

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



**Otimização de linhas MT em zonas
florestais: estudo técnico-económico
comparativo entre a utilização de postes
em betão e torres treliçadas**

Verónica Juliana da Silva Meneses

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor António Machado e Moura

Co-orientador: Engenheiro Márcio Ribeiro

18 de Julho de 2019

Resumo

As linhas aéreas de energia são um elemento crucial das redes de distribuição de energia elétrica e, conseqüentemente, do sistema elétrico de energia português, dado que permitem satisfazer a crescente necessidade de consumo de energia elétrica dos consumidores, realizando o seu transporte e distribuição de forma eficaz.

Contudo, o operador da rede de distribuição tem de suportar custos significativos relacionados com o projeto e construção deste tipo de infraestruturas, pelo que se exploram soluções que permitam minimizar os investimentos necessários.

Sendo que uma forma de mitigar estes custos é otimizar o projeto de uma linha, nesta dissertação apresenta-se uma metodologia de otimização de projetos de linhas aéreas de média tensão, que resultou de uma aprendizagem recursiva e manual, baseada no conceito de *machine learning*. O procedimento consistiu em realizar diversos projetos de linhas e, com base nos resultados obtidos, perceber quais as estratégias mais indicadas na elaboração de um projeto, desenvolvendo assim uma metodologia otimizada.

Os apoios são os ativos que representam maior custo no projeto de uma linha aérea. Assim, juntamente com a proposta de soluções otimizadas, em que se pretende minimizar o número de apoios, apresenta-se um estudo técnico económico comparativo entre a utilização de apoios em betão e apoios metálicos.

Os projetos que consideram a utilização de apoios de betão apresentam custos menores, embora possuam algumas desvantagens técnicas face às torres treliçadas.

Este estudo foca-se em linhas de média tensão que se desenvolvem em zonas florestais. As particularidades deste tipo de linhas, sobretudo a extensa exposição a zonas arborizadas que resulta numa maior vulnerabilidade a estados atmosféricos extremos como incêndios e tempestades, acrescentam relevância a este estudo dada a ocorrência de alguns fenómenos atmosféricos extremos verificados nos últimos anos.

Esta dissertação foi realizada em ambiente empresarial na EDP Distribuição e foram utilizados os *software* Microsoft Office Excel e CLinhas da EDP.

Abstract

Overhead power lines are an element of paramount importance of electricity distribution networks and, therefore, of the Portuguese electric power system, since they enable the consumers' growing need for electricity consumption to be met by transporting and distributing electrical energy effectively.

However, the distribution network operator has to bear significant costs related to the design and construction of this infrastructures, thus there is a need to explore solutions that enable the reduction of the investments.

As one way of mitigating these costs is to optimise the design of a line, this dissertation presents a methodology of optimisation of the design of medium voltage overhead power lines. This methodology resulted from recursive and manual learning, based on the concept of machine learning. The procedure consisted of making several line projects and, based on the results obtained, it was realised which strategies a project should adopt, which resulted in the optimized methodology.

Both concrete poles and metallic towers are the most expensive assets in a aerial power line. So, along with the proposal of the optimized solution, whose purpose is to reduce the number of supports, a technical-economic study is presented between the utilization of poles compared to towers.

The projects that consider the use of concrete poles result in lower costs, although these type of supports have some technical disadvantages compared to towers.

This study focuses on medium voltage lines that are inserted in forest areas. The singularities of this type of line, especially the extensive exposure to wooded areas that results in greater vulnerability to extreme weather conditions such as fires and storms, add relevance to this study given the occurrence of some atmospheric phenomena observed in recent years.

This dissertation was conducted as part of a curricular internship at EDP Distribuição and the software used were Microsoft Office Excel and CLinhas software from EDP.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor António Machado e Moura, pela oportunidade de realizar este trabalho, pela disponibilidade constante e, essencialmente, pelas palavras amigas e encorajadoras que me incentivaram a trabalhar com persistência e dedicação.

Em segundo lugar, mas não menos importante, quero também prestar o meu profundo agradecimento ao meu coorientador, Engenheiro Márcio Ribeiro, principalmente pela experiência transmitida, que contribuiu de forma vital para a elaboração desta dissertação. Além disso, quero agradecer o apoio e acompanhamento contínuo e também a atitude desafiadora que me favoreceu o pensamento crítico e as minhas capacidades técnicas.

Agradeço de forma especial ao meu namorado e colega de curso, Luís Costa, por tudo. Pelo carinho, enorme paciência e compreensão e pela força e coragem que sempre me transmitiu, mesmo nos momentos menos fáceis. Sem este apoio incondicional o meu percurso académico não teria sido tão bem sucedido.

Quero deixar também o meu agradecimento a todos os amigos que me acompanharam ao longo destes cinco anos, por todos os momentos partilhados e as boas recordações que vão deixar ficar desta etapa.

Por último, quero agradecer à minha família, especialmente à minha mãe, que é um exemplo na minha vida. Por me ensinar a nunca desistir e a lutar pelo que quero e por acreditar sempre em mim. Obrigada.

Verónica Meneses

“The three great essentials to achieve anything worthwhile are, first, hard work; second, stick-to-itiveness; third, common sense.”

Thomas A. Edison

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento, Motivação e Objetivos	1
1.2	Estrutura da Dissertação	2
2	Conceitos Gerais Sobre Linhas Aéreas	3
2.1	Introdução	3
2.2	Classes das linhas aéreas	3
2.3	Elementos constituintes	4
2.3.1	Apoios	4
2.3.2	Armações	10
2.3.3	Fundações	13
2.3.4	Isoladores	14
2.3.5	Condutores	15
2.3.6	Sinalização das linhas aéreas	16
2.3.7	Ligações à terra	17
2.4	Síntese e principais conclusões	19
3	Cálculos de um Projeto de uma Linha Aérea	21
3.1	Introdução	21
3.2	Cálculo mecânico	22
3.2.1	Tensões mecânicas máximas	22
3.2.2	Estados atmosféricos	23
3.2.3	Ações dos agentes atmosféricos	23
3.2.4	Coefficiente de sobrecarga	27
3.2.5	Equação dos estados	29
3.2.6	Determinação de t_i	29
3.2.7	Determinação do parâmetro da curva e catenária	30
3.2.8	Determinação da flecha máxima	30
3.2.9	Desvio transversal da cadeia de isoladores	32
3.2.10	Distâncias regulamentares a cumprir	33
3.2.11	Estabilidade dos apoios	34
3.3	Síntese e principais conclusões	48
4	Projeto Exemplificativo de uma Linha de 15 kV	49
4.1	Introdução	49
4.2	Cálculo mecânico	50
4.2.1	Dados do condutor	51
4.2.2	Ação dos agentes atmosféricos e coeficiente de sobrecarga	51

4.2.3	Determinação do pior estado atmosférico	52
4.2.4	Equação dos estados	53
4.2.5	Flecha máxima e distância mínima ao solo	55
4.2.6	Distância entre condutores	56
4.2.7	Desvio transversal das cadeias de isoladores	57
4.2.8	Estabilidade dos apoios	58
4.3	Síntese e principais conclusões	63
5	Otimização do Projeto e Análise Económica	65
5.1	Introdução	65
5.2	Desafios da otimização	66
5.3	Determinação analítica dos vãos máximos	67
5.3.1	Vãos limitados pela distância entre condutores	67
5.3.2	Vãos limitados pela distância ao solo	70
5.4	Aprendizagem recursiva	71
5.4.1	Aumento da tensão mecânica de serviço	74
5.4.2	Aumento da altura	75
5.4.3	Principais conclusões dos testes dos casos de estudo	75
5.5	Metodologia de otimização	76
5.5.1	Apoios metálicos	77
5.5.2	Apoios de betão	86
5.5.3	Considerações finais do projeto	91
5.6	Estudo técnico-económico comparativo entre torres treliçadas e postes de betão	92
6	Conclusões e Trabalho Futuro	95
6.1	Síntese e principais conclusões	95
6.2	Estudos futuros	97
A	Esforços Máximos dos Apoios Metálicos	99
B	Vãos máximos	101
C	Exemplo de topografia	103
D	Linha da Pampilhosa: Apoios Metálicos	105
E	Linha da Pampilhosa: Apoios Betão	107
F	Linha em Romão: Apoios Metálicos	109
G	Linha em Romão - Apoios Betão	111
	Referências	113

Lista de Figuras

2.1	Exemplo de um poste de betão, à esquerda, e uma torre treliçada, à direita, para MT [1].	5
2.2	Esquema representativo dos esforços solicitados a um apoio [2].	6
2.3	Apoio de alinhamento [3].	7
2.4	Apoio de ângulo, à esquerda, e apoio de reforço, à direita [3].	8
2.5	Apoio de derivação, à esquerda, e apoio de fim de linha, à direita [3].	8
2.6	Esquemas representativos das tipologias das armações em esteira horizontal, à esquerda, e esteira vertical, à direita [4].	10
2.7	Esquemas representativos das tipologias das armações em galhardete, à esquerda, e triângulo, à direita [4].	11
2.8	Representação da distância entre condutores na armação em galhardete.	12
2.9	Representação da distância entre condutores na armação em triângulo.	12
2.10	Exemplo de um isolador rígido, à esquerda, e de um isolador em cadeia, à direita [5].	14
2.11	Representação de uma cadeia de isoladores em suspensão, à esquerda, e em amarração, à direita [4].	15
2.12	Representação do cabo ACSR [3].	16
2.13	Sinalização diurna de um apoio [4].	17
2.14	Esfera de sinalização[4].	17
2.15	Esquemas de ligação à terra nos postes de betão, à esquerda, e nos postes metálicos, à direita[1].	18
2.16	Esquema de ligação à terra de uma armação em triângulo[1].	19
3.1	Forças exercidas sobre um condutor [2].	26
3.2	Árvore de decisão do estado mais desfavorável [2].	28
3.3	Vão de nível [6].	31
3.4	Vão de desnível [6].	31
3.5	Esquema das forças exercidas sobre a cadeia de isoladores[2].	33
3.6	Representação de um apoio de alinhamento.	35
3.7	Representação de um apoio de ângulo.	39
3.8	Representação de um apoio fim de linha.	45
5.1	Fluxograma início projeto (Apoios metálicos).	79
5.2	Diagrama da diferença da distância entre condutores com o aumento da t_{serv}	80
5.3	Diagrama da diferença da flecha com o aumento da t_{serv}	82
5.4	Fluxograma de colocação de novos apoios (Apoios metálicos).	83
5.5	Fluxograma de verificação do desvio transversal das cadeias (Apoios metálicos).	84
5.6	Escolha do apoio adequado (Apoios metálicos).	85

5.7	Fluxograma início projeto (Apoios betão).	87
5.8	Fluxograma de colocação de novos apoios (Apoios betão).	88
5.9	Fluxograma de verificação do desvio transversal das cadeias (Apoios betão).	89
5.10	Fluxograma da escolha da armação adequada (Apoios betão).	90
5.11	Fluxograma da escolha do apoio adequado - Apoios betão	91
C.1	Exemplo de um cume.	103

Lista de Tabelas

2.1	Postes de betão normalizados para linhas MT.	9
2.2	Postes aço reticulado normalizados para linhas MT.	9
3.1	Temperaturas de acordo com o estado atmosférico.	24
3.2	Coefficiente de forma para condutores nus.	25
3.3	Pressão dinâmica do vento de acordo com a altura do apoio.	25
3.4	Distâncias regulamentares a cumprir.	34
4.1	Dados dos apoios do projeto exemplificativo.	50
4.2	Dados dos cantões do projeto exemplificativo.	50
4.3	Caraterísticas do condutor.	51
4.4	Flechas máximas e distâncias mínimas ao solo para cada vão.	55
4.5	Distâncias entre condutores verificadas em cada apoio.	56
4.6	Distâncias entre condutores verificadas em cada apoio.	57
4.7	Esforços solicitados em cada apoio.	62
5.1	Vãos máximos limitados pela distância entre condutores, considerando armações F10CM, F15CM e F30CM.	69
5.2	Vãos máximos limitados pela distância entre condutores, considerando armações GAN e GAL.	69
5.3	Vãos máximos de apoios metálicos limitados pela distância ao solo, em metros.	70
5.4	Vãos máximos de apoios de betão limitados pela distância ao solo, em metros.	71
5.5	Apoios de ângulo e derivação da linha da Pampilhosa.	72
5.6	Apoios de ângulo e derivação da linha em Romão.	72
5.7	Custos das soluções base.	73
5.8	Custo das soluções otimizadas.	74
5.9	Custo e vão médios das soluções estudadas.	92
5.10	Percentagem do vão máximo aproveitado das soluções estudadas.	93
5.11	Custo médio dos apoios utilizados nas soluções estudadas.	93
A.1	Esforços máximos suportados pelos apoios metálicos.	99
B.1	Vãos máximos limitados pela distância entre condutores, considerando armações TAN e TAL.	101
B.2	Vãos máximos de apoios de betão limitados pela distância ao solo, considerando GAN e GAL, em metros.	101

Abreviaturas e Símbolos

ACSR	Aluminium Cable Steel Reinforced
AT	Alta Tensão
EDP	Energias de Portugal
MAT	Muito Alta Tensão
MT	Média Tensão
RSLEAT	Regulamento de Segurança de Linha Elétricas de Alta Tensão
SEE	Sistema Elétrico de Energia

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento, Motivação e Objetivos

As linhas aéreas de energia constituem um elemento essencial do Sistema Elétrico de Energia português, uma vez que permitem realizar o transporte e distribuição da energia elétrica desde os centros produtores até aos consumidores. Em 2017, por exemplo, encontravam-se em serviço cerca de 8999 km de linhas AT e 58 782 km de linhas MT, segundo a EDP Distribuição [7]. Por serem um componente tão importante e significativo do SEE, as linhas aéreas ainda são um assunto de notável relevância.

As redes de distribuição, das quais fazem parte não só as linhas aéreas de alta e média tensão, mas também as de baixa tensão, têm evoluído significativamente, tendo sido reforçadas e modernizadas. As razões para estas alterações nas redes estão relacionadas com a necessidade de adaptação e capacidade de resposta à evolução dos consumos, assegurando os níveis de qualidade e minimizando perdas [8]. Outra razão pela qual a evolução das linhas aéreas tem sido considerável é devido às condições climatéricas adversas que se têm vindo a verificar nos últimos anos, provocadas por incêndios e tempestades e que afetaram gravemente algumas linhas de distribuição [9, 10].

Neste estudo são analisadas linhas aéreas de MT, em particular aquelas que se desenvolvem sobretudo em zonas florestais. O estudo do projeto de linhas aéreas nestas condições é importante e atual, na medida em que a sua exposição a zonas muito arborizadas e com vegetação muito densa contribuem para um maior risco de exploração e conservação destes ativos da rede.

Os principais fatores de risco associados às linhas inseridas em zonas florestais são potenciados precisamente por estados atmosféricos extremos, como os incêndios florestais e as tempestades. Desses fenómenos extremos podem resultar queda de árvores sobre os de apoios, queda de árvores sobre as linhas (e consequente queda dos apoios) ou degradação dos condutores pela elevada temperatura em situação de incêndio na sua vizinhança.

Além disto, como as linhas aéreas apresentam um custo elevado e como o operador da rede continua a investir numa melhoria da qualidade de serviço e redução de perdas, é de grande interesse estudar soluções que minimizem o investimento necessário. Uma forma de reduzir o

custo de uma linha aérea é otimizar o seu projeto, ou seja, obter as soluções mais económicas, com características técnicas adequadas. Sendo assim, um dos objetivos desta dissertação é apresentar uma metodologia de otimização de projetos de linhas aéreas nas condições referidas, isto é, linhas de média tensão em zonas florestais.

Mais concretamente, a finalidade desta parte da dissertação é apresentar uma metodologia, resultante de uma aprendizagem sucessiva e manual, baseada no conceito de *machine learning*. Através da realização de diversas iterações a projetos de diferentes linhas, estuda-se a influência de diferentes parâmetros, como a altura do apoio ou a tração máxima de serviço, no número total de apoios a utilizar. A partir dos resultados obtidos e após vários projetos realizados, convergiu-se para a estratégia mais adequada que permite reduzir o número de apoios, dado que são os componentes de uma linha aérea que representam um maior investimento.

Por esta razão, outro dos objetivos desta dissertação é analisar a diferença entre a utilização de postes em betão e torres treliçadas, também conhecidas como postes metálicos. Assim, além da elaboração de uma metodologia para cada um destes tipos de apoios, no final é ainda apresentado um estudo técnico-económico que compara as soluções otimizadas de postes em betão e metálicos.

Esta dissertação foi proposta pela EDP Distribuição, pelo que se pretende que este trabalho académico traga um valor acrescentado para a empresa.

1.2 Estrutura da Dissertação

Este documento encontra-se organizado em 6 capítulos, sendo que cada um reflete as diferentes etapas do trabalho desenvolvido. Nesta secção é apresentada uma breve descrição de cada um dos capítulos.

No presente capítulo é realizado um enquadramento ao tema, indicando os principais objetivos do trabalho.

No segundo capítulo apresentam-se alguns fundamentos teóricos sobre linhas aéreas, essenciais para a compreensão do tema e posterior elaboração de um projeto, como as classes das linhas e os seus principais elementos constituintes.

O capítulo 3 foca-se nos cálculos mecânicos necessários para realizar o projeto de uma linha, sendo apresentados os conceitos e expressões fundamentais.

No quarto capítulo são realizados os cálculos mecânicos de um projeto exemplificativo, que teve como objetivo a aquisição de sensibilidade referente aos cálculos e às diferentes variáveis importantes no projeto.

O capítulo 5 consiste na apresentação da metodologia de otimização para apoios metálicos e para apoios de betão e no processo da sua elaboração. É também neste capítulo em que se apresenta o estudo técnico-económico comparativo entre a utilização destes dois tipos de apoios.

Por fim, o sexto capítulo resume o trabalho realizado e apresenta as principais conclusões sobre o mesmo, indicando também alguns trabalhos futuros relativos ao tema em estudo.

Capítulo 2

Conceitos Gerais Sobre Linhas Aéreas

2.1 Introdução

As linhas aéreas de energia são elementos complexos do sistema elétrico e o seu projeto e exploração obedecem ao Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão (RSLEAT [11]). Este documento legal é válido não só para linhas de alta tensão, mas também para linhas aéreas de média tensão. Desta forma, o trabalho desenvolvido teve em consideração este regulamento, que tem como objetivo estabelecer um conjunto de condições técnicas a cumprir, relacionadas com os diversos fatores que influenciam o projeto, atendendo à proteção de pessoas e coisas e à salvaguarda de interesses coletivos.

Para uma boa compreensão deste tema e para a elaboração correta de um projeto de uma linha aérea é necessário conhecer diversos conceitos teóricos, como os principais elementos constituintes. Deste modo, neste capítulo são então apresentados os fundamentos essenciais sobre linhas aéreas de média tensão.

2.2 Classes das linhas aéreas

O Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão classifica as linhas aéreas segundo classes, conforme a sua tensão nominal.¹ As linhas de 1ª classe constituem as instalações cuja tensão nominal não ultrapassa os 1000 V em corrente alternada ou os 1500 V em corrente contínua, que correspondem, segundo os valores adotados em Portugal, às linhas de Baixa Tensão. As de linhas de 2ª classe referem-se às instalações cuja tensão nominal é superior aos valores indicados anteriormente e inferior a 40000 V, que são as linhas de Média Tensão. Finalmente, as linhas de 3ª classe englobam as restantes linhas em que a tensão nominal é igual ou superior a 40 000 V, ou seja, as linhas de Alta e Muito Alta Tensão.

Assim, todos os assuntos abordados nesta dissertação referem-se a linhas de 2ª classe.

¹Capítulo I, Secção III, Artigo 3º do RSLEAT

2.3 Elementos constituintes

Os principais elementos de uma linha aérea de média tensão são os apoios, constituídos pelo poste e a respetiva armação e fundação, os isoladores e os condutores. Associados a estes elementos podem ainda ter-se em consideração acessórios de fixação, balizagem e a sinalização avifauna. Além destes, os sistemas de ligação à terra são também um relevante aspeto construtivo a considerar.

2.3.1 Apoios

Designa-se por apoio o conjunto constituído pelo poste, armação e fundação. O poste é a estrutura à qual é fixada a armação, onde, por sua vez, são fixados os condutores, por meio das cadeias de isoladores, que podem estar em amarração ou suspensão. As fundações são os elementos que permitem fixar o poste ao solo, garantindo a sua estabilidade. Apesar de as armações e as fundações fazerem parte do conjunto que constitui um apoio, estes elementos são abordados separadamente.

A função dos apoios consiste em suportar os condutores, mantendo-os separados e devidamente distanciados do solo ou outros obstáculos ao longo da linha, garantindo as distâncias regulamentares definidas no RSLEAT.

2.3.1.1 Material dos apoios

Segundo o RSLEAT, os apoios de uma linha aérea podem ser de aço, betão armado ou madeira.²Atualmente, os apoios de madeira são apenas utilizados em algumas linhas de baixa tensão e em linhas de telecomunicações.

Na média tensão, são utilizados apoios de aço, normalmente designados por apoios metálicos, e apoios de betão, ilustrados na Figura 2.1.

Estes apoios apresentam características distintas em relação a diversos aspetos, tais como a altura, a facilidade de transporte ou o custo.

As torres treliçadas ou apoios metálicos são apoios com maior altura do que os de betão armado, o que se pode traduzir numa vantagem, na medida em que é garantida uma maior distância ao solo.

Além disto, os apoios metálicos são mais fáceis de transportar, uma vez podem ser divididos em partes e montados no local e, deste modo, a sua implantação em zonas com diferentes características é facilitada. Pelo contrário, os postes de betão consistem apenas numa peça que é transportada por inteiro. Em algumas situações, pode até ser inviável transportar e implantar apoios em betão, como no caso de apoios de maior altura em zonas de difícil acesso.

Outro aspeto em que este tipo de apoios difere é relativamente às armações. As armações utilizadas nos postes metálicos já se encontram integradas na estrutura do poste, enquanto que os postes de betão são desprovidos destes elementos.

²Capítulo V, Secção I, Artigo 51º do RSLEAT

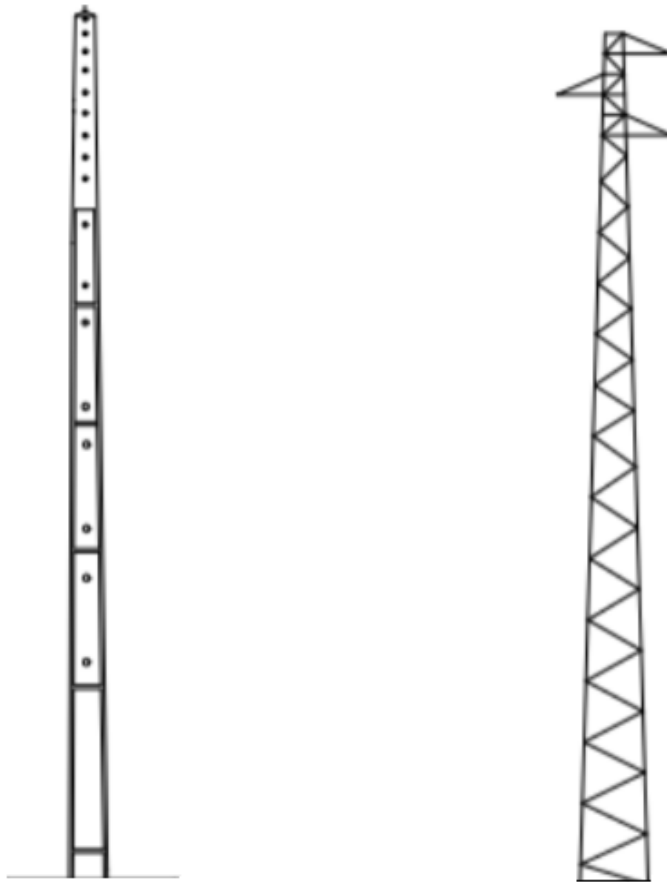


Figura 2.1: Exemplo de um poste de betão, à esquerda, e uma torre treliçada, à direita, para MT [1].

Uma vantagem dos postes em betão relaciona-se com o facto de apresentarem um custo menor. Também por serem visualmente mais simples e ocuparem menos espaço no solo, alguns proprietários de terrenos aceitam mais facilmente a sua instalação do que um apoio metálico.

Existe ainda outra diferença no que diz respeito à estrutura destes dois tipos de postes. Os postes de betão têm 2 faces (A e B), podendo ser orientados na linha de maneira diferente. Um apoio orientado segundo a face B pode suportar mais esforços longitudinais. Os principais tipos de esforços são abordados na secção seguinte. Os apoios metálicos possuem secções quadradas, pelo que a sua orientação é indiferente.

2.3.1.2 Esforços

A escolha de um apoio deve atender à sua altura, de maneira a controlar a distância dos condutores ao solo, e também à sua robustez, que é traduzida pela capacidade de o apoio suportar diferentes esforços que lhe são solicitados.

As ações que se fazem sentir sobre os apoios podem ser divididas segundo os eixos cartesianos xyz , logo podem considerar-se esforços longitudinais (F_x), transversais (F_y) e verticais (F_z), como representado na Figura 2.2.

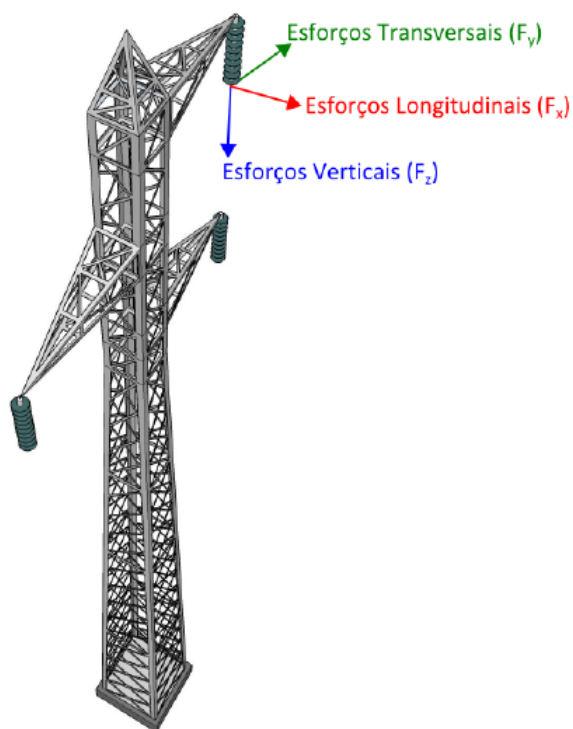


Figura 2.2: Esquema representativo dos esforços solicitados a um apoio [2].

Os esforços longitudinais estão relacionados com a tração mecânica nos condutores, resultantes nomeadamente de trações desiguais aplicadas nos vãos adjacentes de um apoio.

Por outro lado, os esforços transversais devem-se essencialmente à ação do vento sobre os condutores e isoladores nos vãos adjacentes ao apoio e sobre os próprios apoios. A componente transversal também deve considerar a tração nos condutores quando os apoios são de ângulo.

No caso da componente vertical, os esforços são consequência do peso dos condutores e das cadeias de isoladores.

A ação total sobre os apoios é resultado da associação de todos os esforços mencionados.

As hipóteses de cálculo dos esforços para os diferentes tipos de apoios, apresentados na secção seguinte, são indicadas no RSLEAT e descritas na secção 3.2.11.

Com base nos valores fornecidos pelos fabricantes das forças máximas segundo cada direcção que cada apoio pode aguentar, é escolhido o apoio adequado a cada situação.

2.3.1.3 Classificação dos apoios

Os apoios podem ainda ser classificados de acordo com a posição que ocupam ao longo de uma linha, sendo que se dividem em apoios de alinhamento, de ângulo, de reforço (em alinhamento ou ângulo), de derivação e de fim de linha [12].

- **Apoios de alinhamento:**

Os apoios de alinhamento correspondem aos apoios situados em troços de linha retilíneos, como representado na Figura 2.3. Neste tipo de apoios os esforços mais solicitados aos apoios são os transversais.

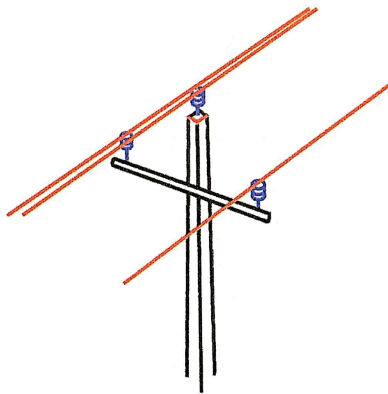


Figura 2.3: Apoio de alinhamento [3].

- **Apoios de ângulo:**

Os apoios de ângulo (Figura 2.4) são situados em zonas da linha em que se verificam mudanças de direcção, que se traduzem em ângulos da linha. Os esforços da componente transversal neste caso são particularmente elevados.

- **Apoios de reforço:**

Os apoios de reforço são indicados para suportar os esforços longitudinais solicitados aos apoios em condições excepcionais como a rotura de um condutor, formando pontos firmes na linha. Podem ser de ângulo ou de reforço, de acordo com a posição do apoio no traçado. Um exemplo de um apoio de reforço é o ilustrado na Figura 2.4.

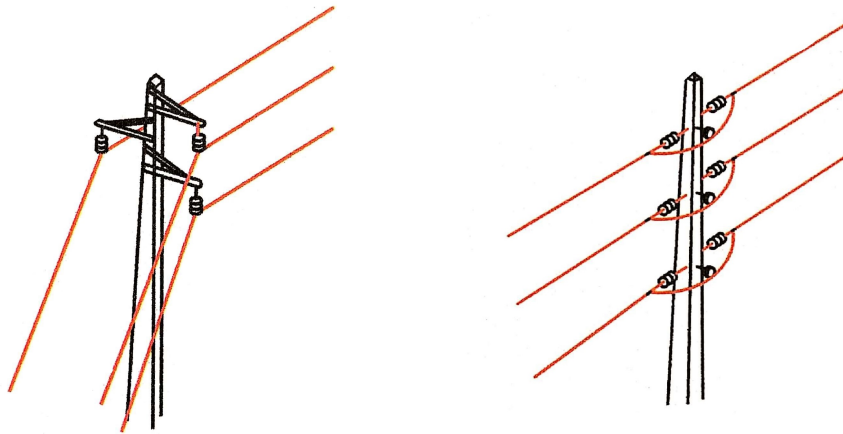


Figura 2.4: Apoio de ângulo, à esquerda, e apoio de reforço, à direita [3].

- **Apoios de derivação:**

Os apoios de derivação consistem em apoios nos quais se estabelecem uma ou mais derivações. Podem estar em alinhamento ou em ângulo e, além dos esforços já referidos, este tipo de apoios deve também suportar os esforços longitudinais resultantes da tração dos condutores de derivação. Na Figura 2.5 encontra-se representado um desenho exemplificativo deste tipo de apoios.

- **Apoios de fim de linha:**

Os apoios fim de linha (Figura 2.5) são utilizados nos extremos das linhas. Os esforços mais críticos neste tipo de apoios são os longitudinais, uma vez que devem apresentar capacidade de suporte de todos os esforços longitudinais de apenas um lado do apoio. É necessário ter uma atenção especial nos apoios fim de linha e reforço para que não se verifique torção no apoio.

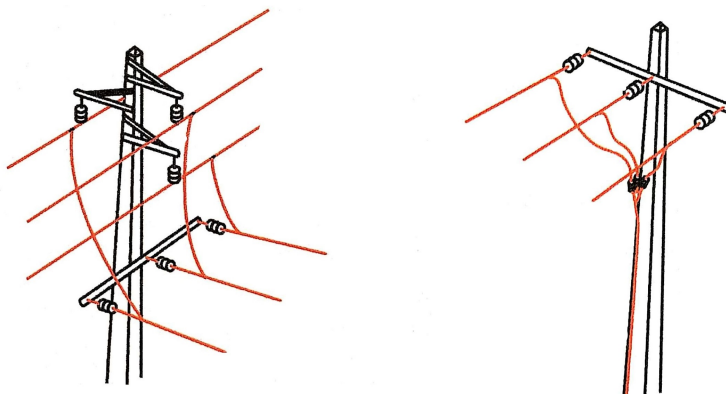


Figura 2.5: Apoio de derivação, à esquerda, e apoio de fim de linha, à direita [3].

2.3.1.4 Apoios normalizados pela EDP Distribuição

A EDP Distribuição considera um conjunto de apoios normalizados de betão armado e de aço reticulado. As Tabelas 2.1 e 2.2 apresentam o conjunto de apoios utilizados pela EDP, para MT.

Na Tabela 2.1, na qual estão indicados os apoios de betão normalizados, estes encontram-se organizados de acordo com a sua altura e a solicitação aplicada no eixo de maior inércia.

Neste documento, ao longo do texto, mencionam-se os nomes dos apoios utilizados na EDP Distribuição. Relativamente aos apoios de betão, os seus nomes indicam tanto os esforços solicitados como a sua altura. Por exemplo, o apoio MP01-800/320-18 corresponde ao apoio que suporta 800 daN segundo o eixo de maior inércia, de 18 m de altura total.

Também são referidas frequentemente as gamas dos apoios. Uma gama de apoios corresponde ao conjunto de apoios que suporta os mesmo esforços.

Quanto às designações dos apoios metálicos, também são especificados os esforços solicitados e a sua altura útil. O nome ainda indica que são adequados para média tensão. Por exemplo, o apoio F10CM/27 corresponde ao apoio que suporta 1000 daN, de altura útil de 27 m, para MT.

É importante notar que os apoios apresentam uma altura total, que corresponde ao comprimento do poste. Também se menciona regularmente a altura fora do solo do apoio, porém, a altura relevante a considerar nos cálculos é a altura útil do poste, que equivale à altura desde o ponto em que o condutor inferior é fixado até ao solo.

Tabela 2.1: Postes de betão normalizados para linhas MT.

Altura total [m]	Esforços [daN]								
	400	600	800	1200	1600	2250	2750	5000	7500
14	X	X	X	X	X	X	X		
16	X	X	X	X	X	X	X	X	X
18	X	X	X	X	X	X	X	X	X
20		X	X	X	X	X	X	X	X
22		X	X	X	X	X	X	X	X
24				X	X	X	X	X	X
26				X	X	X	X	X	X
28				X	X	X	X		

Tabela 2.2: Postes aço reticulado normalizados para linhas MT.

Tipo	Esforços [daN]	Altura útil [m]			
		21	27	30	33
F10CM	1000		X	X	X
F15CM	1500		X	X	X
F30CM	3000			X	X
F45CM	4500	X	X	X	X

2.3.1.5 Conjuntos sinaléticos

Em cada poste devem existir marcações que permitam a sua identificação e assinalem, de forma visível do solo, o perigo de eletrocussão. Em geral, devem incluir estas indicações:

- Informação de perigo de morte;
- Numeração e identificação do apoio;
- Nome da linha;
- Contacto de emergência;
- Empresa responsável pela linha.

2.3.2 Armações

As armações são o elemento ao qual são fixados os condutores, por meio dos isoladores. A EDP Distribuição considera as seguintes disposições normalizadas:

- Esteira horizontal;
- Triângulo;
- Galhardete;
- Esteira vertical, conforme a geometria da linha;
- Pórtico.

Na Figura 2.6 estão representados esquemas das armações em esteira horizontal e em esteira vertical e na Figura 2.7 ilustram-se as armações em galhardete e em triângulo.

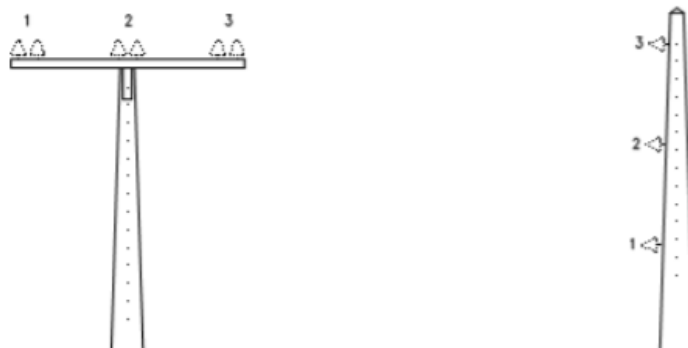


Figura 2.6: Esquemas representativos das tipologias das armações em esteira horizontal, à esquerda, e esteira vertical, à direita [4].

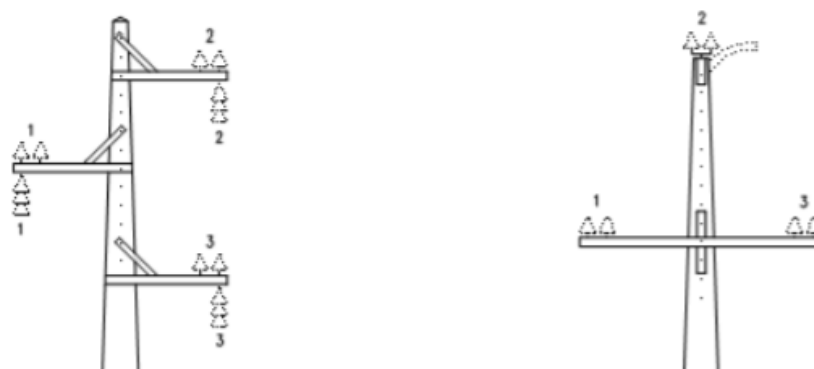


Figura 2.7: Esquemas representativos das tipologias das armações em galhardete, à esquerda, e triângulo, à direita [4].

Como referido, os apoios metálicos já incluem as armações, enquanto que os apoios de betão carecem das mesmas, sendo necessário escolher uma armação adequada. As principais diferenças entre os vários tipos de armações são a disposição dos condutores e a distância que permitem entre estes.

Neste trabalho admitem-se armações em galhardete para os apoios metálicos e, para o caso dos apoios de betão, considera-se a utilização de armações em triângulo e galhardete. Estas são as indicadas para postes MT.

As armações em triângulo podem ser aplicadas em apoio de alinhamento, denominadas TAL, ou em apoios de ângulo, reforço ou fim de linha, designadas por TAN. Da mesma forma, as armações em galhardete também podem ser divididas em GAL, para apoios de alinhamento, e GAN, utilizadas em apoios de ângulo.

A escolha das armações permite garantir a distância entre condutores ao longo de um vão, assegurando que os condutores se encontram suficientemente afastados, de forma a não se tocarem nem no plano horizontal, nem no plano vertical, evitando um curto-circuito. Porém, esta distância pode limitar o comprimento do vão.

As armações em galhardete são as que permitem uma maior distância entre condutores, em ambos os planos. O cálculo da distância entre condutores no plano horizontal para as armações em galhardete, D_g é dado pela expressão 2.1, tendo em conta a Figura 2.8.

$$D_g = \sqrt{2L^2 + H^2} \quad (2.1)$$

Em que

- L é o comprimento do braço da armação, em m;
- H é a altura entre dois braços da armação, em m.

A distância entre condutores nas armações em triângulo, D_t , está ilustrada na Figura 5.9.

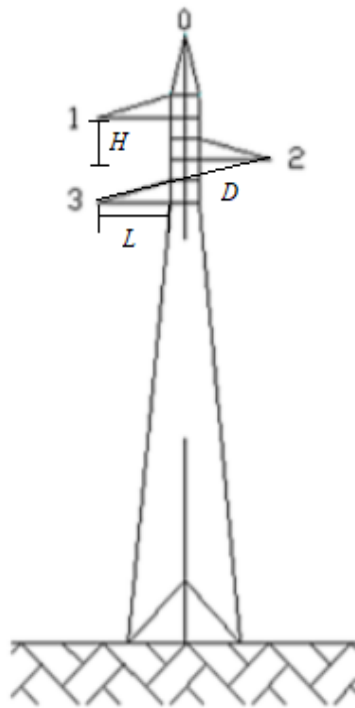


Figura 2.8: Representação da distância entre condutores na armação em galhardete.

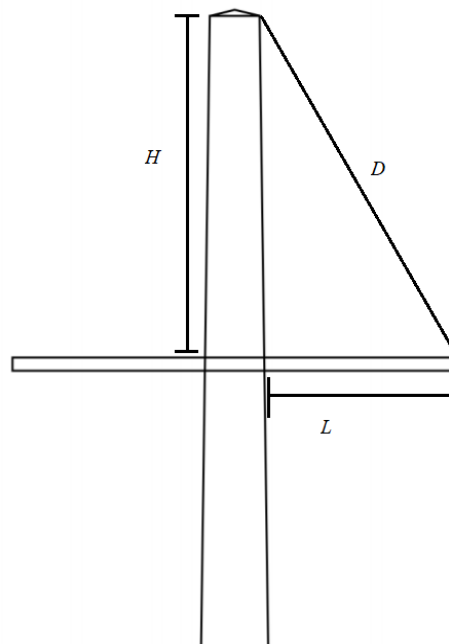


Figura 2.9: Representação da distância entre condutores na armação em triângulo.

O cálculo de D_t é dado pela expressão 2.2.

$$D_t = \sqrt{H^2 + L^2} \quad (2.2)$$

Em que

- L é o comprimento do braço da armação, em m;
- H é a altura entre dois braços da armação, em m.

Para as armações normalizadas pela EDP e consideradas neste trabalho, as distâncias entre condutores obtidas são:

- Em galhardete, nos apoios metálicos MT: $D = 2,70 m$;
- Em galhardete, nos apoios de betão MT: $D = 2,21 m$;
- Em triângulo, nos apoios de betão MT: $D = 1,30 m$.

Confirma-se que as armações em galhardete, por terem braços mais alongados, permitem uma maior distância entre condutores, o que é fundamental para vãos maiores, uma vez que quanto maior é o vão e, conseqüentemente, maior é flecha, mais os condutores se aproximam perigosamente.

Contudo, estas armações são de grande estrutura, resultando num menor aproveitamento da altura total do apoio, ou seja, com estas armações as distâncias ao solo são menores. Por outro lado, as armações em triângulo, por serem menores, possibilitam que o apoio apresente uma maior altura útil.

Entre as armações referidas, a escolha deve ser feita consoante o comprimento do vão e as condições de regulação do mesmo.

2.3.3 Fundações

As fundações permitem realizar a fixação dos apoios ao solo e asseguram a sua estabilidade, transmitindo todos os esforços solicitados do sistema de transmissão à terra.

A EDP Distribuição admite uma solução normalizada em termos de fundação para cada apoio, que apresenta as características principais quanto ao volume de escavação, volume e tipo de betão a utilizar, a sua geometria e o peso previsto [13].

Uma vez que já existem soluções normalizadas, não se abordam os cálculos do dimensionamento das fundações. Apesar disto, deve ter-se em consideração que o dimensionamento do maciço atende a alguns critérios como a natureza do solo, uma vez que a fundação deve ser compatível com o solo onde é inserida e deve manter a capacidade de resistência a longo prazo. Além disto, outras questões tidas em conta no dimensionamento de um maciço são os esforços envolvidos no apoio, a sua função e altura.

As fundações podem possuir um maciço, no caso dos apoios de betão, enquanto que nos apoios metálicos são utilizados dois ou quatro maciços.

2.3.4 Isoladores

Os isoladores são os elementos da linha aos quais os condutores estão fixados, possuindo um corpo isolante com um ou mais dispositivos de fixação. Estes elementos evitam a passagem de corrente dos condutores em tensão para os apoios que suportam a linha.

De forma a garantir um isolamento que assegure a proteção os equipamentos de forma eficaz contra os diferentes tipos de sobretensões, foi elaborado um documento pela EDP, denominado Guia de Coordenação de Isolamento [14]. Neste guia é apresentada a filosofia da coordenação de isolamento em linhas aéreas, indicando algumas soluções que devem ser aplicadas e os diferentes tipos de isoladores normalizados.

Essencialmente, os isoladores deverão apresentar dimensões e formas apropriadas ao ambiente em que vão ser utilizados, tendo em conta os níveis de poluição. Devem também atender às tensões elétricas a que vão estar sujeitos, aos esforços mecânicos que terão de suportar em exploração normal e a outras ações físico-químicas que as condições de ar livre venham a exercer sobre eles³.

Os isoladores das linhas aéreas podem ser rígidos ou em cadeia (Figura 2.10). Os isoladores rígidos são fixos rigidamente à armação do apoio, garantindo por si só as condições de isolamento do condutor⁴. No entanto, a sua utilização é muitas vezes desaconselhada, devido às dificuldades de montagem e à sua fragilidade. Além disso, uma vez verificado um defeito no seu isolamento, é necessário trocar todo o isolador [15]. Desta forma, idealmente, o isolamento deve ser realizado por meio de cadeias de isoladores, que são constituídas por associações de dois ou mais isoladores e por acessórios metálicos de articulação às armações e aos condutores.



Figura 2.10: Exemplo de um isolador rígido, à esquerda, e de um isolador em cadeia, à direita [5].

³Capítulo IV, Artigo 48º do RSLEAT

⁴Capítulo I, Secção IV, Artigo 4º do RSLEAT

Os principais materiais dos isoladores são a cerâmica, nomeadamente a porcelana, o vidro e os materiais poliméricos. O Regulamento recomenda que sejam em vidro, porcelana vidrada ou de outros materiais apropriados, como os poliméricos⁵.

Além disto, de acordo com a função do apoio, as cadeias de isoladores podem encontrar-se em suspensão ou amarração, ilustradas na Figura 2.11. As cadeias em suspensão são montadas verticalmente e utilizadas apenas nos apoios de alinhamento. Pelo contrário, as cadeias de amarração são montadas horizontalmente e são usadas em apoios de ângulo, fim de linha, reforço e alinhamento em amarração.

Uma vez que as cadeias de isoladores em suspensão utilizam metade dos isoladores das cadeias em amarração, são utilizadas sempre que possível.

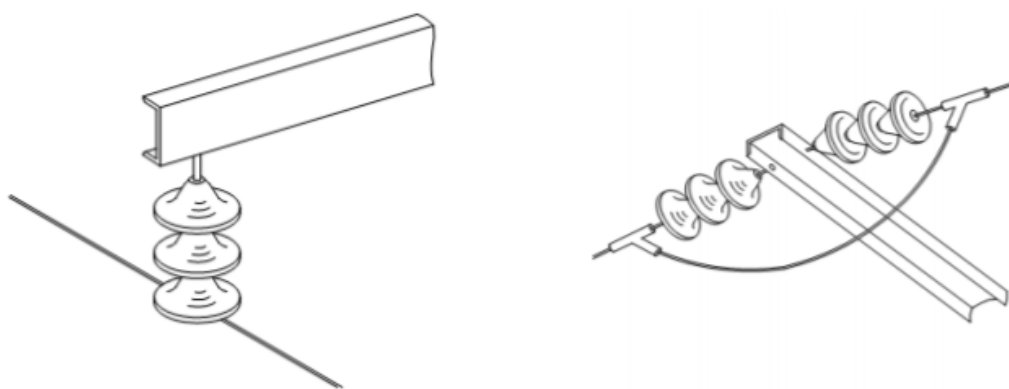


Figura 2.11: Representação de uma cadeia de isoladores em suspensão, à esquerda, e em amarração, à direita [4].

Nas linhas de MT, as cadeias de isoladores são equipadas com 3 isoladores sem hastes de descarga, exceto se existirem mais de quatro apoios com isolamento reforçado. Neste caso, o quinto apoio deve possuir haste de descarga, para assegurar proteção contra os arcos de descarga.

2.3.5 Condutores

Os cabos mais utilizados utilizados pela EDP nas linhas aéreas de energia são os cabos de alumínio-aço, também designados por ACSR (Aluminium Cable Steel Reinforced). São constituídos por uma alma em aço galvanizado envolvida em camadas sucessivas de fios de alumínio, como representado na Figura 2.12.

A aplicação de cabos homogêneos de alumínio puro é restringida nas linhas aéreas, porque, embora o alumínio apresente boa capacidade de transporte, estes cabos demonstram-se inadequados em determinadas situações, pela insuficiente resistência mecânica, relacionada com tensões de rutura baixas, fluência excessiva e coeficiente de expansão térmica elevado [16].

⁵Capítulo IV, Artigo 47º do RSLEAT

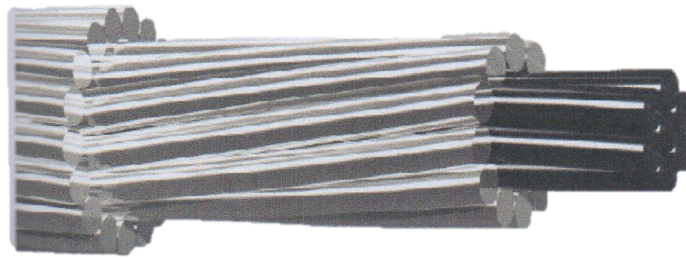


Figura 2.12: Representação do cabo ACSR [3].

Também não é considerada a utilização de condutores de cobre, que apesar de apresentarem uma baixa resistividade e, por isso, grandes potencialidades de transporte de energia, apresentam algumas desvantagens a nível técnico e económico.

Em primeiro lugar, os cabos de cobre têm um custo superior e apresentam menor resistência mecânica do que cabos de alumínio-aço.

Além disto, comparando um cabo de cobre com um cabo de alumínio-aço com a mesma resistência, portanto, em igualdade de perdas, o cabo de alumínio-aço apresenta um diâmetro cerca de 40% superior, o que se traduz numa redução do efeito coroa [15]. A utilização do alumínio ainda permite uma redução de 50% no peso dos condutores. Esta diminuição permite reduzir a flecha e aumentar vãos, resultando numa solução mais económica [17].

Os condutores de uma linha devem ser escolhidos de acordo com as correntes a que estarão sujeitos e as tensões mecânicas a que serão submetidos, que variam com as condições ambientais.

Relativamente aos condutores de uma linha aérea, pode ainda considerar-se a sinalização dos cabos e da avifauna, abordados sucintamente na secção seguinte.

2.3.6 Sinalização das linhas aéreas

De forma a garantir a segurança das aeronaves, de acordo com o recomendado pelo Instituto Nacional de Aviação Civil, as linhas devem ser sinalizadas. Esta sinalização é mais frequente nas linhas de AT e sobretudo nas de MAT, devido à grande altura dos postes e extensão dos apoios. No entanto, em algumas situações pontuais, também pode ser exigida em linhas de MT [3].

A sinalização consiste na colocação de esferas de sinalização, alternadamente de cor branca e laranja e quando se justificar, podem também ser balizados os apoios por pintura dos mesmos com as mesmas cores, como ilustrado nas Figuras 2.13 e 2.14. Estas medidas consistem na balizagem diurna.

Também se pode considerar balizagem noturna colocando dispositivos luminosos nos apoios.

Os detalhes da sinalização a ser eventualmente feita encontram-se na Circular de Informação Aeronáutica - CIA 10/03, de 6 de Maio [18].

Nas linhas aéreas pode ainda considerar-se a utilização de equipamentos de sinalização para a avifauna. Também neste caso existe um documento que indica as considerações a ter no

projeto e construção de linhas de AT e MT no que diz respeito à proteção da avifauna. Este documento, "Manual de apoio à análise de projetos relativos à instalação de linhas aéreas de distribuição e transporte de energia elétrica – Componente Avifauna", foi elaborado pelo Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF) e além de avaliar o impacto que as linhas aéreas criam na avifauna, também sugere alguns procedimentos a adotar, como por exemplo, a aplicação de dispositivos salva-pássaros, dispositivos anti-nidificação e anti-poiso e plataformas para ninhos [19].



Figura 2.13: Sinalização diurna de um apoio [4].



Figura 2.14: Esfera de sinalização[4].

2.3.7 Ligações à terra

Os sistemas de ligação à terra criam um ponto comum e de referência entre as partes eletricamente condutoras e a terra. São constituídos pelos elétrodos de terra e pelos seus conjuntos de condutores e têm como objetivo escoar as correntes de defeito para o solo.

Estas ligações devem garantir a segurança de pessoas, de maneira a que as que se encontram nas proximidades de instalações elétricas não sejam afetadas por tensões de passo e de contacto superiores aos máximos admissíveis. Além disto, devem também assegurar a proteção dos

equipamentos e instalações, garantindo que o escoamento é realizado sem afetar os equipamentos ou a continuidade de serviço.

As ligações à terra devem obedecer a um documento elaborado pela EDP Distribuição, o Guia Técnico de Terras (DRE-C11-040/N) [1].

Nas linhas aéreas de MT, toda a aparelhagem metálica (normalmente fora de tensão) necessária ao suporte dos condutores e ao seccionamento e proteção das linhas, tem de ser ligada à terra. Portanto, devem ser realizadas ligações à terra dos postes (betão e metálicos), armações, postes com equipamentos de rede aérea e postes com transições aéreo-subterrâneas [1].

Os postes de betão devem ser ligados à terra, interligando-se o terminal de terra existente na parte inferior do poste com o elétrodo de terra, através de um cabo de cobre nu de 35 mm^2 . No caso dos postes metálicos, as ligações devem ser feitas interligando-se os terminais de terra existentes em cada um dos montantes aos elétrodos de terra, e interligando-os entre si, através de cabo VV 1G35 mm^2 [1].

Nos dois casos, o valor da resistência de terra não deve exceder 20Ω . Estas ligações encontram-se representadas na Figura 2.15.

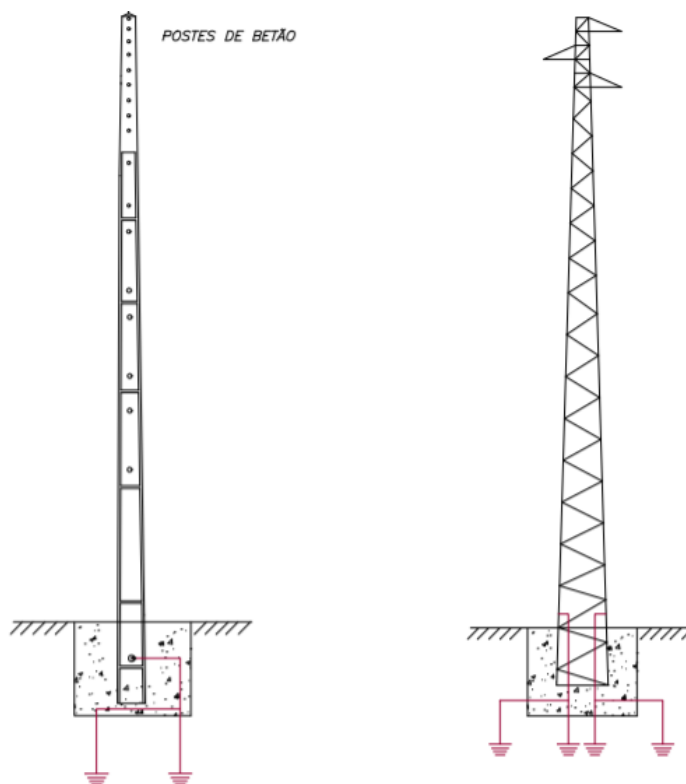


Figura 2.15: Esquemas de ligação à terra nos postes de betão, à esquerda, e nos postes metálicos, à direita[1].

As armações dos postes de betão devem ser ligadas à terra através de fio de cobre de 16 mm^2 de secção, que deve interligar todas as ferragens constituintes da armação nos pontos de ligação à terra. Depois, o mesmo fio deve ligar ao terminal de terra superior do poste, através de um

terminal apropriado. Nos postes metálicos, não é necessário efetuar estas ligações. Na Figura 2.16 encontra-se ilustrado um exemplo do esquema de ligação à terra a realizar numa armação em triângulo.

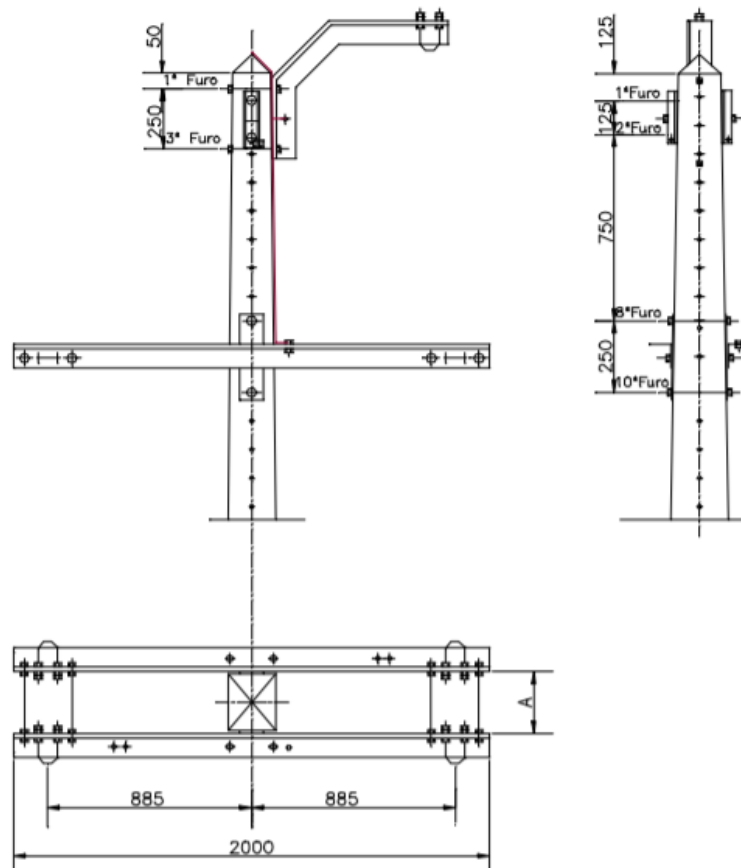


Figura 2.16: Esquema de ligação à terra de uma armação em triângulo[1].

As restantes ligações, nomeadamente aos equipamento de rede aéreas e às transições aéreo-subterrâneas, encontram-se exemplificadas no Guia Técnico.

2.4 Síntese e principais conclusões

Uma linha aérea é um elemento do sistema elétrico significativamente complexo. Neste capítulo foram apresentados os seus elementos principais, nomeadamente os apoios, constituídos pelos postes, armações e fundações, os condutores e isoladores.

Para cada componente da linha foram apresentas sucintamente as suas principais características, principalmente as que são relevantes para os cálculos e elaboração do projeto, de forma a facilitar a compreensão dos capítulos seguintes.

Capítulo 3

Cálculos de um Projeto de uma Linha Aérea

3.1 Introdução

A fase de elaboração do projeto de uma linha aérea pressupõe um conjunto de etapas realizadas previamente, que permitem obter um traçado com as informações do perfil do terreno. Neste traçado constam todas as informações sobre o terreno que a linha atravessa, como as diferenças altitudes do mesmo. São também definidos e marcados os vértices da linha e indicam-se os edifícios e linhas aéreas de telecomunicações ou de energia [6].

Obtido o traçado final, no qual estão definidas as posições dos apoios fim de linha, ângulo e derivação, o projetista deve determinar a posição mais adequada dos restantes apoios na linha. De seguida, deve então verificar se são cumpridas todas as condições fixadas no RSLEAT, realizando os cálculos do projeto.

Num projeto devem ser realizados cálculos elétricos e mecânicos. Nos cálculos elétricos é determinada a intensidade de corrente nominal, que determina o condutor adequado a utilizar. Também se precisam as constantes físicas elétricas por quilómetro de linha, nomeadamente a resistência elétrica (R), a indutância (L), a capacidade (C) e a condutância (G) do condutor utilizado. Destas constantes podem ser deduzidas as características elétricas por quilómetro de linha: a reatância (X), a suscetância (B), a impedância (Z) e a admitância (Y). Outros cálculos elétricos relevantes são as perdas de energia e a queda de tensão.

Neste capítulo apenas se apresentam com detalhe os cálculos mecânicos a realizar na elaboração de um projeto, por serem o foco deste trabalho.

3.2 Cálculo mecânico

Os cálculos mecânicos a realizar na elaboração de um projeto são uma das etapas mais importantes, visto que permitem garantir que são cumpridas todas as condições técnicas impostas pelo RSLEAT, assegurando, assim, a segurança e estabilidade da linha.

Os principais objetivos do cálculo mecânico são:

- A determinação das tensões de montagem a aplicar nos condutores, de acordo com as condições atmosféricas verificadas;
- Com os valores do ponto anterior, a determinação das diferentes flechas que se podem verificar para as diferentes temperaturas no ato da montagem, especialmente a flecha máxima, de maneira a garantir uma distância mínima ao solo apropriada;
- Determinar a distância entre condutores, assegurando o devido afastamento;
- Determinar o desvio transversal das cadeias de isoladores;
- Escolher a gama do apoio, de maneira a garantir a estabilidade, e a sua altura, de modo a garantir também uma distância mínima ao solo adequada.

Os seguintes tópicos apresentam os conceitos e expressões necessários para determinar todos estes objetivos.

3.2.1 Tensões mecânicas máximas

O primeiro passo da etapa do cálculo mecânico é definir as tensões mecânicas de serviço a aplicar nos condutores. Este valor não deve ser superior à tensão máxima admissível pelo condutor que é dada pela expressão 3.1.

$$t_{max} = \frac{t_{rotura}}{2,5} = \frac{T_{rotura}}{\sigma * 2,5} [daN/mm^2] \quad (3.1)$$

Em que:

- t_{rotura} é a tensão de rotura do cabo, em daN/mm^2 ;
- T_{rotura} é a tração de rotura do cabo, em daN ;
- σ é a secção do cabo em mm^2 .

Por isso, deve verificar-se

$$t_{serv} \leq t_{max} [daN/mm^2]. \quad (3.2)$$

A tensão mecânica de serviço a considerar para os condutores é verificada para o estado mais desfavorável. Este é um dos parâmetros mais relevantes do projeto, uma vez que tem influência em aspetos fundamentais do projeto, como a flecha e os esforços solicitados aos apoios.

3.2.2 Estados atmosféricos

O comportamento mecânico das linhas é condicionado pela ação de diferentes agentes atmosféricos: o vento, a temperatura e o gelo. São definidos três estados atmosféricos nos quais é caracterizada a ação destes agentes em diferentes períodos.

3.2.2.1 Estado de Inverno

O Estado de Inverno é caracterizado pela menor temperatura previsível para a região de implementação da linha, pela possibilidade da existência de uma manga de gelo e é também definido pelo vento reduzido. Para zonas fora de gelo considera-se uma temperatura de -5°C e, para zonas propícias a gelo, a temperatura a admitir é de -10°C .

3.2.2.2 Estado de Primavera

O Estado de Primavera, também designado como estado de vento máximo, é definido pelos ventos intensos e uma temperatura média de 15°C previsível para o local onde se vai instalar a linha. Não é considerada a existência de uma manga de gelo.

3.2.2.3 Estado de Verão

Por fim, é ainda definido o Estado de Verão, também denominado por estado de flecha máxima. Neste estado, caracterizado pela temperatura máxima previsível para a região de implementação da linha, é desprezada a existência de mangas de gelo nos condutores e despreza-se também a ação do vento.

As temperaturas estão dependentes da classe das linhas a implementar. Para linhas de 2ª classe, a temperatura máxima considerada é de 50°C ¹.

Este estado apenas é considerado para a determinação da flecha máxima.

3.2.3 Ações dos agentes atmosféricos

3.2.3.1 Ação da temperatura

Ao longo do ano, as linhas são expostas a diferentes temperaturas. Estas variações são relevantes, dado que o aumento da temperatura provoca a dilatação dos cabos e o contrário acontece quando se dá uma redução.

Assim, é importante atender as temperaturas referidas a considerar para cada estado atmosférico. Estes valores encontram-se resumidos na Tabela 3.1.

¹Capítulo III, Artigo 22º do RSLEAT

Tabela 3.1: Temperaturas de acordo com o estado atmosférico.

Estado atmosférico	Temperatura [°C]	
	Sem gelo	Com gelo
Inverno	-5	-10
Primavera	15	-
Verão	50	-

3.2.3.2 Ação do gelo

São consideradas zonas de gelo os locais cuja altitude é superior a 700 m. Nesta situação, pode verificar-se a formação de uma manga de gelo em torno dos condutores e cabos de guarda, que afeta não só o seu peso, mas também a área exposta à ação do vento. Sendo assim, o valor do peso específico do gelo, W_g é dado por

$$W_g = \left(\frac{\rho * \pi}{4} \right) * [(d + 2e)^2 - d^2] [daN/m]. \quad (3.3)$$

Em que:

- ρ é o peso volumétrico do gelo, que para altitudes superiores a 700 m deve ser de 900 kg/m^3 ;
- d é o diâmetro do cabo, em m;
- e é a espessura da manga de gelo, em m.

A manga de gelo a considerar no cálculo dos condutores deverá ter uma espessura uniforme de pelo menos 10 mm^2 , contudo, o projetista pode considerar outro valor caso a experiência assim o indique.

3.2.3.3 Ação do vento

O vento deve considerar-se a atuar numa direção horizontal, enquanto que a força proveniente da sua ação deve considerar-se paralela à direção do vento. A sua ação pode ser calculada considerando a expressão 3.4.

$$F_v = \alpha * c * q * (d + 2e) [daN/m] \quad (3.4)$$

Em que:

- α é o coeficiente de redução, que é adimensional;
- c é o coeficiente de forma nos condutores, que é adimensional;
- q é a pressão dinâmica do vento, em daPa;

²Capítulo II, Artigo 16° do RSLEAT

- d é o diâmetro do cabo, em m;
- e é a espessura da manga de gelo, em m, no caso de ser uma zona de gelo.
- **Coefficiente de redução**

Relativamente ao coeficiente de redução, que se trata de um coeficiente da efetividade do vento, é adotado o valor de 0,6 para condutores e também para cabos de guarda (quando se trata de linhas AT) e admite-se o valor de 1 para apoios, travessuras e isoladores³.

- **Coefficiente de forma**

Na ação do vento também é considerado um coeficiente de forma que traduz a influência da forma geométrica do elemento exposto à ação do vento. Os seus valores são definidos no RSLEAT⁴ e apresentam-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Coeficiente de forma para condutores nus.

Elemento	Diâmetro [mm]	Coefficiente
Condutores nus e cabos de guarda	$\leq 12,5$	1,2
	$12,5 < d < 15,8$	1,1
	$\geq 15,8$	1

- **Pressão dinâmica do vento**

A pressão dinâmica do vento está diretamente relacionada com a altura acima do solo em que se encontra o elemento da linha sobre o qual se pretende calcular a ação do vento e varia de acordo com o estado atmosférico. Os valores para este parâmetro estão também definidos no RSLEAT⁵ e estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Pressão dinâmica do vento de acordo com a altura do apoio.

Altura acima do solo h [m]	Pressão dinâmica q [Pa]	
	Vento máximo habitual	Vento reduzido
≤ 30	750	300
$30 < h \leq 50$	900	360
> 50	1050	420

3.2.3.4 Peso do próprio cabo

Além da ação dos agentes atmosféricos como o vento e o gelo nos cabos, é importante ter em conta que os condutores estão submetidos a solicitações mecânicas pelo próprio peso. Este valor é disponibilizado pelos fabricantes dos condutores em utilização, em daN/m.

³Capítulo II, Artigo 14º do RSLEAT

⁴Capítulo II, Artigo 15º do RSLEAT

⁵Capítulo II, Artigo 13º do RSLEAT

3.2.3.5 Forças exercidas sobre um condutor

Fundamentalmente, as forças exercidas sobre um condutor devem-se ao peso dos próprio cabos, à ação do vento e à possível ação do gelo sobre os condutores, como ilustrado na Figura 3.1.

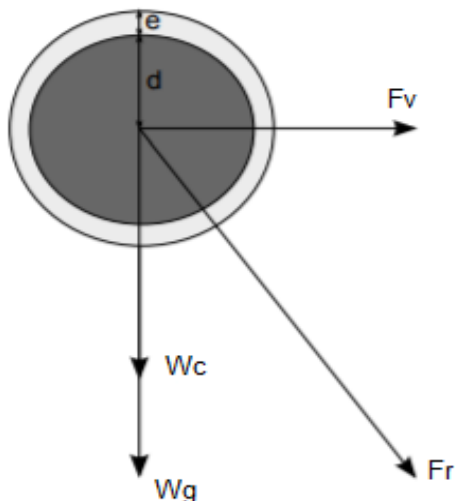


Figura 3.1: Forças exercidas sobre um condutor [2].

Em que:

- W_c é o peso do cabo por unidade de comprimento, em daN/m ;
- W_g é o peso do gelo por unidade de comprimento, em daN/m ;
- F_v é a força do vento, em daN/m ;
- F_r é a resultante das forças, em daN/m .

Assim, a força resultante da ação dos agentes atmosféricos e do peso do cabo é dada pela expressão 3.5.

$$F_r = \sqrt{(W_c + W_g)^2 + F_v^2} \text{ [daN/m]} \quad (3.5)$$

Em que:

- W_c é o peso específico do cabo, em daN/m ;
- W_g é o peso específico do gelo, em daN/m ;
- F_v é a força do vento, em daN/m .

3.2.4 Coeficiente de sobrecarga

Nesta etapa deve então ser calculado o coeficiente de sobrecarga, que exprime o agravamento no peso dos condutores causado pela ação dos agentes atmosféricos envolvidos. O seu cálculo deve considerar a expressão 3.6.

$$m = \frac{F_t}{W_c} = \frac{\sqrt{(W_c + W_g)^2 + F_v^2}}{W_c} \quad (3.6)$$

Em que:

- W_c é o peso específico do cabo, em daN/m;
- W_g é o peso específico do gelo, em daN/m;
- F_v é a força do vento, em daN/m.

Deste modo, de acordo com as características da linha a projetar, deve calcular-se o coeficiente de sobrecarga para o estado de inverno e de primavera. No estado de verão, o coeficiente de sobrecarga é unitário.

3.2.4.1 Vão crítico

Conhecendo os coeficientes de sobrecarga para o inverno e para a primavera, interessa determinar qual o estado atmosférico mais desfavorável para cada cantão, ou seja, o estado em que se verifica a tensão mecânica de serviço definida. O estudo do estado atmosférico mais desfavorável encontra-se na secção 3.2.4.3.

Nesta fase, importa saber que para a sua determinação é necessário determinar, para cada cantão, o vão crítico, L_{cr} . Este corresponde ao vão para o qual os condutores ficam sujeitos à tensão máxima definida no estado de inverno e no estado de primavera. A sua expressão é obtida a partir da equação dos estados e é dada por

$$L_{cr} = \frac{\sigma * t_k}{\omega} * \sqrt{\frac{24 * \alpha * (\theta_i - \theta_k)}{m_i^2 - m_k^2}} [m]. \quad (3.7)$$

Em que:

- σ é a secção do condutor, em mm^2 ;
- t_k é a tensão mecânica de serviço definida aplicada aos condutores nos estados i e k , em daN/mm^2 ;
- ω é o peso próprio do condutor, em daN/m ;
- α é o coeficiente de dilatação térmica do condutor, em C^{-1} ;
- θ_i e θ_k são as temperaturas do estado i e do estado k , respetivamente, em C ;
- m_i e m_k são os coeficientes de sobrecarga do estado i e do estado k , respetivamente.

3.2.4.2 Vão equivalente

Para a determinação do estado mais desfavorável é também necessário conhecer o comprimento do cantão. No entanto, no caso de este ser constituído por mais do que um vão, deve ser calculado o seu vão equivalente. Este vão traduz um vão fictício no qual as variações da tensão mecânica, devido às variações de carga e de temperatura, são sensivelmente iguais às dos vãos reais do cantão. O seu cálculo é dado pela expressão 3.8.

$$L_{eq} = \sqrt{\frac{\sum_1^n *L_i^3}{\sum_1^n *L_i}} [m] \quad (3.8)$$

Em que:

- $\sum_1^n *L_i$ é o somatório do comprimento dos vãos pertencentes ao cantão, em m.

3.2.4.3 Estado mais desfavorável

Tendo obtido o vão crítico e o vão equivalente deve determinar-se o estado mais desfavorável para um determinado cantão. Esta determinação é auxiliada pela árvore de decisão da Figura 3.2.

A determinação do estado mais desfavorável é fundamental para o cálculo da tensão mecânica mínima, visto que para a obtenção deste valor é realizada uma comparação entre o estado mais desfavorável e o estado de verão.

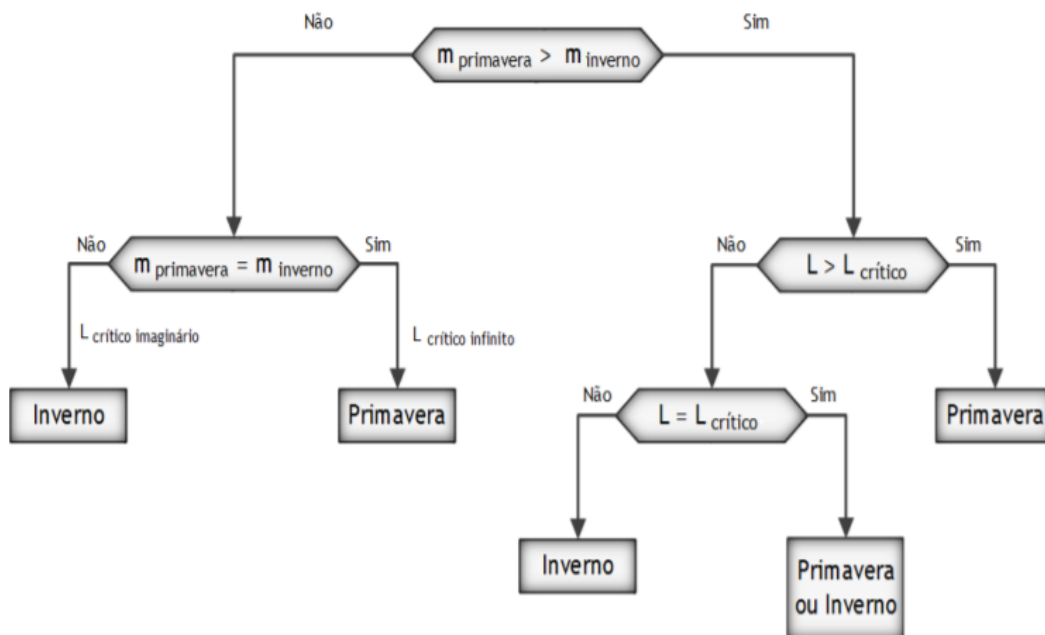


Figura 3.2: Árvore de decisão do estado mais desfavorável [2].

Os critérios de escolha são baseados em comparações entre os valores dos coeficientes de sobrecarga no inverno e na primavera e também entre os valores do vão crítico e vão equivalente.

3.2.5 Equação dos estados

A equação dos estados é uma equação de equilíbrio mecânico que relaciona dois estados atmosféricos, permitindo o cálculo da tensão mecânica nos condutores de um dado vão, num qualquer estado atmosférico, desde que seja conhecido o seu valor no outro estado atmosférico.

Portanto, conhecendo os valores das temperaturas e dos coeficientes de sobrecarga em ambos os estados atmosféricos, as características dos condutores utilizados e o valor de tensão mecânica num desses estado, como por exemplo, o pior estado atmosférico, pode ser determinada a tensão mecânica no outro estado, neste caso, a tensão mecânica de serviço mínima, verificada para a flecha máxima, no estado de verão.

A expressão da equação dos estados é então:

$$\theta_k + \frac{t_k}{\alpha * E} - \frac{m_k^2 * W_c^2 * L^2}{24 * \alpha * \sigma^2 * t_k^2} = \theta_i + \frac{t_i}{\alpha * E} - \frac{m_i^2 * W_c^2 * L^2}{24 * \alpha * \sigma^2 * t_i^2} \quad (3.9)$$

Em que:

- σ é a secção do condutor, em mm^2 ;
- t_i e t_k são as tensões mecânica de serviço definida aplicada aos condutores nos estados i e k , em daN/mm^2 ;
- L é o comprimento do vão, em m;
- E é o módulo de elasticidade do conduto, em daN/mm^2 ;
- ω é o peso próprio do condutor, em daN/m ;
- α é o coeficiente de dilatação térmica do condutor, em C^{-1} ;
- θ_i e θ_k são as temperaturas do estado i e do estado k , respetivamente, em C ;
- m_i e m_k são os coeficientes de sobrecarga do estado i e do estado k , respetivamente.

3.2.6 Determinação de t_i

Finalmente, após a determinação do pior estado atmosférico para cada cantão, este é comparado ao estado de verão, através da equação dos estados 3.9, determinando assim a tensão mínima de serviço, que corresponde à tensão para a qual se verifica a flecha máxima, para 50°C, no estado de Verão.

Embora a montagem e regulação mecânica dos condutores seja realizada sem a presença de gelo e ausência de vento, que corresponde às características do estado de verão, não é possível prever a temperatura a que a montagem da linha será efetuada.

Desta forma, além de ser determinada a tensão para a temperatura máxima, são também determinadas as tensões de montagem para outras temperaturas, intervaladas de 5°C, que se possam fazer sentir naquele momento.

3.2.7 Determinação do parâmetro da curva e catenária

Determinada t_i , é possível determinar o parâmetro da curva, também designado parâmetro da catenária. Este parâmetro representa geometricamente o raio de curvatura no ponto em que a tangente à curva é horizontal e é representado pela relação entre a força de tração horizontal do condutor e o peso linear do mesmo, como representado na expressão 3.10.

$$p = \frac{\sigma * t_i}{\omega} [m] \quad (3.10)$$

Em que:

- σ é a secção do cabo, em mm^2 ;
- t_i é a tensão mínima verificada, em daN/mm^2 ;
- ω é o peso específico do condutor por unidade de comprimento, em daN/m .

A partir deste valor é possível determinar a catenária. A catenária é a melhor aproximação da curva de equilíbrio feita pelos condutores, entre dois apoios adjacentes e a sua expressão é

$$y = p \left(\cosh \left(\frac{x}{p} \right) - 1 \right) [m]. \quad (3.11)$$

Em que:

- p é o parâmetro da catenária, em m ;
- x é a distância em projeção horizontal entre um ponto da catenária e o ponto horizontal tangente à curva, em m .

Esta expressão é uma aproximação hiperbólica, mais aproximada da realidade, mas que implica cálculos mais complexos. Desta forma, pode ser considerada uma aproximação parabólica, cujo resultado é semelhante ao anterior e que permite simplificar os cálculos. Sendo assim, a aproximação parabólica da equação da catenária é

$$y = \frac{x^2}{2p} [m]. \quad (3.12)$$

3.2.8 Determinação da flecha máxima

Da mesma maneira pode então determinar-se a flecha máxima, para a temperatura máxima, ou a flecha de montagem para outra temperatura. A flecha de um cabo corresponde à distância entre o ponto do condutor onde a tangente é paralela à reta que passa pelos pontos de fixação e

a intersecção da vertical que passa por esse ponto com esta reta, admitindo que o condutor ou o cabo de guarda não são desviados pelo vento.

O cálculo do valor da flecha máxima é crucial, pois permite determinar a distância que se verifica ao solo, de acordo com a altura do apoio.

Este valor considera expressões de cálculo diferentes no caso em que os vãos se encontram em patamar e em situação de desnível. As Figuras 3.3 e 3.4 representam esquemas de um vão em patamar e de um vão desnivelado.

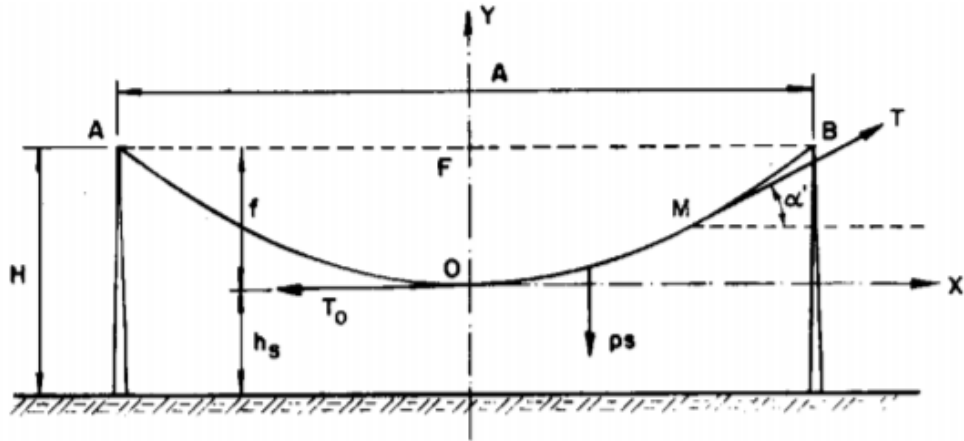


Figura 3.3: Vão de nível [6].

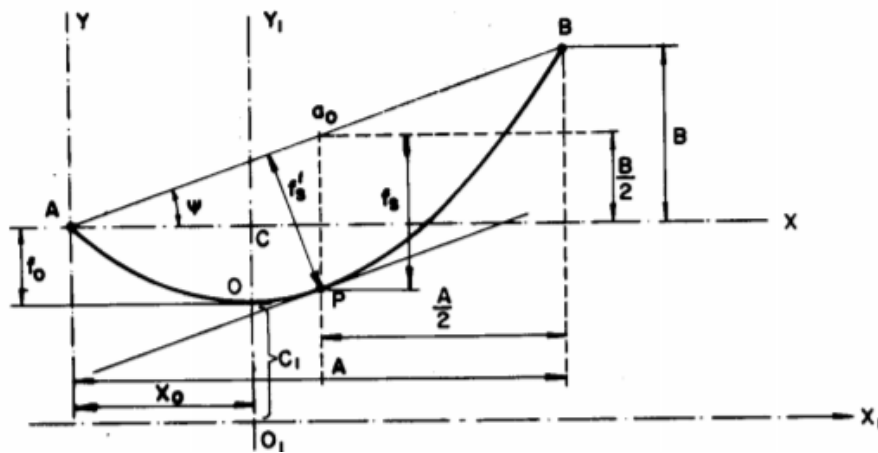


Figura 3.4: Vão de desnível [6].

Num vão em patamar, a flecha é dada por:

$$f = \frac{m * \omega * A^2}{8 * \sigma * l_i} [m]. \tag{3.13}$$

Em que:

- m é o coeficiente de sobrecarga;
- ω é o peso específico do condutor por unidade de comprimento, em daN/m ;
- A é o comprimento do vão, em m ;
- σ é a secção do cabo, em mm^2 ;
- t_i é a tensão mínima verificada, em daN/mm^2 .

Num vão desnivelado, a flecha deve ser calculada de acordo com a expressão 3.14.

$$f = \frac{m * \omega * A^2}{8 * \sigma * t_i} * \frac{1}{\cos(\arctg(B/A))} [m] \quad (3.14)$$

Em que:

- m é o coeficiente de sobrecarga;
- ω é o peso específico do condutor por unidade de comprimento, em daN/m ;
- A é o comprimento do vão, em m ;
- σ é a secção do cabo, em mm^2 ;
- t_i é a tensão mínima verificada, em daN/mm^2 ;
- B é o desnível entre os pontos de fixação do cabo nos apoios que definem o vão, em m .

Estas expressões também consideraram uma aproximação parabólica.

3.2.9 Desvio transversal da cadeia de isoladores

Nas cadeias de isoladores em suspensão, os condutores encontram-se fixos através de um ponto. Por esta razão, estas cadeias possuem alguma liberdade de movimento, podendo oscilar.

Perante este fenómeno, é essencial garantir que os isoladores não se aproximam perigosamente do apoio. Desta forma, calcula-se o desvio que as cadeias sofrem e verifica-se se o ângulo obtido é menor do que 60 graus (valor adotado pela EDP Distribuição).

As cadeias de isoladores estão sujeitas à ação do peso dos próprios isoladores e do cabo, bem como à ação do vento sobre os mesmos, como representado na Figura 3.5.

O desvio transversal, i , é então função da força resultante das forças horizontais e verticais a que está submetida a cadeia. O seu cálculo é dado pela expressão 3.15.

$$i = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{Fv_{cond} + \frac{Fv_{iso}}{2}}{P_{cond} + \frac{P_{iso}}{2}} \right) [grados] \quad (3.15)$$

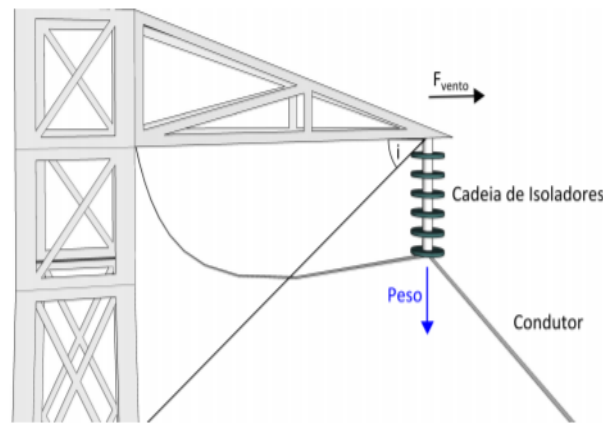


Figura 3.5: Esquema das forças exercidas sobre a cadeia de isoladores[2].

3.2.10 Distâncias regulamentares a cumprir

O RSLEAT prevê um conjunto de distâncias que os condutores de uma linha devem manter a outros elementos da linha ou a obstáculos, de maneira a garantir o funcionamento eficaz dos equipamentos e a evitar acidentes, principalmente com pessoas.

De forma a sintetizar todas as expressões das distâncias regulamentares a cumprir, foi elaborada a Tabela 3.4, na qual se apresentam as expressões sugeridas no Regulamento e as distâncias mínimas recomendadas pela EDP [13].

Nas expressões da tabela:

- U é a tensão nominal da linha, em kV (no caso de duas linhas deve considerar-se a linha de maior tensão);
- k é um coeficiente que depende da natureza dos condutores, cujo valor é 0,6 para cobre, bronze, aço e alumínio-aço;
- f é a flecha máxima dos condutores, em m;
- d é o comprimento das cadeias de isoladores suscetíveis a oscilarem transversalmente à linha, em m;
- h é a altura dos barcos que passam no local medida acima do nível médio das águas, em m;
- L é a distância entre o ponto de cruzamento e o apoio mais próximo da linha, em m.

Também é importante referir que deverá estabelecer-se ao longo das linhas uma faixa de serviço com uma largura de 5 m, dividida ao meio pelo eixo da linha, na qual se efetuará o corte e decote de árvores necessários para tornar possível a sua montagem e conservação. Com vista a garantir a segurança de exploração das linhas e para efeitos de aplicação do número seguinte, a zona de proteção terá a largura máxima de 15 m, para linhas de 2.^a classe. Na zona de proteção

deverá também proceder-se ao corte ou decote das árvores que for suficiente para garantir a distância mínima referida no n.º 1, bem como das árvores que, por queda, não garantam em relação aos condutores, na hipótese de flecha máxima sem sobrecarga de vento, a distância mínima de 1,5 m⁶.

Tabela 3.4: Distâncias regulamentares a cumprir.

Distância mínima	Artigo RSLEAT	Expressão da distância mínima, D [m]	Mínimo recomendado pela EDP [m]
Ao solo	27	$D = 6,0 + 0,005 * U$	7
Às árvores	28	$D = 2,0 + 0,0075 * U$	2,5
A edifícios	29	$D = 3,0 + 0,075 * U$	4
A obstáculos diversos	30	$D = 2,0 + 0,0075 * U$	3
Entre condutores	31	$D = 0,75 * k * \sqrt{f + d} + U/200$	0,54
Entre condutores em repouso e apoios	33	$D = 0,1 + 0,0065 * U$	0,48
Entre condutores desviados pelo vento e apoios	33	$D = 0,0065 * U$	0,48
Às estradas	91	$D = 6,3 + 0,01 * U$	7
A cursos de água não navegáveis	93	$D = 6,0 + 0,005 * U$	7
A cursos de água navegáveis	94	$D = 1,5 + 0,05 * U + h$	2 + h
A teleféricos	95	$D = 3,3 + 0,01 * U$	4
A caminhos de ferro não eletrificados	100	$D = 6,3 + 0,01 * U$	7
A caminhos de ferro com eletrificação prevista	101	$D = 11,0 + 0,01 * U + 0,005 * L$	13,5
A linhas de contacto	102	$D = 1,5 + 0,01 * U + 0,005 * L$	3
Entre duas linhas	109	$D = 2,0 + 0,0075 * U$	2
A linhas de telecomunicações	113	$D = 1,5 + 0,01 * U + 0,005 * L$	2

3.2.11 Estabilidade dos apoios

Num projeto de uma linha aérea, os apoios escolhidos devem suportar todos os esforços solicitados.

Os apoios estão sujeitos aos esforços aplicados pelos condutores, resultado das diferentes trações a eles aplicados, ao peso próprio dos condutores e isoladores e ainda devido à ação do vento sobre os condutores. Estes diferentes esforços, decompõem-se ao longo dos eixos longitudinal, transversal e vertical. Sendo assim, em todos os apoios, devem ser calculados os esforços solicitados em cada uma destas componentes.

⁶Capítulo III, Secção IV, Artigo 28º do RSLEAT

Nesta secção são apresentadas as expressões para o cálculo dos esforços existentes nas três componentes dos apoios de alinhamento, ângulo, reforço em alinhamento e ângulo e apoios fim de linha. Estas expressões provêm da análise do RSLEAT, que para cada tipo de apoio sugere hipóteses de cálculo, que não devem ser consideradas simultaneamente⁷. Estas hipóteses de cálculo admitem que as ações exercidas sobre os apoios podem ser de dois tipos: normais ou excepcionais.

As ações normais referem-se aos esforços que os apoios devem suportar normalmente e que não colocam em causa a sua integridade, mesmo em situações mais desfavoráveis. Estas ações correspondem às hipóteses 1 e 2, exceto para os apoios fim de linha. Por outro lado, as ações excepcionais dizem respeito a situações em que pode ocorrer a rotura de um condutor, que origina uma diferença de tração enorme, podendo resultar em torção no apoio ou até a queda do mesmo. As ações excepcionais correspondem à hipótese 3 nos apoios de reforço, no entanto, o RSLEAT refere que em linhas de 2º classe a verificação desta hipótese é dispensável⁸, pelo que não é calculada neste trabalho. No caso dos apoios de fim de linha, as ações excepcionais são calculadas (hipótese 2 neste caso).

Por fim, para escolher a gama de apoio adequada aos esforços solicitados, devem ainda considerar-se algumas condições, que são apresentadas no final.

3.2.11.1 Apoios de Alinhamento

Na Figura 3.6 encontra-se representado um apoio de alinhamento.

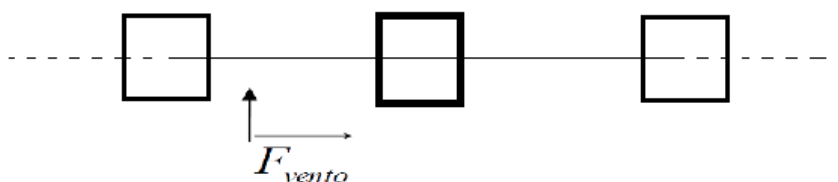


Figura 3.6: Representação de um apoio de alinhamento.

Nos apoios de alinhamento, as forças exercidas são a resultante das trações aplicadas nos condutores dos vãos adjacentes, a força do vento a atuar perpendicularmente sobre os condutores e cadeias de isoladores e o peso dos condutores e isoladores.

A resultante das trações aplicadas nos condutores dos vãos adjacentes é dada por:

$$T_{cond_x} = \sigma * |t_i - t_j| \quad [daN]. \quad (3.16)$$

⁷Capítulo V, Secção II, Artigos 56º a 62º do RSLEAT

⁸Capítulo V, Secção II, Número 3 do Artigo 59º do RSLEAT

Em que:

- σ é a secção do condutor, em mm^2 ;
- t_i é a tensão máxima de serviço a montante do apoio, em daN/mm^2 ;
- t_j é a tensão máxima de serviço a jusante do apoio, em daN/mm^2 .

A força do vento a atuar perpendicularmente sobre os condutores dos vãos adjacentes é dada pela expressão 3.17.

$$F_{v_{condy}} = \alpha * c * q * d * \frac{L_i + L_j}{2} [daN] \quad (3.17)$$

Em que:

- α é o coeficiente de redução;
- c é o coeficiente de forma nos condutores;
- q é a pressão dinâmica do vento na Primavera, em daPa;
- d é o diâmetro do cabo, em m;
- L_i é o comprimento do vão a montante do apoio, em m;
- L_j é o comprimento do vão a jusante do apoio, em m.

A força do vento exercida nos isoladores é dada pelo fabricante. Neste trabalho considera-se um valor típico da força do vento exercida nas cadeias de isoladores de média tensão:

$$F_{v_{iso}} = 12 daN. \quad (3.18)$$

A expressão 3.19 indica o cálculo da ação vertical resultante do peso dos condutores.

$$P_{cond} = \omega * \frac{L_i + L_j}{2} [daN] \quad (3.19)$$

Em que:

- ω é o peso do cabo, em daN/m;
- L_i é o comprimento do vão a montante do apoio, em m;
- L_j é o comprimento do vão a jusante do apoio, em m;

O peso dos isoladores também é dado pelo fabricante, sendo considerado também neste caso um valor comum do peso dos isoladores utilizados em média tensão:

$$P_{iso} = 12 daN. \quad (3.20)$$

A **Hipótese 1** do RSLEAT considera:

A sobrecarga de vento actuando, normalmente à direcção da linha, sobre o apoio, as travessas e os isoladores e sobre os condutores e os cabos de guarda nos dois meios vãos adjacentes ao apoio.

Simultaneamente, a resultante das componentes horizontais das tracções dos condutores e dos cabos de guarda.

Simultaneamente, o peso próprio do apoio, das travessas, dos isoladores, dos condutores e dos cabos de guarda.

Sendo assim, os esforços verificados nas três componentes, resultantes das ações acima indicadas, para a hipótese 1, são dados pelas expressões 3.21 a 3.23.

1. Componente longitudinal

$$F_x = n_{cond} * T_{cond_x} [daN] \quad (3.21)$$

Em que:

- n_{cond} é o número de condutores;
- T_{cond_x} é a tração dos condutores, segundo o eixo longitudinal, em daN.

2. Componente transversal

$$F_y = n_{cond} * F_{v_{cond_y}} + n_{iso} * F_{v_{iso}} [daN] \quad (3.22)$$

Em que:

- n_{cond} é o número de condutores;
- $F_{v_{cond_y}}$ é a força exercida pelo vento sobre os condutores, em daN;
- n_{iso} é o número de isoladores;
- $F_{v_{iso}}$ é a força exercida pelo vento sobre as cadeias de isoladores, em daN.

3. Componente vertical

$$F_z = n_{cond} * P_{cond} + n_{iso} * P_{iso} [daN] \quad (3.23)$$

Em que:

- n_{cond} é o número de condutores;
- P_{cond} é o peso dos condutores, em daN;

- n_{iso} é o número de isoladores;
- P_{iso} é o peso das cadeias de isoladores, em daN.

Por outro lado, a **Hipótese 2** do RSLEAT considera:

A força horizontal, de valor igual a um quinto do da resultante das forças provenientes da acção do vento normal à direcção da linha sobre os condutores e os cabos de guarda nos dois meios vãos adjacentes ao apoio, actuando no eixo do apoio, na direcção da linha, à altura daquela resultante.

Simultaneamente, o peso próprio do apoio, das travessas, dos isoladores, dos condutores e dos cabos de guarda.

Nesta situação, os esforços verificados nas três componentes, para a hipótese 2, são dados pelas expressões 3.24 a 3.26.

1. Componente longitudinal

$$F_x = \frac{1}{5} * n_{cond} * Fv_{cond_y} [daN] \quad (3.24)$$

Em que:

- n_{cond} é o número de condutores;
- Fv_{cond_y} é a força exercida pelo vento sobre um condutor, em daN.

2. Componente transversal

$$F_y = 0 [daN] \quad (3.25)$$

3. Componente vertical

$$F_z = n_{cond} * P_{cond} + n_{iso} * P_{iso} [daN] \quad (3.26)$$

Em que:

- n_{cond} é o número de condutores;
- P_{cond} é o peso do condutor, em daN;
- n_{iso} é o número de isoladores;
- P_{iso} é o peso da cadeia de isoladores, em daN.

3.2.11.2 Apoios de Ângulo

Na Figura 3.7 encontra-se representado um apoio de ângulo, em que β corresponde ao ângulo de desvio da linha e θ representa o ângulo que os condutores fazem com a diretriz da normal à bissetriz do ângulo de desvio da linha, ambos em graus.

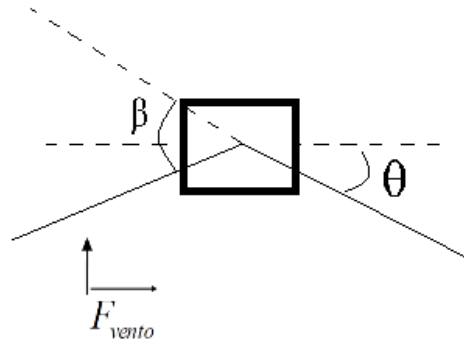


Figura 3.7: Representação de um apoio de ângulo.

Nos apoios de ângulo, as forças exercidas são a resultante das trações aplicadas nos condutores dos vãos adjacentes segundo o eixo longitudinal, mas também uma componente das trações segundo o eixo transversal. As restantes ações são as da força do vento a atuar perpendicularmente sobre os condutores e cadeias de isoladores e o peso dos condutores e isoladores. Estes esforços são dados pelas expressões 3.27 a 3.32.

$$T_{cond_x} = \sigma * |t_i - t_j| * \cos(\theta) [daN] \quad (3.27)$$

Em que:

- σ é a secção do condutor, em mm^2 ;
- t_i é a tensão máxima de serviço a montante do apoio, em daN/mm^2 ;
- t_j é a tensão máxima de serviço a jusante do apoio, em daN/mm^2 .

$$T_{cond_y} = \sigma * |t_i + t_j| * \sin(\theta) [daN] \quad (3.28)$$

Em que:

- σ é a secção do condutor, em mm^2 ;
- t_i é a tensão máxima de serviço a montante do apoio, em daN/mm^2 ;
- t_j é a tensão máxima de serviço a jusante do apoio, em daN/mm^2 .

$$F_{v_{cond_y}} = \alpha * c * q * d * \frac{L_i + L_j}{2} * \cos(\theta)^2 [daN] \quad (3.29)$$

Em que:

- α é o coeficiente de redução;
- c é o coeficiente de forma nos condutores;
- q é a pressão dinâmica do vento na Primavera, em daPa;
- d é o diâmetro do cabo, em m;
- L_i é o comprimento do vão a montante do apoio, em m;
- L_j é o comprimento do vão a jusante do apoio, em m.

$$F_{v_{iso}} = 12 \text{ daN} \quad (3.30)$$

$$P_{cond} = \omega * \frac{L_i + L_j}{2} [\text{daN}] \quad (3.31)$$

Em que:

- ω é o peso do cabo, em daN/m;
- L_i é o comprimento do vão a montante do apoio, em m;
- L_j é o comprimento do vão a jusante do apoio, em m.

$$P_{iso} = 12 \text{ daN} \quad (3.32)$$

A **Hipótese 1** do RSLEAT considera:

A sobrecarga de vento actuando, segundo a direcção da bissectriz do ângulo, sobre o apoio, as travessas e os isoladores e sobre os condutores e os cabos de guarda nos dois meios vãos adjacentes ao apoio.

Simultaneamente, a resultante das componentes horizontais das tracções exercidas pelos condutores e pelos cabos de guarda à temperatura de +15.°C, com vento actuando segundo a direcção da bissectriz do ângulo.

Simultaneamente, o peso próprio do apoio, das travessas, dos isoladores, dos condutores e dos cabos de guarda.

Sendo assim, os esforços verificados nas três componentes, resultantes das ações acima indicadas, para a hipótese 1, são dados pelas expressões 3.33 a 3.35.

1. Componente longitudinal

$$F_x = n_{cond} * T_{cond_x} [\text{daN}] \quad (3.33)$$

Em que:

- n_{cond} é o número de condutores;
- T_{cond_x} é a tração dos condutores, segundo o eixo longitudinal, em daN.

2. Componente transversal

$$F_y = n_{cond} * (Fv_{cond_y} + T_{cond_y}) + n_{iso} * F_{v_{iso}} [daN] \quad (3.34)$$

Em que:

- n_{cond} é o número de condutores;
- Fv_{cond_y} é a força exercida pelo vento sobre os condutores, em daN;
- T_{cond_y} é a tração dos condutores, segundo o eixo transversal, em daN;
- n_{iso} é o número de isoladores;
- $F_{v_{iso}}$ é a força exercida pelo vento sobre as cadeias de isoladores, em daN.

É importante notar que, como nos apoios de ângulo, reforço e fim de linha, as cadeias de isoladores estão em suspensão, deve ser considerado o dobro dos isoladores.

3. Componente vertical

$$F_z = n_{cond} * P_{cond} + n_{iso} * P_{iso} [daN] \quad (3.35)$$

Em que:

- n_{cond} é o número de condutores;
- P_{cond} é o peso dos condutores, em daN;
- n_{iso} é o número de isoladores;
- P_{iso} é o peso das cadeias de isoladores, em daN.

Por outro lado, a **Hipótese 2** do RSLEAT considera:

A força horizontal, de valor igual a um quinto do da resultante das forças provenientes da acção do vento segundo a direcção da bissectriz do ângulo sobre os condutores e os cabos de guarda nos dois meios vãos adjacentes ao apoio, actuando no eixo do apoio, na direcção normal à bissectriz do ângulo, à altura daquela resultante;

Simultaneamente, o peso próprio do apoio, das travessas, dos isoladores, dos condutores e dos cabos de guarda.

Nesta situação, os esforços verificados nas três componentes, para a hipótese 2, são dados pelas expressões 3.36 a 3.38.

1. Componente longitudinal

$$F_x = \frac{1}{5} * n_{cond} * F_{v_{cond_y}} [daN] \quad (3.36)$$

Em que:

- n_{cond} é o número de condutores;
- $F_{v_{cond_y}}$ é a força exercida pelo vento sobre um condutor, em daN.

2. Componente transversal

$$F_y = 0 [daN] \quad (3.37)$$

3. Componente vertical

$$F_z = n_{cond} * P_{cond} + n_{iso} * P_{iso} [daN] \quad (3.38)$$

Em que:

- n_{cond} é o número de condutores;
- P_{cond} é o peso do condutor, em daN;
- n_{iso} é o número de isoladores;
- P_{iso} é o peso da cadeia de isoladores, em daN.

3.2.11.3 Apoios de Reforço em Alinhamento e Ângulo

Nos apoios de reforço em alinhamento ou ângulo, as forças exercidas nos apoios são as mesmas que as que atuam nos apoios de alinhamento ou ângulo. O que difere neste caso são as hipóteses de cálculo. Desta forma, são apresentadas as hipóteses de cálculo 1 e 2 para os dois tipos de apoio, sendo que nos apoios de reforço em alinhamento $\theta = 0 \text{ gr}$. Note-se que para linhas de 3ª classe (AT) deveria ainda ser calculada uma terceira hipótese que considera a possibilidade de rotura de um condutor.

A **Hipótese 1** do RSLEAT considera:

A sobrecarga de vento actuando, segundo a direcção da bissectriz do ângulo, sobre o apoio, as travessas e os isoladores e sobre os condutores e os cabos de guarda nos dois meios vãos adjacentes ao apoio.

Simultaneamente, a resultante das componentes horizontais das tracções exercidas pelos condutores e pelos cabos de guarda à temperatura de +15.°C, com vento actuando segundo a direcção da bissectriz do ângulo.

Simultaneamente, o peso próprio do apoio, das travessas, dos isoladores, dos condutores e dos cabos de guarda.

Sendo assim, os esforços verificados nas três componentes, resultantes das ações acima indicadas, para a hipótese 1, são dados pelas expressões 3.39 a 3.41.

1. Componente longitudinal

$$F_x = n_{cond} * T_{cond_x} [daN] \quad (3.39)$$

Em que:

- n_{cond} é o número de condutores;
- T_{cond_x} é a tração dos condutores, segundo o eixo longitudinal, em daN.

2. Componente transversal

$$F_y = n_{cond} * (Fv_{cond_y} + T_{cond_y}) + n_{iso} * F_{v_{iso}} [daN] \quad (3.40)$$

Em que:

- n_{cond} é o número de condutores;
- Fv_{cond_y} é a força exercida pelo vento sobre os condutores, em daN;
- T_{cond_y} é a tração dos condutores, segundo o eixo transversal, em daN;
- n_{iso} é o número de isoladores, que nesta situação é o dobro do caso anterior por estar em amarração;
- $F_{v_{iso}}$ é a força exercida pelo vento sobre as cadeias de isoladores, em daN.

3. Componente vertical

$$F_z = n_{cond} * P_{cond} + n_{iso} * P_{iso} [daN] \quad (3.41)$$

Em que:

- n_{cond} é o número de condutores;
- P_{cond} é o peso dos condutores, em daN;
- n_{iso} é o número de isoladores;
- P_{iso} é o peso das cadeias de isoladores, em daN.

Por outro lado, a **Hipótese 2** do RSLEAT considera:

A força horizontal, de valor igual a dois terços da soma das componentes horizontais das tracções máximas unilaterais exercidas por todos os condutores e os cabos de guarda, actuando no eixo do apoio, segundo a direcção normal à bissectriz do ângulo, à altura da resultante dessas atracções.

Simultaneamente, o peso próprio do apoio, das travessas, dos isoladores, dos condutores e dos cabos de guarda.

Nesta situação, os esforços verificados nas três componentes, para a hipótese 2, são dados pelas expressões 3.42 a 3.44.

1. Componente longitudinal

$$F_x = \frac{2}{3} * n_{cond} * T_{x_{max}} [daN], \text{ para linhas simples.} \quad (3.42)$$

Em que:

- n_{cond} é o número de condutores;
- $T_{x_{max}}$ é a tração horizontal máxima do condutor, em daN.

2. Componente transversal

$$F_y = 0 [daN] \quad (3.43)$$

3. Componente vertical

$$F_z = n_{cond} * P_{cond} + n_{iso} * P_{iso} [daN] \quad (3.44)$$

Em que:

- n_{cond} é o número de condutores;
- P_{cond} é o peso do condutor, em daN;
- n_{iso} é o número de isoladores;
- P_{iso} é o peso da cadeia de isoladores, em daN.

3.2.11.4 Apoios de Fim de Linha

Na Figura 3.8 encontra-se representado um apoio de fim de linha.

Tal como representado na figura, não se considera a ligação do apoio fim de linha a um pórtico, por exemplo, uma vez que não se considerou que os esforços fossem expressivos para o apoio.

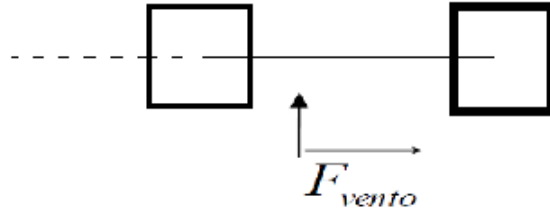


Figura 3.8: Representação de um apoio fim de linha.

Desta forma, as forças exercidas são a tração aplicada nos condutores dos vãos a montante, a força do vento a atuar perpendicularmente sobre os condutores e cadeias de isoladores e o peso dos condutores e isoladores.

$$T_{cond_x} = \sigma * t_i \text{ [daN]} \quad (3.45)$$

Em que:

- σ é a secção do condutor, em mm^2 ;
- t_i é a tensão máxima de serviço a montante do apoio, em daN/mm^2 .

$$Fv_{cond_y} = \alpha * c * q * d * \frac{L_i}{2} \text{ [daN]} \quad (3.46)$$

Em que:

- α é o coeficiente de redução;
- c é o coeficiente de forma nos condutores;
- q é a pressão dinâmica do vento na Primavera, em daPa;
- d é o diâmetro do cabo, em m;
- L_i é o comprimento do vão a montante do apoio, em m.

$$F_{v_{iso}} = 12 \text{ daN.} \quad (3.47)$$

$$P_{cond} = \omega * \frac{L_i}{2} \text{ [daN]} \quad (3.48)$$

Em que:

- ω é o peso do cabo, em daN/m;
- L_i é o comprimento do vão a montante do apoio, em m.

$$P_{iso} = 12 \text{ daN}. \quad (3.49)$$

A **Hipótese 1** do RSLEAT considera:

A sobrecarga de vento actuando, normalmente à direcção da linha, sobre o apoio, as travessas e os isoladores e sobre os condutores e os cabos de guarda no meio vão adjacente ao apoio.

Simultaneamente, a resultante das tracções exercidas pelos condutores e pelos cabos de guarda à temperatura de +15°C, com vento actuando segundo a direcção atrás considerada.

Simultaneamente, o peso próprio do apoio, das travessas, dos isoladores, dos condutores e dos cabos de guarda.

Sendo assim, os esforços verificados nas três componentes, resultantes das acções acima indicadas, para a hipótese 1, são dados pelas expressões 3.50 a 3.52.

1. Componente longitudinal

$$F_x = n_{cond} * T_{cond_x} \text{ [daN]} \quad (3.50)$$

Em que:

- n_{cond} é o número de condutores;
- T_{cond_x} é a tração dos condutores, segundo o eixo longitudinal, em daN.

2. Componente transversal

$$F_y = n_{cond} * F_{v_{cond_y}} + n_{iso} * F_{v_{iso}} \text{ [daN]} \quad (3.51)$$

Em que:

- n_{cond} é o número de condutores;
- $F_{v_{cond_y}}$ é a força exercida pelo vento sobre os condutores, em daN;
- n_{iso} é o número de isoladores;
- $F_{v_{iso}}$ é a força exercida pelo vento sobre as cadeias de isoladores, em daN.

3. Componente vertical

$$F_z = n_{cond} * P_{cond} + n_{iso} * P_{iso} \text{ [daN]} \quad (3.52)$$

Em que:

- n_{cond} é o número de condutores;
- P_{cond} é o peso dos condutores, em daN;
- n_{iso} é o número de isoladores;
- P_{iso} é o peso das cadeias de isoladores, em daN.

Por outro lado, a **Hipótese 2** do RSLEAT considera:

As componentes horizontais das tracções máximas exercidas pelos condutores e pelos cabos de guarda, considerando a rotura de um qualquer dos condutores ou dos cabos de guarda.

Simultaneamente, o peso próprio do apoio, das travessas, dos isoladores, dos condutores e dos cabos de guarda.

Nesta situação, os esforços verificados nas três componentes, para a hipótese 2, são dados pelas expressões 3.53 a 3.55.

1. Componente longitudinal

$$F_x = (n_{cond} - 1) * T_{x_{max}} [daN] \quad (3.53)$$

Em que:

- n_{cond} é o número de condutores;
- $T_{x_{max}}$ é a tração horizontal máxima do condutor, em daN.

2. Componente transversal

$$F_y = 0 [daN] \quad (3.54)$$

3. Componente vertical

$$F_z = n_{cond} * P_{cond} + n_{iso} * P_{iso} [daN] \quad (3.55)$$

Em que:

- n_{cond} é o número de condutores;
- P_{cond} é o peso do condutor, em daN;
- n_{iso} é o número de isoladores;
- P_{iso} é o peso da cadeia de isoladores, em daN.

3.2.11.5 Condições a verificar

Após serem calculados os esforços solicitados aos apoios, é então possível verificar se os apoios escolhidos suportam as solicitações. Em caso negativo, deverá ser escolhido a gama imediatamente superior.

Sendo este processo um processo iterativo, a primeira escolha de apoio a verificar deverá recair por aquele que apresenta menor custo. Uma vez escolhido, as principais condições a verificar são as apresentadas em 3.56 a 3.58.

$$F_{x_{calculado}} < F_{x_{max}} \quad (3.56)$$

$$F_{y_{calculado}} < F_{y_{max}} \quad (3.57)$$

$$F_{z_{calculado}} < F_{z_{max}} \quad (3.58)$$

Nos apoios de betão, deve ainda verificar:

$$\frac{F_{x_{calculado}}}{F_{x_{max}}} + \frac{F_{y_{calculado}}}{F_{y_{max}}} \leq 1 \quad (3.59)$$

E nos apoios metálicos:

$$F_{x_{calculado}} + F_{y_{calculado}} \leq F_{y_{max}} \quad (3.60)$$

Sendo que os valores máximos indicados são os disponibilizados pelos fabricantes, para cada tipo de apoio.

3.3 Síntese e principais conclusões

O cálculo mecânico a realizar na elaboração de um projeto é um processo complexo que permite garantir que são cumpridas as condições técnicas fixadas no RSLEAT.

Atualmente, como estes cálculos são realizados por programas, este processo é facilitado. No entanto, é necessário conhecer as expressões e conceitos por detrás dos resultados obtidos automaticamente, de maneira a que o projetista tenha sensibilidade em relação à sequência do trabalho que deve seguir, bem como conhecer, por exemplo, o que deve ser modificado quando as condições não são cumpridas.

Capítulo 4

Projeto Exemplificativo de uma Linha de 15 kV

4.1 Introdução

No capítulo 3 foram apresentados todos os cálculos mecânicos que são necessários realizar na elaboração de um projeto de uma linha, de maneira a garantir que são cumpridas as condições técnicas estabelecidas no RSLEAT. Uma vez que associados a estes cálculos estão também diversos conceitos e definições, torna-se fundamental realizá-los de uma forma sistemática, com o objetivo de adquirir sensibilidade na elaboração de um projeto.

Sendo assim, neste capítulo apresentam-se os cálculos mecânicos de um projeto exemplificativo de uma linha aérea de 15 kV. Estes cálculos foram realizados através da elaboração de uma folha de cálculo utilizando o Microsoft Office Excel.

Um dos desafios associados ao projeto de uma linha aérea prende-se com a determinação da localização dos apoios. No capítulo seguinte apresenta-se com maior detalhe uma metodologia que permite otimizar o projeto, minimizando o número de apoios e, necessariamente, determinando a sua localização. Neste capítulo porém, por simplicidade de ilustração do conceito a apresentar, consideram-se já definidas as posições dos apoios, apresentadas na Tabela 4.1, bem como as suas funções e ângulos. Na Tabela 4.2 também se indicam as tensões mecânicas de serviço em cada cantão. Além disto, estabelecem-se as seguintes características:

- Tipo de linha: Aérea simples;
- Comprimento da linha: 2525 m;
- Conductor utilizado: Alumínio-aço, 50 mm² (ALACO 50);
- Apoios: Tipo F, com 27 m de altura útil;
- Existência de gelo: Sem gelo;
- Perfil topográfico: Horizontal, isto é, sem desnível.

Tabela 4.1: Dados dos apoios do projeto exemplificativo.

Apoio	Distância à origem [m]	Função	Ângulo [grados]
1	0	Fim de linha	0
2	185	Ângulo	10
3	535	Alinhamento	0
4	785	Alinhamento	0
5	985	Alinhamento	0
6	1220	Alinhamento	0
7	1520	Alinhamento	0
8	1790	Alinhamento	0
9	2125	Alinhamento	0
10	2375	Reforço em Alinhamento	0
11	2525	Fim de linha	0

Tabela 4.2: Dados dos cantões do projeto exemplificativo.

Cantão	Apoios		$t_{serv} [daN/mm^2]$	Comprimento do vão [m]
1	1	2	8	185
2	2	3	9	350
	3	4	9	250
	4	5	9	200
	5	6	9	235
	6	7	9	300
	7	8	9	270
	8	9	9	335
	9	10	9	250
3	10	11	7	150

4.2 Cálculo mecânico

Nesta secção são apresentados os cálculos mecânicos que permitem confirmar se são cumpridas as principais condições a verificar na elaboração de um projeto de uma linha, nomeadamente:

- A distância ao solo e a outros obstáculos;
- A distância entre condutores;
- O ângulo de inclinação das cadeias de isoladores;
- A estabilidade dos apoios de acordo com os esforços solicitados.

Desta forma, realizam-se todos os cálculos necessários para a determinação da flecha máxima, que permite determinar a distância ao solo, e exemplificam-se os restantes cálculos para analisar o cumprimento das condições referidas.

4.2.1 Dados do condutor

Em primeiro lugar, é importante sintetizar os principais dados do condutor em utilização. As características do condutor necessárias para os restantes cálculos apresentam-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Características do condutor.

Caraterísticas do condutor	
Condutor	ALACO50
Secção (σ) [mm^2]	49,48
Diâmetro exterior (d) [mm]	9
Peso próprio (ω) [daN/m]	0,171
Módulo de Young (E) [daN/mm^2]	7940
Coefficiente de dilatação (α_d) [C^{-1}]	$1,9 * 10^{-5}$
Tensão de rotura (T_{rotura}) [daN/m]	1585

4.2.1.1 Tensão mecânica máxima

Embora as tensões mecânicas a aplicar a cada cantão já estejam definidas, pretende-se verificar que os valores admitidos não ultrapassam o valor da tensão máxima admissível.

$$t_{max} = \frac{1585}{49,48 * 2,5} = 12,81 \text{ daN/mm}^2$$

Verifica-se que os valores estabelecidos para as tensões mecânicas de serviço a aplicar em cada cantão, ou seja, a tensão máxima a que os cabos ficam sujeitos nas condições mais desfavoráveis, são inferiores ao valor da tensão máxima admissível pelo condutor.

4.2.2 Ação dos agentes atmosféricos e coeficiente de sobrecarga

Depois de verificar os valores das tensões mecânicas máximas, pretende-se conhecer a ação dos agentes atmosféricos, fundamentais para a determinação dos coeficientes de sobrecarga e dos esforços solicitados aos apoios. Como referido, admite-se que a linha a ser projetada se encontra numa zona sem gelo, pelo que os cálculos não necessitam de incluir a formação de gelo nos cabos. Além disto, considera-se também que os apoios são torres treliçadas com aproximadamente 27m de altura útil e 28,8 m de altura fora do solo. Esta consideração é relevante no que diz respeito ao valor a considerar para a pressão atmosférica do vento. São também determinados os coeficientes de sobrecarga para o inverno e para a primavera, que são essenciais para a determinação do pior estado atmosférico que se verifica na linha.

Posto isto, tendo em conta as características do condutor e a altura dos apoios, sabe-se que:

- $\alpha = 0,6$;
- $c = 1,2$;

- $q = 300 \text{ Pa}$ para vento reduzido e $q = 750 \text{ Pa}$ para vento máximo.

- **Inverno**

$$Fv_{\text{inverno}} = 0,6 * 1,2 * 30 * 9 * 10^{-3} = 0,194 \text{ daN/m}$$

$$m_{\text{inverno}} = \frac{\sqrt{0,171^2 + 0,194^2}}{0,171} = 1,514$$

- **Primavera**

$$Fv_{\text{primavera}} = 0,6 * 1,2 * 75 * 9 * 10^{-3} = 0,486 \text{ daN/m}$$

$$m_{\text{primavera}} = \frac{\sqrt{0,171^2 + 0,486^2}}{0,171} = 3,013$$

4.2.3 Determinação do pior estado atmosférico

Nesta fase dos cálculos, de forma a determinar o pior estado atmosférico, é necessário calcular o vão crítico e o vão equivalente para cada cantão, de acordo com as expressões 3.7 e 3.8.

- **Cantão 1**

$$L_{cr} = \frac{49,48 * 8}{0,171} \sqrt{\frac{24 * 1,9 * 10^{-5} * (15 - (-5))}{3,013^2 * 1,514^2}} = 84,9 \text{ m}$$

Como o cantão 1 é constituído por apenas dois apoios, apresentando apenas um vão, o vão equivalente é igual ao comprimento do cantão.

Portanto,

$$L_{eq} = 185 \text{ m.}$$

- **Cantão 2**

$$L_{cr} = \frac{49,48 * 9}{0,171} \sqrt{\frac{24 * 1,9 * 10^{-5} * (15 - (-5))}{3,013^2 * 1,514^2}} = 95,5 \text{ m}$$

$$L_{eq} = \sqrt{\frac{350^3 + 250^3 + 200^3 + 235^3 + 300^3 + 270^3 + 335^3}{350 + 250 + 200 + 235 + 300 + 270 + 335}} = 286,2 \text{ m}$$

- Cantão 3

$$L_{cr} = \frac{49,48 * 7}{0,171} \sqrt{\frac{24 * 1,9 * 10^{-5} * (15 - (-5))}{3,013^2 * 1,514^2}} = 74,2 \text{ m}$$

O cantão 3 também é constituído por apenas dois apoios, pelo que

$$L_{eq} = 150 \text{ m.}$$

Tendo em conta os valores obtidos, analisa-se a árvore de decisão da Figura 3.2 para cada cantão, determinando assim o estado mais desfavorável.

Para o Cantão 1,

$$\begin{cases} L_{eq} > L_{cr} \Leftrightarrow 185 \text{ m} > 84,9 \text{ m} \\ m_{primavera} > m_{inverno} \Leftrightarrow 3,012 > 1,514 \end{cases} \quad (4.1)$$

O estado mais desfavorável é o da Primavera, portanto, a tração máxima do condutor verifica-se para uma temperatura de 15°C, com um coeficiente de sobrecarga de 3,01.

Para o Cantão 2,

$$\begin{cases} L_{eq} > L_{cr} \Leftrightarrow 286,2 \text{ m} > 95,5 \text{ m} \\ m_{primavera} > m_{inverno} \Leftrightarrow 3,012 > 1,514 \end{cases} \quad (4.2)$$

Novamente, o estado mais desfavorável é o da Primavera e, por isso, a tração máxima do condutor verifica-se para uma temperatura de 15°C, com um coeficiente de sobrecarga de 3,01.

Para o Cantão 3,

$$\begin{cases} L_{eq} > L_{cr} \Leftrightarrow 150 \text{ m} > 74,2 \text{ m} \\ m_{primavera} > m_{inverno} \Leftrightarrow 3,012 > 1,514 \end{cases} \quad (4.3)$$

Logo, também neste caso o estado mais desfavorável é o da Primavera.

4.2.4 Equação dos estados

Um dos objetivos do cálculo mecânico consiste na determinação da flecha máxima de modo a garantir a distância mínima ao solo e a outros obstáculos. Assim, é então necessário calcular a tração mínima que se verifica em cada cantão, que é dada para a temperatura máxima, do estado de Verão (50°C).

Este valor é calculado através da equação dos estados, comparando, neste caso, o estado de Primavera com estado de Verão. Da mesma maneira, pode ser calculada a tensão de montagem, para outras temperaturas possíveis no momento da instalação. Contudo, nesta secção exemplifica-se apenas o cálculo da tensão à temperatura de 50°C, t_{50C} .

Além disto, apresenta-se ainda o parâmetro da curva do condutor para cada cantão.

Para o cálculo da equação dos estados, considerando a expressão 3.9, considera-se para cada cantão:

- $\theta_i = 50 C$;
- $\alpha_d = 1,9 * 10^{-5} C^{-1}$;
- $E = 7940 daN/mm^2$;
- $m_i = 1$;
- $\omega = 0,171 daN/m$;
- $\sigma = 49,48 mm^2$;
- $\theta_k = 15C$.

Sendo assim, para o **cantão 1**, em que:

- $t_k = 8 daN/mm^2$,
- $L = 185m$,

$$t_{50C} = 2,66 daN/mm^2$$

E

$$p_{50C} = \frac{2,66 * 49,48}{0,171} = 769,5 m.$$

Para o **cantão 2**, em que:

- $t_k = 9 daN/mm^2$,
- $L = 286,2m$,

$$t_{50C} = 3,02 daN/mm^2$$

E

$$p_{50C} = \frac{3,02 * 49,48}{0,171} = 872,9 m.$$

Por fim, para o **cantão 3**, em que:

- $t_k = 7 \text{ daN/mm}^2$,
- $L = 150\text{m}$,

$$t_{50C} = 2,28 \text{ daN/mm}^2$$

E

$$p_{50C} = \frac{2,28 * 49,48}{0,171} = 661,1 \text{ m.}$$

4.2.5 Flecha máxima e distância mínima ao solo

Com os valores obtidos é então possível determinar a flecha máxima. Como a flecha deve ser determinada para cada vão e o presente exemplo consiste numa linha com nove vãos, exemplifica-se o cálculo da flecha máxima para o primeiro vão e os restantes resultados estão apresentados na Tabela 4.4.

No estado atmosférico de Verão, caracterizado pela situação em que a flecha será máxima, o coeficiente de sobrecarga é $m=1$.

Em vãos em patamar, a flecha máxima ocorre exatamente a meio vão. Por simplicidade, e sempre que os desníveis entre as cotas dos apoios não são significativos, é usual utilizar-se a aproximação à situação dos vãos em patamar.

Embora existam mais distâncias regulamentares a serem cumpridas, neste exemplo apenas são determinadas a distância mínima ao solo e, na secção seguinte, a distância entre condutores.

Sendo que se trata de um projeto exemplificativo, considera-se que a distância ao solo deve ser a normalmente recomendada pela EDP de 7 m. Deste modo, na Tabela 4.4 também se indicam as distâncias do condutor inferior ao solo verificadas em cada vão. No cálculo desta distância, nos vãos em que as cadeias de isoladores estão em suspensão, considera-se o comprimento da cadeia de suspensão (1 m).

Tabela 4.4: Flechas máximas e distâncias mínimas ao solo para cada vão.

Apoio i	Apoio j	Flecha máxima [m]	Distância ao solo [m]
1	2	5,56	20,99
2	3	17,54	8,01
3	4	8,95	16,60
4	5	5,73	19,82
5	6	7,91	17,64
6	7	12,89	12,66
7	8	10,44	15,11
8	9	16,07	9,48
9	10	8,95	16,60
10	11	4,25	22,30

Por exemplo, no primeiro vão (Apoio 1 a Apoio 2), a flecha é de

$$f_{max} = \frac{1 * 0,171 * 185^2}{8 * 49,48 * 2,66} = 5,56 \text{ m},$$

verificando-se uma distância mínima ao solo de

$$d_{min} = h_{u_{apoio}} - f_{max} = 26,55 - 5,56 = 20,99 \text{ m}.$$

Analisando a Tabela 4.4, é possível confirmar que distância mínima ao solo regulamentar é cumprida em todos os vãos.

4.2.6 Distância entre condutores

Outra distância regulamentar indispensável verificar é a distância entre condutores.

Dado que se escolheram torres treliçadas, do tipo F, as armações respectivas permitem uma distância máxima entre condutores de 2,7 m. Por conseguinte, as distâncias não devem ser inferiores ao valor recomendado pelo RSLEAT nem superior ao permitido pela armação.

Em cada apoio, é calculada a distância entre condutores verificada do lado esquerdo e do lado direito, exceto nos fins de linha, em que a distância apenas é verificada de um dos lados.

Deste modo, exemplifica-se o cálculo das distâncias entre condutores à esquerda e à direita do apoio 2, apresentando-se os restantes valores na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Distâncias entre condutores verificadas em cada apoio.

Apoio	Distância à direita [m]	Distância à esquerda [m]
1	0	1,14
2	1,14	1,96
3	1,96	1,49
4	1,49	1,24
5	1,24	1,42
6	1,42	1,75
7	1,75	1,60
8	1,60	1,93
9	1,93	1,49
10	1,49	1,00
11	1,00	0

À esquerda a flecha é de 5,56 m, portanto,

$$D_{esquerda} = 0,75 * 0,6 * \sqrt{5,56 + 0} + \frac{15}{200} = 1,14 \text{ m}.$$

À direita, a flecha é de 17,54 m, pelo que,

$$D_{direita} = 0,75 * 0,6 * \sqrt{17,54 + 0} + \frac{15}{200} = 1,96 \text{ m}$$

Verifica-se que são cumpridos todos os valores de distâncias entre condutores calculados.

4.2.7 Desvio transversal das cadeias de isoladores

Nesta etapa, pretende-se analisar o desvio transversal das cadeias de isoladores. Esta análise é apenas realizada a cadeias de suspensão, pelo que são calculados os ângulo de inclinação das cadeias dos apoios 3 a 9. Caso o ângulo calculado seja superior a 60 graus, as cadeias de suspensão deverão passar a amarração, dado que neste exemplo se considera que as posições dos apoios na linha já se encontram definidas. Realiza-se então a demonstração do cálculo do ângulo das cadeias do apoio 3.

Em primeiro lugar, é necessário conhecer a ação do vento sobre os condutores e os isoladores, bem como o peso dos mesmos. Assim sendo, foram obtidos os seguintes valores:

$$F_{V_{condy}} = 0,6 * 1,2 * 75 * 9 * 10^{-3} * \frac{350 + 250}{2} = 145,8 \text{ daN}$$

$$F_{V_{iso}} = 12 \text{ daN}$$

$$P_{cond} = 0,171 * \frac{350 + 250}{2} = 51,3 \text{ daN}$$

$$P_{iso} = 12 \text{ daN}$$

Logo,

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{145,8 + \frac{12}{2}}{51,3 + \frac{12}{2}} \right) = 77,02 \text{ gr}$$

Nesta situação, o desvio da cadeia de isoladores é maior que o permitido, pelo que esta cadeia deveria ser alterada para amarração.

Na Tabela 4.6 apresenta-se o resultado do cálculo dos restantes ângulos.

Tabela 4.6: Distâncias entre condutores verificadas em cada apoio.

Apoio	Ângulo de inclinação das cadeias [grados]
3	77,02
4	59,73
5	59,69
6	59,91
7	59,97
8	60,02
9	60,25

Verifica-se que várias cadeias não verificam ou encontram-se próximas do desvio máximo permitido. Este desvio acentuado deve-se principalmente, ao reduzido peso do condutor escolhido, bem como o das cadeias de isoladores. Esta situação não é tão problemática na alta tensão, porque os condutores utilizados são de maior secção e peso e as cadeias geralmente utilizada apresentam o dobro do peso das cadeias utilizadas na média tensão.

4.2.8 Estabilidade dos apoios

Por último, calculam-se os esforços solicitados aos apoios, de forma a escolher a gama adequada que suporte as solicitações. Neste caso, são exemplificados os cálculos dos esforços de um apoio de alinhamento, de um apoio de ângulo, de um apoio de reforço em alinhamento e de um apoio fim de linha, mostrando-se por fim um exemplo de escolha do tipo de apoio apropriado.

4.2.8.1 Exemplo Apoio Alinhamento (Apoio 3)

Sendo que nos apoios de alinhamento as forças exercidas são a resultante das trações aplicados nos condutores dos vãos adjacentes, a força do vento a atuar perpendicularmente sobre os condutores e cadeias de isoladores e o peso dos condutores e isoladores, considerando as expressões 3.16 a 3.20, tem-se:

$$T_{cond_x} = 49,48 * (9 - 9) = 0 \text{ daN}.$$

A demonstração do cálculo da força do vento a atuar sobre os condutores e do peso dos mesmos foi realizada na secção anterior. São ainda assim indicados os resultados obtidos, pois são necessários para o cálculo das duas hipóteses de cálculo.

$$F_{v_{cond_y}} = 145,8 \text{ daN}$$

$$F_{V_{iso}} = 12 \text{ daN}$$

$$P_{cond} = 51,3 \text{ daN}$$

$$P_{iso} = 12 \text{ daN}$$

- **Hipótese 1** (Expressões 3.21 a 3.23)

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

$$F_y = 3 * 145,8 + 3 * 12 = 473,4 \text{ daN}$$

$$F_z = 3 * 51,3 + 3 * 12 = 189,9 \text{ daN}$$

- **Hipótese 2** (Expressões 3.24 a 3.26)

$$F_x = \frac{1}{5} * 3 * 473,4 = 87,48 \text{ daN}$$

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

$$F_z = 3 * 51,3 + 3 * 12 = 189,9 \text{ daN}$$

4.2.8.2 Exemplo Apoio Ângulo (Apoio 2)

Neste caso, o ângulo de desvio da linha é de 10 graus, pelo que o ângulo que os condutores fazem com a diretriz da normal à bissetriz do ângulo de desvio da linha, θ é:

$$\theta = 5 \text{ gr.}$$

Que em radianos é dado por:

$$\theta = 0,079 \text{ rad.}$$

Considerando as expressões 3.27 a 3.32:

$$T_{cond_x} = 49,48 * (9 - 8) * \cos(0,079) = 49,3 \text{ daN}$$

$$T_{cond_y} = 49,48 * (9 + 8) * \sin(0,079) = 66,7 \text{ daN}$$

$$F_{v_{cond_y}} = 0,6 * 1,2 * 75 * 9 * 10^{-3} * \frac{350 + 185}{2} * \cos(0,079)^2 = 129,2 \text{ daN}$$

$$F_{V_{iso}} = 12 \text{ daN}$$

$$P_{cond} = 0,171 * \frac{350 + 185}{2} = 45,7 \text{ daN}$$

$$P_{iso} = 12 \text{ daN}$$

- **Hipótese 1** (Expressões 3.33 a 3.35)

$$F_x = 3 * 49,32 = 147,9 \text{ daN}$$

$$F_y = 3 * (66,7 + 129,2) + 3 * 2 * 12 = 659,6 \text{ daN}$$

$$F_z = 3 * 45,7 + 3 * 2 * 12 = 209,2 \text{ daN}$$

- **Hipótese 2** (Expressões 3.36 a 3.38)

$$F_x = \frac{3 * 129,2}{5} = 77,5 \text{ daN}$$

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

$$F_z = 3 * 45,7 + 3 * 2 * 12 = 209,2 \text{ daN}$$

4.2.8.3 Exemplo Apoio Reforço em Alinhamento (Apoio 10)

No cálculo dos esforços dos apoios de reforço em alinhamento são consideradas as expressões apresentadas na secção 3.2.11.3.

$$T_{cond_x} = 49,48 * (9 - 7) = 98,9 \text{ daN}$$

$$F_{v_{cond_y}} = 0,6 * 1,2 * 75 * 9 * 10^{-3} * \frac{250 + 150}{2} = 97,2 \text{ daN}$$

$$F_{V_{iso}} = 12 \text{ daN}$$

$$P_{cond} = 0,171 * \frac{250 + 150}{2} = 34,2 \text{ daN}$$

$$P_{iso} = 12 \text{ daN}$$

- **Hipótese 1** (Expressões 3.39 a 3.41)

$$F_x = 3 * 98,9 = 296,9 \text{ daN}$$

$$F_y = 3 * 97,2 + 3 * 2 * 12 = 363,6 \text{ daN}$$

$$F_z = 3 * 34,2 + 3 * 2 * 12 = 174,6 \text{ daN}$$

- **Hipótese 2** (Expressões 3.42 a 3.44)

$$F_x = \frac{2}{3} * 3 * 9 * 49,48 = 890,6 \text{ daN}$$

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

$$F_z = 3 * 34,2 + 3 * 2 * 12 = 174,6 \text{ daN}$$

4.2.8.4 Exemplo Apoio Fim de Linha (Apoio 1)

No caso dos apoios fim de linha, as forças exercidas são a tração aplicada nos condutores do vão a montante, a força do vento a atuar perpendicularmente sobre os condutores e cadeias de isoladores e o peso dos condutores e isoladores. Em função disto e considerando as expressões 3.45 a 3.49, tem-se:

$$T_{cond_x} = 49,48 * 8 = 395,8 \text{ daN}$$

$$F_{v_{cond_y}} = 0,6 * 1,2 * 75 * 9 * 10^{-3} * \frac{185}{2} = 45 \text{ daN}$$

$$F_{V_{iso}} = 12 \text{ daN}$$

$$P_{cond} = 0,171 * \frac{185}{2} = 15,8 \text{ daN}$$

$$P_{iso} = 12 \text{ daN}$$

- **Hipótese 1** (Expressões 3.50 a 3.52)

$$F_x = 3 * 395,8 = 1187,5 \text{ daN}$$

$$F_y = 3 * 45 + 3 * 12 = 170,9 \text{ daN}$$

$$F_z = 3 * 15,8 + 3 * 12 = 83,4 \text{ daN}$$

- **Hipótese 2** (Expressões 3.53 a 3.55)

$$F_x = (3 - 1) * 395,8 = 791,7 \text{ daN}$$

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

$$F_z = 3 * 15,8 + 3 * 12 = 83,4 \text{ daN}$$

Na Tabela 4.7 estão representados os resultados dos cálculos dos esforços dos restantes apoios, bem como o apoio escolhido para suportar os esforços solicitados.

Tabela 4.7: Esforços solicitados em cada apoio.

Apoio	Hipótese	Fx [daN]	Fy [daN]	Fz [daN]	Tipo de apoio escolhido
1	1	1188	171	83	F45CM
	2	792	0	83	
2	1	148	658	209	F15CM
	2	78	0	209	
3	1	0	473	190	F15CM
	2	87	0	190	
4	1	0	364	151	F10CM
	2	66	0	151	
5	1	0	353	148	F10CM
	2	63	0	148	
6	1	0	426	173	F15CM
	2	78	0	173	
7	1	0	452	182	F15CM
	2	83	0	182	
8	1	0	477	191	F15CM
	2	88	0	191	
9	1	0	462	186	F15CM
	2	85	0	186	
10	1	297	364	175	F45CM
	2	891	0	175	
	3	198	0	175	
11	1	1039	145	74	F45CM
	2	22	0	74	

A escolha teve em consideração a verificação das condições indicadas em 3.2.11.5 e os esforços máximos dos apoios metálicos, que se encontram no Anexo A.

Em todos os casos, o primeiro passo foi verificar se o apoio F10CM suportava os esforços, uma vez que é o de menor custo. Nos casos em que este apoio não cumpria as condições impostas, era analisado o apoio seguinte, F15CM, e assim sucessivamente, até ao F45CM.

Por exemplo, para o apoio 3, em que a pior hipótese é a 1 e considerando o apoio F10CM, verificou-se que:

$$0 < 45 \text{ daN} - OK$$

$$473 < 900 \text{ daN} - OK$$

$$190 < 1200 \text{ daN} - OK$$

Mas,

$$0 + 473 \leq 75 \text{ daN} - \textit{Falso}$$

Consequentemente, analisou-se o apoio F15CM:

$$0 < 800 \text{ daN} - OK$$

$$473 < 1425 \text{ daN} - OK$$

$$190 < 1200 \text{ daN} - OK$$

$$0 + 473 \leq 800 \text{ daN} - OK$$

Desta maneira, conclui-se que o apoio adequado para o apoio 3 é o F15CM.

4.3 Síntese e principais conclusões

O presente capítulo demonstra uma das primeiras fases do trabalho realizado nesta dissertação, que consistiu em aplicar num exemplo prático os cálculos e os conceitos subjacentes. A experiência adquirida através da realização de todos os cálculos foi fundamental para o progresso da metodologia de otimização apresentada no capítulo seguinte.

A conclusão mais relevante deste capítulo está relacionada com o desvio transversal das cadeias de isoladores. A utilização de condutores de alumínio com alma de aço de secção reduzida, não permite a utilização de apoios em suspensão para vãos extensos, dado a componente de vento sobre os condutores vencer a componente de peso destes.

Portanto, a utilização destes cabos de pequena secção implica a utilização de um maior número de cadeias de isoladores em suspensão ou a consideração de vãos de menor comprimento.

Capítulo 5

Otimização do Projeto e Análise Económica

5.1 Introdução

As linhas aéreas de distribuição de energia são uns dos principais ativos que o operador da rede de distribuição deve projetar, construir e manter ao longo do seu ciclo de vida. Os investimentos no projeto e construção deste tipo de infraestruturas em todo o território nacional representam custos avultados. Nesse sentido, a otimização do projeto poderá revelar-se como um bom caminho para reduzir o esforço de investimento.

Por otimização do projeto entende-se como a determinação da solução com menor custo, mas tecnicamente viável, cumprindo todas as condições impostas pelo RSLEAT. Neste capítulo é então apresentada uma metodologia de otimização de projetos de linhas aéreas de média tensão em zonas florestais.

As linhas alvo de estudo apresentam características muito próprias, dentro das linhas aéreas MT. Tratam-se de linhas inseridas em zonas florestais, caracterizadas, por isso, por elevada e densa vegetação na vizinhança da faixa de proteção. Também se caracterizam por estarem inseridas em perfis montanhosos, com bastantes e acentuados declives. Desta forma, embora o processo de otimização apresentado tenha uma abordagem essencialmente económica, procura-se também encontrar uma solução que atenda a questões técnicas relacionadas com estas características da linha.

Uma vez que os apoios são os componentes das linhas que representam o maior investimento, considerou-se como principal objetivo da otimização reduzir o número de apoios utilizados. Tendo isto em vista, foi elaborada uma metodologia que foi obtida a partir de uma aprendizagem recursiva manual, baseada no conceito de *machine learning*, isto é, através de diversas iterações e projetos realizados inicialmente com uma base fundamentalmente empírica, foram reconhecidos alguns padrões, que permitiram convergir para a estratégia de otimização.

Como os apoios metálicos apresentam um custo e características diferentes dos apoios de betão, apresenta-se uma metodologia para cada tipo de apoio, que embora sejam semelhantes

no seu raciocínio, incluem alguns detalhes diferentes. As soluções estudadas consideram sempre a utilização de apenas um dos tipos de apoios.

Assim, é também realizado um estudo técnico-económico, no qual se compara a utilização de apoios metálicos e de apoios de betão, analisando os custos das soluções otimizadas e as vantagens e desvantagens das duas opções.

Para realizar os diferentes projetos foi utilizado o programa CLinhas, que permite otimizar o tempo que o projetista demora a elaborar o projeto.

5.2 Desafios da otimização

Sendo que a otimização de um projeto se traduz em minimizar o número de apoios, importa determinar a máxima distância entre os postes, o que equivale a determinar a melhor posição do apoio na linha, o mais afastado possível do apoio anterior. Contudo, este processo é desafiante, porque é necessário que todas as seguintes condições sejam sempre cumpridas:

- A distância ao solo e a outros obstáculos;
- A distância entre condutores;
- O ângulo de inclinação das cadeias de isoladores (<60gr);
- A estabilidade dos apoios.

As características que definem as linhas de média tensão em zonas florestais também influenciam a otimização do projeto.

Em primeiro lugar, as linhas MT possuem diversos "vértices" ao longo da linha. Estes vértices consistem em apoios de ângulo e de derivação, que são obrigatoriamente colocados na posição determinada pelo desenhador. Este aspeto pode ser bastante limitador, porque pode considerar-se que estes apoios são obstáculos na tentativa de aumentar o máximo possível o comprimento dos vãos.

Além disto, as zonas florestais podem apresentar grandes declives no perfil topográfico, que também limitam consideravelmente o comprimento dos vãos, devido principalmente à restrição da distância ao solo.

Dado ainda que as zonas florestais se caracterizam por uma considerável vegetação, foi estabelecido que a distância mínima ao solo deve ser de 10 m, em vez dos 7 m definidos pelo RSLEAT como distância mínima a cumprir.

Esta consideração tem por base aquilo que se consideram ser boas práticas para a construção de linhas aéreas, atendendo ao ciclo de vida da linha. No caso particular destas linhas, situadas em zonas florestais, esta medida constitui um fator de segurança às mesmas, na medida em que em caso de incêndio florestal, os condutores possam ser menos afetados pelo efeito da temperatura elevada provocada pelo incêndio.

No entanto, não é apenas a distância ao solo que limita consideravelmente o vão máximo, mas também a distância entre condutores, nas circunstâncias em este valor é maior que o permitido

pela armação. O comprimento máximo de um vão pode ser determinado analiticamente tendo em conta estas distâncias a cumprir, porém, esta questão apenas é abordada na secção seguinte, porque outro ponto importante na otimização de um projeto são os elementos que mais encarecem a linha.

Embora os apoios sejam, de facto, o elemento mais significativo em termos de custos, existem outros componentes das linhas cujo preço pode influenciar o objetivo de alcançar a solução mais económica.

Por exemplo, deve procurar-se colocar, sempre que possível, cadeias de isoladores em suspensão, uma vez que utilizam metade dos isoladores das cadeias em amarração. Contudo, esta escolha não é prioritária, visto que o impacto do custo das cadeias de isoladores é menor que o dos apoios e porque como estas cadeias oscilam consideravelmente (4.2.7), não permitem vãos grandes, que na generalidade das vezes não é o que se pretende.

Além disto, também as armações a utilizar nos postes de betão têm preços diferentes. As soluções mais económicas são as TAL e TAN. Todavia, a escolha da armação também influencia o comprimento máximo que um vão pode ter, uma vez que as GAN e GAL permitem maiores distâncias entre condutores, enquanto que as TAN e TAL permitem maiores distâncias ao solo (2.3.2).

Relativamente aos apoios, os que têm menor altura são os mais baratos, assim como os que suportam menos esforços. Por este motivo são estes os escolhidos sempre que possível.

5.3 Determinação analítica dos vãos máximos

Visto que o comprimento máximo que um vão pode ter, que é muitas vezes referido neste trabalho como vão máximo, pode ser influenciado tanto pela distância ao solo como pela distância entre condutores, é conveniente determinar o seu valor tendo em conta cada uma destas limitações.

5.3.1 Vãos limitados pela distância entre condutores

Em primeiro lugar, é necessário recordar que existe a possibilidade de os condutores se aproximarem perigosamente devido às oscilações provocadas pelo vento. Desta forma, não se deve observar uma distância D inferior à dada pela expressão

$$D = 0,75k\sqrt{f+d} + \frac{U}{200} [m]. \quad (5.1)$$

Em que:

- f é a flecha máxima dos condutores, em m;
- d é o comprimento das cadeias de isoladores suscetíveis de oscilarem transversalmente à linha, em m;
- U é a tensão nominal da linha, em kV;

- k é um coeficiente da natureza dos condutores, que é 0,6 para os cabos de alumínio-aço, utilizados neste estudo.

No entanto, a distância entre condutores também não pode ser superior ao afastamento permitido pela armação utilizada num apoio. Por isso, se for considerado o maior afastamento dos condutores permitido por uma determinada armação, é possível obter a flecha máxima, reajustando a expressão 5.1. Deste modo, a flecha máxima é dada por

$$f = \left(\frac{D - \frac{U}{200}}{0,75k} \right)^2 - d \text{ [m]}. \quad (5.2)$$

Para o cálculo desta flecha, devem considerar-se cadeias de isoladores em amarração ($d = 0$ m), uma vez que permitem que o vão seja maior.

Assim, sabendo que a flecha máxima também é dada por

$$f = \frac{m * w * L^2}{8 * \sigma * t_i} \text{ [m]}, \quad (5.3)$$

é possível determinar o vão máximo, que é dado pela expressão 5.4.

$$L_{max} = \sqrt{\frac{8 * \sigma * t_i * f_{max}}{m * \omega}} \text{ [m]} \quad (5.4)$$

Determina-se o maior comprimento do vão considerando

- $m = I$, o coeficiente de sobrecarga para o estado de verão;
- o peso (ω) do cabo em utilização, em daN/m ;
- a secção do cabo (σ) em utilização, em mm^2 ;
- a tração mínima (t_i) obtida a partir da equação dos estados, em daN/mm^2 .

Tendo em conta estas expressões, é então possível determinar os comprimentos máximos dos vãos, para diferentes armações e trações.

Sendo que se considera a utilização do cabo ALACO50, sabe-se que a sua tensão máxima admissível é de $12,81 daN/mm^2$ (que corresponde a 40% da tensão de rotura do condutor). Posto isto, os valores dos vãos máximos foram calculados para tensões mecânicas de serviço entre 7 e $12 daN/mm^2$ (ou seja, entre aproximadamente 22% e 38% da tensão de rotura).

Sendo assim, nas tabelas 5.1 e 5.2 encontram-se os vãos máximos possíveis atendendo à distância entre condutores, para as armações utilizadas nos postes MT metálicos e para as GAN e GAL, dos postes de betão, que são as relevantes para este estudo. Os vãos máximos permitidos pelas TAN e TAL, cujas distâncias entre condutores são ligeiramente inferiores encontram-se no Anexo B.

Quanto às torres treliçadas, foram determinados os vãos máximos para as armações F10CM, F15CM e F30CM, uma vez que correspondem às armações dos apoios mais vezes utilizados. A

armação do apoio F45CM permite vãos ligeiramente maiores. Neste caso das torres treliçadas, é importante ter em conta que estas têm alturas úteis de aproximadamente 27, 30 e 33 m. Deste modo, os valores dos vãos calculados são diferentes para alturas fora do solo superior a 30 m, visto que a pressão dinâmica do vento aumenta de 750 Pa para 900 Pa.

Relativamente às armações utilizadas nos apoios de betão, os resultados dos vãos máximos apenas consideram a pressão dinâmica de 750 Pa, porque os apoios de betão têm todos alturas foras do solo inferiores a 30 m.

Tabela 5.1: Vãos máximos limitados pela distância entre condutores, considerando armações F10CM, F15CM e F30CM.

Armação	Distância entre condutores [m]	Flecha máxima [m]	t_{serv} [daN/mm^2]	Altura do apoio acima do solo [m]	Vão máximo [m]
F10CM F15CM F30CM	2,70	34,03	7	< 30	426
				\geq 30	393
			8	< 30	458
				\geq 30	422
			9	< 30	486
				\geq 30	448
			10	< 30	514
				\geq 30	470
			11	< 30	543
				\geq 30	498
			12	< 30	565
				\geq 30	521

Tabela 5.2: Vãos máximos limitados pela distância entre condutores, considerando armações GAN e GAL.

Armação	Distância entre condutores [m]	Flecha máxima [m]	t_{serv} [daN/mm^2]	Vão máximo [m]
GAN/GAL	2,21	22,53	7	347
			8	372
			9	395
			10	418
			11	442
			12	459

Confirma-se que os apoios metálicos permitem obter vãos consideravelmente superiores aos vãos permitidos pela GAN/GAL.

Embora esta determinação analítica considere as expressões matemáticas em que os apoios se encontram em patamar, verificou-se pela experiência que é válido da mesma forma em situações

que o desnível não é acentuado.

Portanto, esta abordagem matemática torna-se útil para prever os vãos máximos que se podem considerar num projeto de uma linha. Contudo, constata-se que as flechas obtidas nestes vãos máximos são muito grandes, difíceis de obter na maioria das situações, uma vez que a altura dos apoios não é suficiente para garantir os 10 m de distância ao solo.

À vista disto, é então relevante determinar os vãos máximos que se pode obter se for considerada a restrição da distância ao solo.

5.3.2 Vãos limitados pela distância ao solo

Os vãos máximos obtidos considerando a distância ao solo são mais realistas, dado que, por exemplo, para uma flecha máxima de 22,53 m para apoios de betão com armações GAN, a altura útil do apoio teria de ser, no mínimo, de 32,53 m. Porém, o apoio de betão com maior altura útil utilizando a armação GAN é de 23,5m. Frequentemente, devido ao perfil da linha, não é possível atingir o vão máximo permitido pela armação, independentemente da tração.

Deste modo, considerando que a flecha máxima é dada por

$$f_{max} = h_{u_{apoio}} - 10 [m] \quad (5.5)$$

E calculando novamente o vão máximo considerando a expressão 5.4, é possível determinar os comprimentos máximos dos vãos para as mesmas tensões mecânicas de serviço e para as diferentes alturas úteis dos apoios.

Em relação aos apoios metálicos, embora se indiquem as alturas indicadas nos nomes dos apoios, é conveniente referir que este valor é aproximado. Por exemplo, para o apoio F10CM/27, a altura útil é de 26,55m. Nos cálculos é considerado o valor exato. A Tabela 5.3 apresenta então os valores dos vãos máximos, dados em metros, para as diferentes alturas úteis dos apoios metálicos, considerando diferentes tensões mecânicas de serviço.

Tabela 5.3: Vãos máximos de apoios metálicos limitados pela distância ao solo, em metros.

Altura útil do apoio [m]	tserv [<i>daN/mm</i> ²]					
	7	8	9	10	11	12
21	237	237	271	286	303	314
27	297	297	339	358	379	397
30	298	320	340	356	378	395
33	320	344	365	382	405	424

Também no caso dos apoios de betão, de forma a ser mais intuitivo, indica-se na tabela a altura do apoio presente no seu nome, que neste caso é a altura total. Por exemplo, para o apoio AP02-1200/410-22, a altura total do apoio são os 22m, que é o valor que se encontra na tabela.

Na Tabela 5.4, para o cálculo do vão máximo limitado pela distância ao solo, foi admitida a altura útil do apoio considerando a armação TAN/TAL, que no grupo das armações para os

postes de betão, é a que permite uma maior altura do condutor inferior ao solo. Porém, também foram calculados os vãos máximos limitados pela distância ao solo, quando se utiliza a armação GAN/GAL, que se encontram no Anexo B.

Embora alguns apoios apresentem alturas fora do solo ligeiramente diferentes, apresenta-se a determinação dos vãos máximos apenas para apoios do tipo AP02-1200/410, porque as diferenças das suas alturas úteis para os restantes apoios não são significativas.

Tabela 5.4: Vãos máximos de apoios de betão limitados pela distância ao solo, em metros.

Altura total [m]	tserv [daN/mm^2]					
	7	8	9	10	11	12
14	50	54	57	60	64	66
16	115	123	131	138	146	152
18	154	166	176	186	197	205
20	187	201	214	226	239	248
22	214	230	244	258	273	283
24	237	255	271	286	303	315
26	257	276	293	310	328	341
28	277	297	316	334	353	367

O comprimento dos vãos máximos calculados, cuja limitação é a distância ao solo, é menor, contudo, são mais realistas, porque na prática são mais as situações em que a distância ao solo é a condição limitadora.

Embora seja útil, esta é uma abordagem matemática que é válida apenas em casos em que o perfil topográfico não apresenta declives, isto é, em patamar. A topografia e os vértices da linha introduzem distorções a esta solução teórica, não sendo muitas vezes possível colocar apoios com estas distâncias entre eles. Portanto, é fundamental elaborar uma abordagem mais prática, que seja aplicável em diferentes situações reais.

5.4 Aprendizagem recursiva

A aprendizagem recursiva realizada consistiu, essencialmente, em elaborar numa primeira fase uma metodologia simplificada, para a partir desta realizar inúmeros testes, alterando determinados parâmetros e verificando quais as alternativas que permitiam reduzir o custo da solução, tendo como prioridade reduzir o número de apoios.

Para este fim, foram estudadas dois casos de estudo: duas linhas com características distintas, sendo uma linha na Pampilhosa e uma linha em Romão. São ambas linhas simples, de 15 kV, que consideram a utilização do condutor ALACO50. Os seus perfis (e as soluções otimizadas elaboradas) encontram-se nos Anexos D a G.

A linha da Pampilhosa tem as seguintes características:

- Comprimento: 4217 m;
- 2 apoios de derivação e 1 apoio em ângulo (Tabela 5.5);
- Desnível médio entre dois apoios consecutivos: 46,5 m;
- Desnível máximo entre dois apoios consecutivos: 100 m;
- Além destes desníveis, o perfil topográfico tem bastantes vales.

Tabela 5.5: Apoios de ângulo e derivação da linha da Pampilhosa.

Distância à origem [m]	Ângulo [grados]
646,34	-
2561	-
3848,35	374, 78

A linha em Romão caracteriza-se por:

- Comprimento: 5323 m;
- 8 apoios em ângulo (Tabela 5.6);
- Desnível médio entre dois apoios consecutivos: 14,4 m;
- Desnível máximo entre dois apoios consecutivos: 64,2 m.

Tabela 5.6: Apoios de ângulo e derivação da linha em Romão.

Distância à origem [m]	Ângulo [grados]
188,74	0,84
1048,07	4,05
1358,08	5,13
2051,65	1,53
3408,92	2,36
3628,51	1,05
3989,40	24,33
4601,32	0,95

Sabe-se que para iniciar um projeto é necessário estabelecer alguns parâmetros de forma a realizar os cálculos mecânicos e perceber se são cumpridas as principais condições (distância ao solo e entre condutores, desvio transversal das cadeias de isoladores e o ângulo de fixação dos condutores). As especificações a fazer incluem o tipo (ou gama) dos apoios, bem como a sua altura e a tensão mecânica de serviço para cada cantão.

Sendo o objetivo reduzir custos, para iniciar o projeto escolheram-se os apoios de menor custo e adequados às linhas de média tensão.

Relativamente aos apoios metálicos foram escolhidos os F10CM/27, que são os que apresentam menor altura e os que suportam menos esforços.

Quanto aos apoios de betão, não foram considerados os apoios de gama MP00-400/220 nem MP00-600/260, embora correspondam aos apoios de menor custo. Inicialmente, são considerados apoios MP01-800/320, que são apoios mais robustos. Esta consideração é assumida pela EDP como forma de assegurar a expansibilidade da rede MT, sempre sujeita ao surgimento de novas derivações nos apoios existentes. Além disto, como se pretende obter uma distância mínima ao solo de 10 m, determinou-se que seriam usados apoios de 18 m de altura total. Note-se que, por exemplo, com uma armação GAN, estes apoios têm apenas 13,7 m de altura útil.

No que diz respeito à tensão mecânica de serviço, foi estabelecido que inicialmente esta deve ser de 9 daN/mm^2 , que corresponde a aproximadamente 28% da tensão de rotura do condutor ALACO50. Além disto, admite-se um aumento deste valor para 12 daN/mm^2 .

Estas primeiras soluções foram realizadas diversas vezes de forma a perceber qual a melhor estratégia a seguir. Para estes parâmetros de altura e tração, foram então obtidas duas soluções que empregam o menor número possível de apoios.

Nos dois casos, a restrição dominante foi a distância ao solo, tendo sido um grande obstáculo principalmente na linha da Pampilhosa, em que os desníveis são muito acentuados. A distância ao solo limitou o comprimento dos vãos nas situações em que o perfil topográfico apresenta um vale com comprimento superior ao vão máximo calculado limitado pela distância entre condutores, uma vez que nesta situação existe a possibilidade de as flechas poderem ser grandes.

As duas soluções respeitam outras condições técnicas recomendadas pelo RSLEAT, como, por exemplo, a colocação de apoios de reforços a cada 15 apoios colocados.

Como era presumível, não foram apenas utilizados apoios F10CM e MP01-800/320. Nos apoios fim de linha, ângulo e reforço foram empregues apoios de gamas superiores.

Além disto, tentou-se incluir o maior número de cadeias de suspensão possível e, no caso dos apoios de betão, foram utilizadas as TAN e TAL o maior número de vezes, por apresentarem um custo menor.

Os custos obtidos para estas soluções bases encontram-se na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Custos das soluções base.

Caso de estudo	Tipo de apoios	Número de apoios	Custo [€]
Pampilhosa	Metálicos	18	90 463,52
	Betão	34	56 334,26
Romão	Metálicos	23	108 512,66
	Betão	37	62 451,62

Verificam-se diferenças consideráveis entre o custo das soluções que utilizam postes metálicos e as soluções que utilizam postes de betão, contudo, a análise a esta disparidade de valores é analisada na secção 5.6.

No que se refere ao número de apoios utilizados, existem dois parâmetros que permitem aumentar o comprimento dos vãos e assim diminuir o seu número, nomeadamente:

- A tração;
- A altura dos apoios.

Tendo isto em mente, e mantendo a posição dos apoios obrigatórios, testou-se a influência do aumento da tração e do aumento da altura dos apoios nestas soluções iniciais obtidas.

Portanto, nesta fase da aprendizagem, decidiu-se manipular estes dois parâmetros que permitem aumentar o comprimento dos vãos, de forma a verificar a possibilidade de diminuir o número de apoios. Com os resultados obtidos, foram tiradas algumas conclusões, que permitiram ir polindo e aperfeiçoando a solução base, convergindo, por fim, numa metodologia otimizada.

5.4.1 Aumento da tensão mecânica de serviço

A análise da linha foi feita por etapas, analisando os cantões criados pelos vértices. Assim, em cada cantão a tensão mecânica de serviço foi aumentada gradualmente e foram analisadas em que situações este aumento permitia reduzir o número de apoios e para que valor esta deveria ser aumentada. Estes testes foram realizados nas quatro soluções obtidas na secção anterior.

Verificou-se que em diversas situações o aumento da tensão mecânica de serviço era claramente satisfatório, uma vez que como permite diminuir a flecha e, conseqüentemente, a distância entre condutores, sendo por isso possível aumentar o comprimento dos vãos.

As vantagens desta solução são, desta forma, os maiores vãos e o facto de nos apoios de alinhamento, o aumento da tração não ter influência.

Por outro lado, estão também associadas algumas desvantagens em relação a este aumento. Nos apoios em que a diferença de tração nos vãos adjacente é considerável, mesmo que o apoio utilizado suporte os esforços da diferença de tração, é boa prática que o apoio seja de reforço, que são apoios mais caros.

Além disto, como o comprimento dos vãos aumenta, o ângulo de inclinação das cadeias é maior, não sendo por vezes verificado o limite do desvio transversal permitido, o que resulta na necessidade de utilizar mais amarrações.

Ainda que com alguns inconvenientes, as soluções obtidas com o aumento da tensão mecânica de serviço em alguns cantões estavam otimizadas em relação às anteriores e os resultados foram os apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Custo das soluções otimizadas.

Caso de estudo	Tipo de apoios	Número de apoios	Custo [€]
Pampilhosa	Metálicos	17	86 478,55
	Betão	32	53 514,22
Romão	Metálicos	18	96 291,44
	Betão	30	54 190,33

5.4.2 Aumento da altura

Da mesma forma que foram feitos os ensaios do aumento da tração, analisaram-se as alterações que o aumento da altura dos apoios pode causar no projeto.

Neste caso, conclui-se que são mais os inconvenientes de aumentar a altura dos apoios do que as vantagens.

O principal benefício do aumento da altura é o facto de resultar numa maior distância ao solo, e, conseqüentemente, em vãos maiores.

No entanto, no caso da solução que inclui apoios metálicos, o aumento da sua altura também se traduz num aumento da pressão dinâmica do vento. Este aumento tem como consequência uma maior solicitação nos apoios, que em várias situações implica um aumento da gama do apoio, devido ao incremento dos esforços solicitados.

Relativamente a soluções com apoios de betão, embora a questão da pressão dinâmica do vento não fosse uma adversidade, nos casos estudados concluiu-se que, embora o número de apoios fosse reduzido, a diferença não era suficiente para compensar o aumento da altura dos restantes apoios, o que resultava numa solução com um custo superior.

Além disto, no caso da linha da Pampilhosa, cujo perfil apresenta desníveis muito acentuados, não é recomendada a utilização de apoios com altura total superior a 18 m, devido à grande dificuldade em transportar os apoios para locais íngremes.

Esta medida também resulta num maior número de cadeias em amarração.

5.4.3 Principais conclusões dos testes dos casos de estudo

Após todos os testes realizados foi possível concluir que a variável de controlo mais adequada para aumentar o comprimento dos vãos é a tração.

Esta conclusão foi obtida após se ter determinado uma solução base e se ter aumentado a tração gradualmente de maneira a analisar que valores permitiam diminuir o número de apoios. No entanto, noutros projetos, não se conhece o número de apoios que é necessário colocar, nem os comprimentos que os vãos podem ter, uma vez que as topografias são muito diferentes. Existe então uma dificuldade acrescida na escolha do valor da tensão mecânica de serviço a considerar para um cantão. Note-se que neste trabalho, os cantões estudados são os criados pelos vértices da linha. Os estudos realizados permitiram concluir que, nos cantões dos apoios fim de linha, a tensão mecânica de serviço não deverá ser maior que 9 daN/mm^2 , de maneira a não solicitar demasiado estes apoios.

Verificou-se também que se o cantão não possuir desníveis superiores a aproximadamente 15 m, ou seja, se o perfil estiver quase em patamar, na maioria dos casos era compensatório um aumento de tração considerável, nomeadamente para 12 daN/mm^2 . Embora este valor esteja perto do limite da tensão máxima admissível, ainda cumpre o recomendado pelo regulamento.

Sendo assim, quando num projeto o cantão não possuir grandes desníveis pode ser admitido este valor de tensão mecânica de serviço.

Também se concluiu que em algumas situações particulares do perfil verifica-se à partida que é necessário colocar um apoio. Por exemplo, admita-se o caso em que num cantão existem vales, em que de cada um dos lados a cota é claramente superior, formando cumes, como representado na Figura presente no Anexo C. Nestes casos, por experiência, verifica-se que é necessário colocar um apoio neste cume, caso contrário, não será cumprida a distância ao solo. Admitindo então a colocação de um apoio nos cumes, uma vez que entre eles a flecha pode ser considerável, a condição que limita o comprimento do vão é a distância entre condutores.

Então, nestes casos, deve determinar-se o comprimento do eventual vão ou vãos e, tendo em conta os valores dos vãos máximos obtidos limitados pela distância entre condutores, verificar qual o valor de tensão adequado que permite cumprir esta restrição naquele cantão.

Relativamente ao aumento da altura dos apoios, apesar não ter sido recomendado como boa solução para minimizar o número de apoios numa linha, existe uma situação em particular em que isto não se verifica. Se num determinado cantão em análise não for cumprida a distância ao solo, porém se o aumento da altura garantir que se passa a verificar esta condição, é mais vantajoso aumentar a altura do apoio do que colocar mais um.

Nesta situação, que nunca aconteceu nos estudos realizados, deve verificar-se, em primeiro lugar se o aumento da altura de apenas um dos apoios é suficiente para fazer cumprir a distância mínima ao solo. No caso de o vão ser em desnível, deve aumentar-se a altura do apoio com cota inferior. Em último caso, deve aumentar-se a altura dos dois apoios gradualmente, até ser verificada a distância mínima ao solo.

5.5 Metodologia de otimização

A presente secção foca-se na metodologia elaborada de otimização de projetos de linhas aéreas MT em zonas florestais. Embora o raciocínio possa ser aplicável a linhas com características diferentes, os parâmetros como a altura dos apoios e a tensão mecânica de serviço sugeridos são válidos para linhas com particularidades semelhantes às linhas estudadas.

Nesta metodologia foram condensadas as estratégias que tiveram êxito no que diz respeito a reduzir o número de apoios e, assim, minimizar o custo da linha.

Concluiu-se que a estratégia utilizada para projetos que utilizam apoios de betão e para os que consideram apoios metálicos é muito semelhante, sendo o rumo a seguir ao longo do projeto bastante próximo, mas como existem algumas particularidades diferentes, os fluxogramas da metodologia para cada tipo de apoio são apresentados separadamente. Em primeiro lugar apresentam-se os fluxogramas relacionados com a metodologia de otimização de um projeto que utiliza apoios metálicos. Em seguida, complementa-se o raciocínio deste algoritmo com as alterações que devem ser feitas no caso da utilização de apoios de betão.

5.5.1 Apoios metálicos

5.5.1.1 Início do projeto

A parte inicial do projeto deve seguir os passos indicados no fluxograma da Figura 5.1.

O primeiro passo na elaboração de um projeto de uma linha aérea é colocar os apoios obrigatórios, nomeadamente os apoios fim de linha e os apoios de ângulo e derivação, sabendo que a localização deste apoios é definida previamente.

Deste modo, considerando n vértices (incluindo apoios fim de linha), estão definidos $n-1$ cantões. De modo a facilitar a análise e execução do algoritmo, estabeleceu-se que a elaboração do projeto é dividida por estes cantões criados pelos vértices.

Assim, a metodologia apresentada é repetida cantão a cantão, até todos os cantões terem sido analisados e otimizados.

Em primeiro lugar admite-se que deve ser aplicada a solução mais económica, ou seja, apoios F10CM, de 27 m de altura útil e a tensão mecânica de serviço de 9 daN/mm^2 e inicia-se, desta forma, a análise a cada cantão.

A situação em análise consiste em dois apoios cuja localização é inalterável. Então, primeiramente, calculam-se os valores das distâncias ao solo e entre condutores, de maneira a verificar se estas condições são cumpridas ou se é necessário colocar um novo apoio. Como as cadeias estão em amarração não é necessário calcular o desvio transversal das cadeias.

Obtidos os valores destas distâncias, verifica-se a necessidade de colocar novo apoio.

Neste caso, a experiência do projetista é útil, sendo possível concluir isto logo à partida, a partir do desenho da linha. Caso a distância entre os dois apoios analisados seja enorme, são obtidas flechas desmedidas, havendo a possibilidade de o condutor estar a tocar no solo. Neste caso, é imediata a dedução de que é necessário colocar pelo menos um apoio entre os vértices. Estas são as situações em que não são cumpridas as distâncias ao solo ou entre condutores e que o aumento da tração ou da altura dos apoios não altera estes resultados. Sendo então necessário um novo apoio, seguem-se os passos do fluxograma da Figura 5.2.

No entanto, em alguns cenários, pode não ser verifica uma destas distâncias, mas pode haver uma solução que não implique colocar um novo apoio, como por exemplo, a distância ao solo ser de 8 m ou a distância entre condutores ser apenas 0,10 m superior ao permitido pela armação. Nestas circunstâncias, verifica-se que o aumento da tração ou da altura dos apoios pode resolver o problema.

Assim sendo, em primeiro lugar, verifica-se se a distância entre condutores atual é menor do que a permitida pela armação, que no caso dos apoios metálicos é de 2,70m. No caso em que isto não se verifica, a solução é aumentar a tração, que resulta numa diminuição da flecha.

De forma a verificar se o aumento da tração é suficiente para que a distância entre condutores passe a ser cumprida, foi criado um diagrama (Figura 5.2) que apresenta o quanto diminui a distância entre condutores com o aumento da tração, para diferentes comprimentos do vão. Embora neste caso a tensão mecânica de serviço seja de 9 daN/mm^2 , o diagrama apresenta as

diferenças dos valores da distância entre condutores desde os 7 daN/mm^2 e admite-se que a tração pode ser aumentada até aos 12 daN/mm^2 , para o condutor ALACO50.

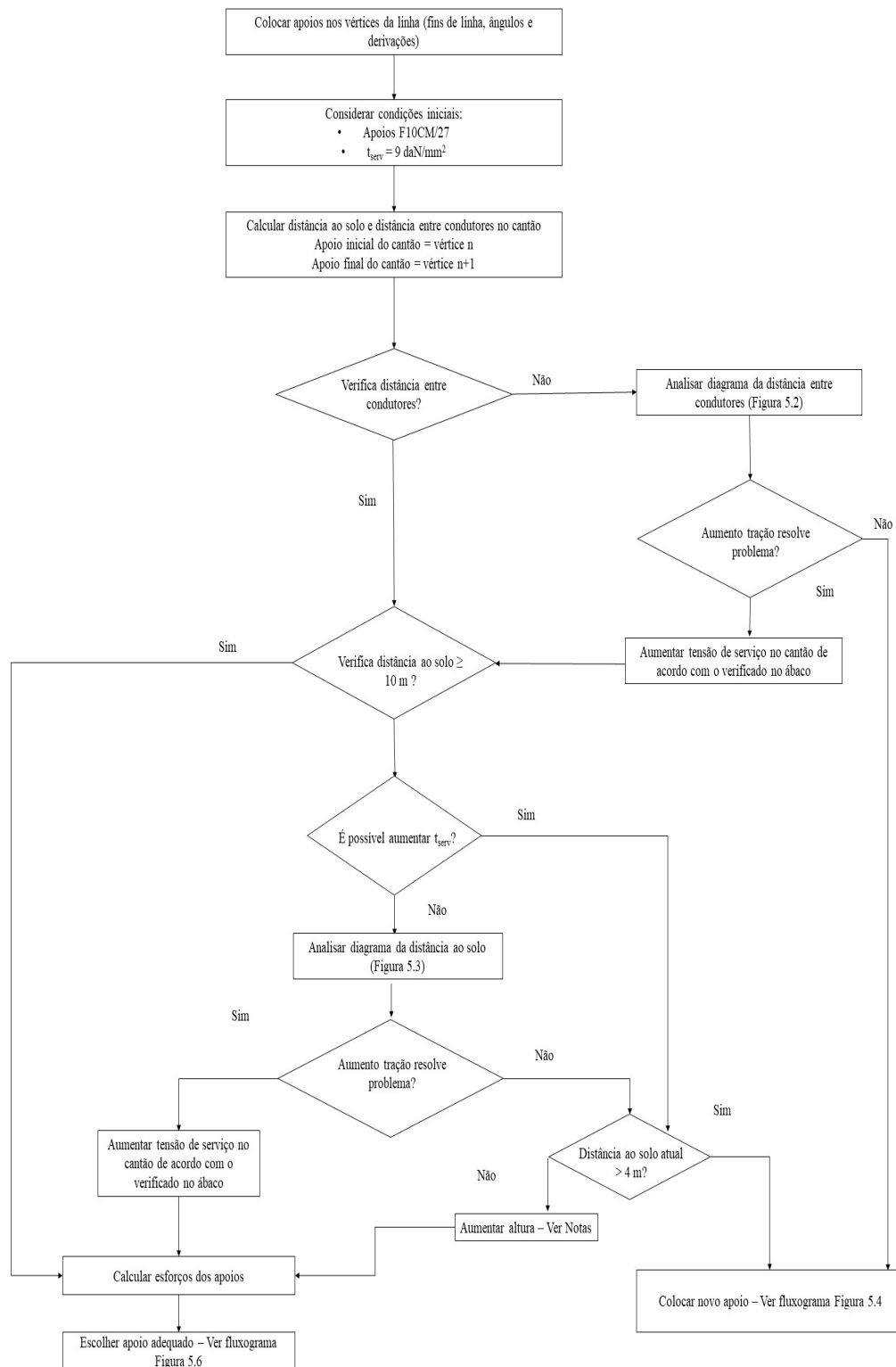


Figura 5.1: Fluxograma início projeto (Apoios metálicos).

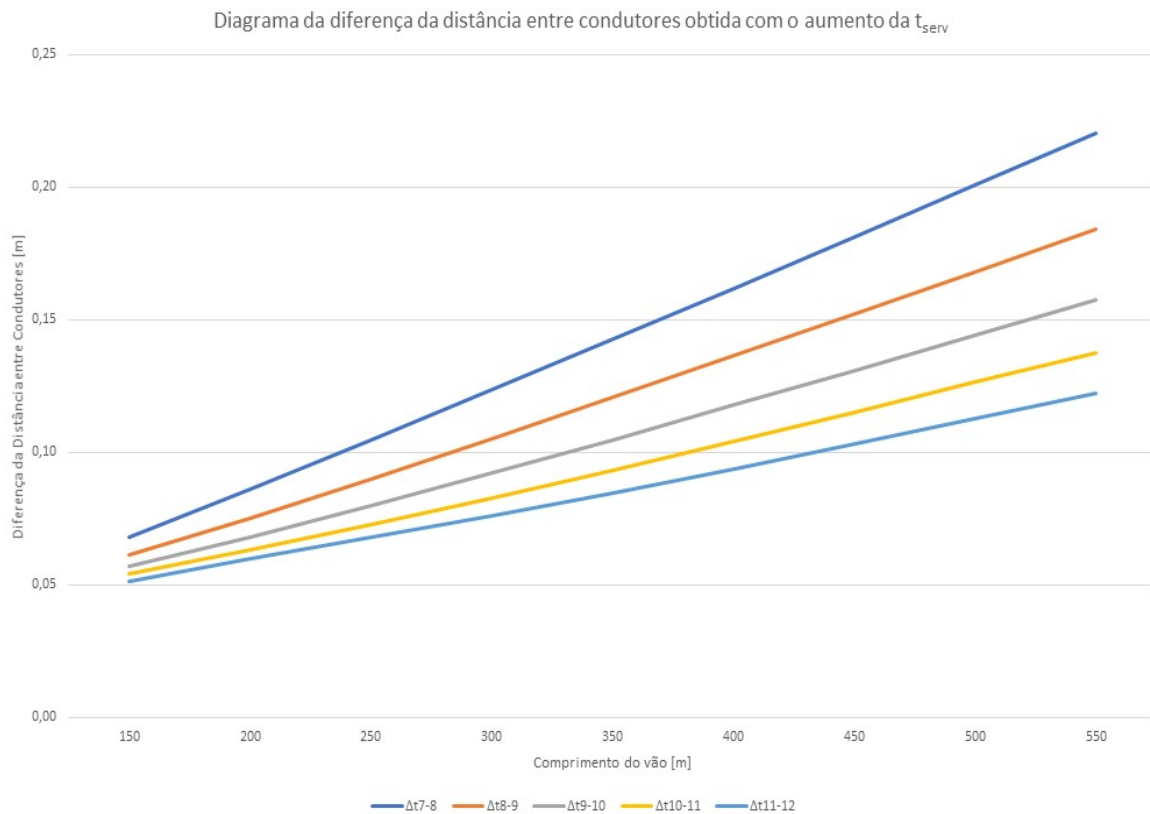


Figura 5.2: Diagrama da diferença da distância entre condutores com o aumento da t_{serv} .

Admitindo um exemplo em que:

- Comprimento do cantão = 450m;
- $t_{serv} = 9 \text{ daN/mm}^2$
- $D = 2,51 \text{ m}$;
- Armação GAN.

A distância entre condutores excede o limite em 0,30 m. Analisando o diagrama, analisa-se se o aumento da tensão mecânica de serviço para 10 daN/mm^2 (Δt_{9-10}) permite cumprir a restrição da distância entre condutores. Para 450 m, a diferença da distância entre condutores é de aproximadamente 0,13m, ou seja, a distância entre condutores diminui este valor, que não é suficiente. Então verifica-se se o aumento para 11 daN/mm^2 (Δt_{10-11}) já resolve o problema. Embora essa linha não esteja no gráfico, trata-se de:

$$\Delta t_{9-11} = \Delta t_{9-10} + \Delta t_{10-11}$$

Neste caso, a alteração Δt_{10-11} implica uma redução de aproximadamente 0,12 m.

Portanto, Δt_{9-11} implica uma diminuição da distância entre condutores $0,13+0,12 = 0,25$ m, que ainda não é suficiente. Teria então de ser feito um aumento de tensão mecânica de serviço de 9 daN/mm^2 para 12 daN/mm^2 .

Este é apenas um exemplo de como analisar o diagrama de redução de distância entre condutores, com o aumento da tensão mecânica de serviço, para diferentes comprimentos de vãos.

Então, para cada cantão deve ser verificado no diagrama se o aumento deste parâmetro permite resolver o incumprimento da condição da distância entre condutores. Caso o aumento da tração não seja suficiente, é necessário colocar outro apoio e consultar o fluxograma da Figura 5.4.

Sendo verificada a condição da distância entre condutores, o passo seguinte é analisar se a distância ao solo é superior que o valor estipulado de 10 m. Se essa condição for verificada, não é necessário colocar nenhum apoio. Nesta situação, devem ser calculados os esforços a que apoios estão sujeitos, de a forma a escolher o apoio adequado. Esta escolha deve ser feita consultando o fluxograma da Figura 5.6.

Caso não seja cumprida a distância ao solo, volta-se a analisar a possibilidade do aumento da tração resolver o problema. Verifica-se, em primeiro lugar, esta medida, porque tal como visto na secção 5.4.1, a melhor variável de controlo do aumento do comprimento do vão, ou neste caso, apenas da diminuição da flecha, é a tração. Deve, no entanto, verificar-se se é possível aumentar a tração, dado que se admite que esta não deve ser maior que 12 daN/mm^2 , para o condutor utilizado.

Se for possível aumentar, deve ser analisado o diagrama da figura 5.3, que apresenta as reduções da flecha, em metros, para diferentes aumentos de tração, para diferentes vãos. A análise deste gráfico deve ser feita da mesma forma que o diagrama da distância entre condutores.

Em último caso, se o aumento da tração não for suficiente ou não for exequível, deve ser verificada a possibilidade de o aumento da altura dos apoios resultar numa distância ao solo seja de pelo menos 10 m.

Como os apoios utilizados são de 27 m e os apoios maiores são de 33 m, permitindo por isso um aumento de 6 m de altura, a distância ao solo atual deve ser de, pelo menos, 4 m. O aumento da altura deve ser realizado tendo em conta as considerações mencionadas em 5.4.3.

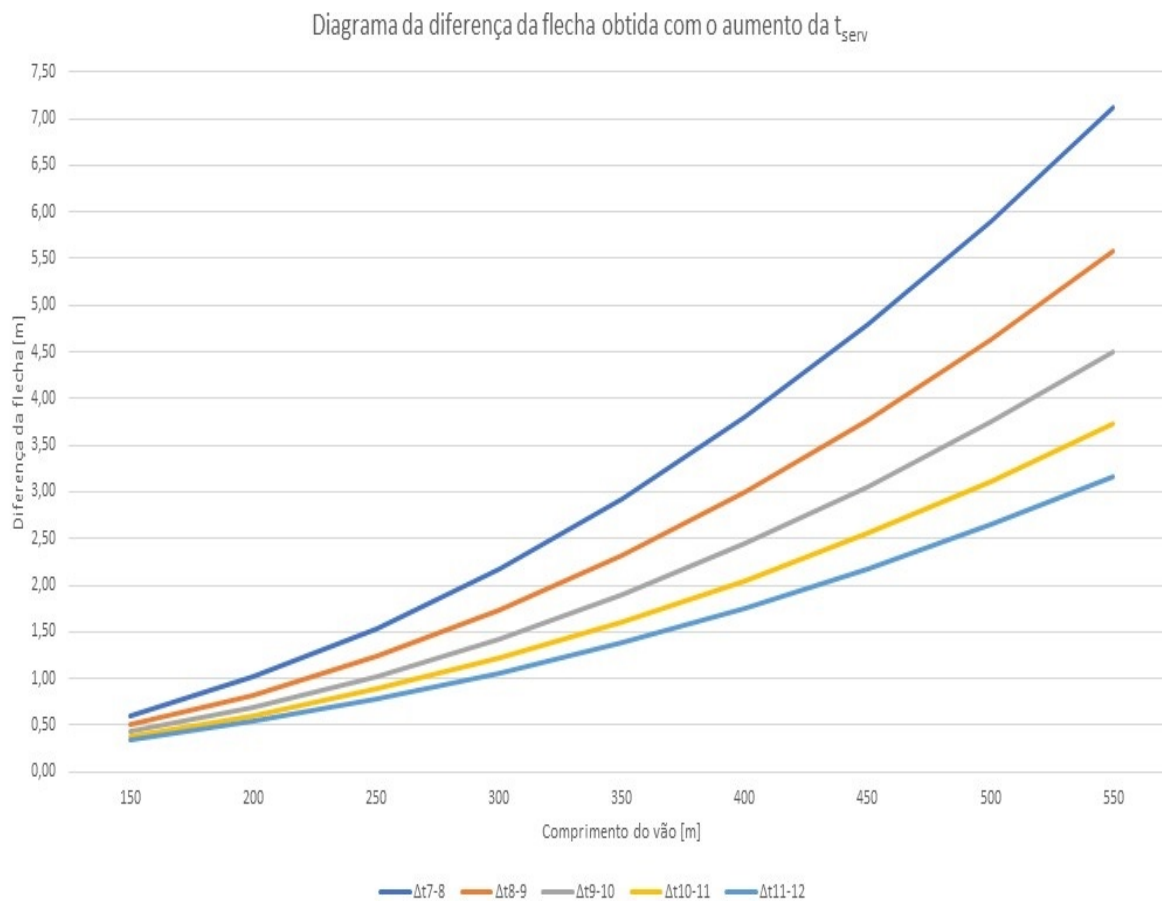


Figura 5.3: Diagrama da diferença da flecha com o aumento da t_{serv} .

5.5.1.2 Colocação de novo apoio

Para colocar um novo apoio deve ser consultado o fluxograma da Figura 5.4.

Antes de colocar o novo apoio, devem-se analisar-se as características do cantão. Sabendo que a variável de controlo mais adequada para aumentar o máximo possível o comprimento do vão é a tração, devem então consultar-se as indicações dadas na secção 5.4.1, verificando se, para as características do cantão em análise, a tração deve ser aumentada ou mantida em 9 daN/mm^2 .

Depois de definidas as condições iniciais para o cantão, inicia-se então um processo iterativo para determinar posição do novo apoio.

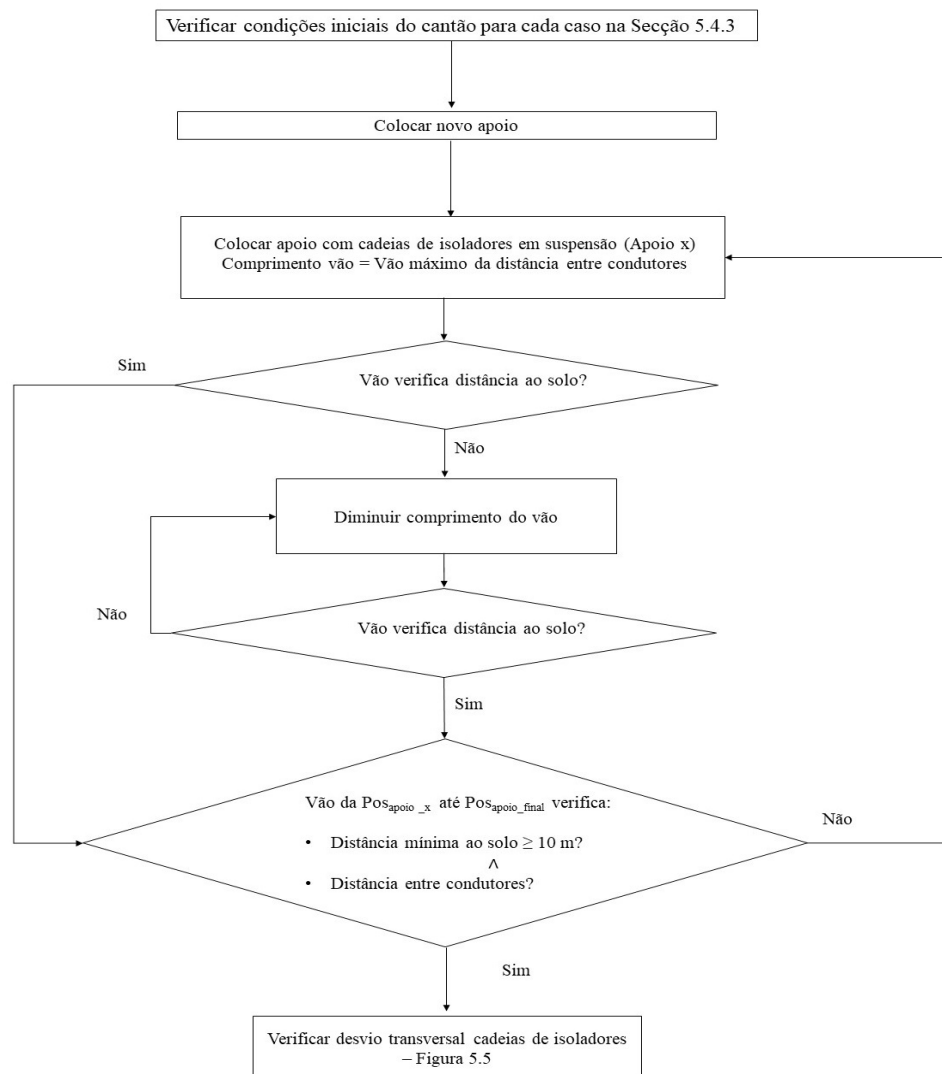


Figura 5.4: Fluxograma de colocação de novos apoios (Apoios metálicos).

O apoio colocado deve ter, nesta fase, cadeias em suspensão (mesmo que depois não seja cumprido o desvio) e o comprimento do vão deve corresponder ao vão máximo analítico determinado, limitado pela distância entre condutores, para a tensão mecânica de serviço do cantão.

Depois, verifica-se iterativamente se o vão obtido cumpre a distância ao solo. Caso não cumpra, a posição do apoio é recuada até que isto se verifique.

Por fim, tendo colocado um primeiro apoio, o cantão tem então dois vãos. Para verificar se é necessário outro apoio, deve ser analisado o vão criado pelo apoio colocado até ao apoio do vértice. Se as distâncias entre condutores e ao solo não forem cumpridas, inclui-se outro apoio e

repete-se o processo, até todas as condições serem verificadas.

Depois desta fase, é ainda necessário verificar se é cumprido o desvio transversal das cadeias de isoladores dos apoios colocados, devendo seguir-se os passos do fluxograma da Figura 5.5.

Note-se que este processo é feito em cada cantão.

5.5.1.3 Verificação do desvio transversal das cadeias

Nesta fase do projeto, deve seguir-se o caminho indicado pelo fluxograma da Figura 5.5.

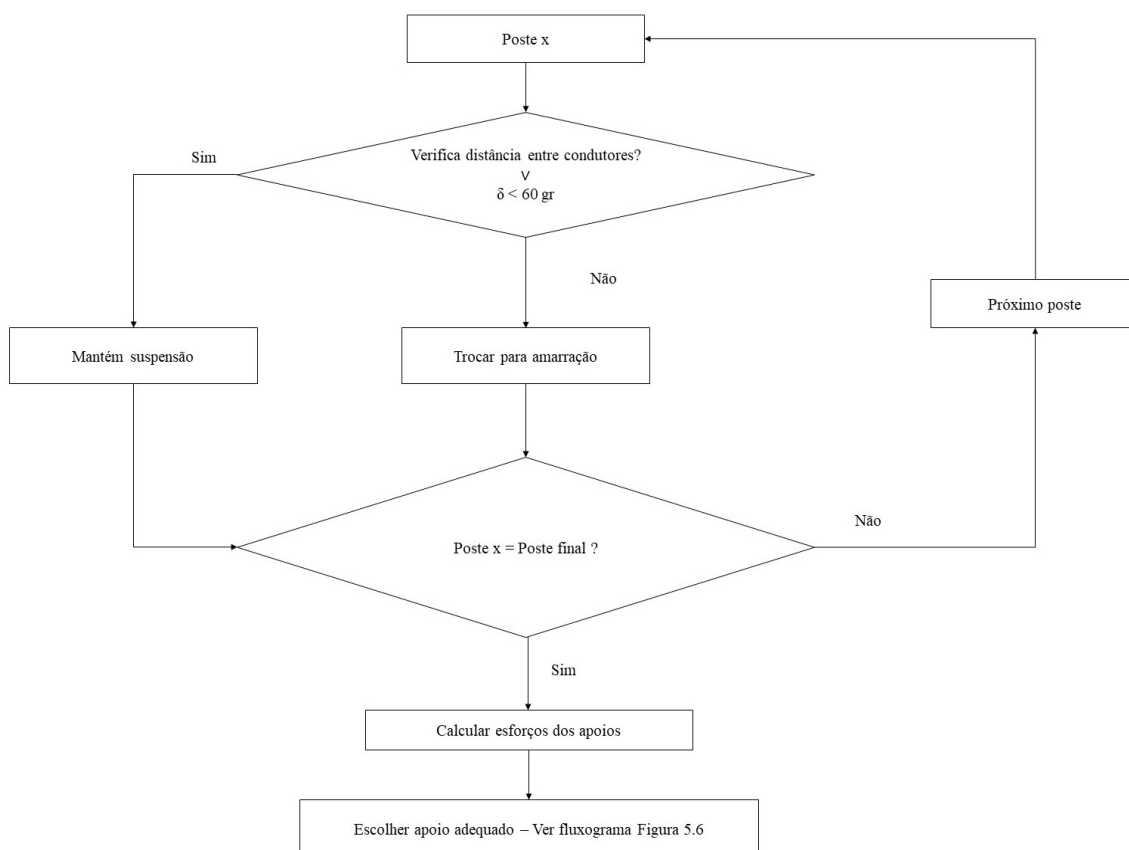


Figura 5.5: Fluxograma de verificação do desvio transversal das cadeias (Apoios metálicos).

Tendo colocado os novos apoios com cadeias de suspensão, é necessário verificar se o desvio obtido nas cadeias ultrapassa os 60 graus. Além disto, como o vão máximo estipulado considera cadeias em amarração, também é essencial confirmar se a distância entre condutores é verificada.

Se todas as condições forem cumpridas, mantém-se a cadeia em suspensão. Caso uma delas não seja, a cadeia passa a amarração, uma vez que é preferível ter vãos maiores e, conseqüentemente, menos apoios. Isto é verificado para todos os postes do cantão.

Feito isto, podem calcular-se os esforços solicitados aos apoios e passar para a parte final do processo, que é escolher o apoio adequado.

5.5.1.4 Escolha do apoio adequado

Esta é a última parte do processo de otimização, em que, em cada caso, se tenta escolher o apoio com menor custo, como indicado na Figura 5.6. Uma vez que as alturas estão definidas, é apenas necessário determinar a gama de apoio de menor custo que suporta os esforços verificados.

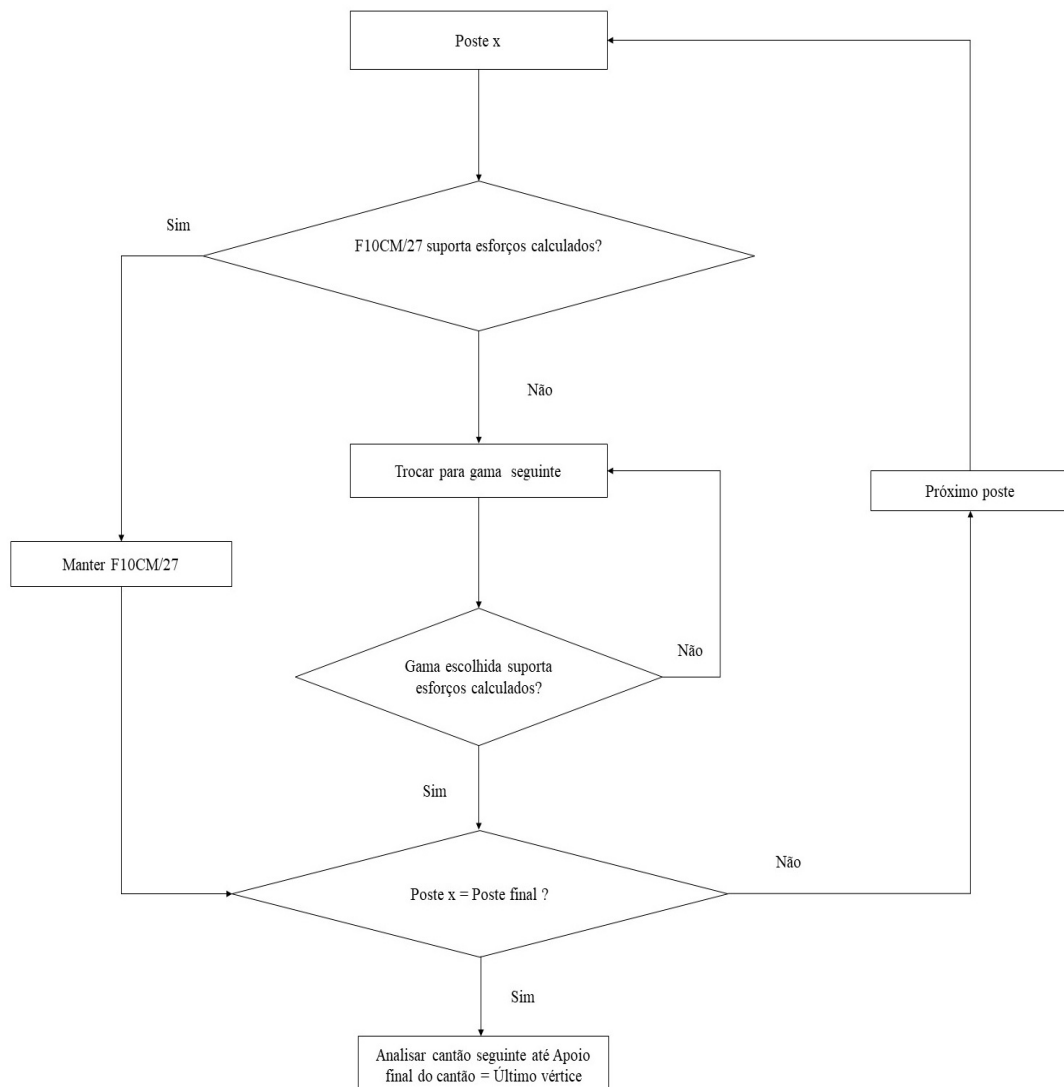


Figura 5.6: Escolha do apoio adequado (Apoios metálicos).

Dado que os apoios inicialmente definidos foram os F10CM, analisa-se a viabilidade da utilização destes apoios. Sempre que os esforços são suportados, estes apoios são mantidos. Caso contrário, aumenta-se para a gama seguinte, até verificar.

Analisam-se todos os apoios e repete-se todo o processo para todos os cantões.

5.5.2 Apoios de betão

5.5.2.1 Parte inicial

Nesta primeira parte do processo, deve proceder-se da mesma forma, consultando o fluxograma da Figura 5.7, mas, neste caso, os apoios iniciais escolhidos devem ser os MP01-800/320-18 e também é necessário escolher uma armação. A armação escolhida logo à partida é a TAN, por ser a que apresenta menor custo e a que permite vãos maiores, considerando a limitação da distância ao solo. Impõe-se que estas armações sejam sempre colocadas nos apoios fim de linha.

Os passos a seguir ao longo deste processo são idênticos aos apresentados na secção 5.5.1.1, porém existem algumas particularidades no que diz respeito às armações.

Embora nos apoios fim de linha não seja possível utilizar GAN, admite-se a possibilidade de nos restantes apoios ser feita uma mudança para esta armação. Desta maneira, quando se verifica se é cumprida a distância entre condutores deve ter-se em conta que:

- Em apoios fim de linha, a distância não deve ser maior que a permitida pela TAN, porque é armação adequada para este tipo de apoios;
- Nos restantes apoios, a verificação pode ser feita considerando que não se deve ultrapassar o valor permitido pela GAN, uma vez que permite vãos maiores quando a limitação é a distância entre condutores.

Desta forma, também neste caso se verifica, essencialmente, a necessidade de incluir mais apoios no cantão em análise.

Na hipótese de não ser necessário incluir mais nenhum apoio no cantão, em vez de serem calculados imediatamente os esforços solicitados aos apoios, em primeiro lugar, deve verificar-se se a armação TAN pode ser mantida ou se é necessário mudar para a armação GAN. Esta decisão é auxiliada pelo fluxograma da Figura 5.10.

No caso de ser necessário colocar mais apoios, deve passar-se à análise do fluxograma da Figura 5.8.

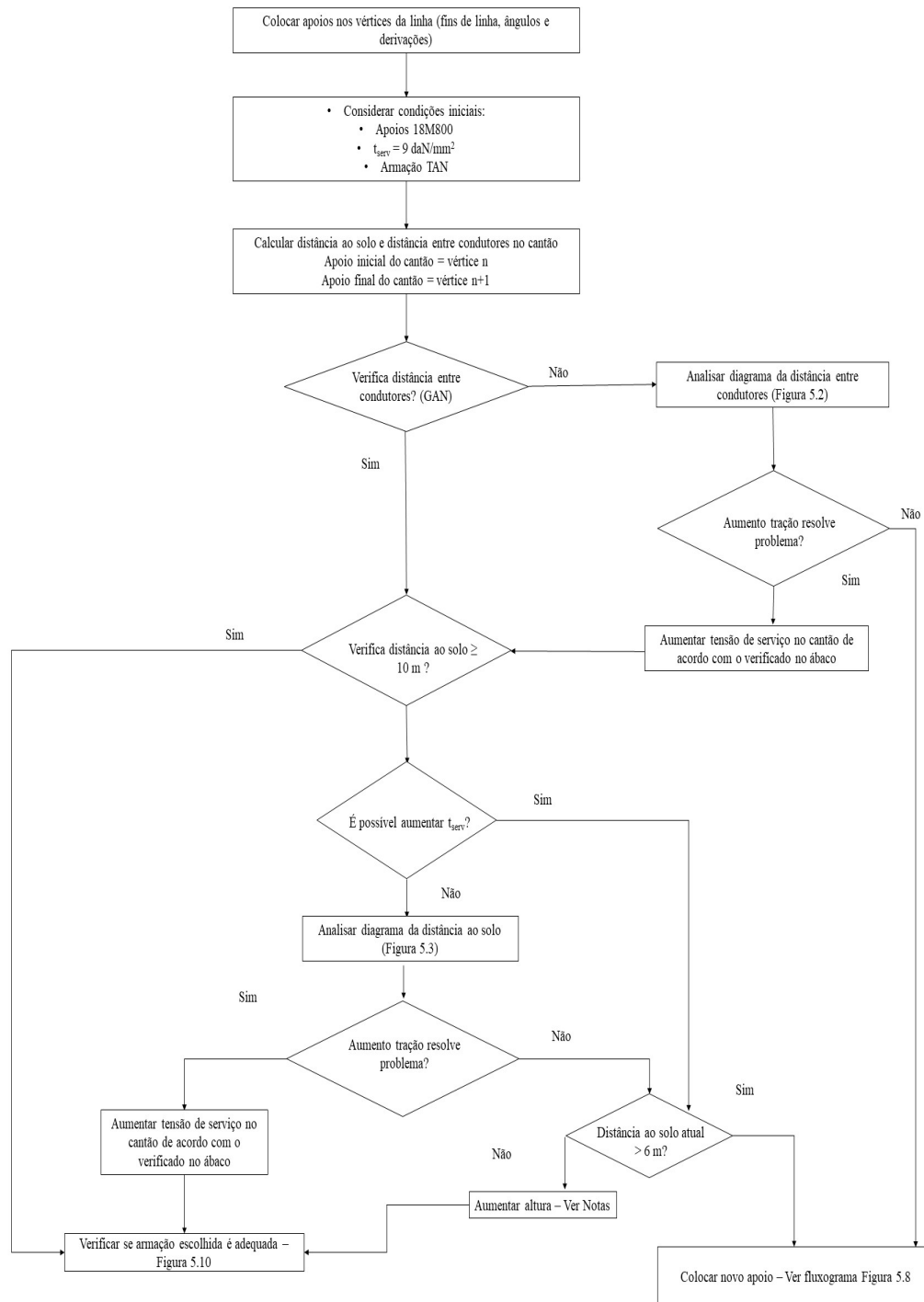


Figura 5.7: Fluxograma início projeto (Apoios betão).

5.5.2.2 Colocação de novo apoio

Consultando o fluxograma da Figura 5.8, verifica-se que também nestas soluções devem ser analisadas as sugestões da tensão mecânica de serviço a considerar no cantão em questão, indicadas em 5.4.3.

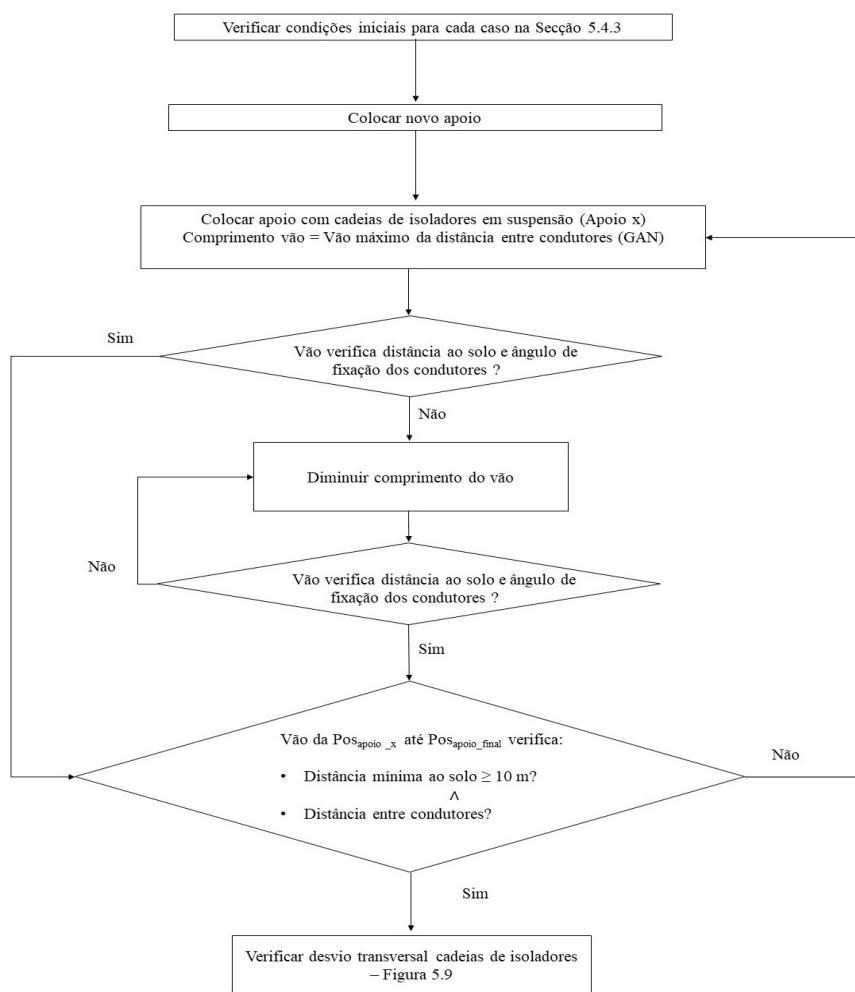


Figura 5.8: Fluxograma de colocação de novos apoios (Apoios betão).

São colocados os apoios com cadeias de isoladores em suspensão, no entanto, há que ter em conta que o vão máximo referido no fluxograma é o calculado para a GAN, limitado pela distância entre condutores.

Sendo assim é considerado este vão máximo que determina a posição do apoio e que vai sendo recuado até se verificar também a distância ao solo. São colocados apoios até se verificarem em todos os vãos estas duas distâncias.

De seguida, deve ser analisado o desvio transversal das cadeias de isoladores, tendo em conta o fluxograma da Figura 5.9.

5.5.2.3 Verificação do desvio transversal das cadeias

O processo (Figura 5.9) é semelhante até à ação final a realizar, que passa a ser a verificação da adequação da armação.

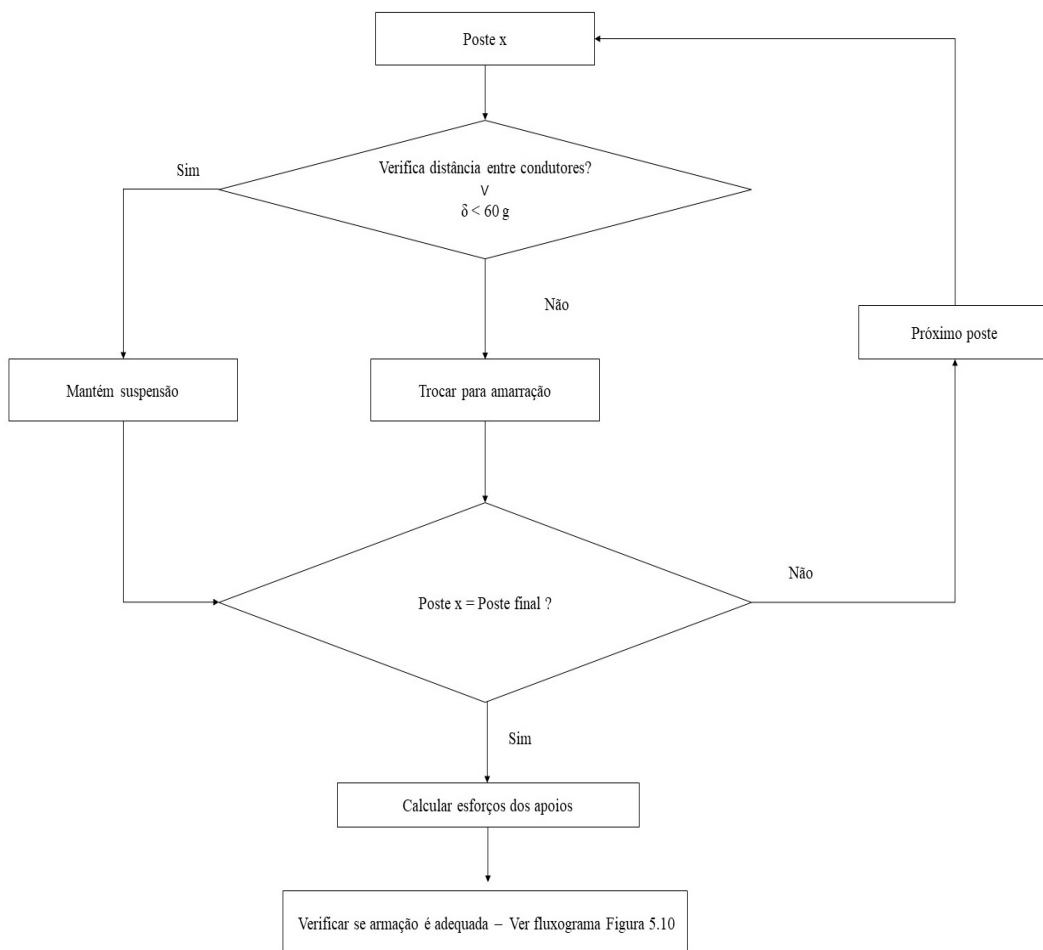


Figura 5.9: Fluxograma de verificação do desvio transversal das cadeias (Apoios betão).

5.5.2.4 Escolha da armação adequada

Em cada poste deve ser analisada qual a armação mais adequada. Considerando que os apoios fim de linha devem manter as TAN, o fluxograma da Figura 5.10 apresenta como escolher a

armação para a armação para os restantes postes.

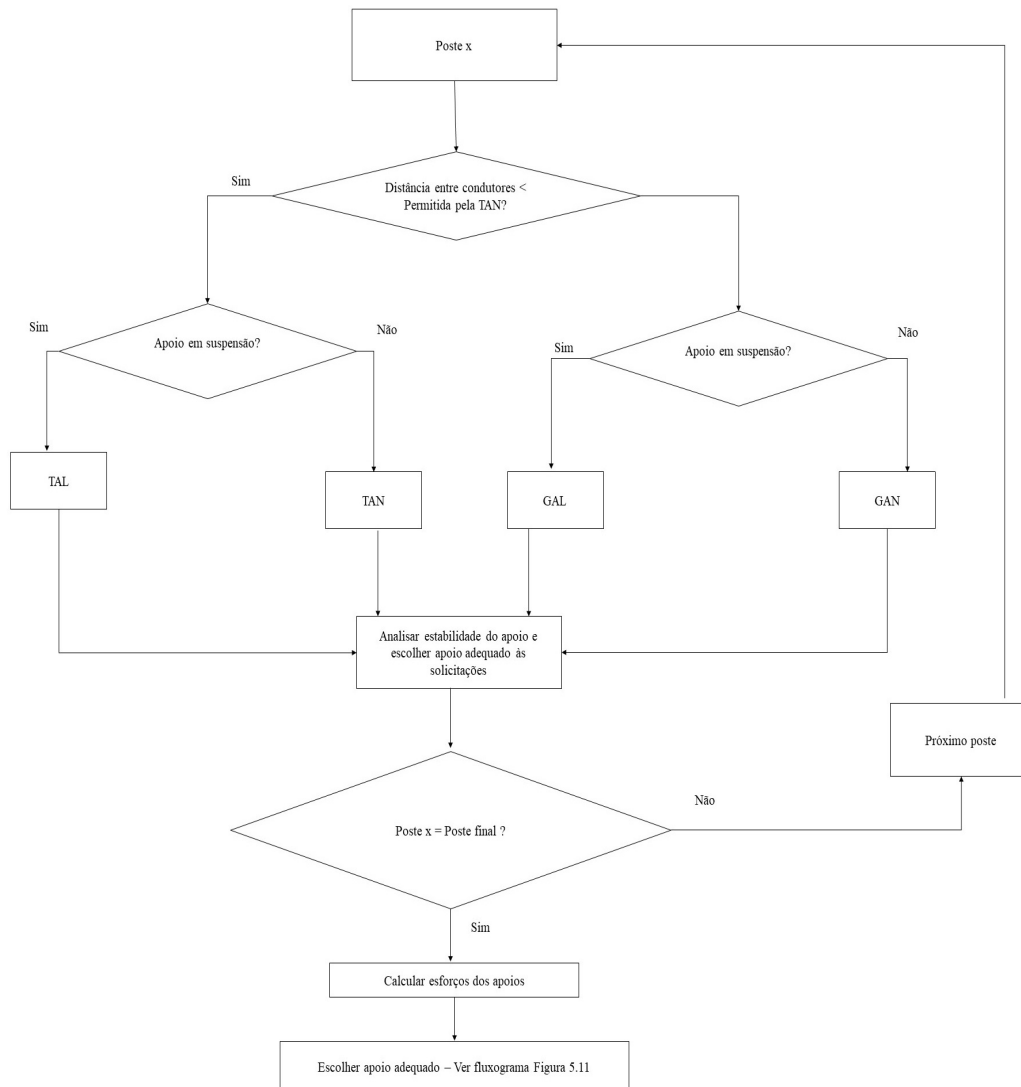


Figura 5.10: Fluxograma da escolha da armação adequada (Apoios betão).

Se a distância entre condutores calculada no poste em análise (em qualquer um dos lados) for superior à permitida pela TAN, a armação deve passar a ser GAN ou GAL.

Nos dois casos, se as cadeias de isoladores estiverem em suspensão, são escolhidas as TAL e GAL, caso contrário, devem ser colocadas as TAN e GAN.

Apenas no fim da escolha das armações é que devem ser calculados os esforços de maneira a determinar o apoio mais adequado.

5.5.2.5 Escolha do apoio adequado

No caso das soluções que adotam apoios de betão, devem seguir-se os mesmos passos que nas soluções que utilizam apoios metálicos. Apenas deve ser verificado se o apoio MP01-800/320 suporta os esforços e caso isto não se constate, deve escolher-se o apoio da gama seguinte dos apoios de betão normalizados, até verificar que o poste suporta os esforços que lhe são solicitados.

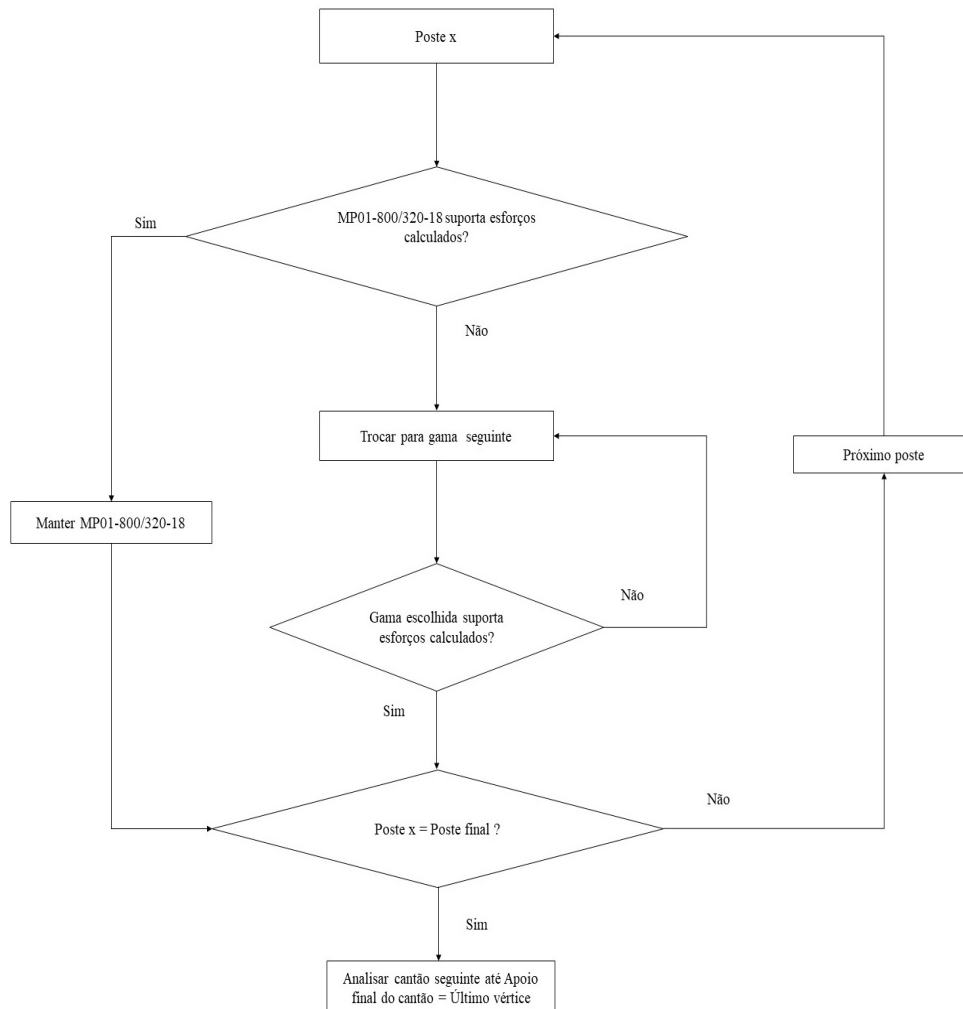


Figura 5.11: Fluxograma da escolha do apoio adequado - Apoios betão

5.5.3 Considerações finais do projeto

Terminado este processo, são obtidas soluções otimizadas, que utilizam o menor número de apoios possível. No entanto, muitas vezes, a solução não se encontra equilibrada. Por exemplo, num cantão de 200 m em que se verifica que é necessário incluir um apoio, seguindo esta

metodologia, pode ser obtido um vão máximo de 170 m. O algoritmo admite então que a posição do apoio deve ser esta, resultando num vão de 170 m e noutra de 30 m. É possível concluir que esta solução não é equilibrada.

Sendo assim, é boa prática, depois de ser obtida a solução otimizada, verificar se esta é equilibrada. Se existirem casos semelhantes ao anterior, os apoios devem ser redistribuídos de maneira a obter uma solução mais robusta.

Além disto, para tornar um projeto mais robusto, outra solução poderia ser a escolha de apoios de betão da gama AP02-1200/410. Esta medida seria adequada caso o projeto tivesse em conta a exploração da linha (que não era o foco deste trabalho por não ser a solução de menor custo), pois permitia uma maior flexibilidade para incluir elementos como seccionadores e possibilidade de outras derivações, por exemplo.

Por fim, sabe-se que é necessário colocar apoios de reforço ao longo da linha, sendo tipicamente utilizados nos casos em que a diferença de tração é considerável, por exemplo. Porém, se em dois cantões consecutivos as diferenças de tração forem muito acentuadas, outra medida a considerar é a subida ou descida das trações nos apoios adjacentes àquele em que é grande a diferença de tração, caso esta ação não cause perturbações na solução obtida.

5.6 Estudo técnico-económico comparativo entre torres treliçadas e postes de betão

Por fim, nesta secção é comparada a utilização dos apoios de betão com a utilização de apoios metálicos nas linhas de média tensão.

Embora nas soluções otimizadas obtidas, para as duas linhas projetadas, as que incluem apoios metálicos apresentem custos consideravelmente superiores, é importante perceber as razões desta disparidade de custos.

Para isto, interessa conhecer o vão médio das soluções obtidas. Na Tabela 5.9 indicam-se novamente os custos das soluções otimizadas e o vão médio correspondente.

Tabela 5.9: Custo e vãos médios das soluções estudadas.

Caso de estudo	Tipo de apoios	Número de apoios	Custo [€]	Vão médio [m]
Pampilhosa	Metálicos	17	86 478,55	264
	Betão	32	53 514,22	141
Romão	Metálicos	18	96 291,44	311
	Betão	30	54 190,33	183

Tanto na linha da Pampilhosa como na linha em Romão, o que limitou, na maioria das vezes, o vão máximo foi a distância ao solo. Caso a linha estivesse em patamar e não existissem apoios de ângulo e derivação ao longo da linha seria possível obter o vão máximo determinado analiticamente e utilizar ainda menos apoios. Desta forma, uma análise que pode ser realizada é a

determinação da percentagem de utilização dos apoios, relativamente aos vãos máximos que estes permitem vencer teoricamente.

Considerando então os vãos máximos determinados analiticamente, cuja limitação é a distância ao solo, para a tensão mecânica de serviço máxima aplicada na linha, são obtidos os resultados da Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Percentagem do vão máximo aproveitado das soluções estudadas.

Solução	Vão médio [m]	Vão máximo	Percentagem do vão máximo aproveitado [%]
Pampilhosa Betão	141	205	69
Pampilhosa Metálicos	264	397	66
Romão Betão	183	205	89
Romão Metálicos	311	397	78

Em todos os casos, nas soluções com postes de betão, é aproveitada uma percentagem maior do vão máximo, ou seja, tira-se mais partido da utilização de postes de betão do que da utilização de postes metálicos. Isto deve-se ao facto de os apoios metálicos possibilitarem vãos maiores e serem mais indicados em casos em que os vãos podem então ser grandes.

As diferentes especificidades destas linhas não permitiram um melhor aproveitamento da capacidade dos apoios metálicos, podendo dessa forma torna-los mais competitivos. Esta limitação do comprimento dos vãos se deveu essencialmente à existência de vários vértices na linha (ângulos e derivações) bem como a existência de declives acentuados.

No caso da linha da Pampilhosa, o custo médio dos apoios utilizados na solução com postes de betão e na solução com postes metálicos está indicado na tabela 5.11.

Tabela 5.11: Custo médio dos apoios utilizados nas soluções estudadas.

Solução	Custo médio dos apoios utilizados [€]
Pampilhosa Betão	1 672,32 €
Pampilhosa Metálicos	5 086,97 €

Então, neste caso, os apoios metálicos só se tornariam competitivos se fossem utilizados até:

$$\frac{53154,22}{5086,97} = 10,5 \text{ postes}$$

Portanto, para compensar a utilização de apoios metálicos, deveriam ser utilizados apenas 10 postes. Neste caso, o vão médio seria de aproximadamente 421 m.

Na hipótese de ir poder acontecer, se o vão médio é de aproximadamente 421 m, o vão máximo já não seria limitado pela distância ao solo, mas antes pela distância entre condutores. Comparando agora este hipotético vão médio com o vão máximo limitado pela distância entre condutores, a percentagem que se aproveitava do vão máximo já seria de 75%.

É possível concluir que caso não existissem os obstáculos existentes nas linhas estudadas e a condição limitadores fosse, deste modo, a distância entre condutores, os apoios metálicos

passariam a ser compensatórios sempre que se pudesse aproveitar pelo menos 75% do vão máximo, ou seja, sempre que o vão fosse superior a 421 m.

Estas conclusões revelam que na maioria das situações os apoios de betão são os que apresentam menor custo, no entanto, nem sempre são a melhor solução a considerar, porque tecnicamente apresentam algumas desvantagens face aos apoios metálicos, que em cada caso deverão ser ponderadas.

Em primeiro lugar, as soluções que consideram a utilização de apoios metálicos apresentam um número menor de apoios. Nos dois casos estudados eram utilizados cerca de metade dos apoios metálicos comparativamente com os de betão. Tendo em conta que são necessárias autorizações para montar um apoio no terreno e pagar indemnizações aos proprietários dos terrenos, a utilização de apoios metálicos traduz-se em menos custos. O processo de obtenção das necessárias autorizações pode ser moroso, nem sempre pelas questões financeiras associadas ao acordo dos valores a indemnizar. Dessa forma, a utilização de um menor número de apoios viabilizará esse processo inicial de uma forma mais expedita.

Os apoios metálicos, sendo estruturas em aço galvanizado apresentam uma resistência à erosão inferior, tendo à partida uma longevidade esperada superior aos apoios de betão.

Relativamente à possibilidade de transporte, os apoios de betão são transportados inteiros e isso pode dificultar ou impossibilitar o transporte e montagem em declives mais sinuosos.

Em suma, a qualidade e robustez de uma solução deverá atender a outros fatores que não apenas o custo inicial do projeto, embora esse também seja muito importante.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

6.1 Síntese e principais conclusões

Nos primeiros três capítulos deste trabalho foram apresentados os conceitos, definições e cálculos necessários para compreender e elaborar um projeto de uma linha aérea. No quarto capítulo, com o objetivo de adquirir sensibilidade relativamente aos cálculos mecânicos de um projeto, apresentou-se um projeto exemplificativo de uma linha aérea de média tensão, em que os cálculos foram realizados manualmente.

O foco do capítulo 5 foi a metodologia de otimização de linhas MT inseridas em zonas florestais e o processo realizado para a sua elaboração.

Em primeiro lugar, foram apresentados os objetivos da otimização de projetos e os principais desafios que dificultam a obtenção de soluções com o menor número de apoios.

As principais limitações para atingir este fim são determinadas pelas condições impostas pelo RSLEAT, principalmente a distância ao solo e a outros obstáculos e a distância entre condutores.

Além disso, estas restrições são agravadas pelas características específicas das linhas MT em zonas florestais. Em primeiro lugar, por possuírem elevada e densa vegetação na vizinhança da faixa de proteção, foi aumentada a distância mínima ao solo para 10 m. Estarem inseridas em perfis montanhosos, com bastantes e acentuados declives e contarem com alguns apoios de ângulo e derivação constituíram outros obstáculos na finalidade de minimizar o número de apoios utilizados num projeto.

Tendo concluído que os vãos são limitados tanto pela distância entre condutores, como pela distância ao solo, foram determinados analiticamente os vãos máximos limitados por estas duas restrições, para diferentes armações e alturas dos apoios e também para diferentes trações, permitindo fazer uma estimação dos vãos máximos que se podem considerar nos projetos.

O passo seguinte foi a descrição da aprendizagem recursiva realizada. Esta aprendizagem consistiu essencialmente em elaborar quatro soluções base, para duas linhas com perfis e características distintas, para apoios de betão e metálicos. Nestes projetos admitiu-se a utilização dos apoios de menores custos, desde que adequados às funções, e de uma tensão de serviço de

cerca de 28% da tensão máxima admissível pelo condutor utilizado, sendo que este valor não deve ultrapassar os 40%.

Foram depois realizadas diversas iterações que permitiram convergir para a metodologia otimizada. Entre todos os projetos e testes realizados, foi estudada a influência dos parâmetros tração e altura dos apoios no número total de apoios a incluir. Concluiu-se que a tração é a variável de controlo mais adequada para aumentar os vãos, uma vez que apresenta menos inconvenientes do que aumentar a altura dos apoios, para linhas com as características indicadas.

Nas soluções que consideravam apoios metálicos, foi possível concluir que o aumento da altura não era benéfico, uma vez que resultava em maiores solicitações nos apoios devido ao aumento da pressão dinâmica do vento. Nos projetos com apoios de betão, verificou-se que este aumento implicava maiores custos.

Por outro lado, embora o aumento da tração resultasse, frequentemente, num maior número de apoios de reforço, as soluções obtidas permitiam sempre reduzir o número de apoios total e, desta forma, minimizar o custo da solução. Além disto, definiram-se as condições em que se verificou ser vantajoso aumentar a tração. Concluiu-se que na generalidade dos casos este aumento deveria ser feito para um valor próximo do máximo admissível, visto que potenciava mais vezes uma maior redução do número de apoios.

Nos projetos realizados verificou-se também que a restrição mais limitadora do comprimento dos vãos foi, nos dois casos, a distância ao solo.

Foram elaboradas duas metodologias de otimização de projetos de linhas MT desenvolvidas em zonas florestais: uma para postes de betão e outra para postes metálicos. Os estudos permitiram concluir que as estratégias a adotar na elaboração de um projeto com o objetivo de o otimizar são semelhantes nos dois casos, apresentando apenas algumas diferenças relativamente à escolha das armações.

Essencialmente, em todos os casos foi realizado um estudo cantão a cantão formado pelos vértices da linha. O processo consiste em verificar se é necessário colocar um apoio de maneira a que sejam cumpridas as distâncias ao solo e entre condutores. Em caso afirmativo, apresenta-se o processo de colocação de novos apoios. Após isto deve ser verificado o desvio transversal das cadeias de isoladores e, no caso dos apoios de betão, deve ser escolhida a armação mais adequada. Por fim, deve ser escolhido o apoio adequado.

Por último, foi realizado o estudo técnico-económico comparativo entre a utilização de postes de betão e torres treliçadas. Para este fim, foram comparadas as soluções otimizadas obtidas e verificou-se que os projetos com postes de betão apresentavam custos significativamente menores.

Conclui-se que para a solução com postes metálicos ser compensatória, os vãos médios teriam de ser consideravelmente maiores, o que implicava que a condição limitadora passasse a ser mais vezes a distância entre condutores.

Uma das razões que resulta nesta manifesta diferença de preços é o facto de os apoios de betão terem uma maior variabilidade de alturas e gamas de apoios, enquanto que os apoios metálicos têm um conjunto de apoios mais limitado. Por exemplo, o apoio metálico de menor altura é de 27 m.

Em alguns casos, não seriam necessários apoios tão altos, que até por serem maiores apresentam necessariamente um custo maior.

No entanto, a nível técnico, os postes de betão apresentam mais desvantagens do que os postes metálicos, relacionadas com transporte, durabilidade e viabilidade para expandir a rede. Além disso, as soluções com postes de betão utilizam aproximadamente o dobro dos apoios, o que se traduz em mais autorizações, indemnizações e num processo mais lento.

Com este estudo foi possível concluir que em linhas aéreas MT inseridas em zonas florestais, a utilização de postes de betão aparenta ser benéfica, dado que resulta em menos custos. No entanto, estes são os custos iniciais do projeto.

Atendendo que uma solução não deve apenas considerar o custo inicial do projeto, as conclusões obtidas apontam para a hipótese de ser vantajoso considerar soluções mistas, ou seja, que utilizem os dois tipos de apoios. Ainda que os custos fossem superiores, esta medida seria provavelmente mais aproximada da realidade e teria vantagens relativamente aos aspetos técnicos.

6.2 Estudos futuros

O presente estudo foi realizado para linhas de média tensão inseridas em zonas florestais, simples, considerando o cabo ALACO50. Dado que são características tão particulares, alguns estudos a ser feitos podem considerar diferentes características, como por exemplo, outro condutor.

Também seria interessante estudar com mais detalhe as soluções mistas, identificando em que situações é proveitoso utilizar cada tipo de apoio numa linha, mantendo o objetivo da otimização.

Anexo A

Esforços Máximos dos Apoios Metálicos

Tabela A.1: Esforços máximos suportados pelos apoios metálicos.

Designação	F_{xa} [daN]	F_{ya} [daN]	F_z[daN]
F10CM/27	75	900	1200
F10CM/30	75	900	1200
F10CM/33	75	900	1200
F15CM/27	800	1425	1200
F15CM/30	800	900	1200
F15CM/33	800	900	1200
F30CM/30	800	2925	1500
F30CM/33	800	2925	1500
F45CM/21	2880	618	508,5
F45CM/27	2880	618	508,5
F45CM/30	2880	618	508,5
F45CM/33	2880	618	508,5

Anexo B

Vãos máximos

Tabela B.1: Vãos máximos limitados pela distância entre condutores, considerando armações TAN e TAL.

Armação	Distância entre condutores [m]	Flecha máxima [m]	t _{serv} [<i>daN/mm</i> ²]	Vão máximo [m]
TAN/TAL	1,30	7,43	7	199
			8	214
			9	227
			10	240
			11	254
			12	264

Tabela B.2: Vãos máximos de apoios de betão limitados pela distância ao solo, considerando GAN e GAL, em metros.

Altura total [m]	t _{serv} [<i>daN/mm</i> ²]					
	7	8	9	10	11	12
14	-	-	-	-	-	-
16	92	99	105	111	118	122
18	139	149	158	167	177	184
20	174	187	199	210	222	231
22	203	218	231	244	259	269
24	227	244	260	274	290	302
26	248	266	283	299	316	328
28	268	288	306	324	342	356

Anexo C

Exemplo de topografia

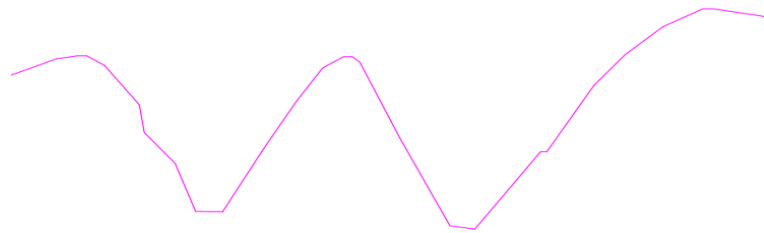
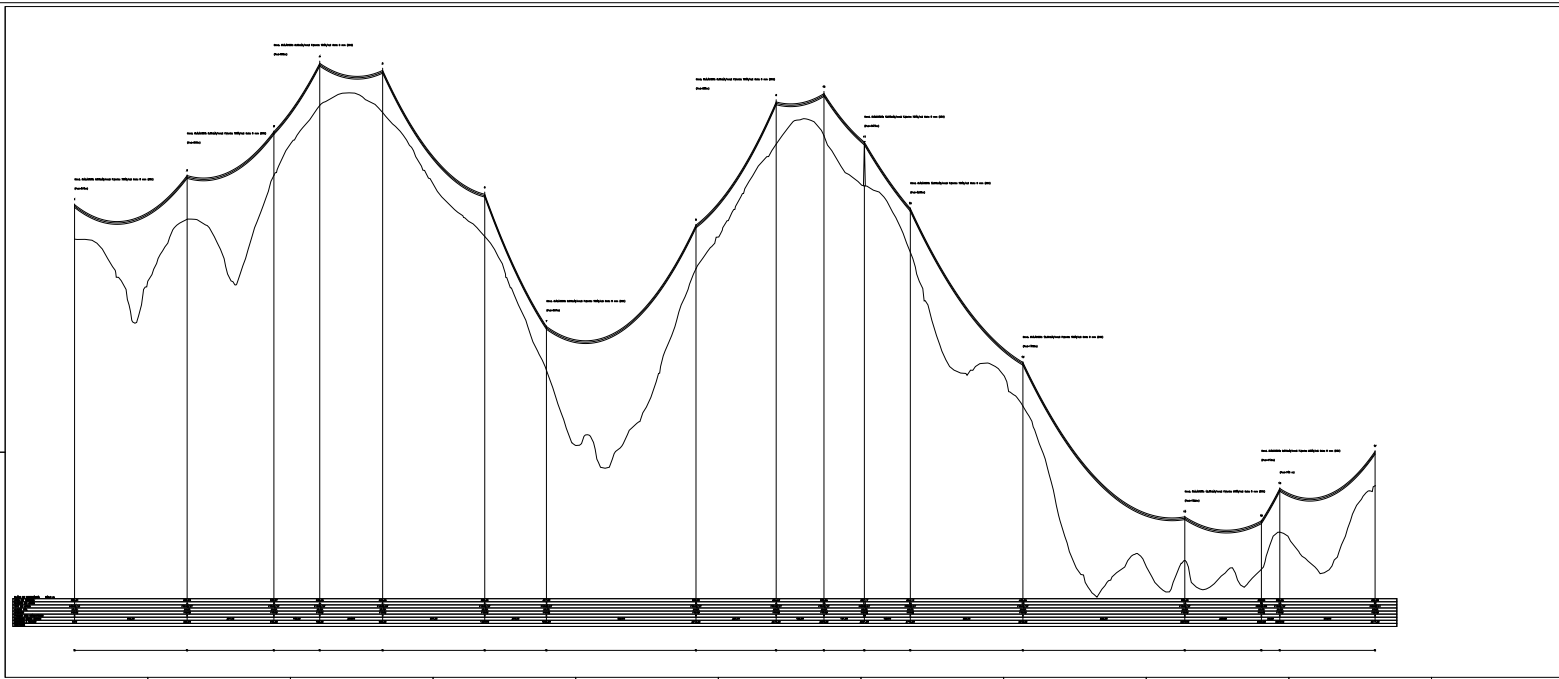


Figura C.1: Exemplo de um cume.

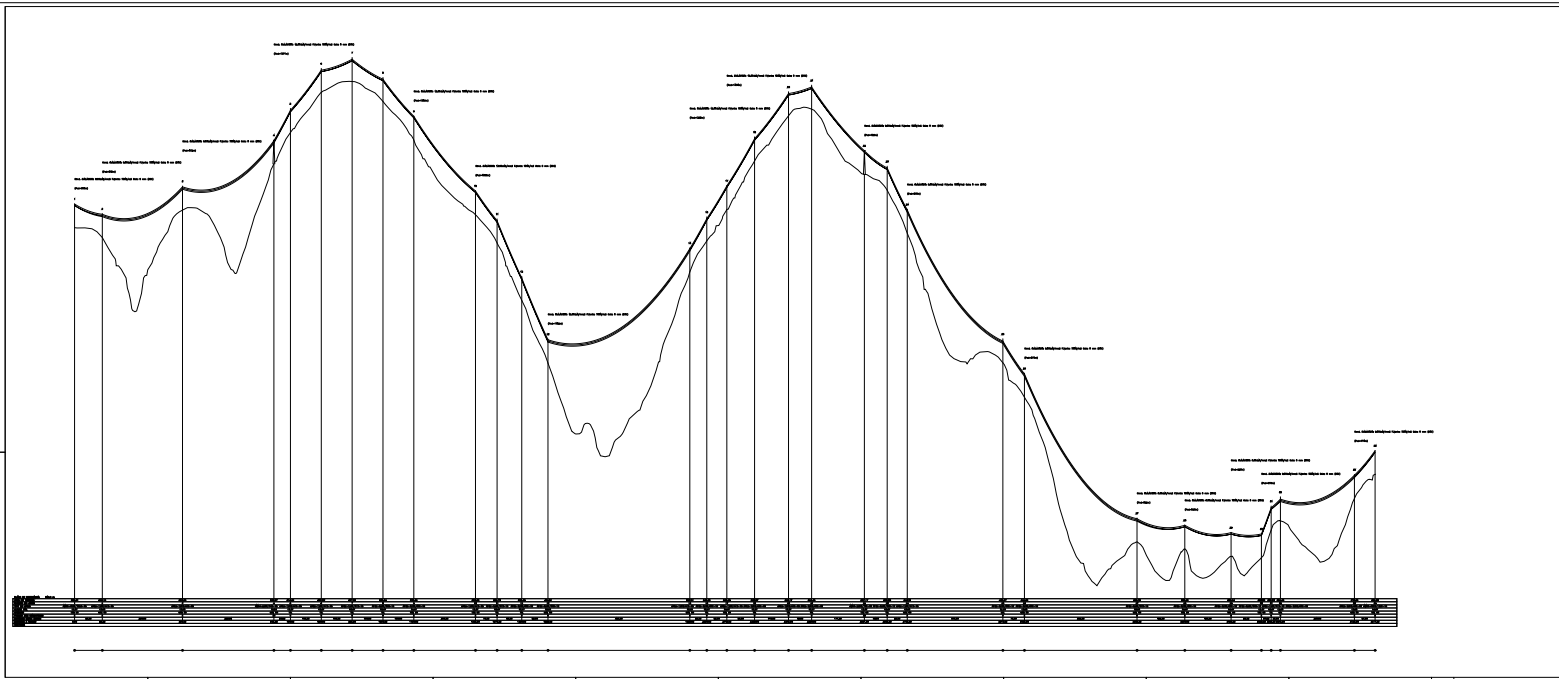
Anexo D

Linha da Pampilhosa: Apoios Metálicos



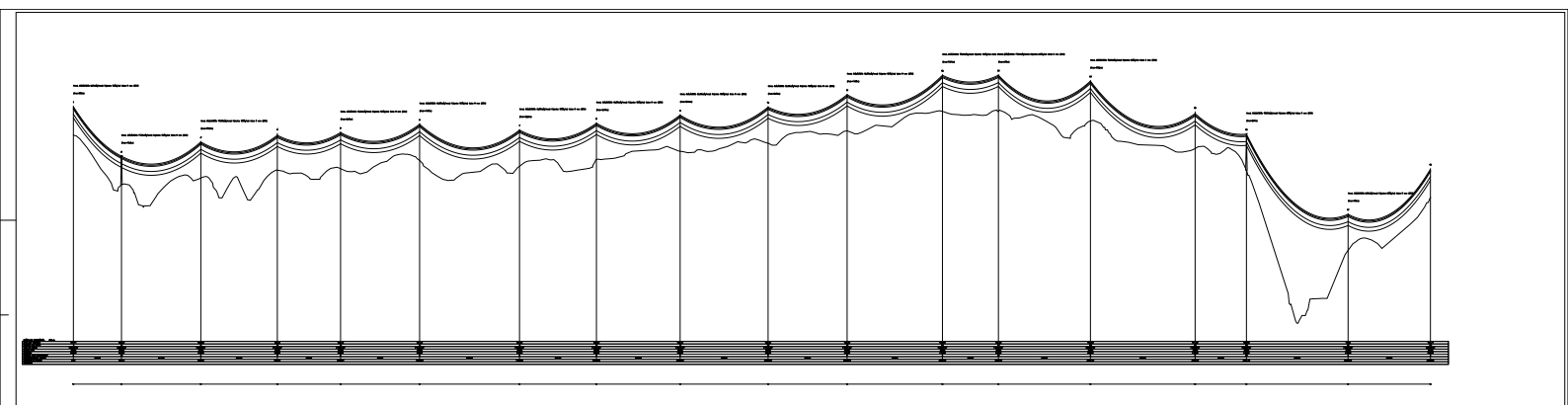
Anexo E

Linha da Pampilhosa: Apoios Betão



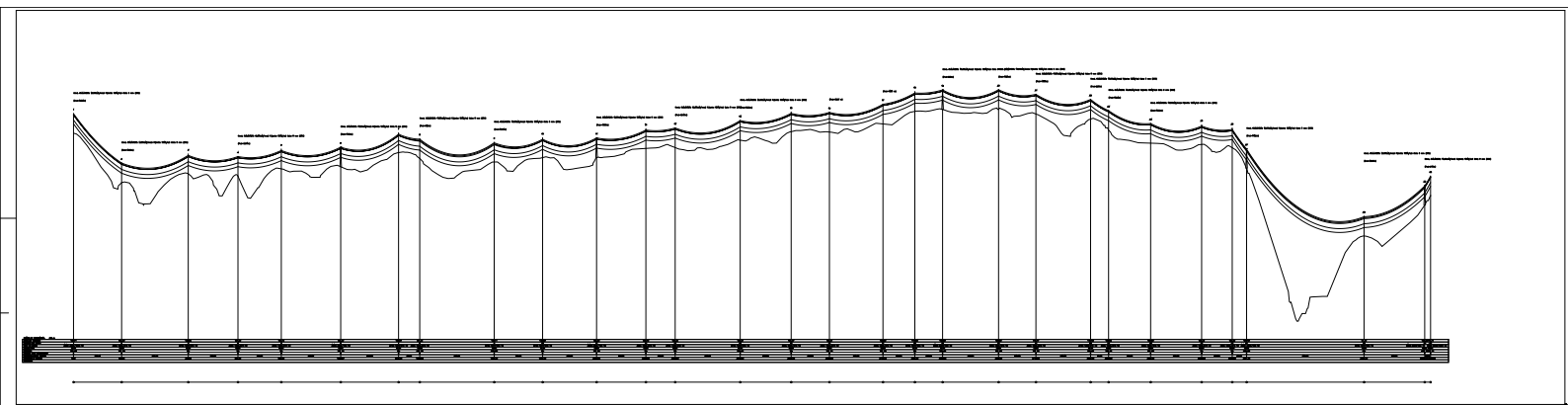
Anexo F

Linha em Romão: Apoios Metálicos



Anexo G

Linha em Romão - Apoios Betão



Referências

- [1] EDP Distribuição Energia S.A. Guia Técnico de Terras, DRE-C11-040/N.
- [2] Vera Mónica Silva. Automatização do Projeto de Linhas Elétricas: Criação de Modelo Matemático para Minimização de Custos. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Julho 2014.
- [3] Manuel Bolotinha. *Distribuição de Energia Elétrica em Média e Baixa Tensão - Manual*. Engebook, Janeiro 2019.
- [4] Filipe Gonçalves. Projeto de Execução de Linhas de Média Tensão - Estágio na Empresa JAG-Power. Tese de mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Setembro 2011.
- [5] Pedro Oliveira. Aplicação da tecnologia de deteção ultrassónica para a caracterização de defeitos elétricos em componentes das Redes de Energia. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Janeiro 2016.
- [6] Alice Silva. Projeto de uma Linha de Alta Tensão. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Fevereiro 2019.
- [7] EDP Distribuição Energia S.A. EDP Distribuição em Números 2017, 2018. Disponível em <https://www.edpdistribuicao.pt/pt-pt/comercializadores/em-numeros/>, acessado a última vez em 12 de Maio de 2019.
- [8] ERSE Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos. Distribuição, 2017. Disponível em <http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/distribuicao/Paginas/default.aspx>, acessado a última vez em 24 de abril de 2019.
- [9] EDP Distribuição Energia S.A. Notícias - Temporal Ana danifica rede de distribuição, 2017. Disponível em <https://www.edpdistribuicao.pt/pt-pt/noticias/2017/12/11/temporal-ana-danifica-rede-de-distribuicao>, acessado a última vez em 26 de abril de 2019.
- [10] EDP Distribuição Energia S.A. Notícias - EDP Distribuição recupera a totalidade da rede elétrica destruída pelos incêndios, 2017. Disponível em <https://www.edpdistribuicao.pt/pt-pt/noticias/2017/10/20>, acessado a última vez em 26 de abril de 2019.
- [11] Direção de Serviços de Energia Elétrica. Edição DGE do Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão, Abril 1993.

- [12] Helder Leite. As Linhas Aéreas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Março 2018.
- [13] Carina Pinto. Viabilidade Técnica e Económica dos Cabos de Alta Temperatura num Projeto de Linhas de Alta Tensão. Tese de mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Julho 2017.
- [14] EDP Distribuição Energia S.A. Guia de Coordenação de Isolamento, DRE-C010-001/E, Novembro 2007.
- [15] José Rui Ferreira. Linhas de Transmissão, 2004.
- [16] Cabelte SA. Cabos Nús para Linhas Aéreas, 2019. Disponível em http://svrweb.cabelte.pt/pt-pt/produtos_servicos/Cabos_energia/Nus_para_linhas_aereas, acessado a última vez em 10 de Maio de 2019.
- [17] José Neves dos Santos. Condutores e Cabos de Energia, FEUP, Novembro 2005.
- [18] Instituto Nacional de Aviação Civil. LIMITAÇÕES EM ALTURA E BALIZAGEM DE OBSTÁCULOS ARTIFICIAIS À NAVEGAÇÃO AÉREA, 6 de Maio.
- [19] Instituto da Conservação da Natureza e da Biodiversidade. Manual de apoio à análise de projetos relativos à instalação de linhas aéreas de distribuição e transporte de energia elétrica – Componente Avifauna, Janeiro 2019.