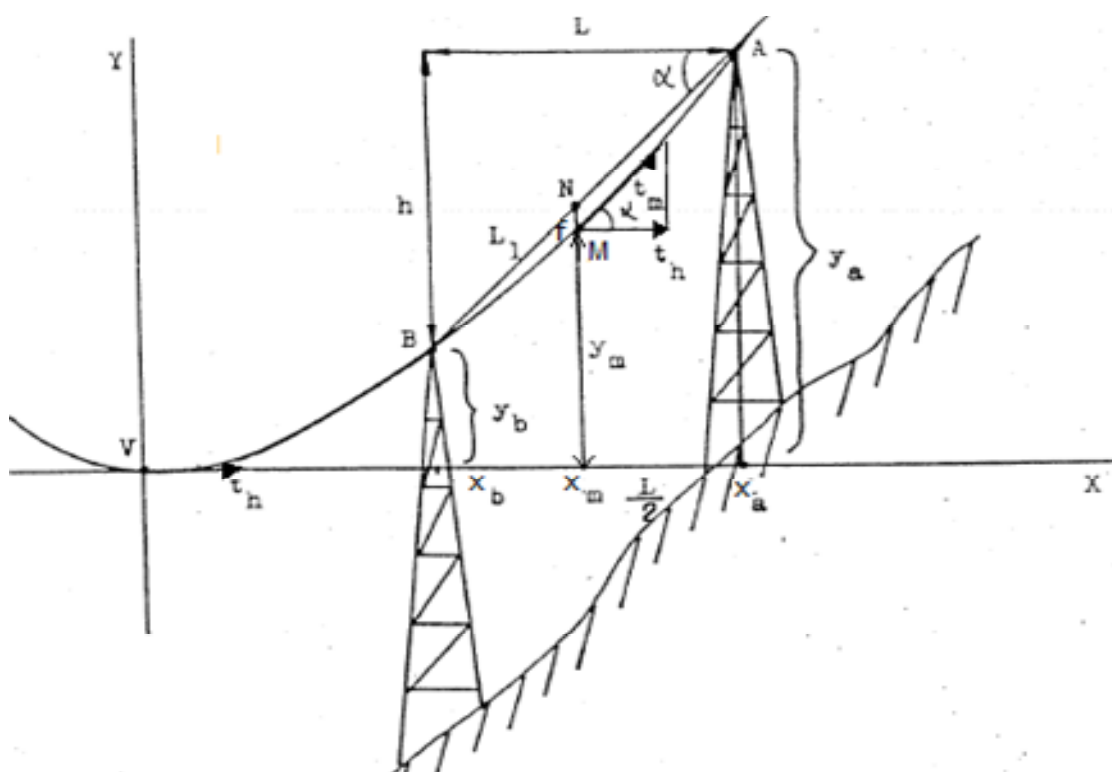


Figura 2.12 - Representação de um vão desnivelado, adaptado de [Vale]

O desnível h é dado por:

$$h = y_a - y_b = P \cdot \left(ch \frac{x_a}{P} - ch \frac{x_b}{P} \right) \quad (2.60)$$

$$= 2P \cdot sh \frac{x_a + x_b}{2P} \cdot sh \frac{x_a - x_b}{2P}$$

$$= 2P \cdot sh \frac{x_m}{P} \cdot sh \frac{L}{2P}$$

$$= 2P \left(\frac{x_m}{P} + \frac{x_m^3}{3!P^3} + \frac{x_m^5}{5!P^5} + \dots \right) \times \left(\frac{L}{2P} + \frac{L^3}{3! \times 8P^3} + \frac{L^5}{5! \times 32P^5} + \dots \right)$$

Sendo $\frac{x_m}{P}$ e $\frac{L}{P}$ da ordem das décimas, pode desprezar-se, os termos de grau igual ou superior a 3, resultando:

$$h \approx \frac{x_m \cdot L}{P} \quad (2.61)$$

Considerando a aproximação parabólica :

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot P} \quad (2.62)$$

O valor da derivada de y no ponto $x_m \cong \frac{P \cdot h}{L}$ será:

$$\left(\frac{dy}{dx} \right)_{x=\frac{P \cdot h}{L}} = \left[\frac{d}{dx} \left(\frac{x^2}{2P} \right) \right]_{x=\frac{P \cdot h}{L}} = \left(\frac{x}{P} \right)_{x=\frac{P \cdot h}{L}} = \frac{P \cdot h}{P \cdot L} = \frac{h}{L} = \operatorname{tg} \alpha \quad (2.63)$$

Logo, a tangente à parábola no ponto M tem a mesma inclinação da recta que une os pontos de amarração do condutor.

Definindo a flecha f , isto é, a distância entre o ponto do condutor ou do cabo de guarda onde a tangente é paralela à recta que passa pelos pontos de fixação e a intersecção da vertical que passa por esse ponto com esta recta, supondo o condutor ou o cabo de guarda não desviados pelo vento tem-se:

$$f = \overline{MN} = \frac{y_A + y_B}{2} - y_M \quad (2.64)$$

Assim,

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{2} \left(P \cdot ch \frac{x_a}{P} + P \cdot ch \frac{x_b}{P} - 2P \right) - \left(P \cdot ch \frac{x_m}{P} - P \right) \\ &= \frac{P}{2} \left(ch \frac{x_a}{P} + ch \frac{x_b}{P} \right) - P - P \cdot ch \frac{x_m}{P} + P \\ &= \frac{P}{2} \cdot 2ch \frac{x_a + x_b}{2P} \cdot ch \frac{x_a - x_b}{2P} - P \cdot ch \frac{x_m}{P} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= P \cdot ch \frac{x_m}{P} \cdot ch \frac{L}{2P} - P \cdot ch \frac{x_m}{P} \\
&= P \cdot ch \frac{x_m}{P} \cdot \left(ch \frac{L}{2P} - 1 \right) \\
&= P \left(1 + \frac{x_m^2}{2! \times P^2} + \frac{x_m^4}{4! \times P^4} + \dots \right) \times \left(1 + \frac{L^2}{2! \times 4P^2} + \frac{L^4}{4! \times 16P^4} + \dots - 1 \right) \\
&\cong P \left(\frac{L^2}{8P^2} + \frac{L^4}{384P^4} + \dots \right) \\
&\cong \frac{L^2}{8P} \left(1 + \frac{L^2}{48P^2} \right)
\end{aligned}$$

Recordando que $P = \frac{t_h \cdot \sigma}{m \cdot w}$. a flecha f vem:

$$f = \frac{m \cdot w \cdot L^2}{8 \cdot \sigma \cdot t_h} \cdot \left(1 + \frac{m^2 \cdot w^2 \cdot L^2}{48 \cdot \sigma^2 \cdot t_h^2} \right) \quad (2.65)$$

Considerando a relação $\frac{t_h}{t_m} \cong \frac{L}{L_1}$ obtém-se finalmente:

$$f = \frac{m \cdot w \cdot L \cdot L_1}{8 \cdot \sigma \cdot t_m} \cdot \left(1 + \frac{m^2 \cdot w^2 \cdot L_1^2}{48 \cdot \sigma^2 \cdot t_m^2} \right) \quad (2.66)$$

No caso de terrenos pouco acidentados sem grande desnível e para vãos não muito compridos poderá simplificar-se a expressão obtendo-se:

$$f = \frac{m \cdot w \cdot L \cdot L_1}{8 \cdot \sigma \cdot t_h} \quad (2.67)$$

Quanto ao arco da curva de equilíbrio S compreendido entre os pontos A e B será dado por:

$$\begin{aligned}
S &= S_a - S_b = P \cdot sh \frac{x_a}{P} - P \cdot sh \frac{x_b}{P} \\
&= 2P \cdot ch \frac{x_a + x_b}{2P} \cdot sh \frac{x_a - x_b}{2P}
\end{aligned} \quad (2.68)$$

$$\begin{aligned}
 &= 2P \cdot ch \frac{x_m}{P} \cdot sh \frac{L}{2P} \\
 &= 2P \cdot \left(1 + \frac{x_m^2}{2! \times P^2} + \frac{x_m^4}{4! \times P^4} + \dots \right) \cdot \left(\frac{L}{2P} + \frac{L^3}{3! \times 8P^3} + \dots \right) \\
 &\approx 2P \cdot \left(\frac{L}{2P} + \frac{L^3}{48P^3} \right)
 \end{aligned}$$

Atendendo a que $t_m \cong t_h \cdot \frac{L_1}{L}$ vem:

$$S = L_1 + \frac{m^2 \cdot w^2 \cdot L_1 \cdot L^2}{24 \cdot \sigma^2 \cdot t_m^2} \quad (2.69)$$

As tensões mecânicas por unidade de superfície nos pontos A , M e B serão dadas pelas seguintes expressões [Vale]:

$$\begin{cases} t_a = t_h + \frac{m \cdot w \cdot y_a}{\sigma} \\ t_m = t_h + \frac{m \cdot w \cdot y_m}{\sigma} \end{cases} \quad (2.70)$$

Subtraindo membro a membro equações anteriores virá:

$$t_a - t_m = \frac{m \cdot w}{\sigma} \cdot (y_a - y_m) \quad (2.71)$$

sendo:

$$y_a - y_m = \left(\frac{h}{2} + f \right), \text{ vem:}$$

$$t_a = t_m + \frac{m \cdot w}{\sigma} \cdot \left(\frac{h}{2} + f \right) \quad (2.72)$$

analogamente tem-se:

$$t_b = t_m - \frac{m \cdot w}{\sigma} \cdot \left(\frac{h}{2} - f \right) \quad (2.73)$$

Tendo ainda em conta que:

$$\begin{cases} x_a = x_m + \frac{L}{2} \\ x_b = x_m - \frac{L}{2} \\ x_m \cong \frac{P \cdot h}{L} \end{cases} \quad (2.74)$$

É possível estabelecer as seguintes relações:

$$x_a \cong \frac{P \cdot h}{L} + \frac{L}{2} \quad (2.75)$$

$$x_b \cong \frac{P \cdot h}{L} - \frac{L}{2} \quad (2.76)$$

2.4.10.3. Vãos em Patamar

Para vãos em patamar (figura 2.13) , isto é, em que os pontos de fixação dos condutores estão ao mesmo nível tem-se:

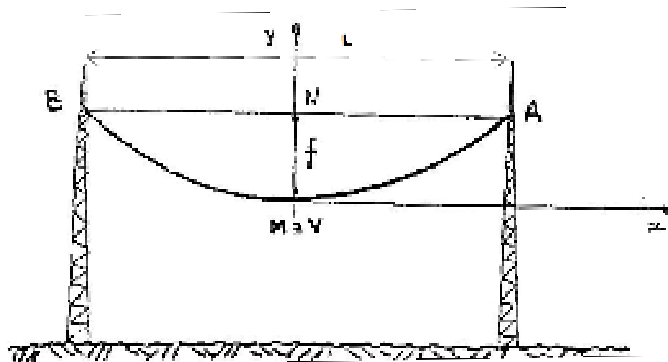


Figura 2.13 - Vão em patamar, adaptado de [Távora]

$$\begin{cases} h = 0 \\ L_1 = L \\ t_m = t_h \end{cases}$$

O que permite escrever as seguintes relações:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_a = \frac{L}{2} \\ x_b = -\frac{L}{2} \\ y_a = \frac{x_a^2}{2P} \\ y_b = \frac{x_b^2}{2P} \end{array} \right. \quad \text{e} \quad \left\{ \begin{array}{l} f = \frac{m \times w \times L^2}{8 \times \sigma \times t_h} \\ S = L + \frac{m^2 \times w^2 \times L^3}{24 \times \sigma^2 \times t_h^2} \\ t_a = t_b = t_h + \frac{m \times w \times f}{\sigma} \end{array} \right. \quad (2.77)$$

2.4.10.4. Apoio Enforcado

Num apoio de suspensão comum a dois vãos contíguos com declive acentuado, existe a possibilidade de ocorrer o enforcamento da cadeia de isoladores, isto é, num dos estados atmosféricos a cadeia ficar sujeita a uma força ascendente. A figura 2.14 ilustra uma situação de um apoio enforcado.

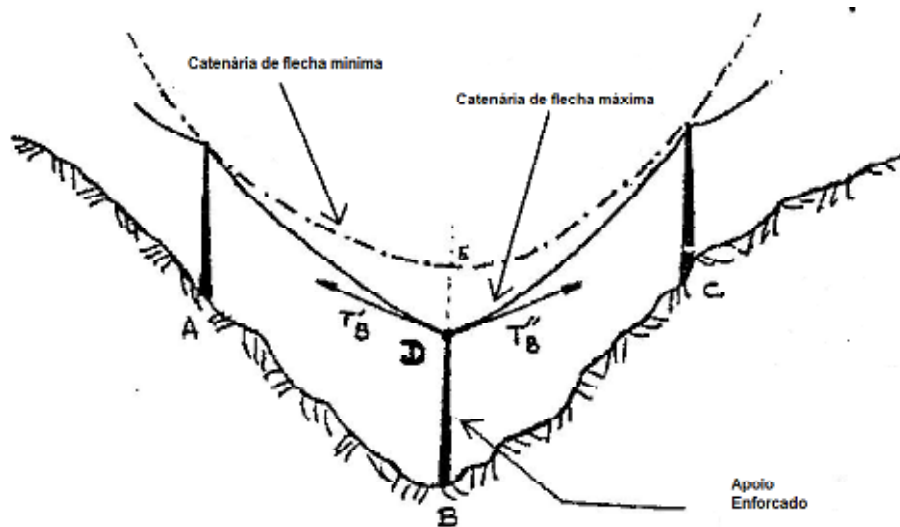


Figura 2.14 - Apoio enforcado, adaptado de [Távora]

Atentando na figura 2.14, considerando as curvas traçadas existe enforcamento sempre que a cota do ponto E é superior à cota do ponto D. A curva de flecha mínima é calculada nas seguintes condições:

- Zona de gelo - temperatura $\theta = -10^\circ\text{C}$, sem vento nem gelo;
- Fora de zona de gelo - $\theta = -5^\circ\text{C}$, sem vento nem gelo.

Nestes casos, a cadeia de isoladores deverá ser substituída por cadeias de amarração.

2.4.11. Desvio Transversal das Cadeias de Isoladores

A acção do vento transversal sobre os condutores da linha e sobre a própria cadeia em suspensão de isoladores pode provocar o desvio desta, podendo mesmo levar os condutores a aproximarem-se demasiado dos apoios. A figura 2.15 ilustra o desvio de uma cadeia de comprimento S_L , e mostra também as forças aplicadas na mesma.

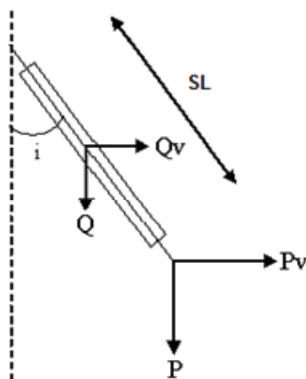


Figura 2.15 - Desvio Transversal da cadeia de isoladores, adaptado de [Checa].

As forças aplicadas são então:

- P_v - Força do vento nos cabo condutores em daN;
- Q_v - Força do vento na cadeia de isoladores em daN;
- P - Peso dos condutores sobre o apoio daN;
- Q - Peso da cadeia de isoladores daN;

O desvio transversal i é função da resultante do sistema de forças verticais e horizontais a que está submetida a cadeia e é dado por:

$$i = \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{P_v + \frac{Q_v}{2}}{P + \frac{Q}{2}} \right] \text{ [grados]} \quad (2.78)$$

Na EDP considera-se o desvio máximo admissível igual a 60 grados.

Se para vãos em patamar o peso do condutor P sobre o apoio é facilmente determinado e dado pela soma dos pesos dos meios vãos adjacentes ao apoio, no caso de vãos desnivelados tal não se aplica pois o ponto mais baixo do cabo condutor não corresponde ao ponto médio do vão considerado. Recorrendo à figura 2.16, é possível calcular o peso real dos condutores sobre o apoio [Avril]:

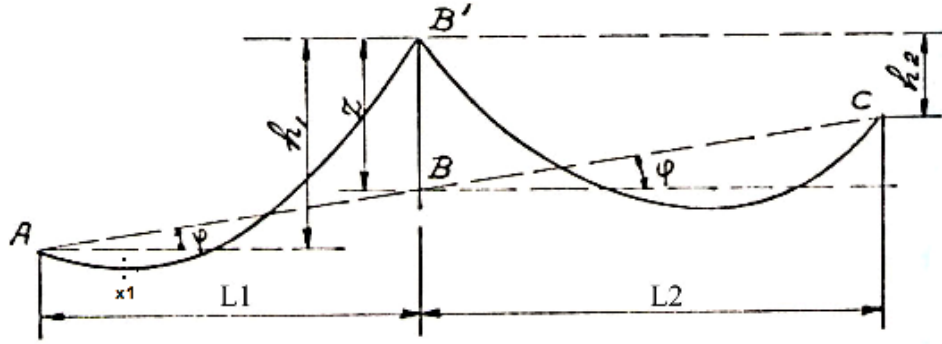


Figura 2.16 - Ilustração de dois vãos desnivelados, [Avril]

Sendo as contribuições dos vãos L_1 e L_2 para o peso a suportar pelo apoio, respectivamente P_1 e P_2 , estes são dados por:

$$P_1 = \omega \times \frac{L_1}{2} + T_1 \times \frac{h_1}{L_1} \quad (2.79)$$

$$P_2 = \omega \times \frac{L_2}{2} + T_2 \times \frac{h_2}{L_2} \quad (2.80)$$

Onde:

ω é o peso próprio dos condutores;

T_1 e T_2 são as tracções a que os condutores estão sujeitos no vão 1 e 2 respectivamente;

Sendo:

$$\begin{cases} h_1 = L_1 \times \operatorname{tg} \varphi + Z \\ h_2 = Z - L_2 \times \operatorname{tg} \varphi \end{cases} \quad (2.81)$$

O peso real P dos condutores de dois vãos adjacentes que um apoio suportará é a soma de P_1 e P_2 .

$$P = P_1 + P_2 = \omega \times \frac{L_1 + L_2}{2} + T_1 \times \frac{h_1}{L_1} + T_2 \times \frac{h_2}{L_2} \quad (2.82)$$

Substituindo h_1 e h_2 dados nas expressões 2.83 com as expressões acima e considerando a tracção $T = T_1 = T_2$ já que os vãos fazem parte do mesmo cantão, vem:

$$P = P_1 + P_2 = \omega \times \frac{L_1 + L_2}{2} + T \left(\frac{Z}{L_1} + \frac{Z}{L_2} \right) \quad (2.83)$$

No caso em que o ponto de fixação dos condutores no apoio (B') está abaixo do segmento de recta que une os pontos de fixação dos condutores A e C, isto é, a distância $\bar{Z}$ for medida por baixo desse mesmo segmento de recta, então o termo $T \left(\frac{Z}{L_1} + \frac{Z}{L_2} \right)$ vem afectado de sinal negativo, isto é:

$$P = P_1 + P_2 = \omega \times \frac{L_1 + L_2}{2} - T \left(\frac{Z}{L_1} + \frac{Z}{L_2} \right) \quad (2.84)$$

2.4.12. Distâncias de Isolamento

Na EN50341-1 são consideradas cinco tipos de distâncias eléctricas para evitar contornamentos. Para efeitos de projecto, e com vista a calcular as diferentes distâncias mínimas admissíveis entre condutores de fase, condutores e o próprio poste, condutores e solo e obstáculos diversos, é necessário o conhecimento de dois tipos daquelas distâncias eléctricas.

São estas:

D_{el} - distância mínima necessária para prevenir a descarga disruptiva entre condutores de fase e objectos ao potencial da terra, durante sobretensões transitórias. D_{el} pode ser considerada uma distância interna considerando a distância de condutores à estrutura do poste ou externa considerando a distância de condutores a obstáculos.

D_{pp} - distância mínima necessária para prevenir a descarga disruptiva entre condutores de fase, durante sobretensões transitórias. D_{pp} é, por isso, considerada uma distância interna.

O cálculo de D_{el} e D_{pp} é realizado de acordo com o demonstrado no Anexo E da EN50341-1 e difere consoante o tipo de sobretensão considerado.

Tem-se então a fórmulas finais que permitem o cálculo das distâncias:

➤ Sobretensões de Choque Atmosférico (frente rápida)

$$D_{el} = \frac{U_{90\%_{-ff-is}}}{530 \cdot K_a \cdot K_{z-ff} \cdot K_{g-ff}} \quad (2.85)$$

$$D_{pp} = \frac{1.2 \cdot U_{90\%_{ff_is}}}{530 \cdot K_a \cdot K_{z_ff} \cdot K_{g_ff}} \quad (2.86)$$

➤ Sobretensões de manobra (frente lenta)

$$D_{el} = \frac{1}{0,46} \cdot \left(e^{\frac{K_{cs} \cdot U_{e2\%_{sf}}}{1080 \cdot k_a \cdot K_{z_sf} \cdot K_{g_sf}}} - 1 \right) \quad (2.87)$$

$$D_{pp} = \frac{1}{0,46} \cdot \left(e^{\frac{1.4 \cdot K_{cs} \cdot U_{e2\%_{sf}}}{1080 \cdot k_a \cdot K_{z_sf} \cdot K_{g_sf}}} - 1 \right) \quad (2.88)$$

➤ Sobretensões à frequência industrial

$$D_{el} = \left(\frac{e^{\frac{U_s}{750 \cdot \sqrt{3} \cdot K_a \cdot K_{z_pf} \cdot K_{g_pf}}} - 1}{0,55} \right)^{0,83} \quad (2.89)$$

$$D_{pp} = \frac{1}{0,46} \cdot \left(e^{\frac{1.4 \cdot K_{cs} \cdot U_{e2\%_{sf}}}{1080 \cdot k_a \cdot K_{z_sf} \cdot K_{g_sf}}} - 1 \right) \quad (2.90)$$

sendo:

$U_{90\%_{ff_is}}$ a tensão suportável ao choque atmosférico da cadeia de isoladores;

K_{z_ff} o factor de desvio da distribuição da tensão suportável a sobretensões de frente rápida;

K_{g_ff} o factor de intervalo para sobretensões de choque atmosférico para sobretensões de frente rápida de valor $K_{g_ff} = 0,74 + 0,26K_g$, sendo que K_g é o factor de intervalo;

K_a o factor de altitude para a altura representativa para Portugal (1000 m) e que assume diferentes valores consoante o valore de tensão de contornamento;

K_{cs} o factor estatístico de coordenação (representa o risco de falha do isolador) que toma o valor de 1,05;

K_{g_sf} o factor de intervalo para sobretensões de manobra com $K_{g_sf} = K_g$;

K_{z_sf} o factor de desvio da distribuição da tensão suportável a sobretensões de frente rápida;

$U_{e2\%_{sf}}$ a sobretensão de frente lenta com 2% de probabilidade de ser ultrapassada;
 $K_{g_{pf}}$ o factor de intervalo para sobretensões à frequência industrial de valor
 $K_{g_{pf}} = 1,35K_g - 0,35K_g^2$
 $K_{z_{pf}}$ o factor de desvio da distribuição da tensão suportável a sobretensões à frequência industrial;
 U_s a tensão simples mais elevada .

Os valores para cada factor e grandeza, encontram-se tabelados na EN50341-3-17 (tabelas 5.35/PT.2 , 5.3.5/PT.3-1 , 5.3.5/PT.3-2 , 5.3.5/PT.3-3 e 5.3.5/PT.4.

2.4.13. Distâncias Mínimas Admissíveis

A cláusula 5.4.3/PT.2 da EN50341-3-17 estabelece que a distância de segurança entre condutores de fase de um circuito ou entre condutores de fase de diferentes circuitos no mesmo apoio deve ser não inferior a D_{pp} . Adicionalmente, os condutores nus devem manter distâncias entre si não inferiores a D dada por:

$$D = k \cdot (f + S_L) + D_{pp} \quad [m] \quad (2.91)$$

onde:

k é o coeficiente de material que vale 0,6 para o alumínio-aço;
 f é a flecha do condutor à temperatura máxima de projecto (75°C) e sem vento;
 S_L é o comprimento da cadeia de isoladores.

Fora de zonas de gelo, a distância entre condutores pode ser reduzida a $\frac{2}{3} \cdot D$, desde que a distância horizontal entre os planos verticais que passam através dos pontos de fixação seja não inferior a $\frac{2}{3} \cdot D$.

Há ainda que considerar as distâncias mínimas admissíveis em relação ao solo, estruturas e objectos diversos apresentadas na tabela 2.7 de acordo com a EN50341-3-17:

Tabela 2.7 - Distâncias externas admissíveis

Definição		Cláusula	Expressão	Mínimo
Distância dos condutores ao solo		5.4.4	$D = 5m + D_{el}$	6 m
Distância dos condutores às árvores		5.4.4/PT.1	$D = 2m + D_{el}$	2,5 m
Largura da faixa de protecção			–	25 m
Distância dos condutores aos edifícios	Linha sobre edifícios	5.4.5.2/PT.1	Ver requisitos especiais seguintes à tabela	4 m
	Linha adjacente a edifícios (horizontal)	5.4.5.2/PT.2		$D = 2m + D_{el}$
Distância dos condutores a Antenas, candeeiros de iluminação, mastros de bandeira, sinalização publicitária, etc		5.4.5.2/PT.4	$D = 2m + D_{el}$	3 m
Distância dos condutores nos cruzamentos com estradas e caminhos de ferro não electrificados		5.4.5.3/PT.1	$D = 7m + D_{el}$	$7m + D_{el}$
Distância dos condutores nos cruzamentos com caminhos de ferro electrificados		5.4.5.3/PT.1	$D = 12m + D_{el}$	13,5 m
Distância entre duas linhas (energia e de telecomunicações)		5.4.5.4/PT.1 e PT.2	$D = 1m + D_{pp}$	2 m

Definem-se ainda os seguintes requisitos especiais [EN50341-3-17]:

- Nas as distâncias a árvores define-se uma faixa de protecção centrada no eixo da linha, no interior da qual as árvores pode ser abatidas ou podadas por forma a assegurar em permanência a distância mínima destas aos condutores, estando incluídas árvores que, em caso de queda, não mantenham uma distância mínima aos condutores de 1,5m. Isto não se aplica, no entanto, a espécies protegidas pela Lei Portuguesa.
- Nas distâncias a edifícios, para telhados com inclinação maior que 15° e resistentes ao fogo $D=2m + D_{el}$; Para telhados com inclinação menor ou igual a 15° e resistentes ao fogo $D=4m + D_{el}$; Para telhados não resistentes ao fogo e instalações sensíveis ao fogo $D=10m + D_{el}$;
- Para auto-estradas os apoios devem situar-se a uma distância horizontal não inferior a 5 m do limite da zona de auto-estrada; Para outras estradas essa distância é de 3m; Nas situações em que no caso de colapso do apoio, este poder cair sobre uma estrada as suas fundações devem ser dimensionadas para 1,5 vezes os valores das cargas normalizadas;
- É estabelecida um distância horizontal mínima de 5 m para apoios na vizinhança de caminhos de ferro;

- No cruzamento de linhas, deve ser tomado em consideração a posição relativa das linhas, isto é, no cruzamento de linhas de tensão diferente, a de maior tensão deverá cruzar superiormente
- No cruzamento de uma linha AT com uma linha de telecomunicação, a linha AT deverá cruzar superiormente. Além disso, é fortemente recomendado que o ângulo de cruzamento seja superior a 15°.

2.4.14. Apoios

Os apoios que, ainda hoje, são usualmente utilizados em linhas aéreas de alta tensão são os apoios da série P. Entretanto, surgiram os apoios da série F, licenciados pela primeira vez em 1994 pela, então, Direcção Geral de Energia como elementos tipo de instalações eléctricas e destinavam-se a linhas simples de média tensão e linhas simples e duplas de alta tensão. Todos os apoios da série F foram inicialmente dimensionados de acordo com o RSLEAT no que se refere a requisitos eléctricos (distâncias de isolamento) e requisitos mecânicos (acções, combinações de acções e estabilidade). Posteriormente com a entrada em vigor da norma europeia, esta série de apoios foi sujeita a uma revisão, cujo processo foi concluído em 2006, dando origem à nova série agora designada por série de postes FB [Metalgalva].

No cálculo mecânico dos apoios em Portugal são definidos casos de carga normalizados de acordo com a tabela 2.8:

Tabela 2.8 - Casos de carga normalizados

Caso de carga	Hipótese Associada
1a	Hipótese 1
1b	
5b	Hipótese 2
5a	Hipótese 3

Para cada tipo de apoio é realizado o cálculo tendo em conta as solicitações que lhes são impostas, considerando que em cada hipótese, todas as cargas são simultâneas. O Conjunto de cargas para cada tipo de apoio deve ser entendido como os requisitos nominais mínimos a priori para cada apoio [EN50341-3-17].

2.4.14.1. Apoios de Alinhamento

Os apoios de alinhamento devem ser dimensionados para as seguintes hipóteses de cálculo e respectivas solicitações (cláusula 4.2.10.2/PT.2 da EN50341-3-17):

Hipótese 1(caso de carga 1a e 1b)

- Vento na direcção perpendicular à linha sobre o apoio, isoladores, condutores e cabos de guarda;
- Componentes horizontais das tensões dos condutores e cabos de guarda nos seus pontos de fixação
- Peso próprio de apoio, isoladores, condutores e cabos de guarda.

Hipótese 2(caso de carga 5b)

- 30% das forças resultantes da acção do vento perpendicular à linha sobre condutores e cabos de guarda aplicada no eixo do apoio, na direcção da linha, à altura da resultante.
- Peso próprio de apoio, isoladores, condutores e cabos de guarda.

Hipótese 3(caso de carga 5a)

- Força horizontal resultante da anulação da tensão de qualquer sub-condutor ou cabo de guarda, mantendo os restantes sub-condutores e cabos de guarda uma tensão igual à tensão máxima residual horizontal, na ausência de cargas de vento ou gelo sobre os apoios, numa direcção paralela ao eixo longitudinal do apoios, numa direcção paralela ao eixo longitudinal do apoio..
- Peso próprio de apoio, isoladores, condutores e cabos de guarda.

A hipótese 3 não necessita ser verificada, se estiverem previstos apoios de reforço.

2.4.14.2. Apoios de Ângulo

Os apoios de ângulo devem ser dimensionados para as seguinte hipóteses de cálculo e respectivas solicitações (cláusula 4.2.10.2/PT.3 da EN50341-3-17):

Hipótese 1(caso de carga 1a)

- Vento na direcção da bissectriz do ângulo da linha sobre o apoio, isoladores, condutores e cabos de guarda;
- Componentes horizontais das tensões dos condutores e cabos de guarda nos seus pontos de fixação, resultantes da carga de vento à temperatura de referência (vento sempre na direcção da bissectriz do ângulo da linha;
- Peso próprio de apoio, isoladores, condutores e cabos de guarda.

Hipótese 2(caso de carga 5b)

- 30% das forças resultantes da acção do vento ao longo da bissectriz do ângulo da linha sobre condutores e cabos de guarda aplicada no eixo do apoio, na direcção perpendicular à bissectriz do ângulo, à altura da resultante.

- Peso próprio de apoio, isoladores, condutores e cabos de guarda.

Hipótese 3(caso de carga 5a)

- Força horizontal resultante da anulação da tensão de qualquer sub-condutor ou cabo de guarda, mantendo os restantes sub-condutores e cabos de guarda uma tensão igual à tensão máxima residual horizontal, na ausência de cargas de vento ou gelo sobre os apoios, numa direcção paralela ao eixo longitudinal do apoio, numa direcção paralela ao eixo longitudinal do apoio.
- Peso próprio de apoio, isoladores, condutores e cabos de guarda.

A hipótese 3 não necessita ser verificada, se estiverem previstos apoios de reforço.

2.4.14.3. Apoios Fim de Linha

Os apoios fim de linha devem ser dimensionados para as seguinte hipóteses de cálculo e respectivas solicitações (cláusula 4.2.10.2/PT.5 da EN50341-3-17):

Hipótese 1(caso de carga 1a)

- Carga unilateral de vento na direcção perpendicular à linha sobre o apoio, isoladores, condutores e cabos de guarda;
- Componentes unilaterais horizontais das tensões dos condutores e cabos de guarda nos seus pontos de fixação, resultantes da carga de vento à temperatura de referência (vento actuando perpendicular á linha);
- Peso próprio de apoio, isoladores, condutores e cabos de guarda.

Hipótese 2(caso de carga 5a)

- Força horizontal resultante da anulação da tensão de qualquer sub-condutor ou cabo de guarda, mantendo os restantes sub-condutores e cabos de guarda uma tensão igual à tensão máxima residual horizontal, na ausência de cargas de vento ou gelo sobre os apoios, numa direcção paralela ao eixo longitudinal do apoio, numa direcção paralela ao eixo longitudinal do apoio.
- Peso próprio de apoio, isoladores, condutores e cabos de guarda.

Capítulo 3

Projecto linha Vila Fria - Portucel - Memória Descritiva e Justificativa

3.1. Objectivo

A EDP Distribuição - Energia, S.A pretende interligar a Subestação de Vila Fria, pertencente ao Concelho de Viana do Castelo, à Subestação da Portucel, situada no mesmo Concelho.

Para tal terá de ser construída uma linha aérea dupla de transporte de energia a 60 kV, a qual terá início na Subestação de Vila Fria e terminará na Subestação da Portucel tendo o comprimento total de 7.288 km.

3.2. Regulamentação

O projecto aqui apresentado obedecerá ao disposto na norma EN50341-1 complementada pelos aspectos normativos nacionais referentes a Portugal presentes na EN50341-3-17. O Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão (RSLEAT) serve também como segunda referência quando a norma não se refere a determinado aspecto.

3.3. Corrente e Tensão

A linha a estabelecer será dimensionada prevendo-se, como limite, o transporte de potência de 120 MVA, sob a tensão alternada de 63 kV, com frequência de 50 Hz e factor de potência médio de 0,90 (indutivo).

3.4. Cálculo Eléctrico

3.4.1. Características dos Cabos

A linha dupla será constituída por seis condutores de alumínio-aço e por um cabo de guarda também em alumínio-aço em toda a sua extensão. As características dos cabos utilizados são apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Características do cabo condutor e cabo de guarda

Designação	Condutor AL-AÇO 326		Cabo de guarda AL-AÇO 127 (GUINEA)		
Secção	326,60		127,50		mm ²
Diâmetro	23,45		14,63		mm
Resistência a 20 °C	0,1093		0,3578		Ω/km
Módulo de elasticidade	7850		10546		daN/mm ²
Coeficiente de dilatação linear	1,77E-05		1,53E-05		°C-1
Peso linear	1,219		0,589		daN/m
Carga de ruptura	11270		6880		daN
Tensão de segurança	14		22		daN
Constituição	Alumínio	Aço	Alumínio	Aço	-
	30x3,35	7x3,35	12x2,92	7x2,92	mm
Secção	264,4	61,7	80,4	46,9	mm ²
Diâmetro	3,35	3,35	2,92	2,92	mm

3.4.2. Intensidade de Corrente

Sendo a linha dupla, com os dois ternos a funcionar em paralelo, a intensidade de corrente que transita em cada condutor é:

$$I = \frac{S}{2 \times \sqrt{3} \times U \times \cos(\varphi)} = \frac{120 \times 10^6}{2 \times \sqrt{3} \times 63 \times 10^3 \times 0,9} = 611 \text{ A} \quad (3.1)$$

E a densidade de corrente é então:

$$d = \frac{I}{\sigma} = \frac{611}{326,6} = 1,87 \text{ A/mm}^2 \quad (3.2)$$

3.4.3. Perdas de Energia

A resistência óhmica de um condutor com as características apresentadas na tabela 3.1 e com 7,288 km é dada por:

$$R = R_{20^\circ} \times l = 0,1093 \times 7,288 = 0,797 \ \Omega \quad (3.3)$$

sendo:

R_{20° a resistência linear a 20°C;

l o comprimento da linha em km;

Uma vez tratar-se de uma linha dupla:

$$R = \frac{0,797}{2} = 0,398 \ \Omega$$

Logo, a perda de energia na resistência óhmica por fase será:

$$p = 3 \times R \times I^2 = 3 \times 0,398 \times (2 \times 611)^2 = 1,78 \text{ MW} \quad (3.4)$$

O que corresponde a 1,5% da potência total transportável.

3.4.4. Queda de Tensão

O coeficiente de auto-indução médio (L), por fase e por quilómetro é dado por:

$$L = \left[0,5 + 4,605 \times \log \frac{D}{r} \right] \times 10^{-4} \text{ H / km} \quad (3.5)$$

A figura 3.1 e 3.2 representam o topos dos apoios usados no projecto da linha.

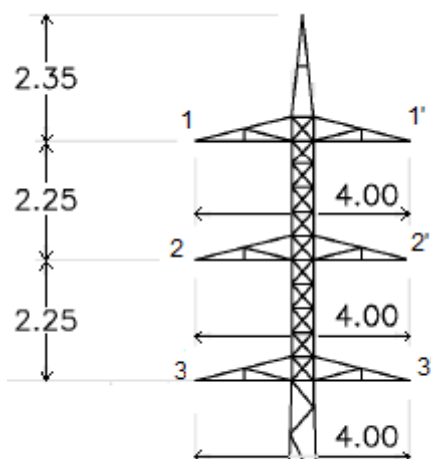


Figura 3.1 - Topo de um apoio tipo FB30ADN e respectivas distâncias entre pontos de fixação dos cabos expressas em metros

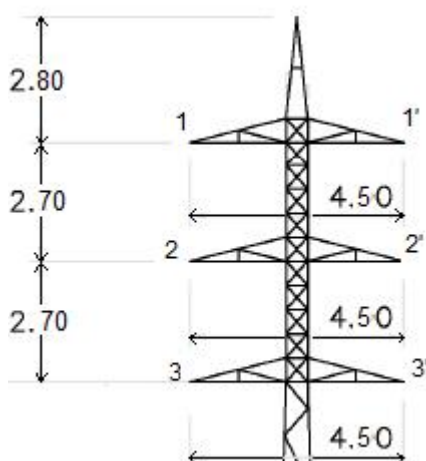


Figura 3.2 - Topo de um apoio tipo FB95ADN e FB165ADN e respectivas distâncias entre pontos de fixação dos cabos expressas em metros

Tendo por base as figura 3.1 e 3.2, calcula-se a distância D através de:

$$D = \sqrt[3]{D_1 \times D_2 \times D_3} \quad (3.6)$$

Apoio FB30ADN:

$$D_{1-2'} = D_{2-1'} = D_{2-3'} = D_{3-2'} = \sqrt{2250^2 + 4000^2} = 4589 \text{ mm}$$

$$D_{1-3'} = D_{3-1'} = \sqrt{4500^2 + 4000^2} = 6020 \text{ mm}$$

$$D_1 = \frac{\sqrt{D_{1-2'} \times D_{1-2'} \times D_{1-3'} \times D_{1-3'}}}{D_{1-1'}} = \frac{\sqrt{2250 \times 4589 \times 4500 \times 6020}}{4000} = 4181 \text{ mm}$$

$$D_2 = \frac{\sqrt{D_{2-1} \times D_{2-1'} \times D_{2-3} \times D_{2-3'}}}{D_{2-2'}} = \frac{\sqrt{2250 \times 4589 \times 2250 \times 4589}}{4000} = 2581 \text{ mm}$$

$$D_3 = \frac{\sqrt{D_{3-1} \times D_{3-1'} \times D_{3-2} \times D_{3-2'}}}{D_{3-3'}} = \frac{\sqrt{4500 \times 6020 \times 2250 \times 4589}}{4000} = 4181 \text{ mm}$$

$$D = \sqrt[3]{4181 \times 2581 \times 4181} = 3360 \text{ mm}$$

Sendo assim,

$$L_1 = \left[\frac{1}{2} + 4,605 \times \log \frac{3360}{11,725} \right] \times 10^{-4} = 11,8 \times 10^{-4} \text{ H / km}$$

A reactância é dada por:

$$X = \omega \times L \quad [\Omega / \text{km}] \quad (3.7)$$

Logo:

$$X_1 = \omega \times L_1 = 2 \times \pi \times 50 \times 11,8 \times 10^{-4} = 0,37 \text{ } \Omega / \text{km}$$

Tendo em conta que o apoio do tipo FB30ADN é utilizado numa extensão total de 3,961 km da linha tem-se:

$$X_1 = 0,37 \times 3,961 = 1,47 \text{ } \Omega$$

Apoios FB95ADN e FB165ADN:

$$D_{1-2'} = D_{2-1'} = D_{2-3'} = D_{3-2'} = \sqrt{2700^2 + 4500^2} = 5248 \text{ mm}$$

$$D_{1-3'} = D_{3-1'} = \sqrt{5400^2 + 4500^2} = 7029 \text{ mm}$$

$$D_1 = \frac{\sqrt{D_{1-2} \times D_{1-2'} \times D_{1-3} \times D_{1-3'}}}{D_{1-1'}} = \frac{\sqrt{2700 \times 5248 \times 5400 \times 7029}}{4500} = 5153 \text{ mm}$$

$$D_2 = \frac{\sqrt{D_{2-1} \times D_{2-1'} \times D_{2-3} \times D_{2-3'}}}{D_{2-2'}} = \frac{\sqrt{2700 \times 5248 \times 2700 \times 5248}}{4500} = 2194 \text{ mm}$$

$$D_3 = \frac{\sqrt{D_{3-1} \times D_{3-1'} \times D_{3-2} \times D_{3-2'}}}{D_{3-3'}} = \frac{\sqrt{5400 \times 7029 \times 2700 \times 5248}}{4500} = 5153 \text{ mm}$$

$$D = \sqrt[3]{5153 \times 2194 \times 5153} = 3877 \text{ mm}$$

$$r = \frac{d}{2} = \frac{23,45}{2} = 11,725 \text{ mm}$$

Sendo assim,

$$L_2 = \left[\frac{1}{2} + 4,605 \times \log \frac{3877}{11,725} \right] \times 10^{-4} = 12,1 \times 10^{-4} \text{ H / km}$$

Logo a reactância é,

$$X_2 = \omega \times L_2 = 2 \times \pi \times 50 \times 12,1 \times 10^{-4} = 0,38 \text{ } \Omega / \text{ km}$$

Tendo em conta que os apoios do tipo FB95ADN e FB165ADN são utilizados numa extensão total de 3,302 km da linha tem-se:

$$X_2 = 0,38 \times 3,302 = 1,25 \text{ } \Omega$$

A reactância total é então:

$$X = X_1 + X_2 = 1,47 + 1,25 = 2,72 \text{ } \Omega$$

Finalmente vem:

$$\Delta U = \sqrt{3} \times I \times (R \times \cos \theta + X \times \sin \theta) \quad (3.8)$$

$$\Delta U = \sqrt{3} \times 611 \times (0,398 \times 0,90 + 2,72 \times \sin(\arccos 0,9)) = 1634 \text{ V}$$

O que corresponde a 2,6% da tensão nominal da linha.

3.4.5. Capacidade

$$C = \frac{24,2}{\log\left(\frac{D}{r'}\right)} \times 10^{-9} \quad [F / km] \quad (3.9)$$

Apoios FB30ADN:

$$C_1 = \frac{24,2}{\log\left(\frac{3,360}{11,725 \times 10^{-3}}\right)} \times 10^{-9} = 9,8 \text{ nF} / km$$

Apoios FB95ADN e FB165ADN:

$$C_2 = \frac{24,2}{\log\left(\frac{2 \times 3,877}{11,725 \times 10^{-3}}\right)} \times 10^{-9} = 9,6 \text{ nF} / km$$

3.4.6. Susceptância

$$B = \omega \times C \quad (3.10)$$

Apoios FB30ADN:

$$B_1 = 2 \times \pi \times 50 \times 9,8 \times 10^{-9} = 3,1 \times 10^{-6} \text{ S} / km$$

Apoios FB95ADN e FB165ADN:

$$B_2 = 2 \times \pi \times 50 \times 9,6 \times 10^{-9} = 3,0 \times 10^{-6} \text{ S} / km$$

3.4.7. Condutância

$$G = \frac{P}{U_s^2} \times 10^{-3} \quad [S / km] \quad (3.11)$$

sendo,

$$p = \frac{1780}{7,288} = 244,2 \text{ kW} / km$$

$$G = \frac{244,2}{\left(\frac{60}{\sqrt{3}}\right)^2} \times 10^{-3} = 0,0002 \approx 0 \text{ S} / km$$

3.4.8. Admitância

$$Y = G + jB \quad (3.12)$$

Apoios FB30ADN:

$$Y_1 = 0 + j3,1 \times 10^{-6} \text{ S/km}$$

$$|\underline{Y}_1| = 3,1 \times 10^{-6} \text{ S/km} \quad ; \quad \angle \underline{Y}_1 = 90^\circ$$

Apoios FB95ADN e FB165ADN:

$$Y_2 = 0 + j3,0 \times 10^{-6} \text{ S/km} \quad (3.13)$$

$$|\underline{Y}_2| = 3,0 \times 10^{-6} \text{ S/km} \quad ; \quad \angle \underline{Y}_2 = 90^\circ$$

3.4.9. Impedância

$$Z = R + jX \quad (3.14)$$

Apoios FB30ADN:

$$Z_1 = 0,1093 + j0,37 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$|\underline{Z}_1| = \sqrt{0,1093^2 + 0,37^2} = 0,386 \text{ } \Omega/\text{km} \quad ; \quad \angle \underline{Z}_1 = \arctg \frac{0,37}{0,1093} = 73,5^\circ$$

Apoios FB95ADN e FB165ADN:

$$Z_2 = 0,1093 + j0,38 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$|\underline{Z}_1| = \sqrt{0,1093^2 + 0,38^2} = 0,395 \text{ } \Omega/\text{km} \quad ; \quad \angle \underline{Z}_2 = \arctg \frac{0,38}{0,1093} = 73,9^\circ$$

3.4.10. Impedância Característica

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} \quad (3.15)$$

Apoios FB30ADN:

$$Z_{c1} = \sqrt{\frac{0,1093 + j0,37}{0 + j2,76 \times 10^{-6}}} = 370 - j54 \text{ } \Omega / km$$

$$|Z_{c1}| = \sqrt{370^2 + 54^2} = 374 \text{ } \Omega / km \quad ; \quad \angle Z_{c1} = \arctg \frac{50}{349} = -8,3^\circ$$

Apoios FB95ADN e FB165ADN:

$$Z_{c2} = \sqrt{\frac{0,1093 + j0,38}{0 + j2,7 \times 10^{-6}}} = 379 - j53 \text{ } \Omega / km$$

$$|Z_{c2}| = \sqrt{379^2 + 53^2} = 383 \text{ } \Omega / km \quad ; \quad \angle Z_{c2} = \arctg \frac{53}{379} = -8^\circ$$

3.4.11. Isoladores

O valor da tensão nominal da linha é de 60 kV a que corresponde uma tensão mais elevada U_m de 72,5 kV.

A tensão de contornamento sob chuva U_{ch} não deverá ser inferior a $3 \cdot \left(\frac{\sqrt{2} \cdot U_m}{\sqrt{3}} \right) = 2,45 \cdot U_m [kV]$

Isto é,

$$U_{ch} \leq 2,45 \times 72,5 = 178 \text{ } kV$$

Considerando que a linha será implantada numa zona de poluição média, os condutores serão suspensos em cadeias de isoladores com 5 elementos de cerâmica do tipo U70BL, da Empresa Cerisol ou equivalentes. As cadeias de amarração terão igualmente 5 isoladores do mesmo tipo. A tabela 3.2 mostra as características electromecânicas dos isoladores utilizados.

Tabela 3.2 - Características dos Isoladores U70BL

TIPO		U70BL
DIMENSÕES		
	Diâmetro do espigão	16 mm
	Passo	146 mm
	Diâmetro	255 mm
	Comprimento da linha de fuga	300 mm
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS (cadeia)		
	Tensão suportável ao choque	440 kV
	Tensão suportável sob chuva	190 kV
	Tensão de perfuração	115 kV
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS		
	Carga de rotura electromecânica	7000 daN
	Carga máxima de trabalho	2800 daN

3.5. Cálculo Mecânico

3.5.1. Tensões Mecânicas Máximas

Os condutores e cabo de guarda serão montados de modo a que a tensão mecânica máxima a que fiquem sujeitos não ultrapasse, nas condições mais desfavoráveis, os valores apresentados na tabela 3.3. Considerou-se a pressão dinâmica do vento máximo 855 Pa, isto é, 85,5daN/m², correspondente à distância de 30 m do solo em zona A.

Tabela 3.3 - Tensões mecânicas máximas para os diferentes vãos

	Tensões máximas [daN/mm ²]	
	Condutor	Cabo de guarda
Pórtico da subestação de Vila Fria ao apoio 1	0,5	1
Vão entre os apoios 1 e 2	4	8
Vãos entre os apoios 2 e 32	8	13
Vãos entre os apoios 32 e 33	4	8
Apoio 33 ao pórtico da subestação da Portucel	0,5	1

De acordo com a cláusula 9.2.4 da EN50341-3-17 o projecto da linha deve garantir que a tracção máxima admissível nos condutores não exceda 40% da tracção de rotura dos mesmos. Assim, o limite máximo de tensão que os condutores aguentam sem risco de ruptura será:

$$t_{seg} = \frac{0,4 \times T_R}{\sigma} \left[daN / mm^2 \right] \quad (3.16)$$

Onde:

T_R é a tensão de ruptura dos condutores em daN

σ é a secção do condutor em mm^2

$$t_{seg} = \frac{0,4 \times 11270}{326,6} = 14 \text{ daN} / mm^2, \text{ para o cabo condutor Al-Aço 326}$$

e

$$t_{seg} = \frac{0,4 \times 6880}{127,5} = 22 \text{ daN} / mm^2, \text{ para o cabo de guarda Al-Aço 127}$$

Neste projecto a tensão máxima utilizada será para a maioria dos vãos, de 8 daN/mm² para o cabo condutor e 13 daN/mm² para o cabo de guarda como mostra a tabela 3.3.

No primeiro e último vão, a tensão máxima será inferior à tensão mecânica utilizada nos restantes vãos (4 daN/mm² para o condutor e 8 daN/mm² para o cabo de guarda) devido ao dimensionamento dos apoios fim de linha. Além disso os apoios 2 e 32, isto é, os que antecedem os fim de linha são apoios onde a linha faz um ângulo muito pronunciado e, assim, alivia-se a elevada carga transversal a que estes apoios serão sujeitos.

Em relação à ligação dos apoios aos pórticos das subestações, são regra geral usados os valores apresentados.

3.5.2. Coeficientes de Sobrecarga

A linha projectada situa-se no Distrito de Viana do Castelo, e atinge a cota máxima de 143m no apoio 11. Sendo assim, de acordo com a EN50341-1, para cotas inferiores a 600m neste Distrito é improvável a formação de gelo e por isso este não será considerado. De seguida apresenta-se o cálculo dos coeficientes de sobrecarga associados a cada estado atmosférico.

Lista de símbolos:

Q_{w1}	força do vento sobre o condutor ou de cabo de guarda no estado Inverno [daN/m]
Q_{w2}	força do vento sobre o condutor ou de cabo de guarda no estado Primavera [daN/m]
G_c	factor de ressonância estrutural (factor de vão)
G_q	factor de rajada
C_c	coeficiente de forma do condutor ou cabo de guarda
q	pressão dinâmica do vento considerada a 30 m acima do solo [daN/m ²]
d	diâmetro do condutor ou cabo de guarda [m]
m_1	coeficiente de sobrecarga para o estado de Inverno
m_2	coeficiente de sobrecarga para o estado de Primavera
ω	peso linear próprio do condutor ou cabo de guarda [daN/m]

Cabo Condutor:

Estado de Inverno (1)

$$Q_{w1} = G_c \cdot G_q \cdot C_c \cdot 0,4 \cdot q \cdot d = 0,6 \times 1 \times 1 \times 0,4 \times 85,5 \times 0,02345 = 0,481 \text{ daN / m} \quad (3.17)$$

$$m_1 = \frac{\sqrt{\omega^2 + Q_{w1}^2}}{\omega} = \frac{\sqrt{1,219^2 + 0,481^2}}{1,219} = 1,075 \quad (3.18)$$

Estado de Primavera (2)

$$Q_{w2} = G_c \cdot G_q \cdot C_c \cdot q \cdot d = 0,6 \times 1 \times 1 \times 85,5 \times 0,02345 = 1,203 \text{ daN / m} \quad (3.19)$$

$$m_2 = \frac{\sqrt{\omega^2 + Q_{w2}^2}}{\omega} = \frac{\sqrt{1,219^2 + 1,203^2}}{1,219} = 1,405 \quad (3.20)$$

Cabo de Guarda:

Estado de Inverno (1)

$$Q_{w1} = G_c \cdot G_q \cdot C_c \cdot 0,4 \cdot q \cdot d = 0,6 \times 1 \times 1,1 \times 0,4 \times 85,5 \times 0,01463 = 0,330 \text{ daN / m} \quad (3.21)$$

$$m_1 = \frac{\sqrt{\omega^2 + Q_{w1}^2}}{\omega} = \frac{\sqrt{0,589^2 + 0,330^2}}{0,589} = 1,146 \quad (3.22)$$

Estado de Primavera (2)

$$Q_{w2} = G_c \cdot G_q \cdot C_c \cdot q \cdot d = 0,6 \times 1 \times 1,1 \times 85,5 \times 0,01463 = 0,825 \text{ daN / m} \quad (3.23)$$

$$m_2 = \frac{\sqrt{\omega^2 + Q_{w2}^2}}{\omega} = \frac{\sqrt{0,589^2 + 0,825^2}}{1,219} = 1,722 \quad (3.24)$$

Na tabela 3.4 encontram-se resumidos os valores encontrados.

Tabela 3.4 - Forças do vento e coeficientes de sobrecarga para os diferentes estados atmosféricos

	Estado Atmosférico			
	Inverno (1)	Primavera (2)	Verão (Montagem)	
Temperatura	-5	15	75	°C
Vento	Reduzido	Máximo	s/vento	
	Cabo condutor			
Força do vento	0,481	1,203	0	daN/m
Coeficiente de sobrecarga	1,075	1,405	1	
	Cabo de Guarda			
Força do vento	0,330	0,826	0	daN/m
Coeficiente de sobrecarga	1,146	1,722	1	

3.5.3. Parâmetro da Catenária e Flecha máxima

De seguida apresenta-se o cálculo do parâmetro do cabo condutor e flecha máxima referente a um vão médio de 300 m.

Cabo Condutor:

Consultando a tabela 3.4 tem-se:

$$m_1 = 1,075$$

$$m_2 = 1,405$$

Uma vez que $m_2 > m_1$, é necessário calcular o vão crítico para determinar o pior estado.

$$L_{cr} = \frac{\sigma \cdot t_{\max}}{\omega} \sqrt{\frac{24 \cdot \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{m_2^2 - m_1^2}} = \frac{326,6 \times 8}{1,219} \sqrt{\frac{24 \times 1,77 \times 10^{-5} \times (15 - (-5))}{1,405^2 - 1,075^2}} = 218 \text{ m} \quad (3.25)$$

$L_{med} > L_{cr}$ logo o estado mais desfavorável é a Primavera.

Tendo em conta o estado de montagem e o estado de Primavera caracterizados por:

$$\text{Montagem (Verão)} \begin{cases} m_i = 1 \\ \theta_i = 75^\circ C \\ t_i = ? \end{cases} \quad \text{Primavera} \begin{cases} m_k = 1,405 \\ \theta_k = 15^\circ C \\ t_k = 8 \text{ daN} / \text{mm}^2 \end{cases}$$

Aplica-se a equação dos estado:

$$\theta_i + \frac{t_i}{\alpha \cdot E} - \frac{m_i^2 \cdot \omega^2 \cdot L^2}{24 \cdot \alpha \cdot \sigma^2 \cdot t_i^2} = \theta_k + \frac{t_k}{\alpha \cdot E} - \frac{m_k^2 \cdot \omega^2 \cdot L^2}{24 \cdot \alpha \cdot \sigma^2 \cdot t_k^2} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} 75 + \frac{t_i}{1,77 \times 10^{-5} \times 7850} - \frac{1^2 \times 1,219^2 \times 300^2}{24 \times 1,77 \times 10^{-5} \times 326,6^2 \times t_i^2} = \\ = 15 + \frac{8}{1,77 \times 10^{-5} \times 7850} - \frac{1,405^2 \times 1,219^2 \times 300^2}{24 \times 1,77 \times 10^{-5} \times 326,6^2 \times 8^2} \end{aligned}$$

$$t_i = 4,802 \text{ daN} / \text{mm}^2$$

Tracção:

$$T = t_i \times \sigma = 4,802 \times 326,6 = 1568 \text{ daN} \quad (3.27)$$

Parâmetro da catenária:

$$P = \frac{t_i \cdot \sigma}{\omega} = \frac{1568}{1,219} = 1286 \text{ m} \quad (3.28)$$

Flecha (máxima):

$$f = \frac{m \cdot \omega \cdot L \cdot L}{8 \cdot \sigma \cdot t} = \frac{1 \times 1,219 \times 300^2}{8 \times 326,6 \times 4,802} = 8,7 \text{ m} \quad (3.29)$$

A tabela 3.5 apresenta os valores encontrados para os diferentes médios.

Tabela 3.5 - Parâmetro da catenária e flecha do condutor para os vão médios considerados

L_{med} [m]	θ_i [°C]	t [daN/mm ²]	T [daN]	P [m]	f [m]	Estado mais desfavorável
150	75	3,483	1138	933	3,0	Inverno
200	75	4,154	1357	1113	4,5	Inverno
250	75	4,562	1490	1222	6,4	Primavera
300	75	4,802	1568	1286	8,7	Primavera
350	75	4,977	1626	1334	11,5	Primavera

Cabo de Guarda:

Consultando a tabela 3.4 tem-se:

$$m_1 = 1,146$$

$$m_2 = 1,722$$

Uma vez que $m_2 > m_1$, é necessário calcular o vão crítico para determinar o pior estado.

$$L_{cr} = \frac{\sigma \cdot t_{máx}}{\omega} \sqrt{\frac{24 \cdot \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{m_2^2 - m_1^2}} = \frac{127,5 \times 13}{0,589} \sqrt{\frac{24 \times 1,53 \times 10^{-5} \times (15 - (-5))}{1,722^2 - 1,146^2}} = 188 \text{ m} \quad (3.30)$$

$L_{med} > L_{cr}$ logo o estado mais desfavorável é a Primavera.

Tendo em conta o estado de montagem e o estado de Primavera caracterizados por:

$$\text{Montagem (Verão)} \begin{cases} m_i = 1 \\ \theta_i = 75^\circ C \\ t_i = ? \end{cases} \quad \text{Primavera} \begin{cases} 1,722 \\ \theta_k = 15^\circ C \\ t_k = 13 \text{ daN} / \text{mm}^2 \end{cases}$$

Aplica-se a equação dos estados:

$$\theta_i + \frac{t_i}{\alpha \cdot E} - \frac{m_i^2 \cdot \omega^2 \cdot L^2}{24 \cdot \alpha \cdot \sigma^2 \cdot t_i^2} = \theta_k + \frac{t_k}{\alpha \cdot E} - \frac{m_k^2 \cdot \omega^2 \cdot L^2}{24 \cdot \alpha \cdot \sigma^2 \cdot t_k^2} \quad (3.31)$$

$$75 + \frac{t_i}{1,53 \times 10^{-5} \times 10546} - \frac{1^2 \times 0,589^2 \times 300^2}{24 \times 1,53 \times 10^{-5} \times 127,5^2 \times t_i^2} =$$

$$= 15 + \frac{13}{1,53 \times 10^{-5} \times 10546} - \frac{1,722^2 \times 0,589^2 \times 300^2}{24 \times 1,53 \times 10^{-5} \times 127,5^2 \times 13^2}$$

$$t_i = 6,795 \text{ daN/mm}^2$$

Tracção:

$$T = t_i \times \sigma = 6,795 \times 127,5 = 866 \text{ daN} \quad (3.32)$$

Parâmetro:

$$P = \frac{t_i \times \sigma}{\omega} = \frac{866}{0,589} = 1471 \text{ m} \quad (3.33)$$

Flecha (máxima):

$$f = \frac{m \cdot \omega \cdot L \cdot L}{8 \cdot \sigma \cdot t} = \frac{1 \times 0,589 \times 300^2}{8 \times 127,5 \times 6,795} = 7,6 \text{ m} \quad (3.34)$$

A tabela 3.6 apresenta os valores encontrados para os diferentes vãos médios.

Tabela 3.6 - Parâmetro da catenária e flecha do cabo de guarda para os vãos médios considerados

L_{med} [m]	θ_i [°C]	t [daN/mm ²]	T [daN]	P [m]	f [m]	Estado mais desfavorável
150	75	5,479	699	1186	2,4	Inverno
200	75	6,273	800	1358	3,7	Primavera
250	75	6,579	839	1424	5,5	Primavera
300	75	6,795	866	1471	7,6	Primavera
350	75	6,950	886	1504	10,2	Primavera

Com a localização final dos postes escolhida, assim como as suas alturas e definidos os cantões de acordo com o desenho em CAD que se encontra no anexo G, foram recalculados os parâmetros das catenárias e flechas para cada cantão. Para isso foi necessário calcular o vão fictício equivalente de cada cantão através da fórmula:

$$L = \sqrt{\frac{\sum_i L_i^3}{\sum_i L_i}} \quad (3.35)$$

Como exemplo, demonstra-se o cálculo para o cantão 11 que compreende os seguintes vãos:

Vão 21 – 22: $L = 250 \text{ m}$

Vão 22 – 23: $L = 208 \text{ m}$

Vão 23 – 24: $L = 196 \text{ m}$

$$L = \sqrt{\frac{250^3 + 208^3 + 196^3}{250 + 208 + 196}} = 222 \text{ m}$$

Os valores dos parâmetros e flechas para os diferentes vãos equivalentes de cada cantão no que se refere ao cabo condutor e cabo de guarda encontram-se nos Anexos A e B respectivamente. O método de cálculo é igual ao demonstrado, aquando do cálculo dos parâmetros para os vãos médios.

3.5.4. Apoios

Os apoios que serão utilizados neste projecto são apoios metálicos reticulados da série FB da empresa Metalogalva licenciados pela DGEG e dimensionados tendo em conta a EN50341-1. Foram usados três tipos de apoios diferentes nomeadamente o apoio FB30ADN indicado para apoios em alinhamento, FB95ADN para apoios de ângulo e FB165ADN para apoios fim de linha ou ângulo. Embora haja a indicação da função a que estão destinados, não é impeditivo de estes serem usados noutras funções desde que seja verificado que suportam os esforços impostos.

3.5.5. Verificação da Estabilidade dos Apoios

Serão aqui apresentados os cálculos justificativos dos esforços aplicados nos apoios e a consequentemente escolha do tipo de apoio necessário para suportar os respectivos esforços.

Lista de símbolos:

$t_{\max_1}$	Tracção máxima no vão à esquerda [daN]
$t_{\max_2}$	Tracção máxima no vão à direita [daN];
β	Ângulo que a direcção do vento faz com a linha [grados];
φ	Ângulo formado entre condutores [grados];
α	Ângulo complementar daquele formado entre condutores (φ) [grados];
T_{CD_l}	Tracção de um cabo condutor segundo o eixo longitudinal[daN];
T_{CD_t}	Tracção de um cabo condutor segundo o eixo transversal [daN];
T_{CG}	Tracção do cabo de guarda [daN];
F_{V_CD}	Força exercida pelo vento sobre um condutor da linha [daN];

F_{V_CG}	Força exercida pelo vento sobre o cabo de guarda da linha [daN];
F_{V_isol}	Força exercida pelo vento sobre uma cadeia de isoladores [daN];
P_{CD}	Peso de um cabo condutor [daN];
P_{CG}	Peso do cabo de guarda [daN];
P_{isol}	Peso de uma cadeia de isoladores [daN];
F_{l0}	Força exercida pelo cabo de guarda no apoio segundo o eixo longitudinal [daN];
F_{t0}	Força exercida pelo cabo de guarda no apoio segundo o eixo transversal [daN];
F_{v0}	Força exercida pelo cabo de guarda no apoio segundo o eixo vertical [daN];
F_l	Força exercida pelo condutor inferior no apoio segundo o eixo longitudinal [daN];
F_t	Força exercida pelo condutor inferior no apoio segundo o eixo transversal [daN];
F_v	Força exercida pelo condutor inferior no apoio segundo o eixo vertical [daN];

A figura 3.3 mostra as forças a que o apoio está sujeito nas 3 direcções longitudinal, transversal e vertical.

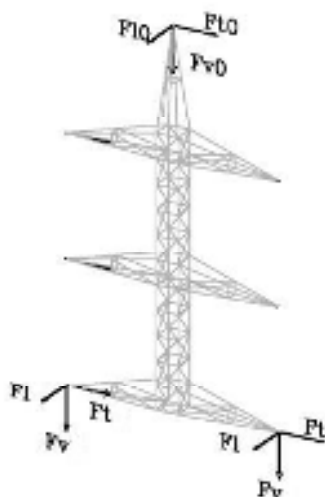


Figura 3.3 - Representação das forças nos apoios segundo as direcções consideradas

Na tabela 3.7 são apresentados os esforços nominais suportados em cada ponto de fixação de condutores e cabo de guarda considerados.

Tabela 3.7 - Esforços nominais suportados pelo apoios em cada caso de carga em daN

Apoio	Caso de carga	F_{l0}	F_{t0}	F_{v0}	F_l	F_t	F_v
FB30ADN	1a	0	408,6	346,5	0	592,3	784,1
	5b	58,4	0	346,5	84,6	0	784,1
FB95ADN	1a	0	1118,3	207,9	0	1249,4	498,5
	5b	770,4	122	207,9	711,1	112,6	498,5
FB165ADN	1a	0	1915,2	346,5	0	3411,8	784,1
	5b	731,8	270	346,5	1372,1	506,2	784,1

3.5.5.1. Apoio Fim de Linha

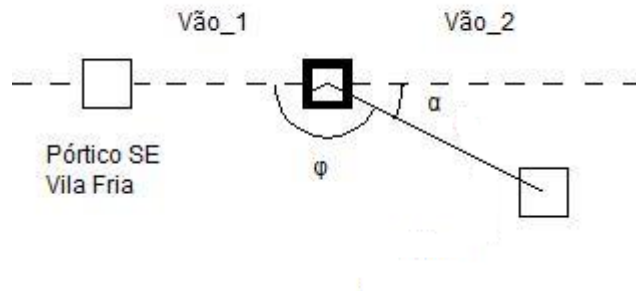


Figura 3.4 - Apoio Fim de Linha de Ângulo

Além de se tratar de um apoio Fim de Linha, este apresenta a particularidade de ser também de ângulo e, sendo assim, constituirá de acordo com a [EN50341-1] um caso especial de apoios de ângulo. Os cálculos são relativos aos apoios nº1 da linha.

$$\begin{cases} \varphi = 105,46 \text{ grados} = 1,66 \text{ rad} \\ \alpha = 94,54 \text{ grados} = 1,49 \text{ rad} \end{cases}$$

Eixo Longitudinal:

$$T_{CD_l} = [t_{\max_2} - t_{\max_1}] \cdot \sigma \cdot \cos(\alpha) = \quad (3.36)$$

$$= |4 - 0,5| \times 326,6 \times \cos(1,49) = 98 \text{ daN}$$

$$T_{CG_l} = [t_{\max_2} - t_{\max_1}] \cdot \sigma \cdot \cos(\alpha) = \quad (3.37)$$

$$= |4 - 0,5| \times 127,5 \times \cos(1,49) = 76 \text{ daN}$$

Eixo Transversal:

$$F_{v_CD} = G_c \cdot G_q \cdot C_c \cdot q \cdot d \cdot \frac{L_1 + L_2}{2} = \quad (3.38)$$

$$= 0,6 \times 1 \times 1 \times 85,5 \times 0,02345 \times \frac{30 + 91}{2} = 73 \text{ daN}$$

$$F_{v_CG} = G_c \cdot G_q \cdot C_c \cdot q \cdot d \cdot \frac{L_1 + L_2}{2} = \quad (3.39)$$

$$= 0,6 \times 1 \times 1,1 \times 85,5 \times 0,01463 \times \frac{30 + 91}{2} = 50 \text{ daN}$$

$$T_{CD_t} = (t_{\max_1} + t_{\max_2}) \times \sigma \times \sin(\alpha) = \quad (3.40)$$

$$= (0,5 + 4) \times 326,6 \times \sin(1,49) = 1464 \text{ daN}$$

$$T_{CG_t} = (t_{\max_1} + t_{\max_2}) \times \sigma \times \sin(\alpha) = \quad (3.41)$$

$$= (1 + 8) \times 127,5 \times \sin(1,49) = 1143 \text{ daN}$$

$$F_{v_Isol} = 15 \text{ daN}$$

Eixo Vertical:

$$P_{CD} = \omega \times \frac{L_1 + L_2}{2} = 1,219 \times \frac{30 + 91}{2} = 74 \text{ daN} \quad (3.42)$$

$$P_{CG} = \omega \times \frac{L_1 + L_2}{2} = 0,589 \times \frac{30 + 91}{2} = 36 \text{ daN} \quad (3.43)$$

$$P_{Isol} = 35 \text{ daN}$$

Hipótese 1 (caso de carga 1a):

$$F_l = T_{CD_l} = 98 \text{ daN} \quad (3.44)$$

$$\begin{aligned} F_t &= T_{CD_t} + F_{v_CD} + 2 \times F_{v_isol} = \\ &= 1464 + 73 + 2 \times 15 = 1567 \text{ daN} \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$\begin{aligned} F_v &= P_{CD} + 2 \times P_{Isol} = \\ &= 74 + 2 \times 35 = 144 \text{ daN} \end{aligned} \quad (3.46)$$

$$F_{l0} = T_{CG_l} = 76 \text{ daN} \quad (3.47)$$

$$\begin{aligned} F_{t0} &= T_{CG_t} + F_{v_CG} = \\ &= 1143 + 50 = 1193 \text{ daN} \end{aligned} \quad (3.48)$$

$$F_{v0} = P_{CG} = 36 \text{ daN} \quad (3.49)$$

Hipótese 2 (caso de carga 5b)

$$F_l = 0,3 \times F_{v_CD} = 0,3 \times 73 = 22 \text{ daN} \quad (3.50)$$

$$F_t = 0 \text{ daN}$$

$$\begin{aligned} F_v &= P_{CD} + 2 \times P_{Isol} = \\ &= 74 + 2 \times 35 = 144 \text{ daN} \end{aligned} \quad (3.51)$$

$$F_{lo} = 0,3 \times F_{v_CG} = 0,3 \times 50 = 15 \text{ daN} \quad (3.52)$$

$$F_{t0} = 0 \text{ daN}$$

$$F_{v0} = P_{CG} = 36 \text{ daN} \quad (3.53)$$

Tendo em conta os esforços totais obtidos e atendendo aos esforços nominais de cada apoio apresentados na tabela 3.7, o apoio nº 1 será do tipo FB165ADN. O apoio será de 27,6 m de altura útil de modo a respeitar as distâncias mínimas regulamentares.

3.5.5.2. Apoio em Alinhamento

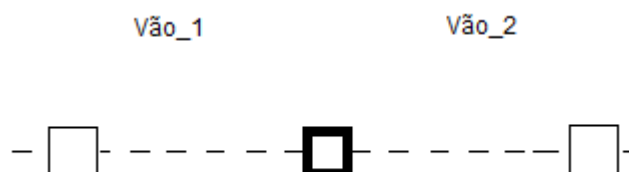


Figura 3.5 - Apoio em Alinhamento

Os cálculos são relativos aos apoio nº 23 da linha.

Eixo Longitudinal:

$$T_{CD_l} = [t_{\max_2} - t_{\max_1}] \cdot \sigma = \quad (3.54)$$

$$= |8 - 8| \times 326,6 = 0 \text{ daN}$$

$$T_{CG_l} = [t_{\max_2} - t_{\max_1}] \cdot \sigma = \quad (3.55)$$

$$= |13 - 13| \times 127,5 = 0 \text{ daN}$$

Eixo Transversal:

$$F_{v_CD} = G_c \cdot G_q \cdot C_c \cdot q \cdot d \cdot \frac{L_1 + L_2}{2} = \quad (3.56)$$

$$= 0,6 \times 1 \times 1 \times 85,5 \times 0,02345 \times \frac{208 + 196}{2} = 243 \text{ daN}$$

$$F_{v_CG} = G_c \cdot G_q \cdot C_c \cdot q \cdot d \cdot \frac{L_1 + L_2}{2} = \quad (3.57)$$

$$= 0,6 \times 1 \times 1,1 \times 85,5 \times 0,01463 \times \frac{208 + 196}{2} = 167 \text{ daN}$$

$$T_{CD_t} = 0 \text{ daN}$$

$$T_{CG_t} = 0 \text{ daN}$$

$$F_{v_Isol} = 15 \text{ daN}$$

Eixo Vertical:

$$P_{CD} = \omega \times \frac{L_1 + L_2}{2} = 1,219 \times \frac{208 + 196}{2} = 246 \text{ daN} \quad (3.58)$$

$$P_{CG} = \omega \times \frac{L_1 + L_2}{2} = 0,589 \times \frac{208 + 196}{2} = 119 \text{ daN} \quad (3.59)$$

$$P_{Isol} = 35 \text{ daN}$$

Hipótese 1 (caso de carga 1a):

$$F_l = T_{CD_l} = 0 \text{ daN} \quad (3.60)$$

$$\begin{aligned} F_t &= T_{CD_t} + F_{v_CD} + F_{v_isol} = \\ &= 0 + 243 + 15 = 1567 \text{ daN} \end{aligned} \quad (3.61)$$

$$\begin{aligned} F_v &= P_{CD} + P_{isol} = \\ &= 246 + 35 = 281 \text{ daN} \end{aligned} \quad (3.62)$$

$$F_{lo} = T_{CG_l} = 0 \text{ daN} \quad (3.63)$$

$$\begin{aligned} F_{t0} &= T_{CG_t} + F_{v_CG} = \\ &= 0 + 167 = 167 \text{ daN} \end{aligned} \quad (3.64)$$

$$F_{v0} = P_{CG} = 119 \text{ daN} \quad (3.65)$$

Hipótese 2 (caso de carga 5b):

$$F_l = 0,3 \times F_{v_CD} = 0,3 \times 243 = 73 \text{ daN} \quad (3.66)$$

$$F_t = 0 \text{ daN}$$

$$\begin{aligned} F_v &= P_{CD} + P_{isol} = \\ &= 246 + 35 = 281 \text{ daN} \end{aligned} \quad (3.67)$$

$$F_{t0} = 0,3 \times F_{v_CG} = 0,3 \times 167 = 50 \text{ daN} \quad (3.68)$$

$$F_{t0} = 0 \text{ daN}$$

$$F_{v0} = P_{CG} = 119 \text{ daN} \quad (3.69)$$

Tendo em conta os esforços totais obtidos e atendendo aos esforços nominais de cada apoio apresentados na tabela 3.7, o apoio nº 23 será do tipo FB30ADN. O apoio será de 27,6 m de altura útil de modo a respeitar as distâncias mínimas regulamentares.

3.5.5.3. Apoio de Ângulo

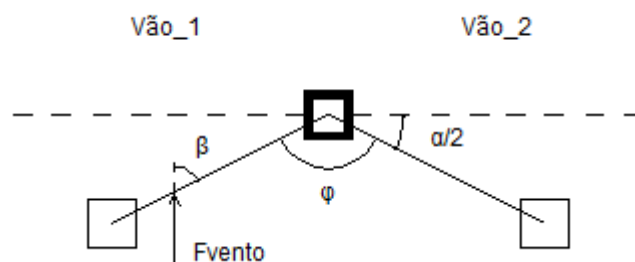


Figura 3.6 - Apoio de Ângulo

Os cálculos são relativos aos apoio nº25 da linha.

$$\begin{cases} \varphi = 176,81 \text{ grados} = 2,78 \text{ rad} \\ \alpha = 23,19 \text{ grados} = 0,36 \text{ rad} \\ \beta = \frac{\varphi}{2} = \frac{176,81}{2} = 88,40 \text{ grados} = 1,39 \text{ rad} \end{cases}$$

Eixo Longitudinal:

$$\begin{aligned} T_{CD_l} &= [t_{\max_2} - t_{\max_1}] \cdot \sigma \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \\ &= |8 - 8| \times 326,6 \times \cos(0,18) = 0 \text{ daN} \end{aligned} \quad (3.70)$$

$$\begin{aligned} T_{CG_l} &= [t_{\max_2} - t_{\max_1}] \cdot \sigma \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \\ &= |13 - 13| \times 127,5 \times \cos(0,18) = 0 \text{ daN} \end{aligned} \quad (3.71)$$

Eixo Transversal:

$$\begin{aligned} F_{v_CD} &= G_c \cdot G_q \cdot C_c \cdot q \cdot d \cdot \frac{L_1 + L_2}{2} \times \text{sen}(\beta)^2 = \\ &= 0,6 \times 1 \times 1 \times 85,5 \times 0,02345 \times \frac{198 + 221}{2} \times \text{sen}(1,39)^2 = 244 \text{ daN} \end{aligned} \quad (3.72)$$

$$F_{v_CG} = G_c \cdot G_q \cdot C_c \cdot q \cdot d \cdot \frac{L_1 + L_2}{2} \times \text{sen}(\beta)^2 = \quad (3.73)$$

$$= 0,6 \times 1 \times 1,1 \times 85,5 \times 0,01463 \times \frac{198 + 221}{2} \text{sen}(1,39)^2 = 167 \text{ daN}$$

$$T_{CD_t} = (t_{\max_1} + t_{\max_2}) \times \sigma \times \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \quad (3.74)$$

$$= (8 + 8) \times 326,6 \times \sin(0,18) = 947 \text{ daN}$$

$$T_{CG_t} = (t_{\max_1} + t_{\max_2}) \times \sigma \times \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \quad (3.75)$$

$$= (13 + 13) \times 127,5 \times \sin(0,18) = 600 \text{ daN}$$

$$F_{v_Isol} = 15 \text{ daN}$$

Eixo Vertical:

$$P_{CD} = \omega \times \frac{L_1 + L_2}{2} = 1,219 \times \frac{198 + 221}{2} = 255 \text{ daN} \quad (3.76)$$

$$P_{CG} = \omega \times \frac{L_1 + L_2}{2} = 0,589 \times \frac{198 + 221}{2} = 123 \text{ daN} \quad (3.77)$$

$$P_{Isol} = 35 \text{ daN}$$

Hipótese 1 (caso de carga 1a):

$$F_l = T_{CD_l} = 0 \text{ daN} \quad (3.78)$$

$$\begin{aligned} F_t &= T_{CD_t} + F_{v_CD} + 2 \times F_{v_isol} = \\ &= 947 + 244 + 2 \times 15 = 1220 \text{ daN} \end{aligned} \quad (3.79)$$

$$\begin{aligned} F_v &= P_{CD} + 2 \times P_{Isol} = \\ &= 255 + 2 \times 35 = 325 \text{ daN} \end{aligned} \quad (3.80)$$

$$F_{l0} = T_{CG_l} = 0 \text{ daN} \quad (3.81)$$

$$\begin{aligned} F_{t0} &= T_{CG_t} + F_{v_CG} = \\ &= 600 + 167 = 767 \text{ daN} \end{aligned} \quad (3.82)$$

$$F_{v0} = P_{CG} = 123 \text{ daN} \quad (3.83)$$

Hipótese 2 (caso de carga 5b):

$$F_l = 0,3 \times F_{v_CD} = 0,3 \times 244 = 73 \text{ daN} \quad (3.84)$$

$$F_t = 0 \text{ daN}$$

$$\begin{aligned} F_v &= P_{CD} + 2 \times P_{Isol} = \\ &= 255 + 2 \times 35 = 325 \text{ daN} \end{aligned} \quad (3.85)$$

$$F_{l0} = 0,3 \times F_{v_CG} = 0,3 \times 167 = 50 \text{ daN} \quad (3.86)$$

$$F_{t0} = 0 \text{ daN}$$

$$F_{v0} = P_{CG} = 123 \text{ daN} \quad (3.87)$$

Tendo em conta os esforços totais obtidos e atendendo aos esforços nominais de cada apoio apresentados na tabela 3.7, o apoio nº 25 será do tipo FB95ADN. O apoio será de 27,6 m de altura útil de modo a respeitar as distâncias mínimas regulamentares.

No anexo D apresenta-se a tabela de cálculo dos esforços nos restantes apoios.

3.5.6. Desvio Transversal das Cadeias de Isoladores

As cadeias de isoladores em suspensão utilizadas na linha têm o comprimento de 1,2 m. Para evitar a aproximação excessiva dos condutores ao apoio por acção do vento, é necessário garantir que as cadeias quando oscilam não ultrapassem um ângulo máximo de desvio transversal de 60 graus.

Seguidamente mostra-se o cálculo do desvio transversal da cadeia de isoladores do apoio nº14.

$$i = \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{P_v + \frac{Q_v}{2}}{P + \frac{Q}{2}} \right] [\text{grados}] \quad (3.88)$$

sendo:

- P_v - Força do vento nos cabos condutores em daN;
- Q_v - Força do vento na cadeia de isoladores em daN;
- P - Peso dos condutores sobre o apoio daN;
- Q - Peso da cadeia de isoladores daN;

$$\text{Tem-se que neste apoio: } \begin{cases} P_v = 319 \text{ daN} \\ Q_v = 15 \text{ daN} \\ Q = 35 \text{ daN} \end{cases}$$

Uma vez que os vãos adjacentes são desnivelados é necessário calcular o peso real P dos condutores sobre o apoio. Sendo a distância vertical Z de 2,1 m neste apoio:

$$P = \omega \times \frac{L_1 + L_2}{2} - T \left(\frac{Z}{L_1} + \frac{Z}{L_2} \right) = \quad (3.89)$$

$$= 1,219 \times \frac{269 + 262}{2} - 1494 \times \left(\frac{2,1}{269} + \frac{2,1}{262} \right) = 300 \text{ daN}$$

Assim,

$$i = \text{tg}^{-1} \left[\frac{319 + \frac{15}{2}}{300 + \frac{35}{2}} \right] = 0,8 \text{ rad} = 50,9 \text{ grados}$$

Verifica-se que o ângulo não ultrapassa o máximo considerado.

3.5.7. Distâncias entre Condutores

A tabela 3.8 que consta na EN50341-3-17 mostra as distâncias eléctricas D_{el} e D_{pp} para as tensões mais elevadas de 72,5 kV e 170 kV em função da tensão suportável ao choque atmosférico da cadeia de isoladores, do factor de intervalo K_g e do factor de altitude K_a .

Tabela 3.8 - Distâncias eléctricas Del e Dpp

Us [kV]	Tensão suportável ao choque atmosférico $U_{90\%_{ff_is}}$ [kV]	Del [m]			Dpp [m]	Ka
		Ao braço ou estrutura $K_g=1,45$	Dentro da janela $K_g=1,26$	A obstáculos $K_g=1,3$	Entre condutores $K_g=1,6$	Altitude até 1000 m
72,5	325	0,61	0,64	0,63	0,71	0,938
	400	0,75	0,79	0,78	0,87	0,938
170	550	1,01	1,06	1,04	1,17	0,959
	650	1,19	1,25	1,23	1,38	0,959
	750	1,36	1,43	1,41	1,58	0,970

Tendo em conta a tensão da linha e os isoladores utilizados (ver tabela 3.2), que apresentam uma tensão suportável ao choque atmosférico de 440 kV as distâncias a considerar serão as mostradas na tabela correspondentes a $U_{90\%_{ff_is}} = 400$ kV. A razão pela qual se apresentam os valores correspondentes à tensão mais elevada de 170 kV tem que ver com a existência de cruzamentos da linha projectada com linhas de 150 kV. Nesses casos a distância eléctrica a considerar são as correspondentes à linha de maior tensão e de acordo com a tensão suportável ao choque atmosférico dos isoladores utilizados nesta.

Apresenta-se de seguida o cálculo da distância entre condutores para o vão compreendido entre o apoio 8 e o apoio 9.

Sabendo que a flecha máxima f para o cantão de que este vão faz parte é de 9,6 m, o comprimento da cadeia de isoladores S_L é de 1,2 m e o coeficiente de material k do alumínio-aço é 0,6 tem-se:

$$D = k \cdot \sqrt{f + S_L} + D_{pp} \quad (3.90)$$

$$D = 0,6 \times \sqrt{9,6 + 1,2} + 0,87 = 2,85 \text{ m}$$

Tratando-se de uma zona sem formação de gelo esta distância pode ser reduzida para:

$$D_{\min} = \frac{2}{3} \cdot D = 1,9 \text{ m} \quad (3.91)$$

Atentando na figura 3.1 verifica-se que o apoio FB30ADN apresenta distâncias entre os planos horizontais definidos pelos pontos de fixação dos condutores de 2,25 m sendo que os outros apoios utilizados apresentam distâncias superiores, logo está garantida a distância mínima.

No anexo C apresentam-se os valores do peso real dos condutores, os desvios transversais obtidos para os apoios com cadeias em suspensão, assim como as distância mínimas entre condutores em cada apoio.

3.5.8. Cruzamentos com Linhas de Telecomunicações

A linha cruzará com linhas de telecomunicações entre os apoios 3-4; 13-14 e 23-24. A distância mínima de $D_{pp} + 1m$ (mínimo 2m) entre o condutor inferior da linha de alta tensão e o superior dos traçados de telecomunicações é assegurada.

3.5.9. Cruzamentos com Linhas Eléctricas de Baixa Tensão

A linha cruzará com linhas de baixa tensão entre os apoios 4-5 e 23-24. A distância mínima $D_{pp} + 1m$ (mínimo 2m) entre o condutor inferior da linha de alta tensão e o superior da linha de baixa tensão é assegurada.

3.5.10. Cruzamentos com Linhas Eléctricas Média Tensão

A linha cruzará com linhas de média tensão entre os apoios 6-7; 7-8 e 27-28. A distância mínima $D_{pp} + 1m$ (mínimo 2m) entre o condutor inferior da linha de alta tensão e o superior da linha de média tensão é assegurada.

3.5.11. Cruzamentos com Linhas Eléctricas Alta Tensão

A linha cruzará com linhas de alta tensão (150kV) entre os apoios 4-5 e 6-7. A distância mínima $D_{pp} + 1m$ (mínimo 2m) entre o condutor inferior da linha de 150 kV e o superior da linha de 60 kV é assegurada.

3.5.12. Cruzamentos com Estradas e Caminhos de Ferro

A linha cruzará com a estrada nacional EN.308 entre os apoios 7-8 e com caminhos de ferro nomeadamente a linha do Minho entre os apoios 3-4. A distância mínima de $D_{el} + 7m$ entre os apoios e a estrada nacional e caminho de ferro estão asseguradas.

Capítulo 4

Execução e Análise do Projecto

4.1. Objectivo

Pretende-se aqui, fazer uma descrição sucinta da sequência de acções que levou a obtenção do projecto da linha aérea que liga a subestação de Vila-Fria à subestação da Portucel realizado no estágio, assim como, as dificuldades encontradas e procedimentos para a resolução de desafios que foram surgindo.

4.2. Cabo Condutor e Cabo de Guarda

Os cabos utilizados e respectivas secções, foram estabelecidas de acordo com a prática comum da EDP neste tipo de projecto e de acordo com o departamento de Planeamento da Gestão da Rede que é quem estabelece a tensão de transporte. As tensões mecânicas máximas a que seriam sujeitos, foram estabelecidas igualmente de acordo com a experiência da EDP em projectos semelhantes.

4.3. Perfil Longitudinal da Linha

Tendo o trajecto da linha já definido, isto é, o ponto inicial e final, assim como os pontos onde a linha fará ângulo, visível na planta topográfica apresentada no anexo F partiu-se para análise do perfil longitudinal da linha. Assim, foi possível fazer uma observação preliminar dos elementos topográficos que iriam ter maior influencia no traçado final, como os tipos de terrenos atravessados, cruzamentos com outras linhas de energia ou telecomunicações, estradas, caminhos de ferro, grandes declives, etc.

4.4. Coeficientes de Sobrecarga

Tendo em conta a caracterização das zonas atravessadas pela linha, foram consideradas as acções dos agentes sobre os cabos nos diferentes estados atmosféricos e calculados os coeficientes de sobrecarga.

4.5. Vãos de Cálculo

Por observação do perfil longitudinal do terreno, fez-se uma análise intuitiva sobre o tamanho dos vãos médios previsíveis ao longo da linha, e estabelecidos os respectivos vãos de cálculo. Foi, então construída uma folha em *Excel* com todos os cálculos necessários à obtenção, para cada vão de cálculo, da tensão de montagem, parâmetro da catenária e flecha dos condutores e cabo de guarda nas condições de temperatura máxima (75°C). Recorrendo ao software da EDP CLINHAS/DM usado para os cálculos de linhas foi executado o programa para os vãos em questão e nas mesmas condições, obtendo-se resultados iguais. Ficaram, assim, confirmados os cálculos, e estando a folha organizada de uma forma automática seria facilmente, daqui para a frente, realizar os cálculos, sem receio de estar a cometer erros, para diferentes valores de vãos e diferentes condições de temperatura, vento, etc.

Partindo dos vãos de cálculo, e parâmetros associados, foi possível traçar as curvas no perfil longitudinal e assim encontrar uma posição provisória para os apoios sem ainda ter em atenção a altura dos mesmos. Nesta fase do processo, prestou-se especial atenção a colocá-los junto a divisórias de terrenos ou caminhos, de modo a facilitar a sua implantação e minimizar o incómodo para as pessoas.

Deve-se referir que neste estágio, o desenho da linha no perfil longitudinal foi realizado inteiramente no software *autocad*, isto é, não foi utilizado o método do transparente, que é prática comum neste departamento e consequentemente não se considera a aproximação parabólica no traçado dos vãos. O software permite traçar directamente as curvas catenárias através do comando *cat* e especificando o parâmetro.

4.6. Traçado da Linha

Nesta altura, em que já foi possível fazer um traçado provisório da linha no perfil longitudinal, foi necessário ter em atenção outros factores que vão levar à escolha das alturas dos apoios, muitas vezes à mudança de local de implantação dos mesmos, assim como à definição de quais serão em suspensão e amarração. A distância mínima regulamentar dos condutores a árvores, habitações, caminhos, cursos de água, outras linhas de transporte de energia ou de telecomunicações e obstáculos diversos é um factor importante neste processo de redesenho da linha. A decisão sobre as amarrações e suspensões, depende do equilíbrio dos vãos e da possibilidade de existência de apoios enforcados, não esquecendo que os apoios de ângulo e fim de linha são obrigatoriamente em amarração. De acordo com o perfil longitudinal, e os obstáculos diversos foram definidas as alturas dos apoios, tendo em conta também como regra de boa prática não diversificar demais as alturas, mas sim normalizar o máximo possível. Quanto à definição do tipo de fixação dos condutores nos apoios e

consequente definição dos cantões foi nesta fase estabelecida uma solução provisória tendo em conta que:

- Exceptuando apoios fim de linha, de ângulo e apoios que no caso de serem de suspensão ficariam enforcados, devem ser usadas cadeias de suspensão no máximo de apoios possível;
- Deve existir um mínimo de um apoio de amarração a cada 15 vãos, isto é, não deverá haver cantões constituídos por mais de 15 vãos.
- Os vãos que constituem cada cantão não tenham valor inferior ou superior a 25% do vão equivalente fictício do cantão.

Esta fase foi algo morosa, uma vez que foram realizadas constantes alterações, seja a retirada de um poste que se verificou não ser necessário, como alteração do local de outros ou mudança do tipo de fixação dos condutores. Isto é, muitas vezes uma qualquer alteração num poste implicou a mudança noutros obrigando ao redesenho das curvas e daí a morosidade deste processo.

4.6.1. Exemplo

Será dado como exemplo de uma situação de difícil traçado que corresponde a uma zona da linha de vários cruzamentos com outras linhas de energia. A figura 4.1 retirada do desenho em CAD ilustra essa situação:

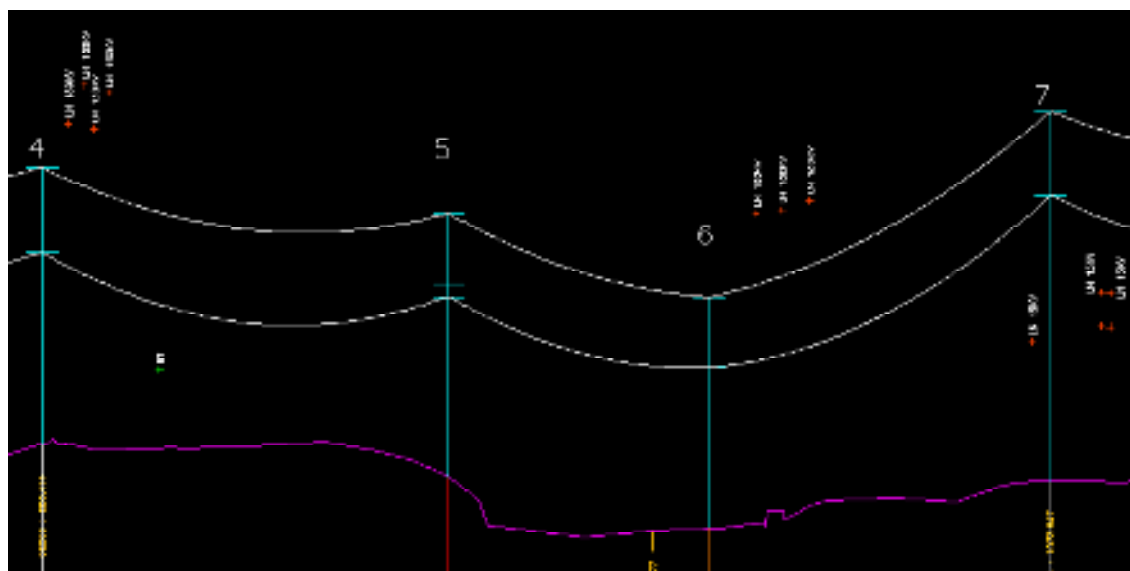


Figura 4.1 - Troço da linha com cruzamentos de outras linhas

Na figura 4.1 a curva superior corresponde ao cabo de guarda, e a inferior corresponde aos condutores inferiores da linha. É, assim, visível um troço da linha (do apoio nº4 ao nº7) onde se identificam duas linhas a cruzar o vão 4-5, sendo uma de 150 kV e outra de baixa tensão, duas linhas a cruzar o vão 6-7, sendo uma de 150 kV e outra de 15 kV e ainda uma

linha de 15 kV a cruzar o vão 7-8. Como se vê a margem de manobra nesta situação não é muito grande e obrigou à utilização de alturas bastantes distintas dos postes. O poste nº4 encontra-se no limite da distância mínima admissível à linha de 150 kV e não é possível substituí-lo por um apoio mais baixo, pois então não respeitaria a distância mínima à linha de BT. Para o poste nº 6 foi obrigatório usar uma poste bastante mais baixo em relação aos outros, pois seria a única maneira de garantir que as linhas se cruzassem adequadamente (a de tensão mais alta cruza superiormente à de tensão inferior). Esta situação originou que este apoio tivesse obrigatoriamente que ser de amarração, uma vez que caso contrário ocorreria o enforcamento da cadeia de isoladores. A figura 4.2 mostra o traçado da curva de flecha mínima entre os apoios nº5 e nº7 provando que haveria enforcamento do apoio nº6 (cota do ponto A superior à cota do ponto B).

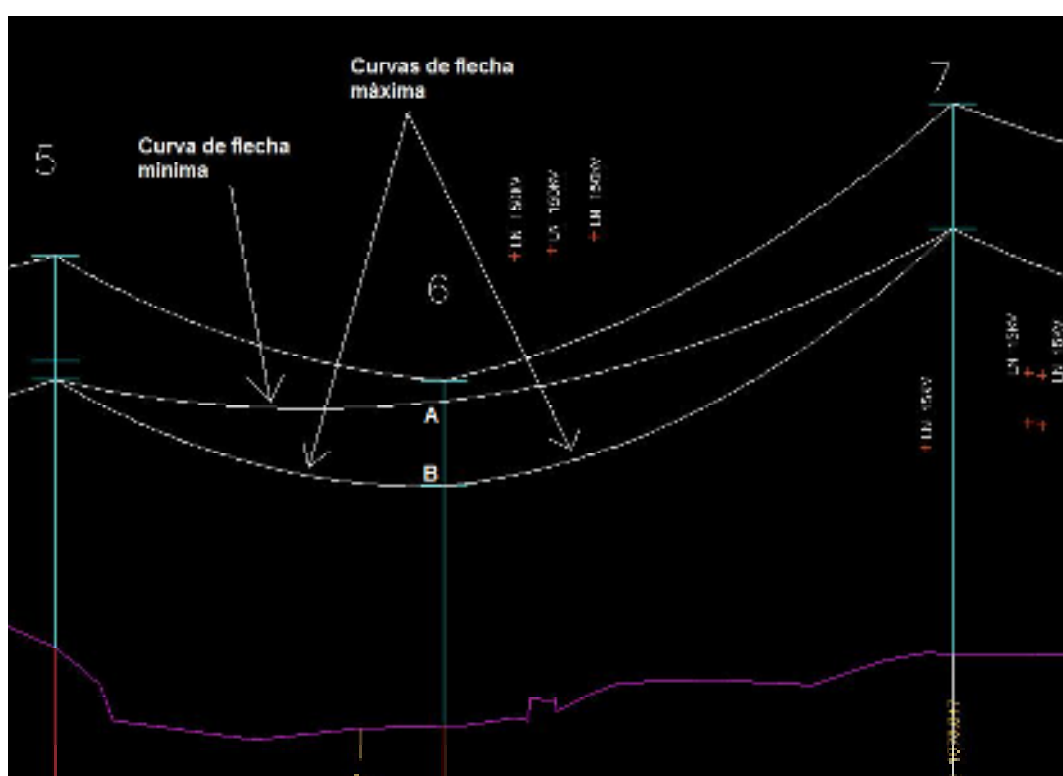


Figura 4.2 - Apoio Enforcado

4.7. Cantões

Estando finalmente o traçado da linha definido, foram calculados para cada cantão caracterizado por um vão equivalente fictício, novas tensões de montagem, parâmetros e flechas, para os condutores e cabos de guarda e redesenhadas as curvas no perfil longitudinal. Para efeitos de distribuição dos apoios e verificação das distâncias mínimas admissíveis os cálculos são realizados considerando o estado de montagem como estado de temperatura máxima ou flecha máxima. No entanto, foi necessário calcular para cada cantão as tensões, parâmetros e flechas para diferentes temperaturas possíveis da região de implantação da linha, uma vez que na elaboração do projecto não se pode prever a temperatura que se irá

verificar no momento de regulação dos condutores.

4.8. Verificação do Desvio Transversal das Cadeias de Isoladores

Numa fase seguinte, foi realizada a verificação do desvio transversal das cadeias de isoladores suspensas nos respectivos apoios recorrendo igualmente a uma folha de cálculo em *Excel* para efectuar o seu cálculo. Ora em alguns apoios, o desvio excedeu o limite admissível de 60 graus. De seguida apresenta-se dois exemplos em que tal acontece e a solução adoptada.

4.8.1. Exemplo 1

A figura 4.3 mostra um troço da linha respeitante a dois vãos consideravelmente desnivelados.

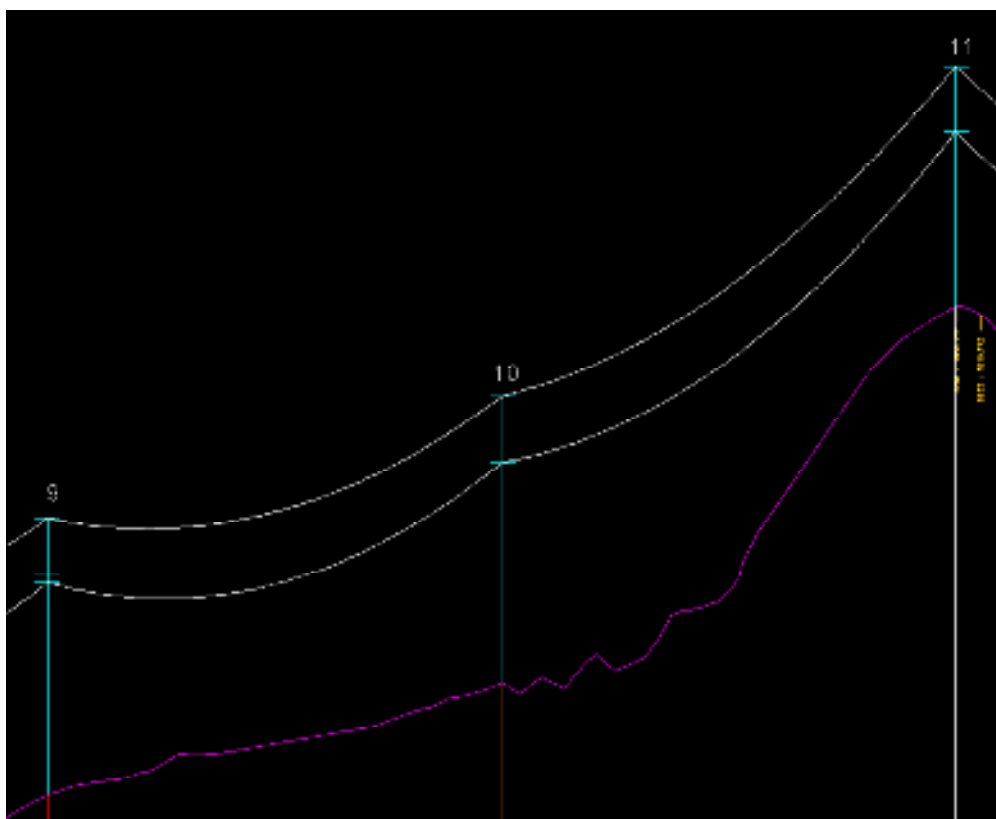


Figura 4.3 - Troço da linha com desnível acentuado

Esta geometria, afecta a força exercida pelo peso desse vão nos apoios, neste caso diminuindo-a no apoio nº 10 em relação ao caso de os vãos serem em patamar. Assim, a acção do vento ganha maior influência nos condutores devido a este fenómeno a que [Checa] refere

como “perda de peso”, elevando-os e consequentemente desviando, mais do que permitido, a cadeia de isoladores onde estão suspensos. A solução poderia passar por utilizar um apoio de menor altura no lugar do apoio nº11 e assim aumentar a influência do peso do vão no apoio nº 10. Tal não é possível, uma vez que nesse caso, a distância dos condutores ao solo, viria reduzida ao ponto de não respeitar a distância mínima permitida. A solução teve, obrigatoriamente, que passar pela utilização de cadeias de amarração no apoio nº10.

4.8.2. Exemplo 2

A figura 4.4 apresenta outra situação, em que o desvio transversal da cadeia de isoladores ultrapassa o ângulo máximo admissível, neste caso no apoio nº 16.

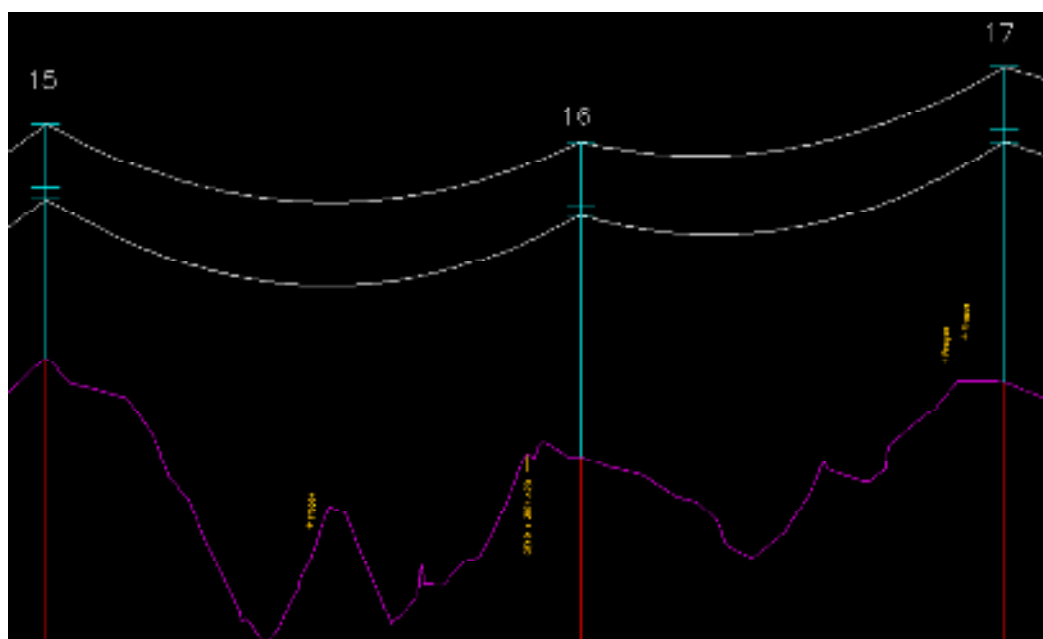


Figura 4.4 - Troço da linha com desnível pouco acentuado

Nesta situação os três apoios têm a mesma altura (27,6 metros de altura útil) e verificou-se que a substituição do apoio nº15 por um apoio mais baixo (18,6 m) garantia que o desvio da cadeia de isoladores se mantém dentro do limite, sem deixar de ser verificar igualmente as distâncias mínimas verticais ao solo ou obstáculos diversos.

4.9. Escolha dos Apoios

A escolha dos apoios a utilizar teve por base o catálogo de apoios da série FB da empresa Metalgalva, estando estes dimensionados de acordo com a norma adoptada para realização deste projecto. Para cada apoio, o catálogo apresenta os esforços nominais suportados em cada ponto de fixação dos condutores e cabo de guarda. Assim sendo, neste projecto optou-se pelo cálculo dos esforços apenas nos pontos de fixação dos condutores inferiores e cabo de guarda. Isto é, concluiu-se não ser necessário verificar as forças nos pontos de fixação do

condutores médios e superiores uma vez que se sabe que serão ligeiramente maiores devido a terem que suportar forças de vento marginalmente maiores e que os esforços nominais suportados nesses pontos são igualmente superiores na mesma proporção.

O resultado, levou a utilização de apenas três tipos de apoios diferentes, indo de encontro à boa prática de máxima normalização possível. De uma maneira geral, foram utilizados apoios para desempenhar a função para que são indicados (alinhamento, ângulo, fim de linha), contudo existiram casos em que tal não aconteceu devido aos esforços calculados ultrapassarem os nominais.

Para os casos de alinhamento, ângulo e fim de linha, foram utilizados na maioria dos casos os apoios indicados para o efeito, isto é, do tipo FB30ADN, FB95ADN e FB165ADN respectivamente. Destacam-se, no entanto, algumas situações em que tal não acontece tendo-se chegado às conclusões apresentadas de seguida.

4.9.1. Apoios Fim de Linha

Os apoios fim de linha serão do tipo FB165ADN, não tendo sido ultrapassados os seus esforços nominais.

4.9.2. Apoios de Ângulo

Verificou-se que nos casos em que o ângulo era bastante pronunciado, foi necessário recorrer a apoios do tipo FB165ADN pois eram excedidos os esforços transversais nominais dos FB95ADN;

4.9.3. Apoios de Alinhamento

Obteve-se situações em que os esforços longitudinais nominais dos apoios do tipo FB30ADN eram marginalmente ultrapassados sendo que:

- No caso de serem de suspensão, foram mantidos os FB30ADN, tendo em conta a relaxação da carga longitudinal resultante da oscilação das cadeias de isoladores;
- No caso de serem de amarração, foi necessário recorrer a apoios do tipo FB95ADN.

4.10. Distâncias entre Condutores

Escolhidos os apoios, verificou-se finalmente as distâncias entre condutores, não tendo havido qualquer situação que obrigasse a alterar o tipo de apoio ou altura.

4.11. Conclusão do Projecto

A fase final consistiu no aperfeiçoamento do desenho da linha no perfil longitudinal em CAD, incluindo-se todos os elementos relevantes e de acordo com a prática comum neste tipo de projecto. Aqui destaca-se a obrigatoriedade de apresentar assinalada no desenho a

distância de apoios e de condutores da linha a linhas de telecomunicação em situações de cruzamento. E ainda, a obrigatoriedade de apresentar, neste caso, isoladamente, o desenho de pormenor de vãos que cruzam caminhos de ferro e as distâncias relevantes, para envio à entidade responsável por estes.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1. Conclusões Gerais

Antes de mais, a realização deste projecto em ambiente de estágio decorreu como planeado e foi bastante enriquecedora, permitindo-me consolidar e aplicar conhecimentos já adquiridos e desenvolver novas competências numa área que para mim tem grande interesse. Considero ambas as fases do projecto de igual importância, tanto o estudo inicial das bases teóricas e análise da norma europeia como a elaboração de um projecto real de uma linha aérea.

Verificou-se que o projecto de uma linha aérea é um problema multi-critério, na medida em que envolve aspectos mecânicos, eléctricos, económicos e ambientais na obtenção de uma solução final. Além disso, exige-se que exerça a sua função com elevada fiabilidade e segurança para as pessoas.

Relativamente aos aspectos normativos que regulam o projecto de linhas, estes traduzem de alguma forma, a longa experiência adquirida no projecto de linhas, numa perspectiva de optimização, tendo em conta os requisitos e restrições impostos pelos critérios já referidos.

Ao longo de todo o estudo do cálculo mecânico e eléctrico e da sua aplicação no projecto em si foram tiradas algumas conclusões:

- Verificou-se a grande importância da topografia no estabelecimento da linha, uma vez que influencia a sua geometria, trajecto e altura dos postes de modo respeitar-se as distâncias mínimas regulamentares, seja ao solo ou a objectos vizinhos ;
- A geometria adquirida pela linha, isto é, existência de vãos desnivelados, tem influência em vários aspectos como nos esforços exercidos pelos condutores sobre os apoios e consequentemente nos desvios transversais das cadeias de isoladores em suspensão;
- O cálculo das tensões, parâmetros e flechas, para efeito de distribuição dos apoios e garantia de distâncias regulamentares (estado de montagem sem vento e a temperatura 75°C) não é suficiente, sendo necessário o mesmo cálculo para várias temperaturas previstas para a

região de implantação da linha, de modo a aplicar a tracção adequada no acto de montagem;

- A consideração de tensões máxima inferiores, no cálculo das tensões em vãos que partem de apoios de ângulos muito pronunciados e/ou vãos que partem de apoios fim de linha permite que a carga a que os apoios serão sujeito venha reduzida, melhorando a hipótese de haver postes que suportem a carga.

- Nem sempre, os apoios indicados para determinada função (alinhamento, ângulo, etc) são efectivamente utilizados nessa função, por alguma necessidade especial, sendo isso possível desde que seja em condições economicamente aceitáveis.

A elaboração do projecto exige ao projectista empenho e concentração sendo que, muitas vezes efectuando pequenas alterações em determinado aspecto, ou corrigindo erros encontrados, implica a verificação de outras situações e possíveis novas alterações, tornando-se um processo moroso. Com certeza a experiência assim como a utilização de ferramentas informáticas de auxílio, atenuarão esse factor.

5.2. Comparação EN50341-1 vs RSLEAT

A realização do projecto conforme a norma EN50341-1 constituiu um desafio, uma vez que não é ainda aplicada pela EDP, e espera-se que represente algum contributo para futuros projectos. A norma não constitui, de maneira nenhuma, um desacordo com o RSLEAT, sendo este inclusive uma das referências consideradas, nos aspectos normativos referentes a Portugal. A norma é um documento mais abrangente incluindo, além de todos os requisitos para o projecto de linhas, algumas das próprias bases de dimensionamento como é o caso do dimensionamento de apoios ou rede de terras e metodologias de cálculo como por exemplo das tensões de toque.

Assim, importa destacar algumas das diferenças mais relevantes e algumas alterações que a norma introduz relativamente ao RSLEAT:

EN 50341-1 e EN 50341-3-17		RSLEAT	
Temperatura final máxima admissível no curto circuito para os condutores de fase igual a 160°C mas recomenda máximo de 125°C.	Cláusula 5.2.2/PT.4	Artigo 20º	De modo a que o aquecimento resultante das correntes máximas admissíveis não seja exagerado para os materiais que constituem os condutores mas não especifica.
Temperatura final máxima admissível no curto-circuito para cabos de guarda em alumínio-aço é de 200°C e para cabos em aço é de 400°C	Cláusula 5.2.2/PT.3	Artigo 20º	De modo a que o aquecimento resultante das correntes máximas admissíveis não seja exagerado para os materiais que constituem os condutores mas não especifica.

EN 50341-1 e EN 50341-3-17		RSLEAT	
Cabo de guarda estabelecido no topo do apoio com ângulo de protecção externa inferior a 20°	Cláusula 5.3.3.5/PT1	Artigo 42°	Cabo de guarda estabelecido no topo do apoio
As cadeias de isoladores devem ter uma carga mínima de ruptura mecânica ou electromecânica pelo menos igual à tracção de ruptura dos condutores	Cláusula 10.7/PT.1	Artigo 48°	As cadeias de isoladores deverão apresentar forças de rotura electromecânica mínima não inferiores a 2,5 vezes a máxima solicitação mecânica a que possam ser sujeitos pelos condutores.
A secção mínima dos condutores de terra e de ligação em cobre será de 16 mm ² em instalação aérea ou de 35 mm ² em instalação enterrada. Nos apoios de betão armado, a armadura longitudinal pode fazer parte do circuito de terra, se a secção for electricamente adequada	Cláusula 6.2.2.2	Artigos 153° e 154°	Igual á norma europeia
Estabelece os limites para as tensões de toque de acordo com a localização	Cláusula 6.2.4.2	-	Não se refere às tensões de toque
Tracção máxima admissível nos condutores não deve exceder 40% da tracção de ruptura dos mesmos	Cláusula 9.2.4/PT.1	Artigo 24°	Tracção máxima admissível nos condutores não deve exceder o quociente das suas tracções de ruptura por 2,5

EN 50341-1 e EN 50341-3-17		RSLEAT			
Com o objectivo de quantificar as acções do vento para linhas aéreas o território Português é considerado dividido em duas zonas: Zona A e Zona B. Pressão do vento a uma dada altura h dada por: Zona A: $q_h = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot 30^2 \cdot (h/10)^{0,4}$ Zona B: $q_h = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot 33^2 \cdot (h/10)^{0,4}$ Vento reduzido corresponde a considerar 40% de q_h	Cláusulas 4.2.2 , 4.2.2.2/PT.1 e 4.2.7/PT.1	Artigo 13º	Pressão dinâmica do vento em função da altura h dividida em 3 escalões:		
			Altura acima do solo [m]	Pressão dinâmica q [Pa]	
				Vento máximo	Vento reduzido
			h > 30 30<h<50 h > 50	750	300
				900	360
	1050	420			
Consideração das distâncias de isolamento Del e Dpp e , de acordo com estas, as distâncias regulamentares são as dadas pela tabela 2.8	Ver tabela 2.8	Artigos 27º , 28º , 29º , 30º , 33º , 91º , 101º , 109º , 110º e 123º	Ver anexo E		
A distância de segurança entre condutores de fase de um circuito ou entre condutores de fase de diferentes circuitos no mesmo apoio é dada por: $D = k \cdot (f + S_L) + D_{pp} \quad [m]$ k - coeficiente de material 0,6 para AL-Aço f - flecha do condutor à temperatura máxima de projecto(75ºC) sem vento SL - comprimento da cadeia de isoladores suspensa Dpp - distância de isolamento	5.4.3/PT.2	Artigo 31º	$D = k\sqrt{f + d} + \frac{U}{150} \quad [m]$ k - coeficiente de material 0,6 para AL-Aço f - flecha máxima do condutor d - comprimento da cadeia de isoladores suspensa U - tensão nominal da linha em kV		

Estes quadros apresentam algumas diferenças entre os documentos normativos, sendo as que me parecem mais relevantes. Importa referir que as descrições apresentadas não representam transcrições exactas da norma nem do RSLEAT.

Finalmente, uma outra grande alteração com a introdução da norma, foi a necessidade de utilizar no projecto, apoios dimensionados de acordo com esta. Sendo assim, foram utilizados os apoios reticulados da série FB da empresa Metalogalva. Em todos os apoios desta série, não existe uma gama de armações possíveis de aplicar, isto é, os apoios vêm com a geometria dos braços já definidas e inalteráveis.

No que diz respeito às cargas suportáveis, indicam-se para cada apoio e, discriminadamente, em cada consola e haste de cabo de guarda e para cada hipótese de carga:

- A carga horizontal transversal;
- A carga horizontal longitudinal;
- A carga vertical.

Exige-se, então, o cálculo dos esforços em cada um dos pontos de fixação dos condutores de modo a verificar a estabilidade do apoio comparando com os esforços nominais.

Comparando, assim, com os apoios do tipo P ainda usualmente usados no projecto de linhas aéreas, estes possibilitam a escolha do tipo de armação, são dados no seu catálogo os esforços nominais calculados à cabeça do apoio e são caracterizados pela carga horizontal e vertical que suportam.

Conclui-se então que a introdução dos postes da série FB, por um lado alterou o modo de cálculo dos esforços aplicados, tornando-o mais preciso com o cálculo a ser feito em cada ponto de fixação dos condutores. Por outro lado, reduziu-se o número de tipo de apoios diferentes, note-se que apenas foram usados três tipos de apoios para este projecto, contribuindo para uma maior normalização nestes projectos, algo que é valorizado e considerado de boa prática.

5.3. Trabalhos Futuros

Como trabalho futuro, seria de grande utilidade a elaboração de um Guia Técnico do Projectista adequado à EN50341-1 para aplicação em futuros projectos, condensando de um modo sequencial os passos e requisitos necessários ao projecto de linhas.

Referências

[Almeida] Almeida, Márcio Tadeu de, Paulo Roberto Labegalini, José Ayrton Labegalini e Rubens Dario Fuchs (1992) Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão. 2ª Edição. Editora Edgard Blücher.

[Avril] Avril, Charles (1974). Construction des lignes aériennes a haute tension. 1ª Edição Éditions Eyrolles.

[Checa] Checa, Luis M. (1986). Linhas de Transporte de Energia. 2ª Edição, Edições CETOP, Lisboa.

[EDP] EDP DRE-C11-040/N - Guia Técnico de Terras.

[EN50341-1] EN50341-1 (2001) CENELEC. "Overhead electrical lines exceeding AC 45kV".

[EN50341-3-17] EN50341-3-17 (2001). " Aspectos Normativos Nacionais para Portugal referentes à EN50341-1".

[Fernandes] Fernandes, Ricardo Jorge Freitas Vasco (2006). Projecto Final de Curso. "Guia Técnico do Projectista de Linhas Aéreas de Transporte de Energia".

[Ferreira] Ferreira, José Rui. FEUP (2004). "Linhas de Transmissão - Apontamentos de Sistemas Eléctricos de Energia I" <http://paginas.fe.up.pt/~mam/Linhas-01.pdf>, acedido em Maio de 2009.

[Leite] Leite, Hélder. FEUP (2008). "Apontamentos de RTDI 2008/2009 - Elaboração de Projectos de Linhas Aéreas".

[Metalgalva] Metalgalva (2008). Apoios Metálicos para Linhas Eléctricas de Alta e Média Tensão.

[Rodrigues] Rodrigues, Grace Ascenso Santos e Sandra Sofia Vieira (2007). "Projecto Global de um Sistema Integrado de Distribuição de Energia Eléctrica".

[Távora] Távora, Francisco. ESTG-Leiria "Linhas de Transmissão de Energia Eléctrica".

[Vale] Vale, António Almeida do. FEUP "Linhas Aéreas de Transmissão de Energia".

[Zoppetti] Zoppetti, Gaudencio (1978). Redes Eléctricas de Alta y Baja Tensión. 6ª Edición, Editorial Gustavo Gili, Barcelona.

Cerisol isoladores cerâmicos, S.A, http://www.cerisol.com/line_ins_en.htm, acedido em Maio de 2009.

DGEG. (2008). Direcção Geral de Energia e Geologia. <http://www.dgge.pt/> acedido em Maio de 2009.

EDP (2001), “*Apoios do tipo P - Catálogo de utilização*”.

Neves dos Santos. J.E. FEUP “*Formulário - Cálculo Eléctrico e Mecânico*”.

Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão (1993) Edição DGE.

Silva, José Luís P. Pereira da (2007). FEUP “*Apontamentos de PLIC - Dimensionamento de Apoios e Maciços para Linhas Aéreas*”.

Anexo A - Parâmetro da catenária e flecha do condutor

Apoios	Vãos [m]	Cantão [m]	£ [m]	θ_i [°C]	t [daN/mm ²]	T [daN]	P [m]	f [m]	Estado mais desfavorável
1_2	91	1	91	75	1,800	588	482	2,1	Inverno
2_3	254	2	254	75	4,584	1497	1228	6,6	Primavera
3_4	222	3	222	75	4,390	1434	1176	5,2	Primavera
4_5	197	4	173	75	3,811	1245	1021	3,7	Inverno
5_6	126			75					
6_7	165	5	165	75	3,701	1209	992	3,4	Inverno
7_8	334	6	317	75	4,867	1590	1304	9,6	Primavera
8_9	327			75					
9_10	284			75					
10_11	283	7	283	75	4,729	1544	1267	7,9	Primavera
11_12	163	8	197	75	4,118	1345	1103	4,4	Inverno
12_13	219			75					
13_14	269	9	252	75	4,573	1494	1225	6,5	Primavera
14_15	262			75					
15_16	292			75					
16_17	231			75					
17_18	220			75					
18_19	206			75					
19_20	217	10	233	75	4,461	1457	1195	5,7	Primavera
20_21	246			75					
21_22	250	11	222	75	4,390	1434	1176	5,2	Primavera
22_23	208			75					
23_24	196			75					
24_25	198	12	198	75	4,130	1349	1107	4,4	Inverno
25_26	221	13	231	75	4,449	1453	1192	5,6	Primavera
26_27	211			75					
27_28	255			75					
28_29	205	14	205	75	4,213	1376	1129	4,7	Inverno
29_30	345	15	345	75	4,962	1621	1329	11,2	Primavera
30_31	265	16	261	75	4,622	1509	1238	6,9	Primavera
31_32	257			75					
32_33	20	17	20	75	0,485	159	130	0,4	Inverno

Anexo B - Parâmetro da catenária e flecha do cabo de guarda

Apoios	Vãos [m]	Cantão [m]	ℓ [m]	θ _i [°C]	t [daN/mm ²]	T [daN]	P [m]	f [m]	Estado mais desfavorável
1_2	91	1	91	75	2,877	367	623	1,7	Inverno
2_3	254	2	254	75	6,599	841	1428	5,6	Primavera
3_4	222	3	222	75	6,421	819	1390	4,4	Primavera
4_5	197	4	173	75	5,919	755	1281	2,9	Inverno
5_6	126			75					
6_7	165	5	165	75	5,771	736	1249	2,7	Inverno
7_8	334	6	317	75	6,853	874	1483	8,5	Primavera
8_9	327			75					
9_10	284			75					
10_11	283	7	283	75	6,729	858	1457	6,9	Primavera
11_12	163	8	197	75	6,250	797	1353	3,6	Primavera
12_13	219			75					
13_14	269	9	252	75	6,589	840	1426	5,6	Primavera
14_15	262			75					
15_16	292			75					
16_17	231			75					
17_18	220			75					
18_19	206			75					
19_20	217	10	233	75	6,487	827	1404	4,8	Primavera
20_21	246			75					
21_22	250	11	222	75	6,421	819	1390	4,4	Primavera
22_23	208			75					
23_24	196			75					
24_25	198	12	198	75	6,258	798	1355	3,6	Primavera
25_26	221	13	231	75	6,475	826	1402	4,8	Primavera
26_27	211			75					
27_28	255			75					
28_29	205	14	205	75	6,308	804	1366	3,8	Primavera
29_30	345	15	345	75	6,937	884	1502	9,9	Primavera
30_31	265	16	261	75	6,633	846	1436	5,9	Primavera
31_32	257			75					
32_33	20	17	20	75	0,805	103	174	0,3	Inverno

Anexo C - Peso real dos Condutores P, Desvio Transversal das Cadeias de Suspensão θ e Distância Mínima entre Condutores D

Apoio	Tipo	Fixação	L ₁ [m]	L ₂ [m]	L _{med} [m]	Z [m]	P [daN]	θ [grad]	D [m]
1	ANG+FLI	A	30	91	60,5				1,17
2	ANG	A	91	254	172,5				1,60
3	ANG	A	254	222	238				1,60
4	ANG	A	222	197	209,5				1,50
5	ALI	S	197	126	161,5	2,5	237	42,6	1,46
6	ALI	A	126	165	145,5			0,0	1,32
7	ANG	A	165	334	249,5			0,0	1,94
8	ALI	S	334	327	330,5	0	403	48,8	1,90
9	ALI	S	327	284	305,5	2,3	348	50,8	1,90
10	ALI	A	284	283	283,5			0,0	1,82
11	ANG	A	283	163	223			0,0	1,70
12	ALI	S	163	219	191	3,4	184	55,2	1,53
13	ALI	A	219	269	244			0,0	1,60
14	ALI	S	269	262	265,5	2,1	300	50,9	1,69
15	ALI	S	262	292	277	9,4	439	40,8	1,69
16	ALI	S	292	231	261,5	5,4	256	55,2	1,69
17	ALI	S	231	220	225,5	2,6	309	45,0	1,69
18	ALI	S	220	206	213	15,3	474	31,3	1,69
19	ALI	A	206	217	211,5			0,0	1,53
20	ALI	S	217	246	231,5	13,4	452	34,9	1,63
21	ALI	A	246	250	248			0,0	1,49
22	ALI	S	250	208	229	6,5	197	58,7	1,59
23	ALI	S	208	196	202	0	246	48,4	1,59
24	ANG	A	196	198	197			0,0	1,42
25	ANG	A	198	221	209,5			0,0	1,53
26	ALI	S	221	211	216	2	236	51,6	1,62
27	ALI	S	211	255	233	3,8	332	43,9	1,68
28	ANG	A	255	205	230			0,0	1,53
29	ANG	A	205	345	275			0,0	1,92
30	ANG	A	345	265	305			0,0	1,92
31	ALI	S	265	257	261	0	318	48,6	1,72
32	ANG	A	257	20	138,5			0,0	1,63
33	ANG+FLI	A	20	17	18,5			0,0	0,83

Anexo D - Esforços nos Apoios em daN e escolha do Tipo de Apoio

	Casos de Carga												
	1a (Hipótese 1)						5b (Hipótese 2)						
Apoio	F _{l0}	F _{t0}	F _{v0}	F _l	F _t	F _v	F _{l0}	F _{t0}	F _{v0}	F _l	F _t	F _v	Apoio
1	76	1193	36	98	1567	144	15	0	36	22	0	144	FB165ADN/27
2	428	1197	102	878	3026	280	19	0	102	28	0	280	FB165ADN/27
3	0	631	140	0	1002	360	58	0	140	84	0	360	FB95ADN/27
4	0	1431	123	0	2268	325	44	0	123	64	0	325	FB165ADN/18
5	0	133	95	0	209	232	40	0	95	58	0	232	FB30ADN/18
6	0	120	86	0	205	247	36	0	86	53	0	247	FB30ADN/15
7	0	1204	147	0	1905	374	56	0	147	82	0	374	FB165ADN/27
8	0	273	195	0	413	438	82	0	195	119	0	438	FB30ADN/27
9	0	252	180	0	383	407	76	0	180	110	0	407	FB30ADN/27
10	0	234	167	0	371	416	70	0	167	102	0	416	FB95ADN/27
11	0	550	131	0	876	342	55	0	131	79	0	342	FB95ADN/21
12	0	158	112	0	245	268	47	0	112	69	0	268	FB30ADN/27
13	0	201	144	0	324	367	60	0	144	88	0	367	FB95ADN/27
14	0	219	156	0	334	359	66	0	156	96	0	359	FB30ADN/27
15	0	229	163	0	348	373	69	0	163	100	0	373	FB30ADN/21
16	0	216	154	0	330	354	65	0	154	94	0	354	FB30ADN/27
17	0	186	133	0	286	310	56	0	133	81	0	310	FB30ADN/27
18	0	176	125	0	271	295	53	0	125	77	0	295	FB30ADN/27
19	0	175	125	0	284	328	52	0	125	76	0	328	FB30ADN/27
20	0	191	136	0	293	317	57	0	136	84	0	317	FB30ADN/27
21	0	205	146	0	328	372	61	0	146	90	0	372	FB95ADN/27
22	0	189	135	0	290	314	57	0	135	83	0	314	FB30ADN/27
23	0	167	119	0	258	281	50	0	119	73	0	281	FB30ADN/27
24	0	1087	116	0	1726	310	45	0	116	65	0	310	FB165ADN/27
25	0	768	123	0	1220	325	50	0	123	73	0	325	FB95ADN/27
26	0	178	127	0	275	298	53	0	127	78	0	298	FB30ADN/27
27	0	192	137	0	295	319	58	0	137	84	0	319	FB30ADN/27
28	0	243	135	0	391	350	57	0	135	83	0	350	FB95ADN/27
29	0	690	162	0	1091	405	67	0	162	97	0	405	FB95ADN/27
30	0	1598	180	0	2525	442	62	0	180	91	0	442	FB165ADN/27
31	0	215	154	0	329	353	65	0	154	94	0	353	FB30ADN/27
32	432	1178	82	885	2989	239	16	0	82	23	0	239	FB165ADN/27
33	758	620	11	971	827	93	5	0	11	7	0	93	FB165ADN/27

Anexo E- Distâncias Externas admissíveis segundo o RSLEAT

Definição		Artigo	Expressão	Distância ¹ [m]
Distância dos condutores ao solo		Art. 27º	D = 6,0 + 0,0050U	6,30 (mínimo 6,0m)
Distância dos condutores às árvores		Art. 28º	D = 2,0 + 0,0075U	2,45 (mínimo 2,5m)
Largura da zona de protecção			–	25
Distância dos condutores aos edifícios		Art. 29º	D = 3,0 + 0,0075U	3,45 (mínimo 4m)
Distância dos condutores a obstáculos diversos		Art. 30º	D = 2,0 + 0,0075U	2,45 (mínimo 3m)
Distância entre os cond. e os apoios	Em repouso	Art. 33º	D = 0,10 + 0,0065U	0,49 (mínimo 0,15m)
	Com a acção do vento		D = 0,0065U	0,39 (mínimo 0,15m)
Distância dos condutores às auto-estradas e às estradas nacionais e municipais		Art. 91º	D = 6,3 + 0,01U	6,90 (mínimo 7m)
Distância dos condutores aos carris, nas travessias de caminhos de ferro cuja electrificação esteja prevista		Art. 101º	D = 11,0 + 0,01U + 0,005L ²	11,60+0,005L (mínimo 13,5m)
Distância entre duas linhas		Art. 109º	D = 1,5 + 0,01U ³ + 0,005L ⁴	2,10 + 0,005L (mínimo 2m)
Distância entre os condutores da linha inferior e os apoios da linha superior		Art. 110º	D = 2,0 + 0,0075U	2,45
Distância entre linhas de alta tensão e linhas de telecomunicação		Art. 123º	D = 1,5 + 0,001U	1,56 (mínimo 2m)

¹ Considerando uma tensão nominal de 60kV.

² L, em metros, é a menor das distâncias dos apoios da linha de alta tensão ao eixo da via.

³ U, em kV, é a tensão da linha de maior tensão.

⁴ L, em metros, é a distância entre o ponto de cruzamento e o apoio mais próximo da linha superior.

Anexo F - Linha Vila Fria - Portucel - Planta Topográfica

Anexo G - Linha Vila Fria - Portucel - Perfil Longitudinal e Planta Parcelar