



# Análise SWOT do aumento de temperatura de funcionamento dos condutores de linhas aéreas

**BRUNO FILIPE RIBEIRO BARROS**

Julho de 2023

# ANÁLISE SWOT DO AUMENTO DE TEMPERATURA DE FUNCIONAMENTO DOS CONDUTORES DAS LINHAS AÉREAS

BRUNO FILIPE RIBEIRO BARROS



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Eléctricos de Energia

2023

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de  
TEDSEE – Dissertação/Estágio do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas  
Elétricos de Energia

Candidato: Bruno Filipe Ribeiro Barros, Nº 1171265, 1171265@isep.ipp.pt

Orientação científica: Professor Custódio Dias, cpd@isep.ipp.pt

Empresa: E-REDES

Supervisão: Engenheiro Luís Miguel Santos Moreira,

LUISMIGUEL.SANTOSMOREIRA@e-redes.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

**2023**



"The only way to do great work is to love  
what you do." - Steve Job

## *Agradecimentos*

Em primeiro lugar, gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos aos meus pais, pela dedicação, confiança e incentivo que sempre demonstraram ao longo da minha vida. Sem o apoio deles, sei que não teria sido possível alcançar este marco importante na minha vida. Estarei sempre grato por todas as oportunidades que me deram e sacrifícios que fizeram para o meu bem.

Um agradecimento especial também à minha irmã, ao meu irmão, à minha avó e aos restantes membros da minha família pelo apoio constante e pelo incentivo ao longo de toda a minha jornada académica.

Quero também expressar o meu profundo agradecimento ao meu orientador, Doutor Custódio Pais Dias, professor no Instituto Superior de Engenharia do Porto. Desde que o conheci tive sempre imenso gosto em vê-lo lecionar e aprender mais, não faria sentido para mim se o professor não me acompanhasse neste meu último passo.

Ao Engenheiro Luís Moreira quero expressar a minha gratidão pela sua ajuda inestimável na minha formação, não apenas académica, mas também pessoal. Terei sempre um enorme respeito por si e tudo me proporcionou.

Por último, mas certamente não menos importante, a minha namorada, Raquel. Quero agradecer do coração toda a compreensão que tens, momentos que passamos juntos e felicidade que me proporcionaste durante esta fase e proporcionas no meu dia-a-dia.

Bruno Barros

## *Resumo*

Com o aumento cada vez maior da dependência da sociedade moderna em relação à eletricidade e o consequente aumento do consumo, é necessário utilizar equipamentos domésticos e industriais mais eficientes para lidar com as necessidades energéticas em crescimento constante. Isso, por sua vez, requer a construção de redes de distribuição eficientes para levar a eletricidade aos centros consumidores.

Diante desse desafio os engenheiros especializados em Sistemas de Energia Elétrica constantemente se deparam com a questão de como manter altos padrões de qualidade de serviço, ao mesmo tempo que otimizam o número de equipamentos utilizados na rede, a fim de minimizar os investimentos necessários.

A dissertação tem como objetivo realizar uma análise à possibilidade do aumento de temperatura máxima de funcionamento das linhas aéreas como solução alternativa para as crescentes necessidades elétricas.

Com o intuito de verificar a eficácia desta possibilidade, foram realizados quatro projetos. Dois foram realizados utilizando o condutor ALACO160, um condutor tipicamente utilizado na saída de subestações de alta tensão/média tensão. Os restantes projetos foram realizados utilizando o condutor ALACO90, que é normalmente utilizado em interligações de linhas de média tensão.

Após a elaboração dos projetos correspondentes, realizou-se uma análise SWOT em três casos de estudo. Esses casos de estudo apresentaram problemas, para os quais foram propostas duas soluções. Uma das soluções baseou-se no aumento de temperatura como uma abordagem para responder às necessidades previamente mencionadas. Os casos de estudo foram criados e analisados para avaliar a viabilidade de utilizar o aumento de temperatura nos condutores como uma solução aplicável.

Por fim, após a realização da análise SWOT, foram tiradas as conclusões relativas em qual pode ser justificado o aumento de temperatura das linhas como uma solução indicada para resolver o problema das cargas crescentes no sistema elétrico. Essas conclusões foram baseadas nos aspetos técnicos e na viabilidade económica, fornecendo recomendações sobre a solução mais eficiente e eficaz para enfrentar esse desafio.

# *Abstract*

With modern society's increasing dependence on electricity and the consequent rise in consumption, it is necessary to use more efficient domestic and industrial equipment to cope with the ever-growing energy needs. Consequently, the construction of efficient distribution networks becomes vital in order to effectively deliver electricity to the consuming centers.

Faced with this challenge, engineers specialised in Electrical Power Systems are constantly faced with the question of how to maintain high standards of service quality while optimising the number of equipment used in the network in order to minimise the necessary investments.

This dissertation aims to analyse the possibility of increasing the maximum operating temperature for overhead lines as an alternative solution to the growing electricity needs.

In order to verify the efficiency of this theory, five projects were carried out. Two projects were carried out using the conductor ALACO160, a conductor typically used at the output of high voltage/medium voltage substations. The remaining projects were carried out using the conductor ALACO90, which is typically used in medium voltage line interconnections.

After the elaboration of the corresponding projects, a SWOT analysis was carried out on three case studies. These case studies presented problems, for which two solutions were proposed. One of the solutions was based on temperature increase as an approach to respond to the previously mentioned needs. The case studies were created and analysed to assess the feasibility of using temperature rise in conductors as an applicable solution.

Finally, after carrying out the SWOT analysis, conclusions were drawn on which can be the increase in the temperature of the lines, can be justified, as an indicated solution to solve the problem of increasing electrical loads. These conclusions were based on technical aspects and economic viability, providing recommendations on the most efficient and effective solution to address this challenge.

## *Índice*

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>1.2. OBJETIVOS.....</b>	<b>19</b>
<b>1.3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO .....</b>	<b>19</b>
<b>2. ESTADO DE ARTE.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1. EVOLUÇÃO DOS PROJETOS DE LINHAS AÉREAS .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2. ATUALIDADE.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.1 SISTEMA DE INFORMAÇÃO TÉCNICA – DESIGN MANAGER ...</b>	<b>25</b>
<b>2.3. FASES DO PROJETO - LINHA AÉREA MT .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.1 ENQUADRAMENTO LEGAL.....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.2 PRÉ-ESTUDO .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.3 ESTUDO .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.4 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO .....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.5 TRAÇADO FINAL .....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.6 LICENCIAMENTO .....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.7 COMEÇO DE OBRA .....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.8 CONCLUSÃO .....</b>	<b>30</b>
<b>3. CONCEITOS SOBRE CONDUTORES ELÉTRICOS.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1. NOÇÕES BÁSICAS .....</b>	<b>31</b>
<b>3.1.1. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1.1.1. INTENSIDADE DE CORRENTE NOMINAL .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1.1.2. RESISTÊNCIA ELÉTRICA .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1.1.3. PERDAS DE ENERGIA .....</b>	<b>34</b>
<b>3.1.1.3. DISTÂNCIA GEOMÉTRICA ENTRE FASES .....</b>	<b>35</b>
<b>3.1.1.4. QUEDAS DE TENSÃO .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1.2. CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1.2.1 MÚLTIPLA DEPENDÊNCIA TÉRMICA.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1.2.2 EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO KUIPERS-BROWN.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1.3. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS .....</b>	<b>39</b>
<b>3.1.3.1 FLECHAS DE MONTAGEM.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1.4. CONCLUSÃO .....</b>	<b>41</b>
<b>4. ELEMENTOS CONSTITUINTES DE UMA LINHA AÉREA DE DISTRIBUIÇÃO .....</b>	<b>42</b>
<b>4.1. CONDUTORES .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1.1. CONDUTORES AAAC .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1.2. CONDUTORES ACSR.....</b>	<b>44</b>

4.1.3	CONDUTORES ACCC .....	45
4.2	CABOS DE GUARDA .....	46
4.3	ISOLADORES .....	47
4.4	APOIOS .....	49
4.5	FUNDAÇÕES .....	52
4.6	ARMAÇÕES .....	53
4.7	REDES DE TERRA .....	53
4.8	BALIZAGEM AERONÁUTICA .....	54
4.9	DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO À AVIFAUNA .....	56
4.10	CONCLUSÃO .....	57
5.	CÁLCULO MECÂNICO .....	58
5.1	TENSÃO MECÂNICA MÁXIMA .....	59
5.2	ESTADOS ATMOSFÉRICOS .....	59
5.2.1.	INVERNO .....	59
5.2.2.	PRIMAVERA .....	60
5.2.3.	VERÃO .....	60
5.3	FORÇAS EXERCIDAS PELOS AGENTES ATMOSFÉRICOS E CONDUTORES .....	60
5.3.1	PESO DO CONDUTOR .....	61
5.3.2.	AÇÃO DO VENTO .....	61
5.3.2.1.	COEFICIENTE DE REDUÇÃO .....	61
5.3.2.2.	COEFICIENTE DE FORMA .....	62
5.3.2.3.	PRESSÃO DINÂMICA DO VENTO .....	62
5.3.3.	AÇÃO DO GELO .....	63
5.4	COEFICIENTES DE SOBRECARGA .....	64
5.5	VÃO CRÍTICO E EQUIVALENTE .....	64
5.6	ESTADO ATMOSFÉRICO MAIS DESFAVORÁVEL .....	66
5.7	EQUAÇÃO DE ESTADOS .....	66
5.8	CÁLCULO DO PARÂMETRO E DA FLECHA MÁXIMA .....	67
5.8.1	VÃOS DE NÍVEL .....	68
5.8.2	VÃOS DESNIVELADOS .....	70
5.9	DESVIO TRANSVERSAL DAS CADEIAS DE ISOLADORES DE SUSPENSÃO .....	71
5.10	DISTÂNCIAS REGULAMENTARES .....	73
5.11	ESTABILIDADE DOS APOIOS .....	74
5.11.1	APOIOS DE ALINHAMENTO E DE REFORÇO EM ALINHAMENTO .....	75
5.11.2	APOIOS DE ÂNGULO E REFORÇO EM ÂNGULO .....	80

5.11.3	APOIOS DE FIM DE LINHA.....	84
5.11.4	APOIOS DE DERIVAÇÃO .....	86
5.12	CONCLUSÃO .....	89
<b>6.</b>	<b>PROJETO DE LINHAS AÉREAS.....</b>	<b>90</b>
6.1.	CARACTERÍSTICAS DOS CONDUTORES .....	90
6.2	PROJETO DE UMA LINHA AÉREA 15kV .....	92
6.2.1	TENSÃO MECÂNICA MÁXIMA .....	92
6.2.2	COEFICIENTES DE SOBRECARGA.....	92
6.2.3	EQUAÇÃO DOS ESTADOS .....	94
6.2.4	PARÂMETRO DE CATENÁRIA E FLECHA MÁXIMA.....	95
6.2.5	DESVIO TRANSVERSAL DE CADEIAS .....	95
6.2.6	CÁLCULO DA ESTABILIDADE DOS APOIOS .....	96
6.2.6.1	APOIOS DE ALINHAMENTO .....	96
6.2.6.2	APOIOS DE ÂNGULO.....	98
6.2.6.3	APOIOS DE REFORÇO .....	100
6.2.6.4	APOIOS DE DERIVAÇÃO.....	102
6.2.6.5	APOIOS DE FIM DE LINHA .....	105
6.3	CONCLUSÃO.....	106
<b>7.</b>	<b>ANÁLISE SWOT .....</b>	<b>107</b>
7.1	ENQUADRAMENTO .....	107
7.2	CASOS DE ESTUDO .....	108
7.2.1	CENÁRIO 1.0.....	109
7.2.1.1	IMPACTO TÉCNICO - ELÉTRICO.....	109
7.2.1.2	IMPACTO ECONÓMICO .....	113
7.2.1.3	ANÁLISE FINAL.....	116
7.2.2	CENÁRIO 1.1.....	117
7.2.2.1	IMPACTO TÉCNICO - ELÉTRICO.....	118
7.2.2.2	IMPACTO ECONÓMICO .....	118
7.2.2.3	ANÁLISE FINAL .....	119
7.3	CENÁRIO 2.....	120
7.3.1.1	IMPACTO TÉCNICO - ELÉTRICO.....	120
7.3.1.2	IMPACTO ECONÓMICO .....	122
7.3.1.3	ANÁLISE FINAL.....	124
7.4	CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS .....	125
7.4.1	FLECHAS MÁXIMAS .....	125
7.4.2	DISTÂNCIAS ENTRE CONDUTORES .....	127
7.5	CONCLUSÃO .....	128

<b>8. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>130</b>
<b>8.1 CONCLUSÃO .....</b>	<b>130</b>
<b>8.2 TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>131</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>132</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>135</b>

## *Índice de Figuras*

<b>Figura 1 – Estação base</b>	22
<b>Figura 2 – Exemplo de um projeto realizado manualmente</b>	23
<b>Figura 3 – Tensões de montagem do cabo ACSR 160</b>	24
<b>Figura 4 – Curva Catenária de 1000 m</b>	24
<b>Figura 5 – Ferramenta SIT-DM</b>	26
<b>Figura 6 – Intensidade de corrente máxima admissível em condutores ACSR [1]</b>	33
<b>Figura 7 – Condutor ACSR 160 e sua corrente máxima admissível [1]</b>	39
<b>Figura 8 – Representação da flecha máxima e mínima num vão [2]</b>	40
<b>Figura 9 – Representação de um condutor AAAC [17]</b>	44
<b>Figura 10 - Representação de um condutor ACSR [19]</b>	45
<b>Figura 11 - Representação de um condutor ACCC [21]</b>	45
<b>Figura 12 - Representação de cabos de guarda [22]</b>	46
<b>Figura 13 - Constituição de um cabo OPGW [23]</b>	47
<b>Figura 14 - Cadeia em Amarração [24]</b>	49
<b>Figura 15 - Cadeia em Suspensão [24]</b>	49
<b>Figura 16 - Representação do esquemático de trações [1]</b>	50
<b>Figura 17 - Representação da ação do vento nos condutores [1]</b>	50
<b>Figura 18 - Representação dos 3 esforços [11]</b>	50
<b>Figura 19 - Apoio em Alinhamento [11]</b>	51
<b>Figura 20 - Apoio em Ângulo [11]</b>	51

<b>Figura 21 - Apoio de derivação [11]</b>	51
<b>Figura 22 - Apoio em posição de reforço [11]</b>	52
<b>Figura 23 - Apoio em fim de linha [11]</b>	52
<b>Figura 24 - Fundação de apoios metálicos [25]</b>	52
<b>Figura 25 - Tipologia de Armações [11]</b>	53
<b>Figura 26 - Esquema de ligação à terra</b>	54
<b>Figura 27- Balizagem Diurna [1]</b>	55
<b>Figura 28 - Exemplo de um sinalizador luminoso [26]</b>	56
<b>Figura 29 - BFD Simples e BFD Dupla [27], [28]</b>	57
<b>Figura 30 - FBF giratórios e FBF Fitas [3]</b>	57
<b>Figura 31 - Representação das forças exercidas sobre um condutor [3][16]</b>	60
<b>Figura 32 - Representação do fluxograma de decisão do estado atmosférico mais desfavorável [11]</b>	66
<b>Figura 33 - Representação de um vão nivelado [11]</b>	68
<b>Figura 34- Representação de um vão desnivelado [11]</b>	70
<b>Figura 35 - Esquema das forças que atuam nas cadeias de suspensão [11]</b>	72
<b>Figura 36 - Forças exercidas sobre a cadeia de isoladores [11]</b>	72
<b>Figura 37 - Exemplo de um apoio e os respectivos ângulos [11]</b>	74
<b>Figura 38 - Composição do condutor ACSR 160 [30]</b>	91
<b>Figura 39 - Composição do condutor ACSR 90 [30]</b>	91
<b>Figura 40 - Representação do fluxograma de decisão do estado atmosférico mais desfavorável [11]</b>	94

<b>Figura 41 - Comparação entre custos e corrente transportada para as duas soluções.</b>	
117	
<b>Figura 42 - Comparação entre custos e corrente transportada para as duas soluções.</b>	
119	
<b>Figura 43 - Comparação entre custos e corrente transportada para as duas soluções.</b>	
124	
<b>Figura 44 - Flecha Máxima para ALACO 160 a 50°C</b>	125
<b>Figura 45 - Flecha Máxima para ALACO 160 a 65°C</b>	126
<b>Figura 46 - Variação das Flechas Máximas para respectivas temperaturas</b>	126
<b>Figura 47 - Variação da distância entre condutores - ALACO 160 a 50°C</b>	127
<b>Figura 48 - Variação da distância entre condutores - ALACO 160 a 65°C</b>	127

## *Índice de Tabelas*

<b>Tabela 1 - Esquema de uma Linha Aérea de Distribuição de Energia Elétrica</b>	42
<b>Tabela 2 - Diferentes tipos de Isoladores e respectivas vantagens e desvantagens [1]</b>	48
<b>Tabela 3- Coeficiente de forma de condutores e cabos de guarda</b>	62
<b>Tabela 4 - Pressão dinâmica do vento consoante estação e altura</b>	62
<b>Tabela 5 - Pressão dinâmica do vento para zonas excecionalmente expostas</b>	63
<b>Tabela 6 – Espessura da manga do gelo consoante altura</b>	63
<b>Tabela 7 - Distâncias Regulamentares a obstáculos [29]</b>	73
<b>Tabela 8 - Características do Condutor ACSR 160 Partridge a 65°C</b>	90
<b>Tabela 9 - Característica do Condutor ACSR 90 a 65°C</b>	91
<b>Tabela 10 - Características dos Cantões da Linha Aérea MT</b>	94
<b>Tabela 11 - Comparação técnica da Solução 1 e Solução 2</b>	113
<b>Tabela 12 - Custos da Solução Convencional – Condutor ALACO160 a 50°C</b>	113
<b>Tabela 13- Remodelação da Linha ALACO 90 A 50°C Para 65°C</b>	114
<b>Tabela 14 - Comparação dos custos de Implementação das Soluções</b>	114
<b>Tabela 15 - Comparação Económica das duas soluções</b>	116
<b>Tabela 16 - Comparação técnica da Solução 1 e Solução 2</b>	118
<b>Tabela 17 Custos da Solução Convencional – Condutor ALACO160 a 50°C</b>	118
<b>Tabela 18 - Custos da Solução Alternativa – Condutor ALACO90 a 65°C</b>	118
<b>Tabela 19 - Comparação Económica das duas soluções</b>	119
<b>Tabela 20 - Comparação Técnica da Solução 1 e Solução 2</b>	122

<b>Tabela 21 - Custos da Solução 1 – 2x ALACO 90 – 50°C</b>	122
<b>Tabela 22 - Custos da Solução Alternativa – Condutor ALACO160 a 65°C</b>	123
<b>Tabela 23 - Comparação dos custos de Implementação das Soluções</b>	123
<b>Tabela 24 - Comparação Económica das Duas soluções</b>	124

## *Siglas e Acrónimos*

AAAC	–	All Aluminium Alloy Conductors
ACCC	–	Aluminium Conductor Composite Core
ACSR	–	Aluminium Conductor Steel Reinforced
CAD	–	<i>Computer Aided Design</i>
MT	–	Média Tensão
RLIE	–	Regulamento de Licenças de Instalações Elétricas
RSLEAT	–	Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão
SCADA	–	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SIT-DM	–	Sistema de Informação Técnica - <i>Design Manager</i>

# 1. INTRODUÇÃO

Este documento é desenvolvido no âmbito da unidade curricular de Dissertação/Estágio, do 2º ano do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia (MEE-SEE), do Departamento de Engenharia Eletrotécnica, do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

O documento assinala toda a evolução deste estudo, incluindo investigações relativamente à exploração de linhas aéreas no passado e na atualidade, bases teóricas de como a temperatura é um fator importante nos condutores elétricos e que implicações terá na exploração nas linhas aéreas de distribuição.

Nesta secção é apresentada uma contextualização do projeto que se irá desenvolver, os seus focos principais, assim como uma apresentação da estrutura deste documento.

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A elaboração de linhas aéreas de média tensão (MT) tem como principal foco tornar possível a distribuição de energia elétrica a longas distâncias, satisfazendo as necessidades elétricas gradualmente crescentes e o surgimento de novos consumidores.

As redes de distribuição têm sido continuamente aperfeiçoadas em resposta ao aumento populacional e consequente evolução dos consumos. A construção destas redes deve ser conseguida assegurando o trinómio de qualidade de serviço, minimização de custos de investimento e gestão socioambiental.

A conceção das redes de distribuição contempla elevados custos de investimento e pode apresentar complexidade a nível técnico e/ou social. Em prol do que foi referido, num futuro relativamente próximo as redes de distribuição de energia elétrica terão de ser capazes de distribuir fluxos de potência superiores ao seu atual limite.

Atualmente a construção de novas linhas de reforço, criação de interligações de linhas existentes, ou até mesmo a substituição do condutor de redes existentes são soluções

tipificadas para a necessidade de alimentar as cargas elétricas, crescentes no sistema elétrico.

Este documento analisa uma alternativa às medidas tipificadas referidas, nomeadamente a hipótese de aumentar a temperatura de funcionamento dos condutores elétricos, possibilitando, assim, um aumento de capacidade de transporte dos condutores. Esta hipótese terá a possibilidade de ser mais economicamente viável, apresentar maior facilidade de implementação e não aumentará o impacto visual sobre o ambiente relativamente à construção de novas linhas.

## **1.2. OBJETIVOS**

O objetivo principal desta dissertação é o estudo da viabilidade de exploração de linhas aéreas de distribuição MT a temperaturas superiores às atualmente em uso, concretamente a sessenta e cinco graus centígrados.

Para o efeito será elaborado um projeto de uma linha elétrica aérea de 15kV, fictícia, onde serão abordados não só os esforços nos condutores e apoios, mas também as componentes elétricas dos condutores, como densidade elétrica e perdas respetivas, considerando o aumento da temperatura máxima de funcionamento a que iremos projetar as linhas, podendo apresentar soluções diferentes no que se refere a:

- Seleção de condutores;
- Corrente transportada;
- Condições de segurança;
- Perdas;
- Investimento económico.

## **1.3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO**

Este documento está organizado em 4 capítulos, refletindo o trabalho desenvolvido. Nesta seção irá ser feita uma breve apresentação sobre eles.

- Capítulo 1 – Contempla a presente secção informativa do documento, onde também se refere as motivações e objetivos para o desenvolvimento desta dissertação.
- Capítulo 2 – É elaborado um estado de arte, referente à evolução dos projetos de linhas aéreas, e descritas as fases que atualmente integram um projeto de redes de distribuição

aéreas.

- Capítulo 3 – Neste capítulo, são abordadas as três variáveis que afetam os condutores elétricos e, por consequência, têm impactos diversos nas redes elétricas e fundamentada graficamente e matematicamente o estudo desta dissertação.
- Capítulo 4 – No capítulo 4 são referidos os elementos constituintes de uma linha aérea de distribuição de energia, nomeadamente os diferentes tipos de condutores, onde são discutidas as diferentes aplicabilidades dos mesmos.
- Capítulo 5 – Neste capítulo, foram abordados os cálculos mecânicos e a determinação dos esforços mecânicos aos quais os apoios das linhas aéreas estão sujeitos devido aos fatores climatéricos e trações de montagem. Foram discutidos os métodos utilizados para calcular esses esforços e como eles afetam os componentes de suporte.
- Capítulo 6 – É exemplificado os cálculos mecânicos para um projeto de linha aérea tipo.
- Capítulo 7 – É feito um enquadramento sobre a temática deste estudo, analisando as vertentes técnicas, económicas dos cenários propostos comparando soluções tipicamente utilizadas com alternativas.
- Capítulo 8 – Aborda as conclusões relativas ao estudo efetuado na presente dissertação, discutindo futuras temáticas a estudar e a possivelmente implementar.

## 2. ESTADO DE ARTE

A função principal das redes de distribuição é garantir a chegada da energia elétrica até aos consumidores, sejam eles industriais ou domésticos. A construção de uma rede aérea contempla as vertentes de custo e melhoria de qualidade dos ativos, nos últimos anos outra variável que entrou em jogo foi o impacto visual que as linhas têm.

Um projeto de engenharia de linhas elétricas pode nascer consoante a necessidade de:

- Interligação de linhas existentes;
- Imposições dos agentes reguladores;
- Ligação a novos clientes;
- Melhoria da qualidade de serviço;
- Remodelação da rede;
- Alteração de traçados de linhas existentes.

Neste estado de arte serão abordados os métodos inicialmente utilizados em projetos de linhas aéreas, o apoio de ferramentas específicas ajudou os projetistas a evoluir com as obras mais eficientemente e com as etapas que a construção de uma rede aérea contempla.

### 2.1. EVOLUÇÃO DOS PROJETOS DE LINHAS AÉREAS

A conceção de um projeto de uma linha aérea é um processo de engenharia específico, que prevê e simula o comportamento do sistema baseado em princípios elétricos e mecânicos. Atualmente, os projetos são executados de forma distinta do que era possível fazer antigamente, pois nessa época, não estavam disponíveis as ferramentas que atualmente podemos utilizar, por esse motivo os projetos eram executados à mão [3].

Durante a fase de planeamento, os topógrafos e projetistas utilizavam mapas militares para definir vários traçados iniciais. Em caso de dúvida, acediam ao terreno para poderem verificar se o local coincidia com a definição, ou seja, se existiam obstáculos que poderiam fazer com que a direção da linha fosse alterada.

Após a definição do traçado final da linha, era dado início aos levantamentos no terreno. Com a ajuda de equipamento de medição que existia na altura, o topógrafo montava a estação base com o objetivo de referenciar os pontos vitais para o projeto. No entanto, quando não havia condições para visualizar os pontos de forma frontal, utilizavam uma estação móvel, figura 1, deslocavam-se para um determinado ponto e obtinham as coordenadas necessárias. Em seguida, deslocavam-se para o ponto seguinte.

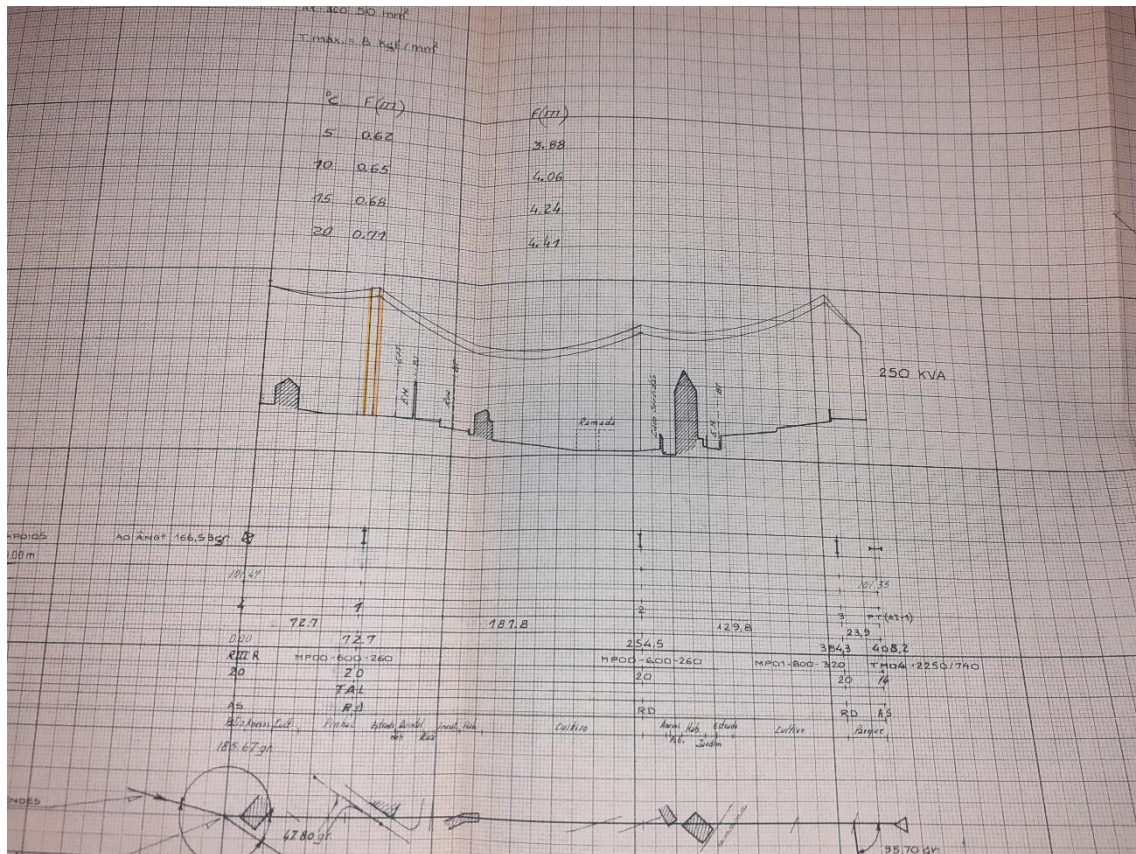
A primeira quota era decidida pela informação proveniente da carta militar e as alturas restantes eram determinadas pelo dispositivo de medida, que fornecia valores de altura em proporção aos ângulos horizontal e vertical, medidos por marcadores geodésicos.



**Figura 1 – Estação base**

Posteriormente, os técnicos elaboravam um esboço sem escala que abrangia o perfil do terreno e uma disposição da parcela da área em redor. Este último incluía pormenores tais como: impedimentos encontrados, nomes dos proprietários, linhas aéreas existentes e zonas angulares.

Em seguida, os desenhadores utilizavam papel milimétrico, conforme apresentado na figura 2, para desenhar o perfil do terreno à escala, com as quotas identificadas, e criavam o plano da parcela com a maior precisão possível, com toda a informação sobre os ângulos que o traçado da linha fazia [4].



**Figura 2 – Exemplo de um projeto realizado manualmente**

No que diz respeito à fase de cálculos elétricos e mecânicos, o grau de dificuldade para os responsáveis pelo projeto era muito elevado, devido aos instrumentos de cálculo existentes na altura, serem muito rudimentares. A resolução de equações complexas, como a equação de estados, tinha de ser feita à mão, o que causava um atraso no projeto. De modo a solucionar este problema e possibilitar um avanço mais rápido de projetos, os fabricantes de condutores elétricos disponibilizaram vários documentos, sobre as características dos cabos [5], tais como:

- As características técnicas do cabo;
- As tensões de rutura máximas e os coeficientes de segurança associados a elas;
- Várias escalas para as condições atmosféricas e a existência de gelo;
- Para cada vão/cantão correspondente, são calculadas as tensões de montagem e flechas.

Consultando estes dados, os cálculos afetos ao projeto eram mais fáceis e rápidos de fazer, promovendo um melhor progresso dos trabalhos. A figura 3 apresenta uma tabela das tensões de montagem do condutor ALACO 160 para diferentes temperaturas e comprimentos.

AL-ACD 160 MM2		T.MAN= 12,5 KG/MM2		ESCALAO 1		E.M.P.									
S= 157,90 MM2		V2= 16,0 KG/M2		M2= 1,14		M3=0,6320 KG/M									
D= 16,92 MM		V1= 55,0 KG/M2		M1= 1,66		M4=0,9191 KG/M									
P0= 0,0935 KG/CM5						* VAL. CALCULO = 261,5 **									
VAD	-10	TENSÕES DE MONTAGEM										EQUIV. CU 9,95%			
		-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
25	0,0	12,44	11,73	10,99	10,24	9,52	8,79	8,06	7,33	6,60	5,87	5,13	4,41	3,68	2,95
30	0,0	12,46	11,77	10,99	10,24	9,53	8,80	8,07	7,35	6,62	5,91	5,18	4,45	3,72	
40	0,0	12,45	11,78	10,99	10,24	9,54	8,81	8,09	7,37	6,65	5,94	5,21	4,48	3,75	
50	0,0	12,44	11,72	10,95	10,22	9,55	8,83	8,11	7,41	6,71	6,01	5,31	4,61	3,91	
60	0,0	12,44	11,71	10,92	10,20	9,57	8,87	8,17	7,49	6,81	6,13	5,45	4,77	4,09	
70	0,0	12,43	11,71	10,92	10,20	9,57	8,87	8,17	7,49	6,81	6,13	5,45	4,77	4,09	
80	0,0	12,43	11,70	10,92	10,20	9,58	8,89	8,21	7,54	6,87	6,20	5,53	4,85	4,17	
90	0,0	12,40	11,69	10,93	10,22	9,62	8,92	8,25	7,59	6,92	6,25	5,58	4,91	4,24	
100	0,0	12,39	11,68	10,93	10,23	9,63	8,94	8,28	7,62	6,95	6,28	5,61	4,94	4,27	
110	0,0	12,37	11,68	10,93	10,23	9,63	8,97	8,33	7,67	7,01	6,34	5,67	5,00	4,33	
120	0,0	12,35	11,67	10,93	10,23	9,65	9,01	8,38	7,77	7,12	6,45	5,78	5,11	4,44	
130	0,0	12,34	11,66	10,93	10,23	9,67	9,04	8,43	7,84	7,20	6,53	5,86	5,19	4,52	
140	0,0	12,32	11,65	10,93	10,23	9,69	9,07	8,47	7,90	7,27	6,60	5,93	5,26	4,59	
150	0,0	12,30	11,64	10,93	10,24	9,71	9,11	8,51	7,97	7,34	6,67	6,00	5,33	4,66	
160	0,0	12,29	11,63	10,93	10,25	9,74	9,15	8,57	8,03	7,40	6,73	6,06	5,39	4,72	
170	0,0	12,28	11,63	10,94	10,25	9,76	9,18	8,60	8,07	7,44	6,77	6,10	5,43	4,76	
180	0,0	12,24	11,60	10,93	10,25	9,78	9,23	8,67	8,10	7,47	6,80	6,13	5,46	4,79	
190	0,0	12,22	11,59	10,93	10,25	9,80	9,25	8,72	8,22	7,57	6,91	6,24	5,57	4,90	
200	0,0	12,20	11,58	10,97	10,25	9,83	9,29	8,77	8,29	7,63	6,97	6,30	5,63	4,96	
210	0,0	12,18	11,55	10,97	10,25	9,87	9,35	8,87	8,41	7,78	7,12	6,45	5,78	5,11	
220	0,0	12,16	11,53	10,97	10,25	9,92	9,43	8,97	8,53	7,92	7,26	6,59	5,92	5,25	
230	0,0	12,15	11,50	10,97	10,25	9,96	9,47	9,04	8,61	8,01	7,35	6,68	6,01	5,34	
240	0,0	12,13	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
250	0,0	12,11	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
260	0,0	12,09	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
270	0,0	12,07	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
280	0,0	12,05	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
290	0,0	12,03	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
300	0,0	12,01	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
310	0,0	11,99	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
320	0,0	11,97	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
330	0,0	11,95	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
340	0,0	11,93	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
350	0,0	11,91	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
360	0,0	11,89	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
370	0,0	11,87	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
380	0,0	11,85	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
390	0,0	11,83	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
400	0,0	11,81	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
410	0,0	11,79	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
420	0,0	11,77	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
430	0,0	11,75	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
440	0,0	11,73	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
450	0,0	11,71	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
460	0,0	11,69	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
470	0,0	11,67	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
480	0,0	11,65	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
490	0,0	11,63	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
500	0,0	11,61	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
510	0,0	11,59	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
520	0,0	11,57	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
530	0,0	11,55	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
540	0,0	11,53	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
550	0,0	11,51	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
560	0,0	11,49	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
570	0,0	11,47	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
580	0,0	11,45	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
590	0,0	11,43	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
600	0,0	11,41	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
610	0,0	11,39	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
620	0,0	11,37	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
630	0,0	11,35	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
640	0,0	11,33	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
650	0,0	11,31	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
660	0,0	11,29	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
670	0,0	11,27	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
680	0,0	11,25	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
690	0,0	11,23	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
700	0,0	11,21	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
710	0,0	11,19	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
720	0,0	11,17	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
730	0,0	11,15	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
740	0,0	11,13	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
750	0,0	11,11	11,47	10,96	10,25	10,01	9,57	9,15	8,75	8,30	7,64	6,97	6,30	5,63	
760	0,0	11,09</													

## **2.2 ATUALIDADE**

Atualmente, os cálculos mecânicos, assim como os projetos das linhas aéreas de distribuição passam por processos computacionais, onde o projetista apenas tem que definir as tensões de montagem e os componentes da linha.

Os computadores começaram a ser amplamente utilizados em praticamente todos os campos científicos, em resultado da revolução tecnológica. O aparecimento de programas computacionais automáticos para o cálculo de linhas aéreas foi o resultado desta evolução, aumentando a velocidade e a credibilidade do processo [6], aliviando o peso do técnico em cálculos que eram sistemáticos e demorados, possibilitando ao projetista os meios para encontrar a solução mais viável.

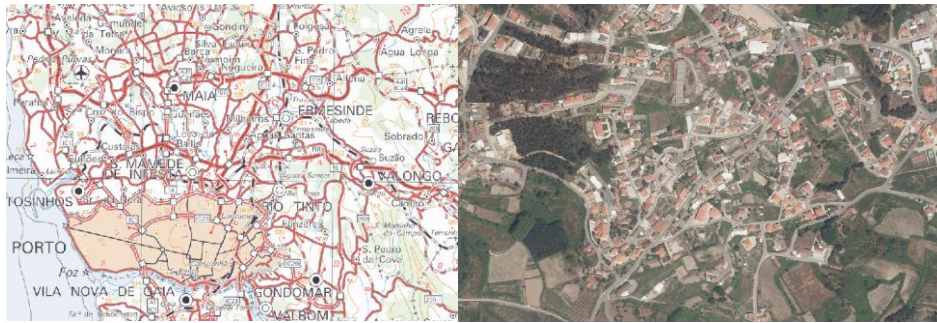
Por volta dos anos 90, começaram a aparecer programas computacionais, que permitiram à EDP – Distribuição, atual E-REDES, automatizar os cálculos das linhas aéreas. Esses *softwares* constituíram um marco importante na elaboração das redes elétricas, embora realizaram apenas cálculos mecânicos para um certo condutor elétrico [7].

### **2.2.1 SISTEMA DE INFORMAÇÃO TÉCNICA – DESIGN MANAGER**

Na atualidade, a E-REDES utiliza o programa abreviado de SIT-DM (Sistema de Informação Técnica - *Design Manager*), que é um *software* com avanços significativos face aos seus antecessores.

Possui diversas funções, possibilitando a gestão, consulta e monitorização de projetos através da sua interface com o sistema SCADA. A sua base de dados abrange todos os níveis de tensão, contendo a localização exata de todas as redes respetivas. Além das cartas militares também possui sistema satélite, que melhora a perceção do terreno em questão e, conseqüentemente, a escolha de traçados.

Permite, também, que todos os membros dos vários departamentos consigam visualizar todas as obras existentes, a fim de conseguir uma melhor gestão de trabalhos e coordenação. Na figura 5 é possível observar dois tipos de vista diferentes.



a) Carta militar

b) Fotografia via satélite

Figura 5 – Ferramenta SIT-DM

## 2.3 FASES DO PROJETO - LINHA AÉREA MT

A relação custo-benefício foi em tempos um dos elementos mais importantes na decisão de investir, ou não, em novos projetos aéreos. Atualmente, para além desta componente de redução de custos, é fundamental minimizar a repercussão que o projeto tem a nível ambiental [8].

Para fazer face às imposições crescentes, surgiram um conjunto de fases que devem ser seguidas e respeitadas na realização de projetos desta magnitude. Como resultado, os processos são separados da forma apresentada nos pontos seguintes, com o objetivo principal de exibir algumas das ações realizadas pela E-REDES.

### 2.3.1 ENQUADRAMENTO LEGAL

As linhas aéreas de alta e média tensão são bens técnicos altamente complexos, que requerem a atenção de especialistas em cada fase do seu ciclo de vida, e as atividades realizadas são regidas por leis detalhadas que garantem à sociedade não só a legalidade dos bens, mas também a sua legitimidade e integração ambiental no ambiente em que estão instaladas [1].

Na listagem seguinte, estão referidos alguns decretos de extrema importância e consulta obrigatória para desenvolvimento de projetos de linhas elétricas:

- Decreto Regulamentar N.º 1/92, de 18 de Fev. – Reg. Segurança Linhas Eléctricas de Alta Tensão – RSLEAT;
- Decreto-Lei N.º 26 852, de 30 de Julho de 1936 - Regulamento de Licenças de Instalações Eléctricas – RLIE;

- Decreto-Lei N.º 43 335, de 19 de Nov. 1960 – Regula a execução da Lei 2002 da Electrificação do País.

### **2.3.2 PRÉ-ESTUDO**

Qualquer tipo de projeto de engenharia deve ser iniciado pela fase de pré-estudo. No caso em questão, quando se procede à elaboração de um novo projeto de uma linha de distribuição, ou alteração de redes já existentes, deve ser contemplado o benefício que trará para a rede de distribuição. Projetos referentes a linhas MT nascem da necessidade de:

- Estabelecer novas ligações a clientes;
- Segurança de abastecimento;
- Qualidade de Serviço;
- Eficiência da rede;
- Eficiência operacional;
- Redução de assimetrias;
- Exigências das entidades reguladoras;

### **2.3.3 ESTUDO**

No planeamento de projetos de redes aéreas a fase de estudo é uma etapa necessária. Após determinar o local onde a linha será instalada, é fundamental conduzir uma investigação exaustiva da área, concentrando-se nos fatores que influenciam o curso futuro da linha. Para o fazer, devem ser tidas em conta várias condicionantes que influenciam a seleção do traçado final, incluindo:

- Linhas existentes;
- Presença de edifícios;
- Declives do terreno;
- Facilidade em executar a obra;
- Propriedades;
- Vias de trânsito;
- Áreas de conservação;
- Zonas protegidas.

Em projetos de engenharia desta amplitude deve sempre estar presente a ideia de minimizar os inconvenientes para todos o *stakeholders* envolvidos, sem acrescentar valor excessivo à iniciativa.

No entanto, mesmo havendo o compromisso de causar o mínimo de complicações possíveis, existem áreas que as linhas elétricas não podem atravessar, a título de exemplo<sup>1</sup>: Espaços denominados como escolares, Centros de desporto, Áreas Militares, Aeroportos, Espaços onde estejam antenas de telecomunicações, Confinamentos de materiais explosivos, entre outros.

### **2.3.4 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO**

Embora a tecnologia tenha evoluído no que se refere à construção de redes aéreas, visto que atualmente já é possível ter uma perceção do terreno com a ajuda do programa SIT-DM, a informação do terreno que um projetista pode obter através desta ferramenta ainda é limitada, como tal a topografia é sempre necessária em trabalhos como este.

O trabalho de topografia é normalmente efetuado por dois elementos, um deles o topógrafo, que irá verificar a viabilidade do traçado definido, anotar os ângulos específicos, diferenças de planos, entre outros. O outro elemento, o fiscal de obra, auxilia o topógrafo no seu trabalho, aconselhando-o em possíveis decisões quanto a modificações de traçado, o qual negocia com os proprietários do terreno as permissões.

### **2.3.5 TRAÇADO FINAL**

O *layout* final é decidido após o levantamento topográfico e é preparado um ficheiro *CAD* com informações sobre as características do terreno e o desenho parcelar.

Toda a informação relativa ao traçado da linha, bem como as cotas do terreno, deve ser incluída no perfil do terreno. Para o efeito, são utilizados pontos específicos para designar as regiões por onde passam as linhas aéreas de telecomunicações ou de linhas elétricas, e como limitam o trajeto da linha.

O levantamento topográfico também inclui edifícios, divisões de propriedades e respetiva identificação dos donos de terrenos, percursos de água, árvores e as restrições do terreno como cercas, murados e rochas.

---

<sup>1</sup>Capítulo I, Secção V, artigo 5º e 6º do RSLEAT

Com todas as variáveis em jogo tratadas, o projetista pode finalmente começar a elaborar realmente o projeto. Caberá ao engenheiro responsável, escolher a tração mecânica a utilizar nos condutores, se os apoios a utilizar serão de ferro ou betão, bem como as suas respetivas alturas, número de apoios, se utilizará cadeias de suspensão ou amarração, recorrendo ao programa SIT/DM.

### **2.3.6 LICENCIAMENTO**

De acordo com o decreto de lei nº 26852 os projetos de instalações elétricas da classe 2<sup>2</sup> públicos podem ser licenciados de duas formas.

A primeira, a licença de estabelecimento, onde o requerente, neste caso a E-REDES necessita da aprovação do Diretor Geral de Geologia e Energia, ou do Diretor Regional da Economia<sup>3</sup>.

A outra opção, embora possivelmente mais conflituosa, resultará em que o projeto se desenrole mais rapidamente, caso a E-REDES chegue a acordo com os proprietários de todos os terrenos afetados pela nova linha, ou se compromete a conseguir acordo<sup>4</sup>.

### **2.3.7 COMEÇO DE OBRA**

Após o projeto estar licenciado, passa-se à fase de construção, onde tudo que o projetista visualizou e implementou em SIT-DM passará agora para o terreno. O projetista e fiscal de obra devem acompanhar o progresso dos trabalhos, desde o começo até o fim, para garantir que tudo é executado como planeado e para coordenar melhor o local de trabalho.

Inicialmente procede-se à abertura de covas para colocação de apoios, posteriormente coloca-se as fundações dos mesmos, para, finalmente, serem colocados inteiramente no caso dos apoios de betão, ou por montantes no caso dos de ferro. Caso a linha intercete área florestal será necessário abrir a respetiva faixa de proteção e sinalizá-la devidamente, garantindo 15m de distância da linha a vegetação classificada como árvores.

Assim que os alicerces da obra estão finalizados procede-se à instalação de condutores, onde são regulados à tração planeada. Em seguida são instalados os respetivos

---

<sup>2</sup> Capítulo I, Secção III, artigo 3º do RSLEAT

<sup>3</sup> Capítulo I, artigo 8º do Decreto-Lei nº26852

<sup>4</sup> Capítulo II, artigo 27º do Decreto-Lei nº26852

equipamentos de proteção ou corte (fusíveis ou seccionadores). Após todo material estar montado, realizam-se testes para averiguar se existe algum defeito com a linha.

Finalmente, a linha é comissionada e carece de uma vistoria do Ministério de Economia, para averiguar que está tudo dentro das regras regulamentares.

### **2.3.8 CONCLUSÃO**

Os projetos de linhas aéreas são processos de engenharia específicos, que preveem e simulam o comportamento do sistema baseado em princípios elétricos e mecânicos. Ao longo dos anos melhoramentos foram feitos quanto à forma como se projetava as iniciativas, um dos passos mais fundamentais foi de facto o software *SIT-DM* que reduziu a carga de trabalho do projetista em grande escala.

No entanto, este avanço tecnológico veio acompanhado de mais necessidades no espetro eléctrico. O sistema de distribuição deve assegurar que todos os consumidores da rede eléctrica consigam obter electricidade com a melhor qualidade de serviço possível.

A metodologia para melhorar a qualidade das redes é sistemática, apresentando por vezes custos acrescidos [9] e impactos a nível socioambiental desagradáveis, pelo que alternativas a este problema devem ser procuradas.

# 3. CONCEITOS SOBRE CONDUCTORES ELÉTRICOS

Neste capítulo serão faladas noções básicas sobre os condutores elétricos e abordar-se-á as características elétricas, mecânicas e térmicas a que os mesmos estão sujeitos

O condutor elétrico constitui uma parte vital de uma linha elétrica. É por eles que a intensidade de corrente elétrica circula, assegurando desta forma as necessidades energéticas dos respectivos consumidores.

Previamente ao início do século XX, começaram a ser utilizados condutores de cobre nas linhas aéreas. Este material apresentava uma resistência elétrica mais baixa que todos os outros metais preciosos, fator importante, pois uma elevada resistência elétrica implicaria mais perdas na forma de calor (Lei de Joule).

A exigência de garantir a propagação de eletricidade para todo o tipo de terreno obrigou a que fossem desenvolvidos estudos para condutores mais resistentes, para traçados mais complexos, com vãos de maior comprimento e tendo também de garantir um tempo de vida útil de dezenas de anos [10].

A necessidade de novos condutores aliada com a vontade de utilizar condutores mais leves e mais robustos, levaram ao surgimento dos condutores de alumínio-aço, que, por sua vez, eram também mais baratos que os condutores de cobre.

## 3.1 NOÇÕES BÁSICAS

A seleção de condutores a instalar é uma decisão importante na elaboração do projeto, a escolha é feita de acordo com a corrente elétrica que se pretende inserir na rede, o custo de implementação de determinado cabo [11] e a zona onde ficará situada a instalação

elétrica, pois estão em jogo variáveis como a mudança de temperatura, gelo, neve, vento, entre outras.

Neste capítulo iremos abordar as características elétricas, térmicas e mecânicas dos cabos condutores.

### 3.1.1 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

O cálculo elétrico é uma etapa fundamental no processo de elaborar um projeto de redes aéreas, pois visa que não sejam ultrapassados os limites técnicos impostos pelos condutores. É utilizado para calcular a tensão nominal da linha a construir, assim como a secção transversal dos condutores que fazem parte dela [10].

#### 3.1.1.1. INTENSIDADE DE CORRENTE NOMINAL

Para calcular a corrente elétrica que atravessa os condutores procede-se à expressão (1):

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} * U * \cos(\varphi)} [A] \quad (1)$$

Em que:

- S – Potência aparente da carga (VA);
- U – Tensão nominal da linha (V);
- $\cos(\varphi)$  – Fator de potência, na carga.

Em função da corrente necessária para alimentar a carga, será escolhido qual o tipo de condutor mais adequado, para assegurar a distribuição de energia elétrica.

Após o cálculo da corrente, é possível calcular a densidade de corrente, por fase de condutor, através de (2):

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

Sendo:

- I – Intensidade de corrente por fase (A);
- $\sigma$  – Secção do condutor ( $mm^2$ ).

Atualmente a temperatura máxima de funcionamento na E-Redes, usada nos projetos de MT, é de 50°C, esta temperatura é considerada na estação de verão onde a radiação solar mais forte e a temperatura ambiente mais elevada, considerando a velocidade do vento

habitualmente 0 m/s.

Na figura 6, está representada a corrente máxima admissível para cabos de alumínio-aço com diferentes seções a uma temperatura de funcionamento de 50°C.

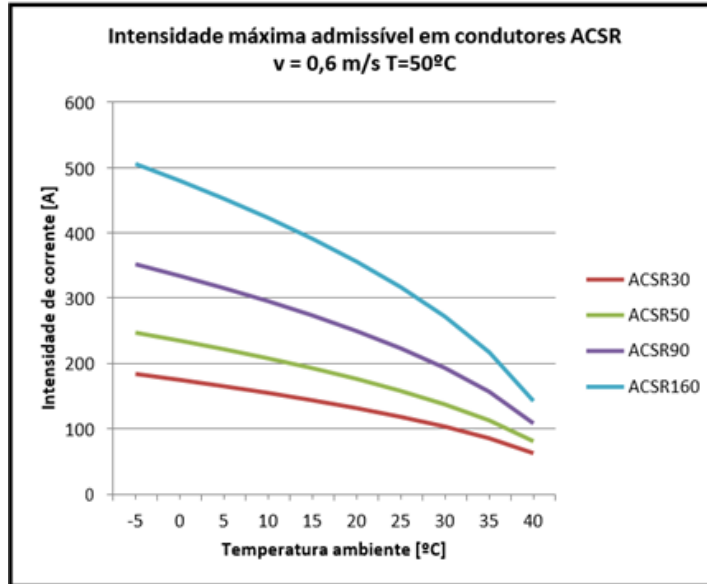


Figura 6 – Intensidade de corrente máxima admissível em condutores ACSR [1]

O gráfico da figura 6 evidencia claramente a limitação que os condutores têm face à temperatura ambiente, diminuindo a sua capacidade de transporte quanto maior for a temperatura envolvente.

O RSLEAT, no entanto, menciona que a flecha máxima dos condutores é calculada aos 50°C no verão, pelo que não existe imposição jurídica quanto a aumentar a temperatura de funcionamento do mesmo.

### 3.1.1.2. RESISTÊNCIA ELÉTRICA

A resistência elétrica é calculada através da seguinte expressão:

$$R = \frac{\rho_{\theta} * l}{S} [\Omega] \quad (3)$$

Em que:

- $\rho_{\theta}$  – Resistividade linear do condutor ( $\Omega * mm^2 / km$ );
- $l$  – Comprimento do cabo (km);
- $S$  – Secção do cabo ( $mm^2$ ).

A partir do cálculo da resistência elétrica do condutor consegue-se determinar a resistência linear, que nos permite calcular a resistência que o cabo irá possuir em função da extensão da linha aérea.

$$R_k = \frac{R}{l} = \frac{\rho_\theta}{S} [\Omega/km] \quad (4)$$

O valor representado na equação (4), normalmente é dado pela tabela característica do cabo em questão, considerando uma temperatura de 20°C e que o condutor apresenta uma resistência máxima em curto-circuito.

### 3.1.1.3 PERDAS DE ENERGIA

Um aspeto fundamental para qualquer linha de transporte é o cálculo das respetivas perdas e assegurar que esse valor seja o mais baixo possível [12], salvaguardando a qualidade de serviço da linha.

#### a) Perdas por efeito de Joule

Quanto maior for a temperatura do condutor elétrico, conseqüentemente maior será a sua resistência, isto em conjunto com a corrente elétrica dá origem a perdas por calor, as denominadas por efeito de Joule.

$$pJ = n * R * I^2 [W] \quad (5)$$

Em que:

- $n$  – Número de condutores na linha;
- $I$  – Intensidade de corrente por fase (A);
- $R$  – Resistência elétrica do condutor ( $\Omega$ ).

#### b) Perdas por efeito de coroa

Caso os cabos elétricos de uma linha aérea atinjam um potencial elevado, que seja superior à rigidez dielétrica do ar, produzem-se perdas de energia devido à corrente que se forma no ar.

As perdas por efeito de coroa acontecem quando a tensão crítica disruptiva for menor que a tensão da própria linha.

$$U_c = \frac{29,8}{\sqrt{2}} * \sqrt{3} * m_c * \delta * m_t * r * n_f * \ln \frac{D}{r} [kV] \quad (6)$$

Sendo:

- $U_c$  – Tensão composta, crítica (kV)
- 29,8 – Rigidez dielétrica do ar a 25°C e a pressão barométrica de 76cm (kV)
- $m_c$  – Coeficiente de rugosidade do condutor;
- $\delta$  – Fator de correção da densidade do ar, função direta da pressão barométrica e inversa da temperatura absoluta do meio ambiente;
- $m_t$  – Coeficiente do efeito de chuva;
- $r$  – Raio do condutor (cm);
- $n_f$  – Número de condutores por fase;
- $D$  – Distância geométrica entre fases.

Para calcular as perdas de energia provocadas pelo efeito de coroa, utiliza-se a expressão de *Peek*, sendo as perdas relativas a uma fase da linha.

$$p_p = \frac{241}{\delta} * (f + 25) * \sqrt{\frac{r}{D}} * (U_s - U_{c_s})^2 * 10^{-5} [kW * km^{-1}] \quad (7)$$

Em que:

- $p_p$  – Perdas por condutância ( $kW * km^{-1}$ );
- $f$  – Frequência da linha (Hz);
- $U_s$  – Tensão simples da linha (V);
- $U_{c_s}$  – Tensão crítica simples (V).

### 3.1.1.3 DISTÂNCIA GEOMÉTRICA ENTRE FASES

A distância entre fases é uma medida importante na transmissão e distribuição de energia elétrica. Ela refere-se à distância física entre os condutores que transportam a corrente elétrica de diferentes fases do sistema.

A distância entre fases é fundamental para garantir a segurança e a eficiência do sistema elétrico. Isso ocorre porque, quando os condutores estão muito próximos uns dos outros, pode ocorrer um curto-circuito entre eles, o que pode danificar os equipamentos, causar falhas no sistema e até mesmo colocar em risco a vida das pessoas.

Por outro lado, se os condutores estiverem muito próximos, pode ocorrer interferência eletromagnética entre as fases, o que pode afetar o desempenho do sistema elétrico e comprometer a qualidade da energia transmitida.

$$D = \frac{0,75 * k}{f + d} + \frac{U}{200} \text{ (m)} \quad (8)$$

Sendo:

- $f$  – Flecha máxima dos condutores (m);
- $d$  – Comprimento das cadeias de isoladores suscetíveis de oscilarem transversalmente à linha (m);
- $U$  – Tensão nominal (kV);
- $k$  – Coeficiente dependente da natureza dos condutores.

#### 3.1.1.4. QUEDAS DE TENSÃO

O cálculo da queda de tensão depende dos parâmetros do condutor, ou seja, resistência e reactância. Outro fator que afeta a queda de tensão ao longo da linha é o seu comprimento, porque quanto maior for a distância percorrida pela corrente maior será a queda de tensão ao longo do circuito que está a ser concebido. A queda de tensão ao longo da linha pode ser obtida a partir de:

$$U = \sqrt{3} * I * (R * \cos(\varphi) + X * \sin(\varphi)) \text{ [V]} \quad (9)$$

Onde:

- $I$  – Intensidade da corrente (A);
- $R$  – Resistência elétrica do condutor ( $\Omega$ );
- $\varphi$  – Ângulo de Desfasamento;
- $X$  – Reactância Elétrica do condutor ( $\Omega$ ).

Para averiguar se as quedas de tensão estão dentro das regulamentadas pelo RSLEAT, calcula-se as mesmas em valor percentual:

$$\Delta U = \frac{\Delta U}{U} * 100 \text{ [%]} \quad (10)$$

### **3.1.2. CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS**

A linha de distribuição pode ser considerada como um sistema onde as condições de funcionamento dependem do sistema envolvente, e que a linha, através dos condutores funcionará a uma determinada temperatura, diferente da temperatura do sistema envolvente [1].

Haverá uma transferência de energia entre os dois sistemas, uma vez que estes estão em contacto. "Transmissão de calor" é o termo para o método através do qual a energia é movimentada. O calor não pode ser diretamente medido ou observado, mas as consequências que produz podem ser vistas e quantificadas [13].

#### **3.1.2.1 MÚLTIPLA DEPENDÊNCIA TÉRMICA**

Uma vez que todos os processos de troca de calor incluem a transmissão e transformação de energia, devem aderir às duas principais leis da termodinâmica.

A primeira lei da termodinâmica afirma que a energia não pode ser gerada ou eliminada, pode apenas ser transformada de uma forma para outra. A segunda foca-se em explicar que num processo de transferência de calor, é impossível a transmissão de calor líquido de uma zona de baixa temperatura para uma região de alta temperatura. A transmissão de calor é efetuada através de radiação, condução ou convecção.

Os condutores das instalações elétricas aéreas estão sujeitos a estes três processos, visto que a radiação solar incide sobre as linhas aéreas [1], os cabos irão conduzir corrente elétrica e, por consequência, gerar calor e ao estarem a uma temperatura diferente do ambiente dissipam/absorvem calor, consoante apresentarem uma temperatura superior ou inferior à do ambiente.

Torna-se imperativo calcular a porção de calor transmitida que irá condicionar este material, o modelo de cálculo habitualmente utilizado para projetos deste carácter é o de Kuipers-Brown, com este modelo é possível quantificar diversos mecanismos de transmissão de calor [1], que condicionam os condutores.

#### **3.1.2.2 EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO KUIPERS-BROWN**

O modelo Kuipers-Brown sugere uma equação de equilíbrio, baseada e desenvolvida a partir dos princípios de transmissão de calor previamente mencionados, tendo em conta

as características dos condutores, ambientais e a intensidade de corrente que percorre os cabos. A equação foi modificada de modo a torná-la independente do comprimento das linhas elétricas, a expressão fica assim apta para qualquer material.

$$-C \frac{dT}{dt} - E * \sigma * \pi * d(T^4 - T_a^4) + \alpha_{sol} * G_i * d - 8,55 * (v * d)^{0,448} * (T - T_a) + R * I^2 = 0 \quad (11)$$

Sendo:

- $C$  – Capacidade calorífica ( $J * m^{-1} * ^\circ K^{-1}$ );
- $T$  – Temperatura do cabo ( $^\circ K$ );
- $T_a$  – Temperatura ambiente ( $^\circ K$ );
- $\frac{dT}{dt}$  – Mudança de temperatura num dado intervalo ( $^\circ K/s$ );
- $\sigma$  – Constante dimensional de Stefan-Boltzmann ( $W * m^{-2} * ^\circ K^{-4}$ );
- $d$  – Diâmetro do cabo (m);
- $E$  – Emissividade em relação ao corpo negro;
- $\alpha_{sol}$  – Coeficiente de absorção solar;
- $G_i$  – Energia radiante incidente sobre o condutor ( $W * m^{-2}$ );
- $v$  – Velocidade do vento (m/s)
- $R$  – Resistência elétrica do condutor, a uma dada temperatura ( $\Omega/m$ );
- $I$  – Intensidade de corrente elétrica (A).

Para se saber qual a resistência elétrica para qualquer temperatura de funcionamento recorre-se à equação (11):

$$R = R_{ref} [1 + \alpha_T(T - T_{ref})] [\Omega/km] \quad (12)$$

Em que:

- $R$  – Resistência elétrica do condutor ( $\Omega/km$ );
- $R_{ref}$  – Resistência elétrica do condutor à temperatura de referência,  $20^\circ C$  ( $\Omega/km$ );
- $\alpha_T$  – Coeficiente de temperatura do cabo ( $^\circ C^{-1}$ );
- $T$  – Temperatura do cabo ( $^\circ C$ );
- $T_{ref}$  – Temperatura de referência ( $^\circ C$ ).

A equação de equilíbrio segundo o modelo Kuipers-Brown é a mais vulgarmente utilizada em linhas aéreas para calcular a intensidade de corrente máxima admissível em condutores, em regime permanente.

A figura 7 representa um condutor ACSR, nomeadamente o Alumínio – Aço de secção  $160\text{mm}^2$ , e a respetiva corrente máxima admissível, consoante o limite de temperatura a que o expomos.

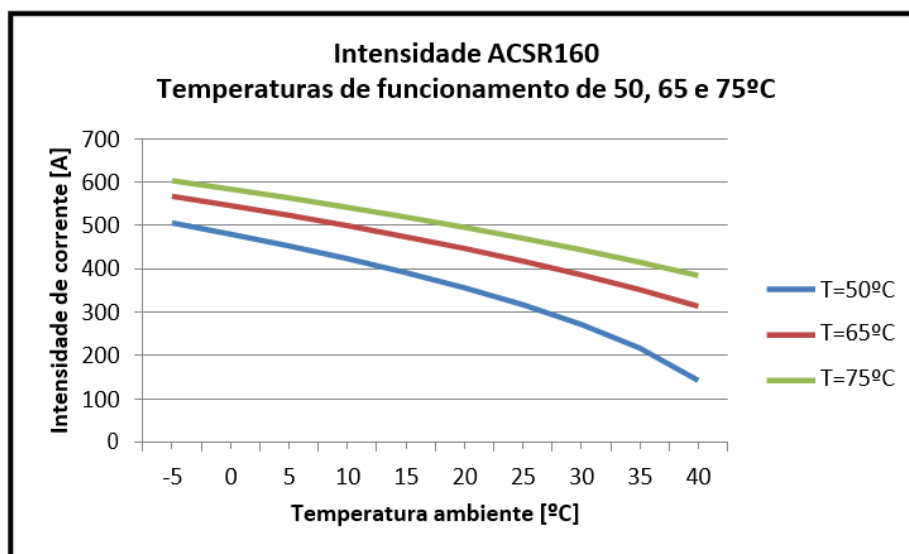


Figura 7 – Condutor ACSR 160 e sua corrente máxima admissível [1]

### 3.1.3. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

O cálculo mecânico dos cabos é elemento fundamental para determinação das condições de estabelecimento da linha.

As condições de regulação dos condutores determinarão a necessidade de colocar mais ou menos estruturas de apoio e a altura desta consoante o tipo e o número de obstáculos a ultrapassar. Analisaremos novamente os efeitos que a temperatura tem sobre os condutores nesta vertente.

#### 3.1.3.1 FLECHAS DE MONTAGEM

Segundo o RSLEAT, a flecha máxima dos condutores deverá ser determinada, quando os mesmos se encontram em regime permanente à temperatura máxima permitida.<sup>5</sup> A flecha de um condutor equivale à distância do ponto do condutor onde a tangente é paralela à reta que passa pelos pontos de fixação e a interseção da vertical que passa por esse ponto com esta reta<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> Capítulo I, Secção V, artigo 22º do RSLEAT

<sup>6</sup> Capítulo I, Secção IV, artigo 4º do RSLEAT

A flecha máxima está associada à estação de verão, onde a temperatura ambiente é a mais elevada, por sua vez os condutores irão dilatar mais levando a uma diminuição da distância ao solo ou a obstáculos. Este fator é influenciado pela temperatura máxima definida, que quanto maior for, corresponderá a uma maior flecha.

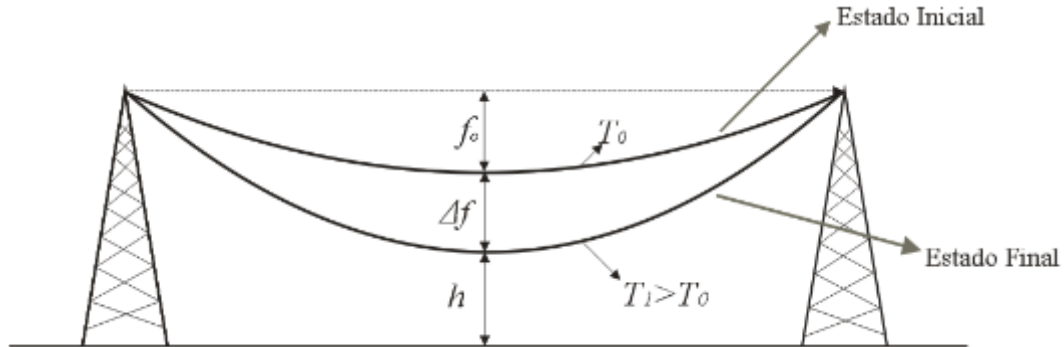


Figura 8 – Representação da flecha máxima e mínima num vão [2]

Com recurso à equação de mudança de estado, conseguimos prever as variações de comprimento no condutor elétrico face às variações de temperatura.

$$L_2 = L_1 + L_1 * \alpha_T * (\theta_1 - \theta_2) \text{ [m]} \quad (13)$$

Onde:

- $L_1$  – Comprimento do condutor inicial (m);
- $L_2$  – Comprimento do condutor final (m);
- $\alpha_T$  – Coeficiente de temperatura do cabo ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ );
- $\theta_1$  – Temperatura do condutor inicial ( $^{\circ}\text{C}$ );
- $\theta_2$  – Temperatura do condutor final ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Com manipulação matemática consegue-se a partir da equação (13), alcançar a equação de mudança de estado, tomando a forma final de:

$$\frac{A^2}{24} * \left( \frac{1}{k_2^2} - \frac{1}{k_1^2} \right) = \alpha_T * (\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{E * S} * (t_2 - t_1) \quad (14)$$

Em que:

- $A$  – Comprimento do vão (m);
- $k_1$  – Parâmetro do condutor inicial (m);
- $k_2$  – Parâmetro do condutor final (m);
- $E$  – Módulo de elasticidade do condutor ( $\text{daN}/\text{mm}^2$ );
- $S$  – Seção do condutor ( $\text{mm}^2$ );
- $t_1$  – Tensão mecânica horizontal do condutor inicial (m);

- $t_2$  – Tensão mecânica horizontal do condutor final (m).

Finalmente, com a equação dos estados, e depois de previamente, se ter definido as condições mecânicas mais desfavoráveis determina-se as tensões de montagem, permitindo o cálculo das flechas.

$$f = \frac{A^2 * \omega}{8 * T} [m] \quad (15)$$

Sendo:

- $\omega$  – Peso Linear do cabo (daN/m).

### 3.1.4. CONCLUSÃO

Neste capítulo foram abordadas vertentes técnicas, térmicas e mecânicas referentes aos condutores elétricos. Entender estas características torna-se imperativo relativamente aos projetos de linhas aéreas, visto que, saber as limitações de corrente elétrica que o cabo consegue transportar, a tensão máxima que o condutor pode estar sujeito ou até mesmo a temperatura de funcionamento são todos fatores importantes em projetos de linhas de distribuição.

No capítulo seguinte serão abordados os constituintes de uma linha aérea, cujo condutores desempenham um papel vital. Irão ser referidos três tipos diferentes de condutores elétricos e referidas as suas vantagens assim como desvantagens.

# 4. ELEMENTOS CONSTITUINTES DE UMA LINHA AÉREA DE DISTRIBUIÇÃO

Este capítulo enumerará e discutirá todos os componentes principais que compõem as linhas aéreas de distribuição, assim como, abordará os seus aspetos teóricos e de construção.

Segundo o RSLEAT, uma linha aérea pode ser definida como o combinado de condutores elétricos, isoladores, jogos de acessórios e elementos de suporte, destinados à distribuição e transporte de energia elétrica. De modo sumariado os elementos presentes numa linha aérea até 60kV são:

**Tabela 1 - Esquema de uma Linha Aérea de Distribuição de Energia Elétrica**

<b>Sistema</b>	<b>Componentes</b>	<b>Elementos</b>
Linha Aérea de Distribuição de Energia Elétrica	Suportes (Estruturas de suporte, e.g. apoios e suas armações)	Postes pré-fabricados de betão armado ou metálicos
		Parafusaria
		Espias e Acessórios
		Conjuntos sinaléticos
	Fundações	Betão, Armaduras
		Chumbadores, perfis de aço
	Condutores	Uniões, Mangas de Reparação, Conectores
		Anti vibradores
		Separadores
		Bolas de Balizagem
		Salva-pássaros
	Cadeias de isoladores	Hastes e Anéis de guarda
		Isoladores
Acessórios de fixação		

## 4.1 CONDUTORES

Um condutor é um elemento das instalações elétricas aéreas que pode ser definido pelo combinado da sua alma condutora e, caso se verifique, pela sua camada isolante [14], sendo da sua responsabilidade o transporte de energia elétrica.

Os condutores são idealizados e construídos com diversas composições, que se regem pelas necessidades específicas de cada projeto [15], podendo as mesmas ser de nível técnico da linha de distribuição, temperaturas máximas admissíveis, de vertente económica ou o nível de tensão que a linha irá operar.

Os condutores são categorizados como unifilares, quando são constituídos por apenas um fio, ou como multifilares, quando constituídos por vários fios. Como as características físicas dos condutores multifilares são melhores para as linhas aéreas, uma vez que, possuem um diâmetro maior, uma seção resistente mais reduzida e também uma resistência mecânica superior, resultante da sua flexibilidade.

Os cabos também podem ser classificados como condutores homogêneos se forem formados inteiramente de um único metal, ou como heterogêneos se forem constituídos por ligas feitas de mais do que um metal na sua composição [16].

Os condutores homogêneos são frequentemente construídos em cobre ou alumínio, enquanto os condutores heterogêneos são mais frequentemente construídos em alumínio-aço.

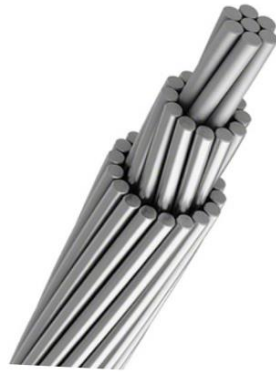
Dada a importância que os condutores possuem na realização deste estudo, serão apresentados três tipos de condutores e as suas principais características nos próximos subcapítulos.

### 4.1.1 CONDUTORES AAAC

Os *All Aluminium Alloy Conductors*, (AAAC) são condutores elétricos compostos por ligas de alumínio organizadas em camadas homocêntricas, conforme observado na figura 9.

Estes condutores são normalmente utilizados em linhas aéreas de distribuição e transporte de energia elétrica. Frequentemente, utilizam-se na substituição dos condutores AAC (*All Aluminium Conductor*), quando é pretendido uma resistência mecânica superior, e na

substituição dos condutores ACSR, quando se trata de uma zona costeira e o fator de corrosão é fulcral na implementação e manutenção da linha elétrica.



**Figura 9 – Representação de um condutor AAAC [17]**

#### **4.1.2 CONDUTORES ACSR**

O condutor *Aluminium Conductor Steel Reinforced* (ACSR) é o mais apropriado para transportar energia elétrica em linhas aéreas com um longo comprimento em quilômetros, podendo também ser utilizado como cabo de guarda para proteger as instalações elétricas AT e MAT contra as descargas atmosféricas.

O ACSR é constituído por uma ou mais camadas de fios de alumínio organizadas em camadas homocêntricas em torno de um núcleo de aço galvanizado com uma elevada resistência mecânica, figura 10.

A fim de alcançar a ligação ideal entre a capacidade de transporte de corrente e a resistência mecânica para cada aplicação, a percentagem relativa da área da secção transversal de alumínio e aço pode ser variada [18]. O ACSR também possui uma excelente resistência à corrosão e apresenta uma boa relação peso/força.

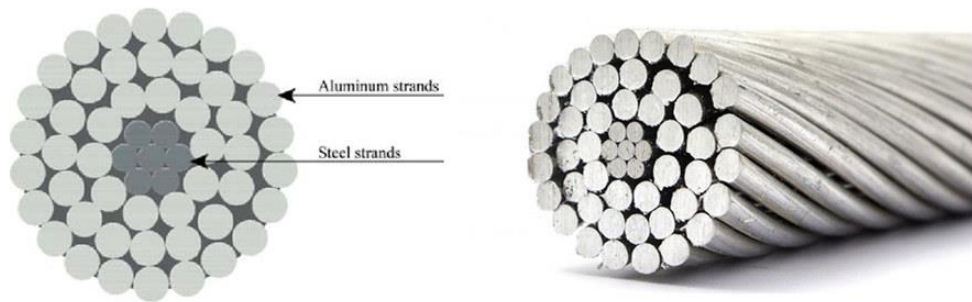


Figura 10 - Representação de um condutor ACSR [19]

### 4.1.3 CONDUTORES ACCC

Os condutores *Aluminium Conductor Composite Core* (ACCC) apresentam um núcleo composto de fibra de carbono e de vidro, cujos componentes estão interligados através de uma resina *epoxy* de alta temperatura. O seu núcleo apresenta maior resistibilidade e menor peso, pois a fibra utilizada é mais resistente e mais leve que aço. O uso de condutores ACCC é especialmente destinado a linhas de transmissão aéreas em alta tensão que exigem redução de flexão e capacidade de operação em temperaturas elevadas. Em comparação com outros condutores de materiais similares, o ACCC oferece vantagens significativas nesses aspetos.

O ACCC mais resistente a tensões mecânicas, apresenta menos perdas e possui uma capacidade de transporte superior aos outros condutores, infelizmente, o seu custo de implementação é mais elevado, daí só se usar este tipo de condutor elétrico em casos específicos [18] [20].

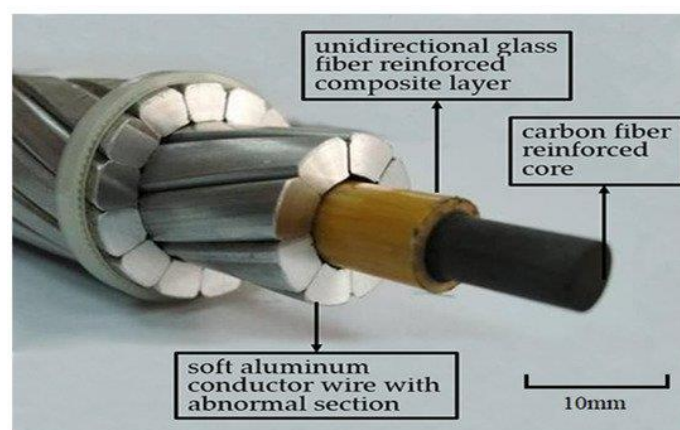


Figura 11 - Representação de um condutor ACCC [21]

## 4.2 CABOS DE GUARDA

Em caso de descargas atmosféricas, os cabos aéreos de distribuição de energia sofrem falhas de isolamento, resultando em curtos-circuitos, que por sua vez podem interromper o transporte de energia e causar danos nos equipamentos das linhas aéreas.

Para prevenir o dano e possibilidade de suspender o serviço de distribuição de energia, são instalados cabos de guarda a um nível acima dos condutores elétricos, figura 12.

Os cabos de guarda estão ligados ao sistema terra, de modo a escoar para o chão a descarga elétrica causada por fenômenos naturais.

A presente dissertação estudará uma linha com a tensão de serviço de 15kV, pelo que não utilizará cabos de guarda.

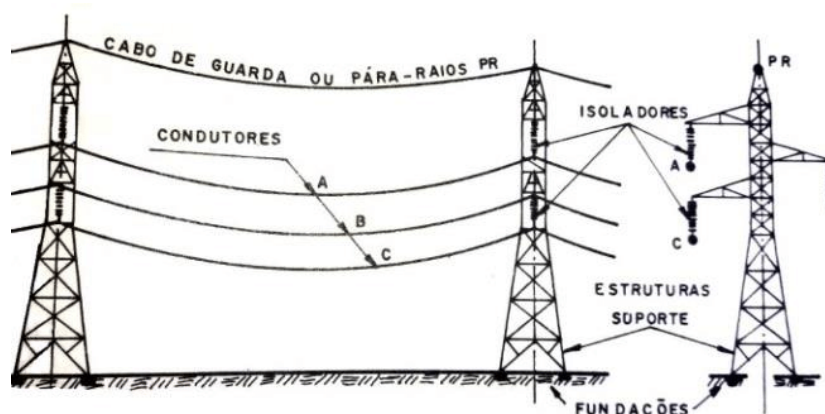


Figura 12 - Representação de cabos de guarda [22]

A escolha de cabos de guarda rege-se pela necessidade de acrescentar sistemas de telecomunicações e telecomando, ou apenas existir a necessidade de proteger a linha aérea contra as descargas. Se apenas quisermos proteger as instalações contra raios, o cabo a utilizar será do tipo ACSR, no entanto, se houver necessidade presente ou futura, de implementar sistemas de telecomunicações e telecomando o material a utilizar é o *Optical Power Ground Wire (OPGW)*, tratando-se de um cabo dielétrico formado também por fibras óticas, podendo a sua composição ser vista em 13.

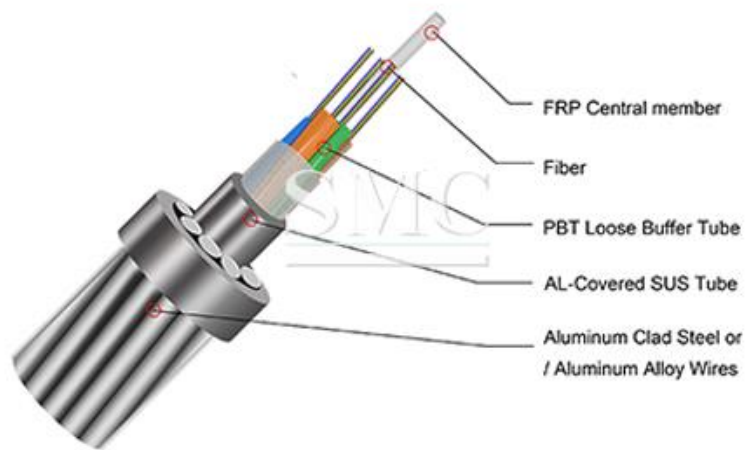





Figura 13 - Constituição de um cabo OPGW [23]

### 4.3 ISOLADORES

Os isoladores consistem habitualmente num corpo isolante com um ou mais dispositivos de fixação e têm como função evitar a passagem de corrente elétrica para os apoios e armações, assim como, auxiliar a segurar o condutor elétrico.

Os isoladores são colocados em cadeias que posteriormente são fixadas articuladamente às armações dos apoios, garantindo o isolamento do condutor.

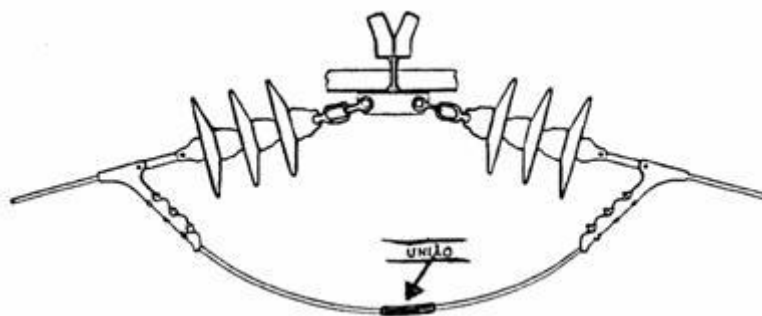
**Tabela 2 - Diferentes tipos de Isoladores e respetivas vantagens e desvantagens [1]**

Material	Vantagem	Desvantagem
<p>Vidro</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fiabilidade a longo prazo</li> <li>- Indicação visual de defeitos internos</li> <li>- Boa resistência à perfuração</li> <li>- Os isoladores dos diferentes fabricantes têm normalmente um bom desempenho</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alvo para vândalos</li> <li>- Disrupção por bandas secas durante longos períodos de tempo poderá danificar o vidro</li> <li>- Material pesado</li> <li>- Não disponível em algumas regiões</li> </ul>
<p>Porcelana</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fiabilidade a longo prazo</li> <li>- Superfície resistente à disrupção por bandas secas</li> <li>- Não estilhaçam quando são atingidos por vândalos</li> <li>- Os isoladores dos diferentes fabricantes têm normalmente um bom desempenho</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Os defeitos internos não são muitas vezes visíveis</li> <li>- Em zonas de poluição forte poderá se necessário ter mais isoladores para equipar uma cadeia</li> <li>- Material pesado</li> <li>- Não disponível em algumas regiões</li> </ul>
<p>Compósito (polimérico, resina epóxida, EPDM, SiR)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo peso</li> <li>- Baixo custo</li> <li>- Menos sensível ao vandalismo</li> <li>- Melhor desempenho face à poluição</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tempo de vida útil variável</li> <li>- Anos de experiência insuficientes</li> <li>- Diferentes projectos e diferentes materiais no seu fabrico;</li> <li>- Sensíveis ao manuseamento</li> <li>- Defeitos internos nem sempre são visíveis</li> </ul>
<p>Resina</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo custo</li> <li>- Baixo peso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mau desempenho face à poluição</li> <li>- Erosão da superfície em climas húmidos</li> <li>- Tempo de vida variável</li> </ul>

Os isoladores podem ser dispostos em cadeias de amarração ou suspensão, dependendo da função que se pretende dos mesmos. As cadeias de amarração, figura 14, estão dispostas horizontalmente, anulando em grande parte o desvio que os isoladores terão devido à oscilação em ventos fortes e violentos.

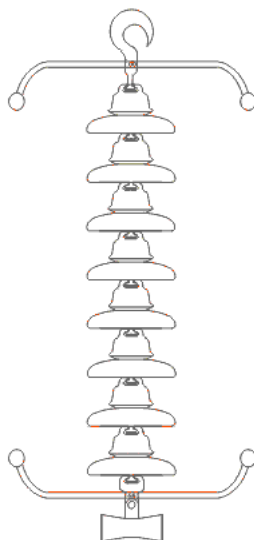
Normalmente utiliza-se estas cadeias de amarração, quando se trata de apoios que estejam em ângulo, apoios onde os esforços mecânicos são elevados, vãos com comprimentos extensos e apoios que possuam a função de reforço ou de fim de linha.

Na vertente económica, o custo é o dobro, pois requer-se o dobro de cadeias para conseguir implementar os isoladores desta forma.



**Figura 14 - Cadeia em Amarração [24]**

Enquanto as cadeias de amarração estão dispostas na horizontal, as cadeias de suspensão são um combinado de isoladores dispostos em série numa posição vertical. O condutor elétrico atravessa a extremidade inferior enquanto a extremidade superior das cadeias é ligada à armação do apoio. Estes tipos de cadeias, figura 15, são usualmente implementadas em apoios cuja função é de alinhamento.



**Figura 15 - Cadeia em Suspensão [24]**

#### **4.4 APOIOS**

Um elemento fulcral para o funcionamento das linhas aéreas de transporte de energia elétrica é o apoio. O apoio tem como objetivo sustentar os condutores elétricos, cabos de guarda, cadeias de isoladores e jogos de acessórios dos esforços mecânicos<sup>7</sup>. Os esforços que os apoios estão sujeitos dividem-se em três vertentes:

- Esforços Verticais – Referente em grande parte ao peso dos condutores e isoladores da linha elétrica, podendo ou não ser afetados por neve ou gelo depositada sobre eles;

<sup>7</sup> Capítulo I, Secção IV, artigo 6º do RSLEAT

- Esforços Longitudinais – Podem ser originados devido ao uso de secções diferentes de condutores no mesmo apoio, de diferentes trações mecânicas, apoios em ângulo, apoios com função de reforço ou fim de linha;

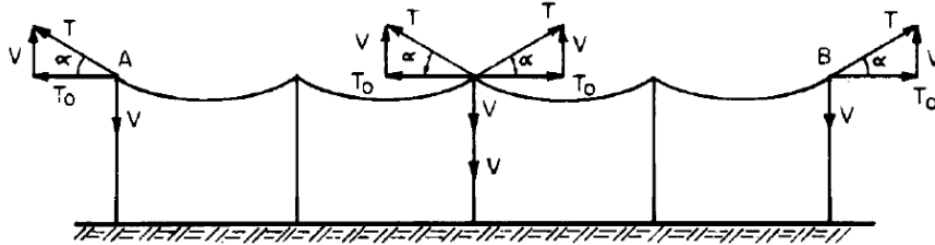


Figura 16 - Representação do esquemático de trações [1]

- Esforços Transversais – Corresponde à força que o vento exerce sobre o condutor, cabos de guarda e isoladores.

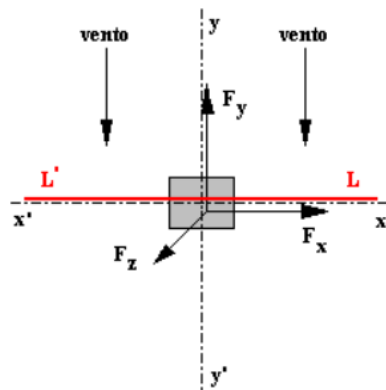


Figura 17 - Representação da ação do vento nos condutores [1]

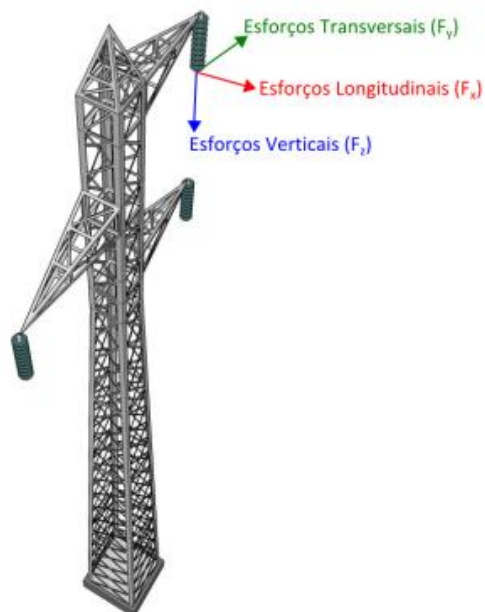


Figura 18 - Representação dos 3 esforços [11]

As funções que os apoios ocupam, variam de projeto para projeto, sendo que existem apoios de:

- Alinhamento – Apoios inseridos num traçado reto, que se limitam a dar continuidade à linha elétrica.

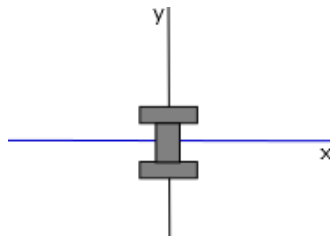


Figura 19 - Apoio em Alinhamento [11]

- Ângulo – Apoios que nascem da necessidade do traçado da linha fazer um desvio.

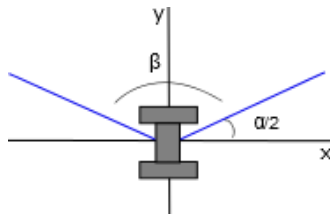


Figura 20 - Apoio em Ângulo [11]

- Derivação – Apoios que já estão em alinhamento ou ângulo e é estabelecida uma ou mais derivações;

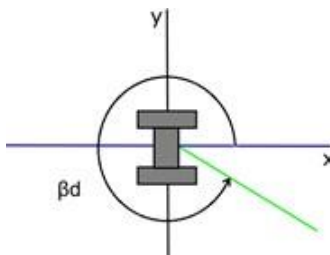
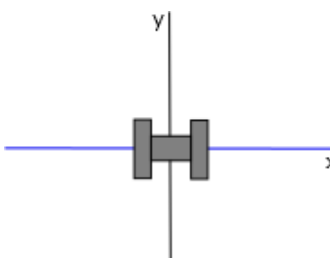


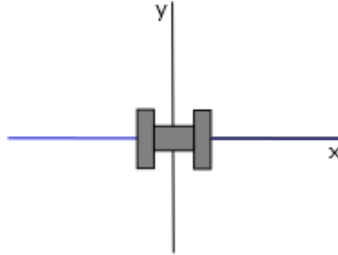
Figura 21 - Apoio de derivação [11]

- Reforço – Elementos que podem estar em alinhamento ou ângulo, que têm a função de sustentar os esforços longitudinais de modo a reduzir os efeitos provenientes da rotura de condutores elétricos ou dos cabos de guarda.



**Figura 22 - Apoio em posição de reforço [11]**

- Fim de linha – Suportes que são aptos para resistir às diferenças de tração causadas pela existência de condutores de um só lado do apoio.



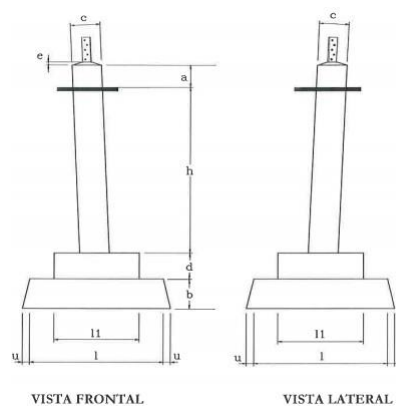
**Figura 23 - Apoio em fim de linha [11]**

## 4.5 FUNDAÇÕES

Os maciços de fundação são fundamentais para a segurança do apoio, assim como das linhas aéreas, pois transmitem à terra todas as forças provenientes de meios exteriores que são aplicadas aos apoios, tal como trações mecânicas, esforços resultantes do vento, peso dos apoios e de todos os elementos constituintes da rede aérea.

No que toca ao dimensionamento dos maciços, os fatores fundamentais na escolha são:

- Tipologia do terreno;
- Função a desempenhar pelo apoio;
- Altura total do apoio;
- Função da linha elétrica.

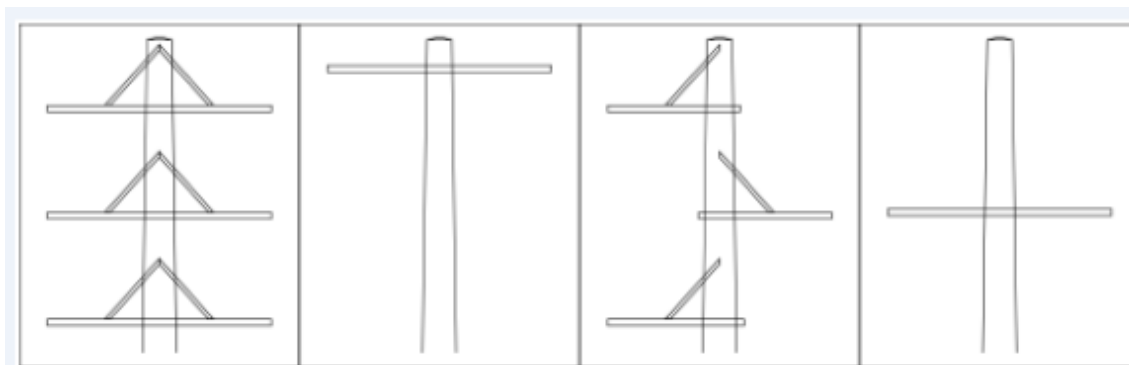


**Figura 24 - Fundação de apoios metálicos [25]**

## 4.6 ARMAÇÕES

As armações são elementos metálicos colocados no topo dos apoios, têm como função sustentar os condutores das redes aéreas. A escolha de armação rege-se pela função que o apoio irá desempenhar, tipologia do apoio, condutores a utilizar, flechas pretendidas, distâncias mínimas entre condutores, pela facilidade de implementação e manutenção no apoio.

Figura 25 - Tipologia de Armações [11]



## 4.7 REDES DE TERRA

O propósito das redes de terra é assegurar a segurança de pessoas e dos equipamentos das instalações elétricas, em caso de avarias. É um elemento das redes aéreas que deve ser dimensionado com rigor.

Os elétrodos de terra são implementados de modo a escoar as correntes defeituosas [9], provocadas por curto-circuitos ou descargas atmosféricas e certificarem-se que a rede de terra está equipotencial, assim como apresentar o valor mais próximo do potencial da terra (0V).

É de carácter obrigatório instalar quatro elétrodos de terra nos respetivos apoios de ferro cujas ligações dos terminais existentes estão interligadas. Numa estrutura metálica a rede de terras é implementada de forma direta com o solo, se a resistência de terra não for superior a  $20 \Omega$ , caso não exista equipamento de corte é dispensada a ligação individual à terra.

No caso de se tratar de uma estrutura de betão, as armações e suas respetivas ferragens ligam-se às varetas de terra localizadas no maciço do apoio, caso exista equipamentos de

manobra ou corte deve-se interligar com recurso a condutores de cobre, o terminal de terra do apoio com o eléctrodo de terra.

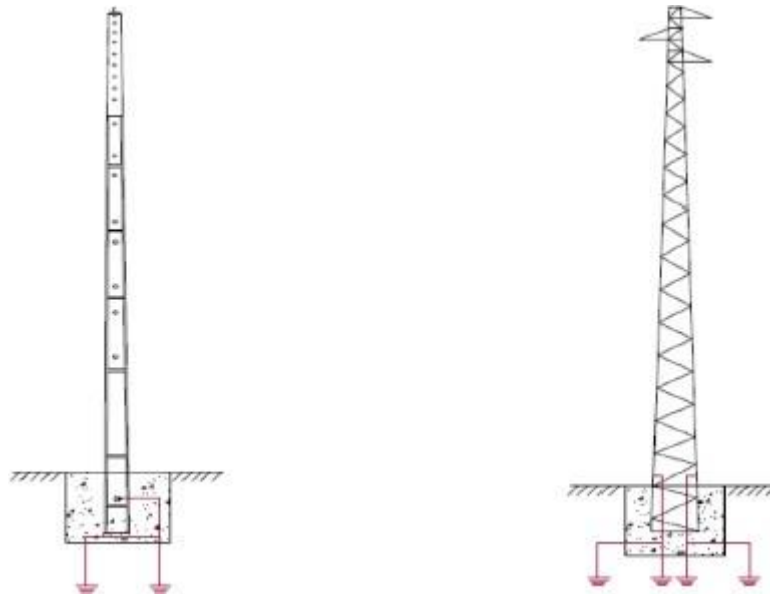


Figura 26 - Esquema de ligação à terra

#### 4.8 BALIZAGEM AERONÁUTICA

A balizagem é uma técnica que consiste na colocação de bolas de balizagem com cores alternadas (laranja e branco), ao longo dos condutores de um ou mais vãos, assim como possível pintura dos apoios pertencentes a esses vãos.

Esta técnica permite aos veículos aéreos identificar as redes eléctricas aéreas consequentemente facilitando missões de salvamento, combate a incêndios e descolagens. As balizas formadas de fibra de vidro ou de resina de poliéster, possuem dimensões aproximadas de 25cm de raio e 5kg de massa.



**Figura 27- Balizagem Diurna [1]**

De acordo com a CIA 10/03, 06 de maio, os condutores sujeitam-se a balizagem no caso de:

- Vãos de comprimento superior a 500 m;
- Vãos sobre curso ou bacias de água com largura superior a 80 m na zona percorrida;
- Vãos de travessia sobre autoestradas, itinerários principais e itinerários complementares;
- Zona de proximidade com aeroportos, aeródromos e heliportos;

Já nos apoios aplica-se a sinalização nas condições de:

- Apoios pertencentes a vãos de autoestradas, itinerários principais e itinerários complementares;
- Apoios de linhas paralelas, numa extensão contínua de 900 m, a autoestradas, itinerários principais e itinerários complementares;
- Zona de proximidade com aeroportos, aeródromos e heliportos;

Quanto à balizagem noturna, são utilizados sinalizadores luminosos tornando visível o comprimento e a posição dos vãos das linhas, para os pilotos tomarem as devidas precauções.



Figura 28 - Exemplo de um sinalizador luminoso [26]

## 4.9 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO À AVIFAUNA

As linhas aéreas podem matar aves quando as mesmas colidem com os seus condutores ou electrocutando-as entre as armações e cabos. Para mitigar o impacto desta questão, foi desenvolvido equipamento especializado de sinalização para ave impostos pelo Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF) [3][10]:

- Salva-pássaros;
- Anti nidificação;
- Anti poiso;
- Plataforma para construção de ninhos.

Para salvaguardar a avifauna, são colocados dispositivos anticollisão para aves a cada 10 metros nos cabos de guarda e condutores, tornando estes elementos da linha aérea visíveis para as aves [13] e baixando a possibilidade de os atingirem.

Existem dois tipos de dispositivos, os *Bird Flight Diverters* (BFD) e *Firefly Bird Flappers* (FBF). Os BFD são elementos em forma de espiral, constituídos por plástico que são enrolados em torno do cabo, as suas espirais podem ser simples ou duplas consoante a necessidade de tornar os elementos da linha visíveis.

Os FBFs podem ser fitas ou giratórios, e foi recentemente introduzido um novo gadget com a capacidade de rodar e brilhar à noite.

A sua composição inclui uma substância brilhante com a propriedade única de absorção da luz, que aumenta o desempenho dos sistemas à noite e tem uma duração máxima de 10 horas.

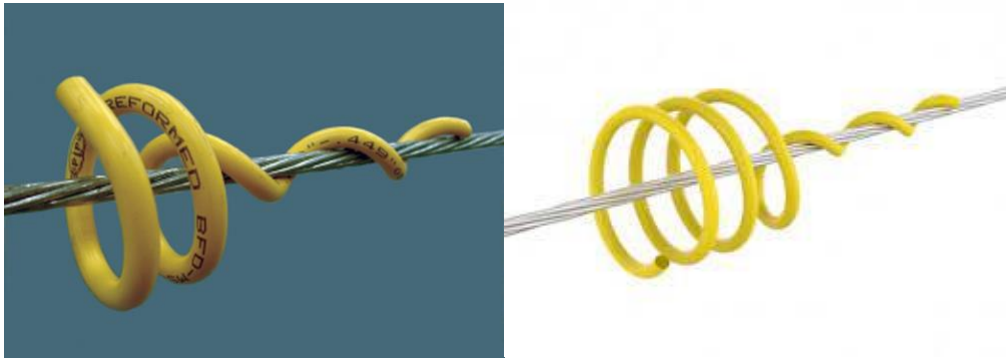


Figura 29 - BFD Simples e BFD Dupla [27], [28]

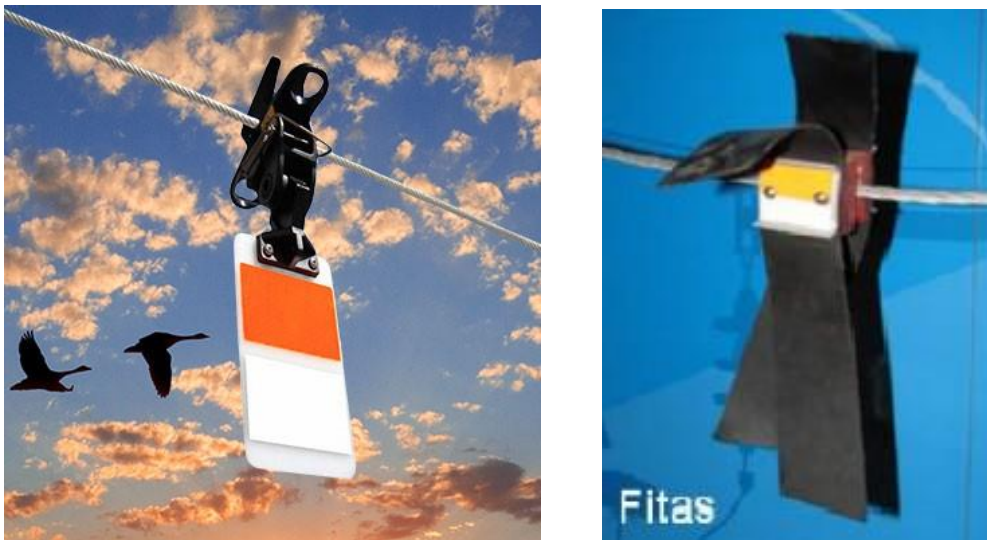


Figura 30 - FBF giratórios e FBF Fitas [3]

#### 4.10 CONCLUSÃO

No presente capítulo foram abordados os principais elementos constituintes de uma linha aérea, entre eles, os condutores elemento que será o grande foco desta dissertação. Foram analisados três tipos de condutores, os mesmos apresentam composições internas diferentes, o que por sua vez leva a aplicações distintas nos projetos de linhas aéreas.

As linhas aéreas são uma infraestrutura que está em constante envolvimento com o meio, neste capítulo foi possível observar a importância de dotar a linha de equipamento de sinalização e dispositivos de avifauna de modo a permitir o normal funcionamento de outras atividades e coexistência de espécies animais.

Os apoios e armações, estruturas que suportam os condutores foram também analisadas pelo que os esforços mecânicos provocados pelas trações mecânicas dos cabos, aos mesmos serão objeto de estudo no próximo capítulo.

# 5. CÁLCULO MECÂNICO

Este capítulo apresentará o cálculo mecânico e a determinação dos esforços mecânicos que os apoios das linhas aéreas estão sujeitos devido às trações de montagem.

Em projetos de instalações elétricas aéreas, o cálculo mecânico é fundamental para assegurar quer as distâncias regulamentares, quer a segurança dos elementos constituintes da linha de distribuição [3].

Com a ajuda de vários instrumentos matemáticos é possível determinar para diferentes condições climatéricas, com as variações de vento e da temperatura ambiente calcular os esforços mecânicos aplicados aos elementos constituintes das linhas aéreas. Os aspetos importantes nesta fase do projeto, estão contemplados em baixo:

- Definir a tensão máxima aplicável aos cabos, tendo por base as condições atmosféricas presentes na sua montagem;
- Cálculo das forças e ações exercidas pelos condutores e cabos de guarda, para as condições atmosféricas presentes na zona de implantação da linha;
- Determinação dos vãos equivalentes e críticos, de acordo com a disposição de apoios na linha a ser criada, e definição de que tipo de apoios são colocados;
- Determinar qual dos vãos apresenta o pior estado atmosférico, efetuando o cálculo do parâmetro da catenária dos cantões para todas as situações atmosféricas, tendo por base a tensão mecânica obtida através da equação de estados, para depois calcular as diferentes flechas;
- Averiguação das distâncias exigidas pelo RSLEAT aos diferentes obstáculos e entre elementos da linha.

## 5.1 TENSÃO MECÂNICA MÁXIMA

Quando num projeto aéreo se aborda a vertente mecânica, começa-se por definir o valor de tensão máxima que se irá aplicar aos cantões das linhas. Este valor tem influência direta no comprimento das flechas, e esforços que irão ser sujeitos os apoios.

Quanto maior for a tensão mecânica menor serão as flechas dos condutores, mas o esforço aplicado aos apoios será maior. As tensões máximas de tração admissíveis para os condutores de linhas aéreas não deverão ser superiores ao quociente das suas tensões de rotura por 2,5.<sup>8</sup>

$$t_{max} = \frac{T_r}{2,5 * \sigma} [daN/mm^2] \quad (16)$$

Em que:

- $t_{max}$  – Tensão mecânica máxima aplicável;
- $T_r$  – Tração de rotura [ $daN$ ];
- $\sigma$  – Seção do condutor [ $mm^2$ ].

## 5.2 ESTADOS ATMOSFÉRICOS

Como já foi mencionado, os agentes atmosféricos influenciam as linhas de distribuição e transporte de energia elétrica, a força exercida pelo vento, a dilatação causada pela temperatura aos cabos ou o peso causado pela acumulação de gelo nos condutores são fatores a considerar ao elaborar um projeto desta natureza.

Ao projetar-se uma instalação aérea considera-se três estados atmosféricos: Inverno, Primavera e Verão, todos com diferentes características atribuídas.

### 5.2.1. INVERNO

O Inverno é um estado climatérico caracterizado pelo seus ventos fracos, temperaturas baixas e formação possível de mangas de gelo. Considera-se para zonas geográficas normais a temperatura de  $-5^{\circ}C$  e para zonas propícias à formação de camadas de gelo  $-10^{\circ}C$ .

---

<sup>8</sup> Capítulo III, Seção III, artigo 28º do RSLEAT

### 5.2.2. PRIMAVERA

A Primavera é a estação designada de vento máximo, caracterizada pelas temperaturas médias e a inexistência de gelo. A temperatura média considerada nesta estação é de 15°C.

### 5.2.3. VERÃO

No Verão regista-se o maior comprimento da flecha dos condutores, devido à existência de temperaturas elevadas e a inexistência de vento. Nesta dissertação esta estação será a considerada explorando-se a linha à temperatura máxima de 50°C e 65°C

## 5.3 FORÇAS EXERCIDAS PELOS AGENTES ATMOSFÉRICOS E CONDUTORES

Os condutores elétricos em linhas aéreas são sujeitos a vários esforços podendo a sua origem ser externa ou intrínseca. Pode-se classificar estas ações como:

- Permanentes – induzidas por esforços horizontais diretamente dependentes das trações máximas dos condutores, assim como esforços verticais originados pelo peso do condutor.
- Variáveis – Refere-se às componentes climáticas, cujos valores podem variar constantemente: temperatura, vento e gelo.

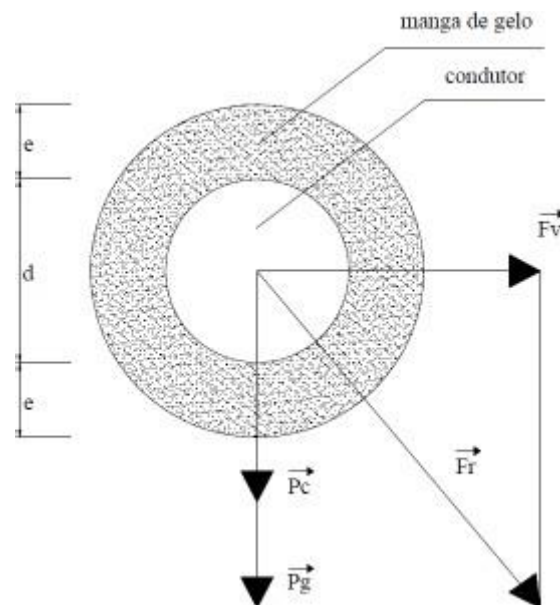


Figura 31 - Representação das forças exercidas sobre um condutor [3][16]

$F_r$  pode ser obtido através da aplicação do teorema de Pitágoras, sendo:

$$F_r = \sqrt{W_c + W_g + F_v^2} \text{ [daN/m]} \quad (17)$$

Em que:

- $W_c$  – Peso distinto do condutor [daN/m];
- $W_g$  – Peso característico da manga de gelo [daN/m];
- $F_v$  – Força provocada pelo vento no condutor e manga de gelo se aplicável [daN/m];
- $F_r$  – Força resultante da soma das diversas ações sobre o condutor [daN/m].

### 5.3.1 PESO DO CONDUTOR

Todos os condutores elétricos catalogados apresentam na sua tabela de características o seu peso específico, podendo ser calculada com facilidade a força exercida pelo próprio peso do cabo.

$$W_c = p * \sigma \text{ [daN/m]} \quad (18)$$

### 5.3.2. AÇÃO DO VENTO

No cálculo das linhas aéreas o vento deverá considerar-se atuando numa direção horizontal e a força proveniente da sua ação considerar-se-á paralela àquela direção e será expresso por:

$$F_v = \alpha * c * q * s \text{ [daN/m]} \quad (19)$$

Em que:

- $\alpha$  – Coeficiente de redução;
- $c$  – Coeficiente de forma;
- $q$  – Pressão dinâmica do vento (PA);
- $s$  – Área da superfície batida pelo vento ( $m^2$ ).

#### 5.3.2.1. COEFICIENTE DE REDUÇÃO

O fator aerodinâmico expressa as variações das velocidades do vento ao longo da linha aérea, o seu valor difere consoante o elemento da linha que estamos a considerar. Apoios,

travessas e cadeias de isoladores possuem 1,0 enquanto condutores elétricos e cabos de guarda 0,6<sup>9</sup>.

### 5.3.2.2. COEFICIENTE DE FORMA

O coeficiente de forma depende do diâmetro do condutor e equivale ao efeito geométrico que a força do vento têm sobre o cabo. A tabela 4 evidência os valores possíveis.

**Tabela 3- Coeficiente de forma de condutores e cabos de guarda**

<b>Tipo</b>	<b>Diâmetro(mm)</b>	<b>Coeficiente de Forma (c)</b>
<b>Condutores e Cabos de Guarda</b>	$d \leq 12,5$	<b>1,2</b>
	$12,5 < d \leq 15,8$	<b>1,1</b>
	$d \geq 15,8$	<b>1,0</b>

### 5.3.2.3. PRESSÃO DINÂMICA DO VENTO

A pressão que o vento aplica às linhas elétricas aéreas é diretamente proporcional à altura que os elementos da linha estão situados, onde é calculada a força exercida pelo vento aos mesmos. A estação onde se regista o vento máximo é a Primavera, sendo que no Inverno regista-se o vento reduzido, conforme pode ser observado na tabela 4.

**Tabela 4 - Pressão dinâmica do vento consoante estação e altura**

<b>Altura acima do solo <math>h</math> (m)</b>	<b>Pressão Dinâmica do vento (Pa)</b>	
	<b>Primavera</b>	<b>Inverno</b>
$h \leq 30$	750	300
$30 < h \leq 50$	900	360
$h > 50$	1050	420

<sup>9</sup> Capítulo II, Seção V, artigo 14<sup>o</sup> do RSLEAT

Na elaboração de linhas aéreas em zonas costeiras com uma extensão de 5 km e para áreas com altitudes superiores a 600 m é recomendado que a pressão dinâmica utilizada para efeitos de cálculo seja 120% superior<sup>10</sup>.

**Tabela 5 - Pressão dinâmica do vento para zonas excepcionalmente expostas**

Altura acima do solo $h$ (m)	Pressão Dinâmica do vento (Pa)	
	Primavera	Inverno
$h \leq 30$	900	360
$30 < h \leq 50$	1080	432
$h > 50$	1296	504

### 5.3.3. AÇÃO DO GELO

Em áreas propícias formação de gelo, é considerado a sua ação na instalação elétrica. Graças a fatores climáticos e geográficos como a humidade, temperatura e altitude é formada uma manga de gelo, a mesma origina o aumento do diâmetro do condutor e peso, que por sua vez aumenta a área exposta à força do vento.

Ao efetuar-se os cálculos para esta ação deverá ter-se em conta a espessura do gelo, normalmente 10 mm.<sup>11</sup>

A tabela 6 apresenta a relação entre altitude e a espessura da manga de gelo nos condutores.

**Tabela 6 – Espessura da manga do gelo consoante altura**

Altitude (m)	Espessura da manga de gelo (mm)
<b>700-900</b>	<b>10</b>
<b>900-1100</b>	<b>12</b>
<b>1100-1300</b>	<b>14</b>

Por fim, podemos calcular a ação que o gelo tem sobre os condutores com recurso à expressão (18):

$$W_g = \frac{\rho * \pi}{4} * [(d + 2 * e)^2 - d^2] [daN/m] \quad (18)$$

<sup>10</sup> Capítulo II, Seção V, artigo 13º, ponto 3 do RSLEAT

<sup>11</sup> Capítulo II, Seção V, artigo 16º do RSLEAT

Sendo:

- $\rho$  – Peso volumétrico específico do gelo, com o valor de  $900 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ ;
- $e$  – Espessura da manga de gelo (m).

## 5.4 COEFICIENTES DE SOBRECARGA

A Primavera e o Inverno são as estações do ano mais desfavoráveis a considerar durante a concepção de linhas elétricas. Um coeficiente de sobrecarga é utilizado para considerar os agentes atmosféricos que definem as condições atmosféricas para o cálculo mecânico.

O cálculo do coeficiente de sobrecarga relacionado com cada uma das situações meteorológicas mencionadas é importante para identificar qual a estação mais desfavorável [32].

O próprio peso do condutor é aumentado pelo coeficiente de sobrecarga, que representa os efeitos do vento e do gelo como se as suas ações fossem equivalentes a um aumento do próprio peso do condutor.

O cálculo respetivo ao coeficiente de sobrecarga pode ser definido como:

$$m = \frac{F_r}{W_c} = \frac{\sqrt{W_c^2 + W_g^2 + F_v^2}}{W_c} \quad (19)$$

## 5.5 VÃO CRÍTICO E EQUIVALENTE

Os vãos equivalentes e críticos de cada vão podem ser calculados após a determinação dos coeficientes de sobrecarga para cada estado atmosférico, o vão equivalente pode ser calculado tendo uma disposição inicial dos suportes na linha a ser concebida que permite determinar, os vãos entre cada um deles, e definir os cantões.

Segundo o RSLEAT o vão equivalente consiste num vão fictício em que as variações da tensão mecânica, devido às variações de carga e de temperatura, são sensivelmente iguais às dos vãos reais do cantão<sup>12</sup>.

---

<sup>12</sup> Capítulo I, Seção IV, artigo 4º, ponto 83 do RSLEAT

O vão equivalente é calculado quando se verifica a existência de cantões compostos por vários vãos, cujo primeiro e últimos apoios possuem cadeias de amarração e os restantes utilizam cadeias de suspensão. A expressão que traduz o vão equivalente pode ser formulada deste modo:

$$L_{Eq} = \sqrt{\frac{\sum L_i^3}{\sum L_i}} [m] \quad (20)$$

Em que:

- $L_i$  – Comprimento do vão (m).

Com o vão equivalente calculado, segue-se o vão crítico, definido como: vão relativo a uma tensão máxima, em que é aplicada aos condutores elétricos em ambos nos estados de Inverno e Primavera [5].

$$L_{Cr} = \frac{\sigma * t_{max}}{p} = \sqrt{\frac{24 * \alpha_d (\theta_2 - \theta_1)}{m_2^2 - m_1^2}} [m] \quad (21)$$

Onde:

- $\alpha_d$  – Coeficiente de dilatação térmica do material ( $^{\circ}C^{-1}$ );
- $\theta_2$  – Temperatura ambiente na primavera ( $^{\circ}C$ );
- $\theta_1$  – Temperatura ambiente no inverno ( $^{\circ}C$ );
- $m_2$  – Coeficiente de sobrecarga na primavera;
- $m_1$  – Coeficiente de sobrecarga no inverno.

## 5.6 ESTADO ATMOSFÉRICO MAIS DESFAVORÁVEL

Após calcular as constantes de sobrecarga e dos vãos críticos torna-se possível a determinação da estação do ano mais prejudicial para cada cantão através do seguinte fluxograma.

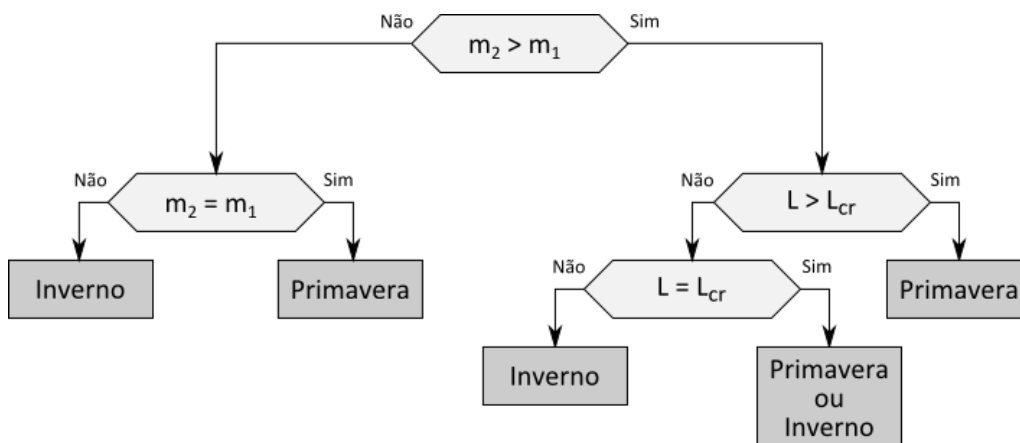


Figura 32 - Representação do fluxograma de decisão do estado atmosférico mais desfavorável [11]

As variáveis de decisão para a decisão do estado atmosférico mais desfavorável são os coeficientes de sobrecarga, o vão crítico e equivalente. A determinação do estado mais desfavorável inicia-se com a verificação de qual dos coeficientes de sobrecarga é superior ao outro.

O vão crítico e vão equivalente apenas são necessários caso, o coeficiente de sobrecarga da primavera seja superior ao de inverno.

## 5.7 EQUAÇÃO DE ESTADOS

Tendo por base o estado atmosférico mais desfavorável para os cantões da linha elétrica é possível o cálculo da tensão de montagem para diversas temperaturas em diversos estados, incluindo para a temperatura máxima definida que irá corresponder à flecha máxima.

Utilizando a equação de estados abaixo apresentada, é possível estimar a tensão mecânica de montagem dos condutores em outro estado, nomeadamente com outra temperatura e calcular o coeficiente de sobrecarga do verão.

$$\theta + \frac{t}{\alpha * E} - \frac{m^2 \omega^2 L^2}{24 \alpha \sigma^2 t^2} = \theta_k + \frac{t_k}{\alpha * E} - \frac{m_k^2 \omega^2 L^2}{24 \alpha \sigma^2 t_k^2} \quad (22)$$

Sendo:

- $\theta$  – Temperatura do estado mais desfavorável ( $^{\circ}C$ );
- $\theta_k$  – Temperatura definida ( $^{\circ}C$ );
- $t$  – Tensão mecânica máxima ( $dan/mm^2$ );
- $t_k$  – Tensão mecânica da temperatura da definida ( $dan/mm^2$ );
- $\alpha$  – Coeficiente de dilatação térmica ( $^{\circ}C^{-1}$ );
- $E$  – Módulo Young ( $dan/mm^2$ );
- $m$  – Coeficiente de sobrecarga no estado mais desfavorável;
- $\omega$  – Peso linear do cabo ( $dan/m$ );
- $\sigma$  – Secção do condutor ( $mm^2$ );
- $L$  – Comprimento do cantão (m).

## 5.8 CÁLCULO DO PARÂMETRO E DA FLECHA MÁXIMA

Segundo o RSLEAT, a flecha máxima dos condutores deverá ser determinada, quando os mesmos se encontram em regime permanente à temperatura máxima permitida.<sup>13</sup>

A flecha de um condutor equivale à distância do ponto do condutor onde a tangente é paralela à reta que passa pelos pontos de fixação e a interseção da vertical que passa por esse ponto com esta reta<sup>14</sup>.

A flecha máxima está associada à estação de verão, onde os condutores irão dilatar mais e, por consequência, diminuir a distância ao solo ou a obstáculos. Este fator é influenciado pela temperatura, que quanto maior for, corresponderá a uma maior flecha.

$$f = \frac{A^2 * \omega}{8 * t * \sigma} [m] \quad (14)$$

Em que:

- $A^2$  – Vão máximo equivalente (m);
- $\omega$  – Peso linear do condutor ( $dan/m$ );
- $t$  – Tensão mecânica aplicada ao condutor ( $dan/mm^2$ );
- $\sigma$  – Secção do condutor ( $mm^2$ ).

<sup>13</sup> Capítulo I, Secção V, artigo 22º do RSLEAT

<sup>14</sup> Capítulo I, Secção IV, artigo 4º do RSLEAT

A partir do cálculo da flecha máxima é possível averiguar se a linha aérea cumpre as distâncias mínimas regulamentares. Através da tensão de montagem calculada na equação de estados para a temperatura mais elevada é possível calcular-se a respetiva flecha máxima.

O parâmetro da catenária, consiste numa constante de equações da catenária e da parábola representada geograficamente pelo raio de curvatura no ponto onde a tangente à curva é horizontal.

O parâmetro é representado pela relação entre a força de tração horizontal do condutor  $T$  a uma dada temperatura e o peso linear do condutor  $\omega$ , incluindo as sobrecargas eventuais de gelo ou de vento.<sup>15</sup>

$$P = \frac{T}{\omega} [m] \quad (23)$$

Sendo a tração horizontal obtida através de:

$$T = t * \sigma [daN] \quad (24)$$

Em que:

- $\omega$  – Peso linear do condutor ( $dan/m$ );
- $t$  – Tensão mecânica aplicada ao condutor ( $dan/mm^2$ );
- $\sigma$  – Secção do condutor ( $mm^2$ ).

### 5.8.1 VÃOS DE NÍVEL

Os vãos de nível são caracterizados pelos seus apoios estarem no mesmo patamar, traduzindo uma catenária nivelada, em que o ponto de flecha máxima está no centro. A figura 31 representa um vão nivelado, assim como o comprimento do condutor e flecha.

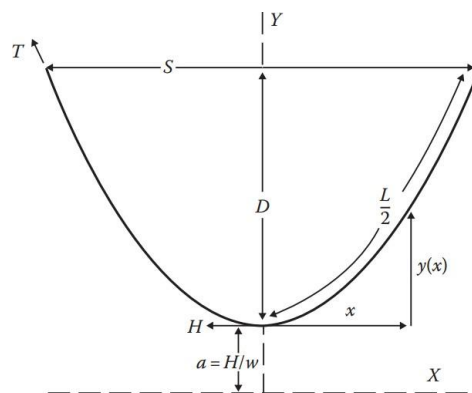


Figura 33 - Representação de um vão nivelado [11]

<sup>15</sup> Capítulo I, Seção IV, artigo 4º, ponto 62 do RSLEAT

A catenária é definida em função de:

- $\omega$  – Peso linear do cabo (daN/m);
- S – Comprimento do vão (m);
- D – Flecha máxima (m);
- H – Tração Horizontal (daN/mm<sup>2</sup>);
- L – Comprimento do vão (m).

A expressão que define a catenária utiliza funções hiperbólicas. O ponto mais baixo da curva catenária designada por  $y(x)$  é dado por:

$$y(x) = \frac{H}{\omega} \left( \cosh\left(\frac{\omega}{H} * x\right) - 1 \right) \quad (25)$$

Simplificando a expressão a mesma pode ser escrita deste modo:

$$y(x) = \frac{x^2 * \omega}{2 * H} \quad (26)$$

Como mencionado no início deste subcapítulo, o vão de nível é caracterizado por ter o seu ponto de flecha maior no centro, em que D pode ser obtido através de na equação anterior considerar:

$$x = \frac{S}{2} \quad (27)$$

Substituindo o valor de x em (25) temos:

$$y(x) = \frac{H}{\omega} \left( \cosh\left(\frac{\omega}{H} * x\right) - 1 \right) = \frac{S^2 * \omega}{8 * H} \quad (28)$$

$\frac{H}{\omega}$  traduz o parâmetro da catenária, sendo que um aumento de flecha resulta numa diminuição do parâmetro da catenária. A flecha depende da temperatura presente nos condutores, a existência de mangas de gelo, a força exercida pelo vento e a tração aplicada na montagem dos condutores.

Recorrendo ao seno hiperbólico é possível determinar a extensão do condutor,  $L(x)$ , desde o ponto mais baixo da catenária [11].

$$L(x) = \frac{H}{\omega} \sinh\left(\frac{\omega}{H} * x\right) = x * \left(1 + \frac{x^2 \omega^2}{6H^2}\right) \quad (29)$$

Uma vez que se trata de uma situação de vão nivelado, o comprimento da linha que corresponde a  $x = \frac{S}{2}$  é metade do comprimento total do condutor, pelo que:

$$L(x) = \frac{2 * H}{\omega} \sinh\left(\frac{\omega}{2 * H} * S\right) = S * \left(1 + \frac{S^2 \omega^2}{24H^2}\right) \quad (30)$$

A fórmula parabólica para determinar o comprimento do condutor pode ser representada em função da flecha da seguinte forma:

$$L(x) = S + \frac{8 * D^2}{3 * S} \quad (30)$$

## 5.8.2 VÃOS DESNIVELADOS

Os vãos desnivelados são considerados como duas seções diferentes, existindo um ponto mais baixo e um ponto mais alto conforme pode ser observado na figura 34. No entanto a sua análise pode ser efetuada com as mesmas expressões previamente usadas em 5.8.1.

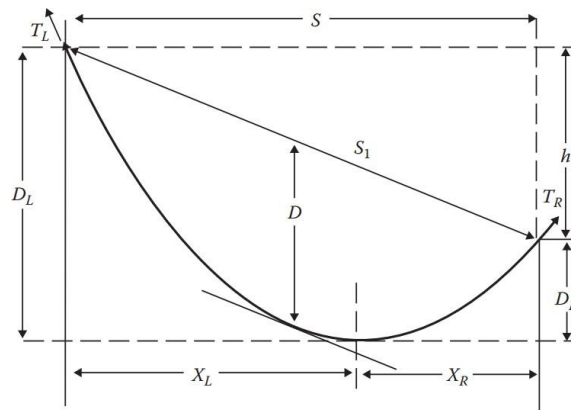


Figura 34- Representação de um vão desnivelado [11]

$y(x)$  pode ser calculado a partir do ponto com a cota mais inferior, para ambos os sentidos, tendo por base:

$$y(x) = \frac{H}{\omega} \left( \cosh\left(\frac{\omega}{H} * x\right) - 1 \right) = \frac{x^2 * \omega}{2 * H} \quad (31)$$

Desde o ponto mais baixo,  $x$  é considerado positivo em qualquer direção, (32) dá a distância horizontal,  $X_L$ , entre o ponto de apoio esquerdo e o ponto mais baixo da catenária.

$$X_L = \frac{S}{2} \left( 1 + \frac{h}{4 * D} \right) \quad (32)$$

$X_R$  representa a distância horizontal do apoio localizado à direita do ponto mais baixo do vão e pode ser calculado através de:

$$X_R = \frac{S}{2} \left( 1 - \frac{h}{4 * D} \right) \quad (33)$$

Sendo:

- S – Comprimento do vão (m);
- h – Distância vertical entre apoios (m);
- D – Flecha máxima (m).

Após determinar-se os comprimentos horizontais do ponto mais baixo do vão, assim como as equações referentes a  $y(x)$  e  $x$ . O comprimento do condutor pode ser calculado.

$$L = S + \left( X_L^3 + X_R^3 + \frac{\omega^2}{6 * H^2} \right) \quad (34)$$

As distâncias verticais,  $D_L$  e  $D_R$ , representam o comprimento desde o ponto mais baixo da catenária e o ponto mais alto do apoio.

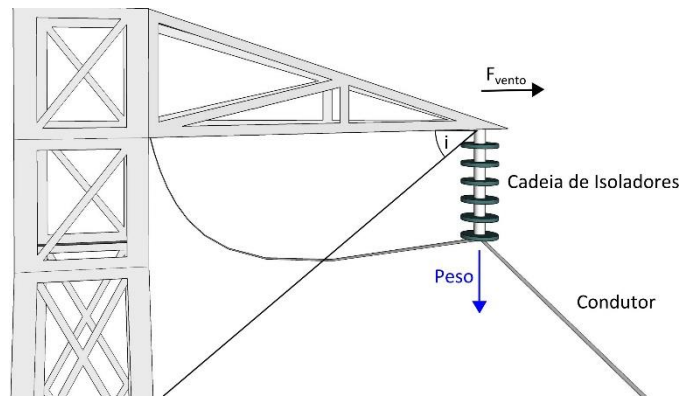
$$D_L = \frac{\omega * XL^2}{2 * H} \quad (35)$$

$$D_R = \frac{\omega * XR^2}{2 * H} \quad (36)$$

## 5.9 DESVIO TRANSVERSAL DAS CADEIAS DE ISOLADORES DE SUSPENSÃO

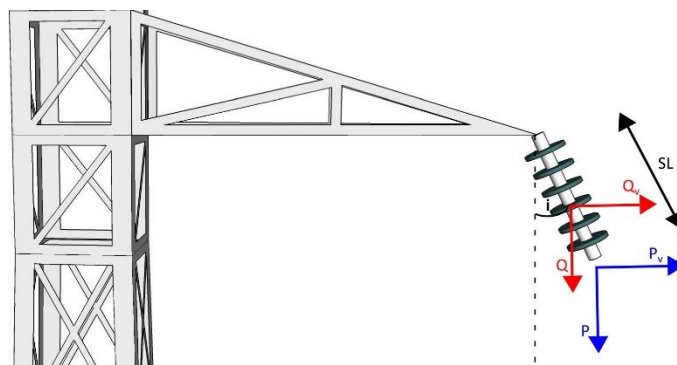
Em apoios de alinhamento existe a possibilidade de usar cadeias de suspensão, de modo a verificar esta hipótese é necessário calcular o desvio máximo que a cadeia terá. Como já foi mencionado, as cadeias de suspensão estão presas através de um único ponto de fixação no apoio de maneira que se podem movimentar.

Deste modo é imperativo averiguar se a movimentação das cadeias põe em risco as condições de segurança. As cadeias de suspensão são afetadas pela ação do vento e peso dos condutores como pode ser evidenciado na figura apresentada em baixo.



**Figura 35 - Esquema das forças que atuam nas cadeias de suspensão [11]**

Na verdade, não existirá desvios transversais das cadeias de suspensão caso não exista força exercida pelo vento. Todavia, caso o contrário se verifique as cadeias de isoladores apresentarão o desvio exposto na figura 36. O comprimento das cadeias isoladoras é representado por SL no mesmo diagrama, em metros.



**Figura 36 - Forças exercidas sobre a cadeia de isoladores [11]**

O valor máximo aceite pela E-REDES é de 60 graus, sendo que uma boa prática é não colocar cadeias em suspensão caso se verifique que o seu desvio transversal seja de 55 graus ou maior. O desvio transversal  $i$  resulta das forças horizontais e verticais às quais as cadeias são submetidas.

$$i = \text{tg}^{-1} * \left[ \frac{P_v + \frac{Q_v}{2}}{P + \frac{Q}{2}} \right] [\text{grados}] \quad (37)$$

Em que:

- $P_v$  – Metade da força exercida pelo vento nos condutores (daN);
- $Q_v$  – Força exercida pelo vento nas cadeias de isoladores (daN);
- P – Peso dos condutores exercido no apoio(daN);
- Q – Peso das cadeias isoladores (daN).

## 5.10 DISTÂNCIAS REGULAMENTARES

Na execução e exploração das linhas aéreas, as distâncias regulamentares representam as distâncias mínimas que as linhas devem estar a vários obstáculos. No RSLEAT as distâncias são definidas e indicado como as obter.

Tabela 7 - Distâncias Regulamentares a obstáculos [29]

Obstáculo	Art. Nº	Expressão da Distância Mínima - D (m)	Mínimo Exercido (m)	Distância Horizontal dos apoios ao obstáculo (m)
Ao solo	27	$D = 6,0 + 0,0005.U$	7	
Às árvores	28	$D = 2,0 + 0,0075.U$	2,5	
Aos edifícios	29	$D = 3,0 + 0,0075.U$	4; 4 +  desnível	
A obstáculos diversos	30	$D = 2,0 + 0,0075.U$	3	
Entre condutores MT	31	$D = 0,75 \times k(f+d)^{1/2} + U/200$	0,54	
Entre condutores MT e cabos de guarda	32	$D = 0,75 \times k(f+d)^{1/2} + U/200$	0,48	
Aos apoios (em repouso)	33	$D = 0,1 + 0,0065.U$	0,48	
Aos apoios (desviados pelo vento)	33	$D = 0,0065.U$	0,48	
Às estradas (AE, IPr, IC)	91 + 92	$D = 6,3 + 0,01.U$	7,0	5,0
Outras vias de comunicação	91 + 92	$D = 6,3 + 0,005.U$	7,0	3,0
Aos cursos de água não navegáveis	93	$D = 6,0 + 0,0005.U$	7,0	
Aos cursos de água navegáveis	94	$D = 1,5 + 0,005.U + h$	2,0 + h	
Aos teleféricos	95	$D = 3,3 + 0,01.U$	4,0	
Aos caminhos de ferro não eletrificados	100 + 103	$D = 6,3 + 0,01.U$	7,0	5,0
Aos caminhos de ferro c/ eletrificação prevista	101 + 103	$D = 11,0 + 0,01.U + 0,005.L$	13,5	5,0
Às linhas AT/MT/BT	109	$D = 1,5 + 0,01.U + 0,005.L$	2,0	
Às linhas de telecomunicações (cruzamento superior)	113 + 114	$D = 1,5 + 0,01.U + 0,005.L$	2,0	2,0

### Sendo:

- U – Tensão nominal da linha (kV);
- h – Altura maior de mastreação dos barcos que viajam em locais acima do nível médio da água (m);
- L – Distância menor dos apoios à via (Art. 101.º) (m);
- L – Distância do ponto de cruzamento ao apoio de linhas de diferentes tensões, considerando a tensão mais elevada (Art.109) (m);
- f – Flecha máxima dos condutores (m);
- k – Coeficiente dependente da natureza dos condutores e cujo valor é:
  - 0,6 para condutores de cobre, bronze, aço e alumínio-aço;
  - 0,7 para condutores de alumínio e de ligas de alumínio.

- $d$  – Comprimento das cadeias de isoladores que oscilam transversalmente (m).

Para além destes comprimentos, uma faixa de proteção com uma largura de 15 metros dividida ao meio pelo eixo da linha deve ser fornecida ao longo das linhas MT.

As árvores dentro desta faixa são cortadas e podadas a fim de assegurar as condições essenciais para a montagem, conservação e exploração da linha.

Para além do abate de árvores nesta zona de proteção, deve ser assegurado que em qualquer instância, da queda de árvores de grande porte as mesmas mantenham uma distância de 1,5 metros em relação às linhas.

## 5.11 ESTABILIDADE DOS APOIOS

Durante o dimensionamento dos apoios deverá ter-se em conta os esforços suportados por estes, de maneira que estes sejam dimensionados para as aguentar. Estes esforços tanto podem ter como origem fatores externos, como a ação do vento, ou os próprios elementos das linhas, como as tensões dos condutores, o peso destes e das cadeias de isoladores.

Considerando para todos os casos:

$$\beta = \frac{\phi}{2}$$

$$\frac{\alpha}{2} = \frac{200 - \phi}{2}$$

$\frac{\alpha}{2}$  não é nulo para apoios de ângulo ou reforço de ângulo, sendo que para os restantes cenários  $\phi = 200g$ , tornando  $\frac{\alpha}{2} = 0^\circ$  e  $\beta = 100g$ .

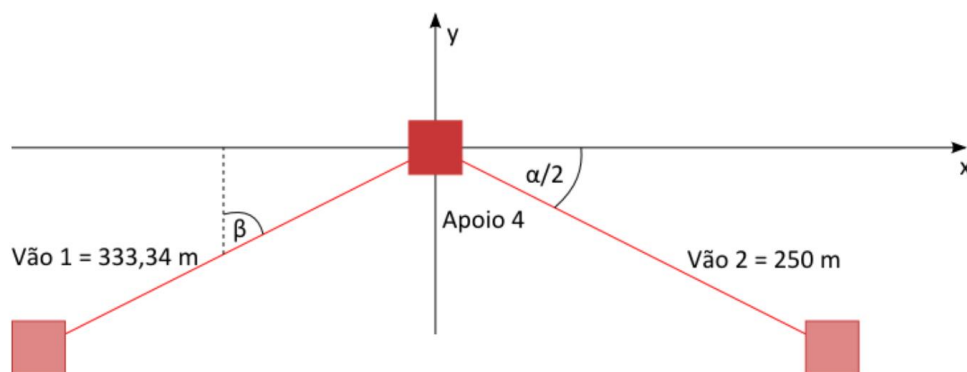


Figura 37 - Exemplo de um apoio e os respetivos ângulos [11]

### 5.11.1 APOIOS DE ALINHAMENTO E DE REFORÇO EM ALINHAMENTO

O RSLEAT prevê que os apoios de alinhamento e de reforço em alinhamento, devam ser dimensionados para as seguintes hipóteses de cálculo, consideradas não simultaneamente<sup>16</sup>:

#### Ações Normais:

#### Hipótese 1 para ambos os tipos de apoio:<sup>17</sup>

- Sobrecarga do vento atuando, normalmente à direção 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 trações dos condutores e cabos de guarda;
- Simultaneamente, o peso próprio do apoio, das travessas, dos isoladores, dos condutores e dos cabos de guarda.

As expressões matemáticas para todos os esforços dos eixos são as seguintes:

#### **Componente Longitudinal (eixo x):**

#### Tração do condutor sobre a linha:

$$T_{CDx} = \sigma * |t_{servL} - t_{servR}| * \cos \frac{\alpha}{2} [daN] \quad (38)$$

Sendo:

- $\sigma$  – Seção do condutor ( $mm^2$ );
- $t_{servL}$  – Tensão mecânica de serviço aplicada ao apoio da esquerda (daN);
- $t_{servR}$  – Tensão mecânica de serviço aplicada ao apoio da direita (daN).

Tendo (38) por base, a força total aplicada sob a componente longitudinal é igual a:

$$F_x = n * T_{CDx} [daN] \quad (39)$$

---

<sup>16</sup> Capítulo II, Seção II, artigo 56º e artigo 59º, ponto 1 do RSLEAT

<sup>17</sup> Capítulo II, Seção II, artigo 56º e artigo 59º, ponto 1, alínea a), Hipótese 1 do RSLEAT

Onde:

- $n$  – Número de condutores;
- $T_{CDx}$  – Tração do cabo exercido sobre os apoios (daN);

### Componente transversal (eixo y):

Tração do condutor sobre a linha:

$$T_{CDy} = \sigma * |t_{servL} - t_{servR}| * \sin \frac{\alpha}{2} \text{ [daN]} \quad (40)$$

Em que:

- $\sigma$  – Seção do conductor ( $mm^2$ );
- $t_{servL}$  – Tensão mecânica de serviço aplicada ao apoio da esquerda (daN);
- $t_{servR}$  – Tensão mecânica de serviço aplicada ao apoio da direita (daN)

Força do vento no condutor:

$$F_{VCDy} = \alpha * q * c * d * \frac{Lv\tilde{a}o1 + Lv\tilde{a}o2}{2} \text{ [daN]} \quad (41)$$

Sendo:

- $\alpha$  – Coeficiente de redução;
- $c$  – Coeficiente de forma;
- $q$  – Pressão dinâmica do vento (Pa);
- $d$  – Diâmetro do conductor (m);
- $Lv\tilde{a}o1$  – Vão para a esquerda do apoio (m);
- $Lv\tilde{a}o2$  – Vão para a direita do apoio (m).

O vento, por sua vez, também exerce força sobre as cadeias de isoladores presentes nos apoios, a sua expressão é dada por:

$$F_{Visol} = n * p_c \text{ [daN]} \quad (42)$$

Onde:

- $n$  – Número de cadeias;
- $p_c$  – Peso das cadeias de isoladores (daN).

Somando os diferentes tipos de esforços, temos o esforço total na componente transversal do apoio:

$$F_y = n * (T_{CDy} + F_{VCDy}) + F_{Visol} [daN] \quad (43)$$

Em que:

- $n$  – Número de condutores;
- $T_{CDy}$  – Tração mecânica do condutor sobre a linha (daN);
- $F_{VCDy}$  – Força do vento sobre os condutores (daN);
- $F_{Visol}$  – Força do vento sobre as cadeias de isoladores (daN).

### **Componente vertical (eixo z):**

Peso de um condutor sobre a linha:

$$P_{CD} = W_c * \frac{Lv\tilde{a}o1 + Lv\tilde{a}o2}{2} [daN] \quad (44)$$

Sendo:

- $W_c$  – Peso específico do condutor por unidade de comprimento [daN/m];
- $Lv\tilde{a}o1$  – Vão para a esquerda do apoio (m);
- $Lv\tilde{a}o2$  – Vão para a direita do apoio (m).

Peso das cadeias de isoladores sobre a linha:

$$P_{isol} = 2 * n * p_c [daN] \quad (45)$$

Onde:

- $n$  – Número de cadeias;
- $p_c$  – Peso das cadeias de isoladores (daN).

A força vertical exercida sobre o apoio pode ser calculada através da soma do peso dos condutores, peso das cadeias de isoladores e peso do cabo de guarda:

$$F_z = n * P_{Cd} + P_{isol} [daN] \quad (46)$$

Em que:

- $n$  – Número de condutores;
- $P_{Cd}$  – Peso dos condutores (daN);
- $P_{isol}$  – Peso das cadeias de isoladores (daN);

### **Hipótese 2: Apoios de Alinhamento:**<sup>18</sup>

- A força horizontal, de valor igual a um quinto do da resultante das forças provenientes da ação do vento normal na direção da linha sobre os condutores e os cabos de guarda nos dois meios vãos adjacentes ao apoio, atuando no eixo do apoio, na direção da linha, à altura daquela resultante;
- Simultaneamente, o peso próprio do apoio, das travessas, dos isoladores, dos condutores e dos cabos de guarda.

#### **Componente longitudinal (eixo x):**

$$F_x = \frac{1}{5} * F_y \text{ [daN]} \quad (47)$$

Sendo:

- $F_y$  – Força transversal total (daN).

Não há referência no RSLEAT sobre como determinar os esforços referentes às componentes transversais, pelo que são considerados nulos, porque as forças do vento são aplicadas ao longo do eixo longitudinal da linha, e as trações são nulas sob o eixo transversal dos suportes.

Para a componente vertical, a expressão a utilizar será exatamente a mesma, pois a ação do peso sobre os materiais é a mesma.

$$F_z = n * P_{Cd} + P_{isol} \text{ [daN]} \quad (48)$$

### **Hipótese 2: Apoios de Reforço em alinhamento:**<sup>19</sup>

- Força, de valor igual a dois terços da soma das componentes horizontais das trações máximas unilaterais exercidas por todos os condutores e os cabos de guarda, atuando no eixo do apoio, na direção da linha, à altura da resultante dessas trações;
- Simultaneamente, o peso próprio do apoio, das travessas, dos isoladores, dos condutores e dos cabos de guarda.

---

<sup>18</sup> Capítulo II, Seção II, artigo 56º ponto 1, alínea a), Hipótese 2 do RSLEAT

<sup>19</sup> Capítulo II, Seção II, artigo 59º, ponto 1, alínea a), Hipótese 2 do RSLEAT

### Componente longitudinal (eixo x):

$$F_x = \frac{2}{3} * n * T_{CDx} * \sigma * \cos(\beta) [daN] \quad (49)$$

Considerando:

- $n$  – Número de condutores;
- $T_{CDx}$  – Tração dos condutores aplicada ao apoio referente ao eixo x (daN);
- $T_{CG}$  – Tração do cabo de guarda aplicado ao apoio (daN).

### Componente vertical (eixo z):

$$F_z = n * P_{Cd} + P_{isol} [daN] \quad (50)$$

Novamente, para a componente vertical, os esforços realizados são considerados os mesmos que na hipótese 2 dos apoios de alinhamento. Assim como a componente transversal é considerada nula.

### Ações Excepcionais:

#### Hipótese 3: Apoios de Reforço em alinhamento:<sup>20</sup>

- As componentes horizontais das trações 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.

Caso ocorra uma quebra de condutores nos apoios de reforço deve-se considerar a seguinte expressão para o cálculo do esforço longitudinal que o apoio irá ficar sujeito a:

$$F_x = (n - 1) * T_{CDx} [daN] \quad (51)$$

Em que:

- $n$  – Número de condutores;
- $T_{CDx}$  – Tração dos condutores aplicada ao apoio referente ao eixo x (daN);

Mais uma vez, considera-se os esforços longitudinais nulos e calcula-se a força vertical através de:

$$F_z = n * P_{Cd} + P_{isol} [daN] \quad (52)$$

---

<sup>20</sup> Capítulo II, Seção II, artigo 59º, ponto 1, alínea b), Hipótese 3 do RSLEAT

Em que:

- $n$  – Número de condutores;
- $P_{Cd}$  – Peso dos condutores (daN);
- $P_{isol}$  – Peso das cadeias de isoladores (daN).

### 5.11.2 APOIOS DE ÂNGULO E REFORÇO EM ÂNGULO

De acordo com o RSLEAT, os apoios que desempenham a função de ângulo ou reforço em ângulo devem ser projetados contemplando as subseqüentes hipóteses de cálculo:

#### Ações Normais:

##### Hipótese 1 para ambos os tipos de apoio<sup>21</sup>:

- A sobrecarga do vento atuando, segundo a direção da bissetriz 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 trações exercidas pelos condutores e pelos cabos de guarda à temperatura de +15°C, com vento atuando segundo a direção da bissetriz do ângulo;
- Simultaneamente, o peso próprio do apoio, das travessas, dos isoladores, dos condutores e dos cabos de guarda.

O modelo matemático utilizado para estes cálculos é o mesmo para todas as forças como indicado na secção anterior para os apoios em alinhamento, com a exceção de que  $\alpha$  já não é nulo, conseqüentemente alterando os valores de  $\beta$  e  $\phi$ .

#### **Componente longitudinal (eixo x):**

##### Tração do condutor sobre a linha:

$$T_{CD} = \sigma * |t_{servL} - t_{servR}| * \cos \frac{\alpha}{2} [daN] \quad (53)$$

##### Força do vento no condutor:

$$F_{VCD} = \alpha * q * c * d * \frac{Lv\tilde{a}o1 + Lv\tilde{a}o2}{2} * \cos \left( \frac{\alpha}{2} \right) * \sin \left( \frac{\alpha}{2} \right) [daN] \quad (54)$$

---

<sup>21</sup> Capítulo II, Seção II, artigo 57º e artigo 60º, ponto 1, alínea a), Hipótese 1 do RSLEAT

Esforço Longitudinal Total:

$$F_x = n * (T_{CDx} + F_{VCD}) [daN] \quad (55)$$

**Componente transversal (eixo y):**

Força do vento no condutor:

$$F_{VCD} = \alpha * q * c * d * \frac{Lv\tilde{a}o1 + Lv\tilde{a}o2}{2} * \sin(\beta)^2 [daN] \quad (56)$$

Tração do condutor sobre a linha:

$$T_{CD} = \sigma * t_{serv} * \sin(\beta)^2 [daN] \quad (57)$$

Força do vento sobre as cadeias de isoladores:

$$F_{visol} = n * p_c [daN] \quad (58)$$

Força do vento total exercida na componente transversal à linha:

$$F_y = n * (T_{CDy} + F_{VCy}) + F_{visol} [daN] \quad (59)$$

**Componente vertical (eixo z):**

Peso de um condutor sobre a linha:

$$P_{CD} = W_c * \frac{Lv\tilde{a}o1 + Lv\tilde{a}o2}{2} [daN] \quad (60)$$

Peso das cadeias de isoladores sobre a linha:

$$P_{isol} = 2 * n * p_c [daN] \quad (61)$$

Esforços Verticais Totais:

$$F_z = n * P_{Cd} + P_{isol} [daN] \quad (62)$$

**Hipótese 2 para apoios de ângulo<sup>22</sup>:**

- A força horizontal, de valor igual a um quinto do da resultante das forças provenientes da ação do vento segundo a direção da bissetriz do ângulo sobre os condutores e os cabos de guarda nos dois meios vãos adjacentes ao apoio, atuando no eixo do apoio, na direção normal à bissetriz do ângulo, à altura daquela resultante.

---

<sup>22</sup> Capítulo II, Seção II, artigo 57º ponto 1, alínea a), Hipótese 2 do RSLEAT

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

**Componente longitudinal (eixo x):**

$$F_x = \frac{1}{5} * F_y [daN] \quad (63)$$

Novamente, não há referência no RSLEAT sobre como determinar os esforços referentes às componentes transversais, pelo que são considerados nulos, porque as forças do vento são aplicadas ao longo do eixo longitudinal da linha, e as trações são nulas sob o eixo transversal dos suportes.

**Componente vertical (eixo z):**

Peso de um condutor sobre a linha:

$$P_{CD} = W_c * \frac{Lv\tilde{a}o1 + Lv\tilde{a}o2}{2} [daN] \quad (64)$$

Peso das cadeias de isoladores sobre a linha:

$$P_{isol} = 2 * n * p_c [daN] \quad (65)$$

**Hipótese 2 para apoios de reforço em ângulo<sup>23</sup>:**

- Força, de valor igual a dois terços da soma das componentes horizontais das trações máximas unilaterais exercidas por todos os condutores e os cabos de guarda, atuando no eixo do apoio, na direção da linha, à altura da resultante dessas trações;
- Simultaneamente, o peso próprio do apoio, das travessas, dos isoladores, dos condutores e dos cabos de guarda.

Mais uma vez, para a componente vertical, os esforços realizados são considerados os mesmos que na hipótese 2 dos apoios de alinhamento. Assim como a componente transversal é considerada nula.

**Componente Longitudinal (eixo x):**

Tração do condutor sobre a linha:

$$F_x = \frac{2}{3} * n * T_{CDx} * \sigma * \cos \frac{\alpha}{2} [daN] \quad (66)$$

---

<sup>23</sup> Capítulo II, Seção II, artigo 60º ponto 1, alínea a), Hipótese 2 do RSLEAT

### **Componente vertical (eixo z):**

Peso de um condutor sobre a linha:

$$P_{CD} = W_c * \frac{Lv\tilde{a}o1 + Lv\tilde{a}o2}{2} [daN] \quad (67)$$

Peso das cadeias de isoladores sobre a linha:

$$P_{isol} = 2 * n * p_c [daN] \quad (68)$$

Esforço Vertical Total:

$$F_z = n * P_{CD} + P_{isol} [daN] \quad (69)$$

### **Hipótese 3 para apoios de reforço em ângulo<sup>24</sup>:**

- As componentes horizontais das trações máximas exercidas pelos condutores e pelos cabos de guarda, considerando a rotura de um qualquer dos condutores ou cabos de guarda.
- Simultaneamente, o peso do próprio apoio, das travessas, dos isoladores, dos condutores e dos cabos de guarda.

### **Componente longitudinal (eixo x):**

Tração do condutor sobre a linha:

$$T_{CD} = \sigma * |t_{servL} - t_{servR}| * \cos \frac{\alpha}{2} [daN] \quad (70)$$

Esforço Longitudinal Total:

$$F_x = (n - 1) * T_{CDx} [daN] \quad (71)$$

Em que:

- $n$  – Número de condutores;
- $T_{CDx}$  – Tração dos condutores aplicada ao apoio referente ao eixo x (daN);
- $T_{CG}$  – Tração do cabo de guarda aplicado ao apoio (daN).

### **Componente vertical (eixo z):**

Peso de um condutor sobre a linha:

$$P_{CD} = W_c * \frac{Lv\tilde{a}o1 + Lv\tilde{a}o2}{2} [daN] \quad (72)$$

---

<sup>24</sup> Capítulo II, Seção II, artigo 60º ponto 1, alínea b), Hipótese 3 do RSLEAT

Peso das cadeias de isoladores sobre a linha:

$$P_{isol} = 2 * n * p_c \text{ [daN]} \quad (73)$$

Esforço Vertical Total:

$$F_z = n * P_{Cd} + P_{isol} \text{ [daN]} \quad (74)$$

### 5.11.3 APOIOS DE FIM DE LINHA

Os esforços realizados pelos apoios de fim de linha devem ser efetuados para as seguintes hipóteses de cálculo, que não devem ser examinadas em simultâneo, de acordo com RSLEAT:

**Ações Normais:**

**Hipótese 1<sup>25</sup>:**

- A sobrecarga do vento atuando, normalmente à direção 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 trações dos condutores e cabos de guarda à temperatura de +15°C, com vento atuando segundo a direção atrás considerada;
- Simultaneamente, o peso próprio do apoio, das travessas, dos isoladores, dos condutores e dos cabos de guarda.

**Componente longitudinal (eixo x):**

Tração do condutor sobre a linha:

$$T_{CD} = \sigma * t_{serv} \text{ [daN]} \quad (75)$$

Esforço Longitudinal Total:

$$F_x = n * T_{CD} \text{ [daN]} \quad (76)$$

**Componente transversal (eixo y):**

Força do vento no condutor:

---

<sup>25</sup> Capítulo II, Seção II, artigo 62º ponto 1, alínea a), Hipótese 1 do RSLEAT

$$F_{VCD} = \alpha * q * c * d * \frac{Lv\tilde{a}o1}{2} [daN] \quad (77)$$

Força do vento sobre as cadeias de isoladores sobre a linha:

$$F_{visol} = n * p_c [daN] \quad (78)$$

Somando os diferentes tipos de esforços, temos o esforço total na componente transversal do apoio:

$$F_y = n * F_{VCD} + F_{visol} [daN] \quad (79)$$

**Componente vertical (eixo z):**

Peso de um condutor sobre a linha:

$$P_{CD} = W_c * \frac{Lv\tilde{a}o1}{2} [daN] \quad (80)$$

Peso das cadeias de isoladores sobre a linha:

$$P_{isol} = 2 * n * p_c [daN] \quad (81)$$

Esforço Vertical Total:

$$F_z = n * P_{Cd} + P_{isol} [daN] \quad (82)$$

**Hipótese 2<sup>26</sup>:**

- As componentes horizontais das trações 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.

Caso ocorra uma quebra de condutores nos apoios de fim de linha deve-se considerar a seguinte expressão para o cálculo do esforço longitudinal que o apoio irá ficar sujeito a:

$$F_x = (n - 1) * T_{CDx} [daN] \quad (83)$$

Sendo:

- $n$  – Número de condutores;
- $T_{CDx}$  – Tração dos condutores aplicada ao apoio referente ao eixo x (daN).

---

<sup>26</sup> Capítulo II, Seção II, artigo 62º ponto 1, alínea a), Hipótese 2 do RSLEAT

De novo, considera-se os esforços longitudinais nulos e calcula-se a força vertical considerando apenas um vão:

$$F_z = n * P_{Cd} + P_{isol} [daN] \quad (84)$$

#### 5.11.4 APOIOS DE DERIVAÇÃO

##### Ações Normais:

##### **Hipótese 1<sup>27</sup>:**

- A sobrecarga de vento atuando, normalmente à direção da linha principal se o apoio for de alinhamento ou segundo a direção da bissetriz do ângulo da linha principal se for de ângulo, sobre o apoio, as travessas, e os isoladores sobre os condutores e o cabo de guarda da linha principal nos dois meios vãos adjacentes ao apoio.
- Simultaneamente, a sobrecarga de vento atuando, com direção anteriormente considerada, sobre os condutores e os cabos de guarda no meio vão adjacente das linhas derivadas.
- Simultaneamente, a resultante das componentes horizontais das trações exercidas pelos condutores e pelos cabos de guarda da linha principal e das linhas derivadas à temperatura de +15°C, com vento atuando segundo a direção atrás considerada.
- Simultaneamente, o peso próprio do apoio das travessas, dos isoladores, dos condutores, e dos cabos de guarda da linha principal e das linhas derivadas.

##### **Componente longitudinal (eixo x):**

##### Tração do condutor sobre a linha principal:

$$T_{CDx} = \sigma * |t_{servL} - t_{servR}| [daN] \quad (85)$$

##### Tração do condutor sobre a linha de derivação:

$$T_{CDdx} = \sigma * t_{serv} * \sin(\beta) [daN] \quad (86)$$

##### Força do vento aplicada ao condutor da derivação:

$$F_{VCDd} = \alpha * q * c * d * \frac{Lv\tilde{a}o1}{2} * \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 [daN] \quad (87)$$

##### Esforço Transversal Total:

$$F_x = (n * T_{CDx}) + 3 * (T_{CDdx} + F_{VCDdx}) [daN] \quad (88)$$

---

<sup>27</sup> Capítulo II, Seção II, artigo 58º ponto 1, alínea a), Hipótese 1 do RSLEAT

### **Componente transversal (eixo y):**

Força do vento no condutor sobre a linha principal:

$$F_{VCD} = \alpha * q * c * d * \frac{Lv\tilde{a}o1 + Lv\tilde{a}o2}{2} * \sin(\beta)^2 [daN] \quad (89)$$

Força do vento no condutor sobre a linha da derivação:

$$F_{VCDd} = \alpha * q * c * d * Lv\tilde{a}o1 * \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) * \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) [daN] \quad (90)$$

Tração do condutor sobre a linha principal:

$$T_{CDy} = \sigma * |t\text{serv}L - t\text{serv}R| * \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) [daN] \quad (91)$$

Tração do condutor sobre a linha de derivação:

$$T_{CDdy} = \sigma * t\text{serv} * \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) [daN] \quad (92)$$

Força do vento sobre as cadeias de isoladores sobre a linha:

$$F_{\text{isol}} = n * p_c [daN] \quad (93)$$

Esforço Longitudinal Total:

$$F_y = 3 * (F_{VCD} + F_{VCDy} + T_{CDy} + T_{CDdy}) + F_{\text{isol}} [daN] \quad (94)$$

### **Componente vertical (eixo z):**

Peso de um condutor sobre a linha principal:

$$P_{CD} = W_c * \frac{Lv\tilde{a}o1 + Lv\tilde{a}o2}{2} [daN] \quad (95)$$

Peso de um condutor sobre a linha de derivação:

$$P_{CDd} = W_c * \frac{Lv\tilde{a}o1}{2} [daN] \quad (96)$$

Peso das cadeias de isoladores sobre as linhas:

$$P_{\text{isol}} = n * p_c [daN] \quad (97)$$

Esforço Vertical Total:

$$F_z = n * (P_{Cd} + P_{CDd}) + P_{\text{isol}} [daN] \quad (98)$$

## Hipótese 2:

### Componente longitudinal (eixo x):

Tração do condutor sobre a linha de derivação:

$$T_{CDdx} = \sigma * t_{serv} * \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) [daN] \quad (99)$$

Força do vento aplicada ao condutor da derivação:

$$F_{VCDdx} = \alpha * q * c * d * \frac{Lv\tilde{a}o1}{2} * \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) * \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) [daN] \quad (100)$$

Esforço Transversal Total:

$$F_x = 3 * (T_{CDdx} + F_{VCDdx}) [daN] \quad (101)$$

### Componente vertical (eixo z):

Peso de um condutor sobre a linha principal:

$$P_{CD} = W_c * \frac{Lv\tilde{a}o1 + Lv\tilde{a}o2}{2} [daN] \quad (102)$$

Peso de um condutor sobre a linha de derivação:

$$P_{CDd} = W_c * \frac{Lv\tilde{a}o1}{2} [daN] \quad (103)$$

Peso das cadeias de isoladores sobre as linhas:

$$P_{isol} = n * p_c [daN] \quad (104)$$

Esforço Vertical Total:

$$F_z = n * (P_{Cd} + P_{CDd}) + P_{isol} [daN] \quad (105)$$

### Componente transversal (eixo y):

Força do vento no condutor sobre a linha da derivação:

$$F_{VCDd} = \alpha * q * c * d * Lv\tilde{a}o1 * \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 [daN] \quad (106)$$

Tração do condutor sobre a linha de derivação:

$$T_{CDd} = \sigma * t_{serv} * \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) [daN] \quad (107)$$

Força do vento sobre as cadeias de isoladores sobre a linha de derivação:

$$F_{visol} = n * p_c \text{ [daN]} \quad (108)$$

Esforço Longitudinal Total:

$$F_y = 3 * (F_{VCDd} + T_{CDd}) + F_{visol} \text{ [daN]} \quad (109)$$

## **5.12 CONCLUSÃO**

O capítulo cinco retratou o cálculo mecânico, associado ao projeto de linhas elétricas baseando-se no RSLEAT, apresentando-se os cálculos com a finalidade de verificar que as distâncias de segurança estão regulamentares, e de modo a assegurar estabilidade dos elementos da instalação elétrica.

No próximo capítulo, capítulo seis, irá ser apresentado o cálculo para um dos cinco projetos de linhas aéreas desta dissertação. O cálculo mecânico é um componente que os projetos têm por base, sendo que serão exemplificados os cálculos para um projeto a título de exemplo e demonstração.

# 6. PROJETO DE LINHAS AÉREAS

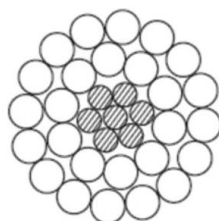
Neste capítulo, será realizada a identificação do caso de estudo abordado pelo projeto, no qual serão explicados os cálculos mecânicos utilizados para avaliar a estabilidade mecânica dos condutores, apoios e isoladores.

## 6.1. CARACTERÍSTICAS DOS CONDUTORES

Serão utilizados dois condutores o ALACO160, o condutor tipicamente usado à saída das subestações MT, e o ALACO90, o condutor que normalmente interliga linhas MT.

**Tabela 8 - Características do Condutor ACSR 160 Partridge a 65°C**

<b>Designação</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
Seção nominal do cabo	$mm^2$	160
Seção total do cabo	$mm^2$	157,9
Seção total de alumínio	$mm^2$	135,9
Seção total de aço	$mm^2$	22,0
Capacidade nominal	$A$	448,0
Resistência Elétrica a 20°C	$\Omega / km$	0,2124
Peso Próprio	$daN / m$	0,545
Diâmetro	$mm$	16,28
Coefficiente de dilatação	$1 / K$	$18,9 * 10^{-6}$
Modelo de <i>Young</i>	$daN/mm^2$	7750
Tensão de Ruptura	$daN$	4920

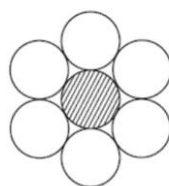


30 Al - 7 Aço

Figura 38 - Composição do condutor ACSR 160 [30]

Tabela 9 - Característica do Condutor ACSR 90 a 65°C

Designação	Unidades	Valor
Seção nominal do cabo	$mm^2$	90
Seção total do cabo	$mm^2$	88
Seção total de alumínio	$mm^2$	75,4
Seção total de aço	$mm^2$	12,6
Capacidade nominal	A	311,4
Resistência Elétrica a 20°C	$\Omega / km$	0,3806
Peso Próprio	$daN / m$	0,306
Diâmetro	mm	12,00
Coefficiente de dilatação	$1 / K$	$18,6 * 10^{-6}$
Modelo de Young	$daN/mm^2$	8100
Tensão de Ruptura	$daN$	2610



6 Al - 1 Aço

Figura 39 - Composição do condutor ACSR 90 [30]

## 6.2 PROJETO DE UMA LINHA AÉREA 15kV

Neste subcapítulo serão apresentados os cálculos mecânicos referentes a um projeto de uma linha aérea, tratando-se de uma linha aérea simples com um comprimento total de 2536 metros, um nível de tensão de 15kV, uma aérea geográfica que não apresenta condições climáticas extremas, ou seja, não existe formação de gelo durante o inverno.

Neste subcapítulo serão apresentados os cálculos referentes a um projeto de uma linha aérea, tendo por base o condutor ALACO160 à temperatura de 65°C. Os cálculos referentes aos outros estudos estarão disponíveis em anexo.

### 6.2.1 TENSÃO MECÂNICA MÁXIMA

Os condutores possuem uma tensão máxima permitida, quanto mais próximo estivermos do limite máximo de tensão, maior será o risco de o condutor se partir. Com recurso à expressão (15), calculámos a tensão máxima que podemos aplicar ao condutor ACSR 160.

$$t_{max} = \frac{4920}{2,5 * 160} = 12,30 [daN/mm^2] \quad (90)$$

Para não colocar o condutor em esforço total a tensão máxima aplicada ao mesmo foi de  $8,5 daN/mm^2$ . As tensões aplicadas aos cantões da linha aérea podem ser visualizadas na tabela 11.

### 6.2.2 COEFICIENTES DE SOBRECARGA

Tendo por a base (17), (19) e as características do condutor usado, procedeu-se ao cálculo dos coeficientes de sobrecarga para o inverno e primavera.

$$F_v = \alpha * c * q * s [daN/m] \quad (17)$$

$$m = \frac{F_r}{W_c} = \frac{\sqrt{W_c^2 + W_g^2 + F_v^2}}{W_c} \quad (19)$$

Estado Inverno:

$$F_{v1} = 0,6 * 1 * 30 * 0,01632 = 0,294 [daN/m] \quad (91)$$

$$m_1 = \frac{F_r}{W_c} = \frac{\sqrt{(0,545^2 + 0,294^2)}}{0,545} = 1,136 \quad (92)$$

Estado Primavera:

$$F_{v2} = 0,6 * 1 * 75 * 0,01632 = 0,734 \text{ [daN/m]} \quad (93)$$

$$m_2 = \frac{F_r}{W_c} = \frac{\sqrt{(0,545^2 + 0,734^2)}}{0,545} = 1,677 \quad (94)$$

Segue-se o cálculo do vão equivalente e vão crítico, como já foi mencionado o vão equivalente é calculado quando se verifica a existência de cantões compostos por vários vãos, cujo primeiro e últimos apoios possuem cadeias de amarração.

$$L_{Eq} = \sqrt{\frac{\sum L_i^3}{\sum L_i}} \text{ [m]} \quad (20)$$

Cantão 1:

$$L_{Eq1} = \sqrt{\frac{110,0^3}{110,0}} = 110,0 \text{ [m]} \quad (95)$$

Para o caso de cantões com vários vãos o vão equivalente é calculado através da expressão (96), utilizou-se para exemplo o cantão nº7.

Cantão 7:

$$L_{Eq7} = \sqrt{\frac{136,39^3 + 252,64^3 + 188,14^3}{136,39 + 252,64 + 188,14}} = 211,32 \text{ [m]} \quad (96)$$

Após o vão equivalente estar calculado para cada cantão, calcula-se o vão crítico, com recurso a (21).

Para determinar o valor do vão crítico é necessário saber a tensão máxima a aplicar-se em cada cantão, pelo que, para o projeto em estudo o valor definido foi de  $8,5 \text{ daN/mm}^2$ .

$$L_{Cr} = \frac{\sigma * t_{max}}{p} * \sqrt{\frac{24 * \alpha_d (\theta_2 - \theta_1)}{m_2^2 - m_1^2}} \text{ [m]} \quad (21)$$

$$L_{Cr} = \frac{157,9 * 8,5}{0,545} * \sqrt{\frac{24 * 18 * 10^{-6} (15 + 5)}{1,677^2 - 1,136^2}} = 185,58 \text{ [m]} \quad (97)$$

A constituição dos cantões da linha aérea, tensão máxima, vão equivalente e vão crítico estão apresentadas na tabela 11.

Tabela 10 - Características dos Cantões da Linha Aérea MT

Nº de Cantão	Cantão	Tensão Máxima (daN/mm <sup>2</sup> )	Leq (m)	Lcr (m)
1	Apoio 19 – Apoio 1	8,5	110,00	185,58
2	Apoio 1 – Apoio 3	8,5	108,50	185,58
3	Apoio 3 – Apoio 5	8,5	168,50	185,58
4	Apoio 5 – Apoio 7	8,5	120,90	185,58
5	Apoio 7 – Apoio 9	8,5	186,30	185,58
6	Apoio 9 – Apoio 10	8,5	170,50	185,58
7	Apoio 10 – Apoio 14	8,5	211,30	185,58
8	Apoio 14 – Apoio 15	8,5	178,00	185,58
9	Apoio 15 – Apoio 16	8,5	100,90	185,58
10	Apoio 16 – PTD	4	49,90	87,32

Finalmente, recorreremos à figura 33 para descobrir qual dos estados atmosféricos é o mais desfavorável, a primavera ou inverno.

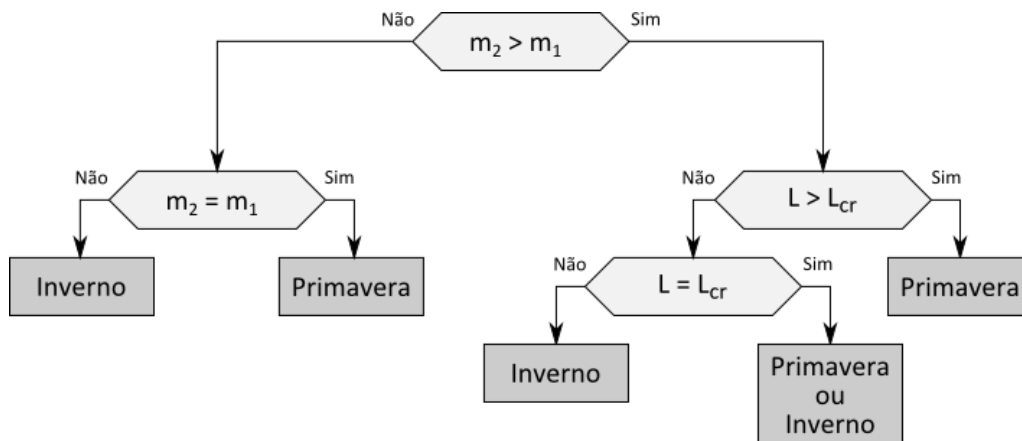


Figura 40 - Representação do fluxograma de decisão do estado atmosférico mais desfavorável [11]

Conclui-se, portanto, que em todos os cantões exceto, o cantão 7 o estado mais desfavorável será o do inverno.

### 6.2.3 EQUAÇÃO DOS ESTADOS

Conhecendo o pior estado atmosférico, a equação de estados pode ser utilizada para determinar a tensão mecânica para uma variedade de cenários, dependendo da temperatura do estado *i* da equação.

Todas as tensões mecânicas foram determinadas nesta dissertação para todos os quatro cenários. Substituindo (22) pelos devidos valores obtemos a tensão de montagem referente ao cantão nº1.

$$-5 + \frac{8,5}{18,9 * 10^{-6} * 7750} - \frac{1,136^2 * 0,545^2 * 110^2}{24 * 18 * 10^{-6} * 157,9^2 * 8,5^2} = \quad (98)$$

$$65 + \frac{t_k}{18 * 10^{-6} * 7750} - \frac{1^2 * 0,545^2 * 110^2}{24 * 18,9 * 10^{-6} * 157,9^2 * t_k^2} = \quad (98)$$

$$t_k = 2,894 \text{ [daN/m]} \quad (98)$$

## 6.2.4 PARÂMETRO DE CATENÁRIA E FLECHA MÁXIMA

Com a tensão de montagem calculada, parte-se para o cálculo do parâmetro de catenária e respetiva flecha máxima, referente ao cantão 1.

$$T(65^\circ\text{C}) = 2,894 * 157,9 = 457 \text{ [daN]} \quad (99)$$

$$P = \frac{545}{0,545} = 839 \text{ [m]} \quad (100)$$

$$f = \frac{110^2 * 0,545 * 1}{8 * 157,9 * 2,894} = 1,804 \text{ [m]} \quad (101)$$

## 6.2.5 DESVIO TRANSVERSAL DE CADEIAS

Referente ao cálculo do desvio das cadeias, utilizou-se o apoio nº2 como referência para demonstração do cálculo:

$$i = \text{tg}^{-1} * \left[ \frac{P_v + \frac{Q_v}{2}}{P + \frac{Q}{2}} \right] \text{ [grados]} \quad (37)$$

$$P_v = 0,6 * 1 * \frac{75}{2} * 0,01628 * \frac{95,69}{2} = 17,53 \text{ [daN]} \quad (102)$$

$$P = 0,545 * \frac{95,69}{2} = 26,08 \text{ [daN]} \quad (103)$$

Os valores de  $Q_v$  e  $Q$  são valores tabelados referentes à força do vento e peso das cadeias isoladoras, e são fornecidos pela E-REDES.

$$Q_v = 10 \text{ [daN]}$$

$$Q = 18 \text{ [daN]}$$

$$i = \text{tg}^{-1} * \left[ \frac{17,53 + 10}{26,08 + 18} \right] = 35,54 \text{ [grados]} \quad (104)$$

## 6.2.6 CÁLCULO DA ESTABILIDADE DOS APOIOS

Nesta seção serão apresentados os cálculos dos esforços dos diferentes tipos de apoios utilizados neste projeto de linha aérea, sendo que os esforços referentes às outras hipóteses de estudo estarão disponíveis em anexo.

### 6.2.6.1 APOIOS DE ALINHAMENTO

Com base no subcapítulo 5.11 os cálculos dos esforços referente ao apoio nº 2:

#### Hipótese 1:

#### **Componente transversal (eixo y):**

Força do vento no condutor:

$$F_{VCD} = 0,6 * 75 * 1 * 16,28 * 10^{-3} * \frac{116,89 + 97,91}{2} = 78,68 \text{ [daN]} \quad (105)$$

Força do vento na cadeia de isoladores:

$$F_{Visol} = 10 = 10 \text{ [daN]} \quad (106)$$

Esforço Total referente à componente transversal:

$$F_y = (78,68 + 10) = 88,68 \text{ [daN]} \quad (107)$$

$$F_{Ty} = 88,68 * 3 = 266,04 \text{ [daN]} \quad (108)$$

#### **Componente longitudinal (eixo x)**

Tração do condutor sobre a linha:

$$T_{CDx} = 157,9 * |8,5 - 8,5| * \cos \frac{0}{2} = 0 \text{ [daN]} \quad (109)$$

Esforço Total referente à componente longitudinal:

$$F_x = 3 * 0 = 0 \text{ [daN]} \quad (110)$$

#### **Componente vertical (eixo z):**

Peso de um condutor sobre a linha:

$$P_{CD} = 0,545 * \frac{116,89 + 97,91}{2} = 58,53 \text{ [daN]} \quad (111)$$

Peso das cadeiras de isoladores:

$$P_{isol} = 18 [daN] \quad (112)$$

Esforço Total referente à componente vertical:

$$F_z = 3 * (58,53 + 18) = 229,59 [daN] \quad (113)$$

### **Hipótese 2:**

**Componente longitudinal (eixo x):**

Esforço Total referente à componente longitudinal:

$$F_x = \frac{1}{5} * F_{Ty} = \frac{266,04}{5} = 53,208 [daN] \quad (114)$$

**Componente vertical (eixo z):**

Peso de um condutor sobre a linha:

$$P_{CD} = 0,545 * \frac{116,89 + 97,91}{2} = 58,53 [daN] \quad (115)$$

Peso das cadeiras de isoladores:

$$P_{isol} = 18 [daN] \quad (116)$$

Esforço Total referente à componente vertical:

$$F_z = 3 * (58,53 + 18) = 229,59 [daN] \quad (117)$$

Estabilidade do Apoio 16M2750:

$$\frac{F_y}{2750} + \frac{F_x}{1300} \leq 1$$

$$\frac{296,04}{2750} + \frac{0}{1300} \leq 1$$

$$0,11 \leq 1$$

## 6.2.6.2 APOIOS DE ÂNGULO

Com base no subcapítulo 5.11.2 os cálculos dos esforços referente ao apoio nº 9:

### Hipótese 1:

#### **Componente longitudinal (eixo x):**

##### Tração do condutor sobre a linha:

$$T_{CDx} = 157,9 * |8,5 - 8,5| * \cos(86,22) = 0 \text{ [daN]} \quad (118)$$

##### Força do vento no condutor:

$$F_{VCDx} = 0,6 * 75 * 1 * 16,28 * 10^{-3} * \frac{170,53 - 130,49}{2} * \cos(86,22) * \sin(86,22) = 3,08 \text{ [daN]} \quad (119)$$

##### Esforço Longitudinal Total:

$$F_x = 3 * 3,08 = 9,24 \text{ [daN]} \quad (120)$$

#### **Componente transversal (eixo y):**

##### Força do vento no condutor:

$$F_{VCDy} = 0,6 * 75 * 1 * 16,28 * 10^{-3} * \frac{130,49 + 170,53}{2} * \sin(86,22)^2 = 105,18 \text{ [daN]} \quad (121)$$

##### Tração do condutor sobre a linha:

$$T_{CDy} = 2 * 157,9 * 8,5 * \sin(13,78) = 576,51 \text{ [daN]} \quad (122)$$

##### Força do vento sobre as cadeias de isoladores:

$$F_{Visol} = 10 * 2 = 20 \text{ [daN]} \quad (123)$$

##### Esforço Transversal Total:

$$F_y = 3 * (576,51 + 105,18 + 20) = 2105,07 \text{ [daN]} \quad (124)$$

#### **Componente vertical (eixo z):**

##### Peso de um condutor sobre a linha:

$$P_{CD} = 0,545 * \frac{130,49 + 108,17}{2} = 65,03 \text{ [daN]} \quad (125)$$

Peso das cadeiras de isoladores:

$$P_{isol} = 18 * 2 = 36 [daN] \quad (126)$$

Esforço Total referente à componente vertical:

$$F_z = 3 * (65,03 + 36) = 303,09 [daN] \quad (127)$$

**Hipótese 2:**

**Componente longitudinal (eixo x):**

Esforço Total referente à componente longitudinal:

$$F_x = \frac{1}{5} * F_y = \frac{2105,07}{5} = 421,01 [daN] \quad (128)$$

**Componente vertical (eixo z):**

Peso de um condutor sobre a linha:

$$P_{CD} = 0,545 * \frac{130,49 + 108,17}{2} = 65,03 [daN] \quad (129)$$

Peso das cadeiras de isoladores:

$$P_{isol} = 18 * 2 = 36 [daN] \quad (130)$$

Esforço Total referente à componente vertical:

$$F_z = 3 * (65,03 + 36) = 303,09 [daN] \quad (131)$$

Estabilidade do Apoio 18M2750:

$$\begin{aligned} \frac{F_y}{2750} + \frac{F_x}{1300} &\leq 1 \\ \frac{2105,07}{2750} + \frac{9,24}{1300} &\leq 1 \\ 0,77 &\leq 1 \end{aligned}$$

### 6.2.6.3 APOIOS DE REFORÇO

Segundo o RSLEAT, todas linhas aéreas necessitam de um apoio de reforço de quinze em quinze vãos, pelo que nesta dissertação só houve a necessidade de um apoio com a função de reforço, sendo ele o número 14:

#### Hipótese 1:

#### **Componente transversal (eixo y):**

##### Força do vento no condutor:

$$F_{VCD} = 0,6 * 75 * 1 * 16,28 * 10^{-3} * \frac{178,00 + 100,87}{2} = 102,15 [daN] \quad (132)$$

##### Força do vento na cadeia de isoladores:

$$F_{Visol} = 10 * 2 = 20 [daN] \quad (133)$$

##### Esforço Total referente à componente transversal:

$$F_y = (102,15 + 20) = 122,15 [daN] \quad (134)$$

$$F_{Ty} = 122,15 * 3 = 366,45 [daN] \quad (135)$$

#### **Componente longitudinal (eixo x):**

##### Tração do condutor sobre a linha:

$$T_{CDx} = 157,9 * |8,5 - 8,5| * \cos \frac{0}{2} = 0 [daN] \quad (136)$$

##### Esforço Total referente à componente longitudinal:

$$F_{Tx} = 3 * 0 = 0 [daN] \quad (137)$$

#### **Componente vertical (eixo z):**

##### Peso de um condutor sobre a linha:

$$P_{CD} = 0,545 * \frac{178,00 + 100,87}{2} = 75,99 [daN] \quad (138)$$

##### Peso das cadeiras de isoladores:

$$P_{isol} = 18 * 2 = 36 [daN] \quad (139)$$

Esforço Total referente à componente vertical:

$$F_z = 3 * (75,99 + 36) = 335,97 \text{ [daN]} \quad (140)$$

**Hipótese 2:**

**Componente longitudinal (eixo x):**

Esforço Longitudinal Total:

$$F_x = \frac{2}{3} * 3 * 8,5 * 157,9 * \cos(0) = 2684,3 \text{ [daN]} \quad (141)$$

**Componente vertical (eixo z):**

Peso de um condutor sobre a linha:

$$P_{CD} = 0,545 * \frac{178,00 + 100,87}{2} = 75,99 \text{ [daN]} \quad (142)$$

Peso das cadeiras de isoladores:

$$P_{isol} = 18 * 2 = 36 \text{ [daN]} \quad (143)$$

Esforço Total referente à componente vertical:

$$F_z = 3 * (75,99 + 36) = 335,97 \text{ [daN]} \quad (144)$$

**Ações Excepcionais:**

**Hipótese 3: Apoios de Reforço em alinhamento:**

Esforço a que o apoio estará sujeito caso exista a queda de um condutor:

$$F_x = 2 * 8,5 * 157,9 = 2684,3 \text{ [daN]} \quad (145)$$

Esforço a que o apoio estará sujeito caso exista a queda de um condutor por fase:

$$F_{xf} = \frac{2684,3}{2} = 1342 \text{ [daN]} \quad (146)$$

Verificação do torque de rutura:

$$\begin{aligned} TR &> F_{xf} \\ 2387 &> 1342 \end{aligned} \quad (147)$$

Estabilidade do Apoio do 18M7500:

$$\begin{aligned} \frac{F_y}{2987} + \frac{F_x}{6589} &\leq 1 \\ \frac{0}{2987} + \frac{2684}{6589} &\leq 1 \end{aligned}$$

$$0,41 \leq 1$$

#### 6.2.6.4 APOIOS DE DERIVAÇÃO

Referente aos apoios de derivação, o cálculo do esforço mecânico terá por base o apoio n.º5 que tem uma derivação efetuada com o condutor ALACO 30 a uma tensão mecânica máxima de  $1 \text{ daN/mm}^2$ .

##### Hipótese 1:

##### **Componente transversal (eixo y):**

##### Força do vento no condutor principal:

$$F_{VCD} = 0,6 * 75 * 1 * 16,28 * 10^{-3} * \frac{142,74 + 108,17}{2} = 91,91 \text{ [daN]} \quad (148)$$

##### Força do vento no condutor da derivação:

$$F_{VCDa} = 0,6 * 75 * 1,2 * 6,00 * 10^{-3} * \frac{21,33}{2} * \text{sen}(17,56) * \cos(17,56) \quad (149)$$

$$= 0,99 \text{ [daN]}$$

##### Força do vento na cadeia de isoladores principais:

$$F_{Visol} = 10 * 2 = 20 \text{ [daN]} \quad (150)$$

##### Força do vento na cadeia de isoladores da derivação:

$$F_{Visola} = 10 = 10 \text{ [daN]} \quad (151)$$

##### Esforço total referente à componente transversal:

$$F_y = (91,91 + 0,99 + 20 + 10) = 122,9 \text{ [daN]} \quad (152)$$

$$F_{Ty} = 122,9 * 3 = 368,7 \text{ [daN]} \quad (153)$$

##### **Componente longitudinal (eixo x):**

##### Força do vento no condutor da derivação:

$$F_{VCDa} = 0,6 * 75 * 1,2 * 6,00^{-3} * \frac{21,33}{2} * \text{sen}^2(17,56) = 0,02 \text{ [daN]} \quad (154)$$

##### Tração do condutor sobre a linha principal:

$$T_{CDx} = 157,9 * |8,5 - 8,5| * \cos \frac{0}{2} = 0 \text{ [daN]} \quad (155)$$

Tração do condutor sobre a linha de derivação:

$$T_{CDx} = 30,6 * 1 * \text{sen}(82,44) = 30,33 \text{ [daN]} \quad (156)$$

Esforço total referente à componente longitudinal:

$$F_x = 0,02 + 30,33 = 30,35 \text{ [daN]} \quad (157)$$

$$F_{Tx} = 3 * 30,35 = 91,05 \text{ [daN]} \quad (158)$$

**Componente vertical (eixo z):**

Peso de um condutor sobre a linha principal:

$$P_{CD} = 0,545 * \frac{116,89 + 97,91}{2} = 58,53 \text{ [daN]} \quad (159)$$

Peso de um condutor sobre a linha principal:

$$P_{CD} = 0,08 * \frac{21,33}{2} = 1,71 \text{ [daN]} \quad (160)$$

Peso das cadeiras de isoladores da linha principal:

$$P_{isol} = 18 * 2 = 36 \text{ [daN]} \quad (161)$$

Peso das cadeiras de isoladores da linha de derivação:

$$P_{isol} = 18 \text{ [daN]} \quad (162)$$

Esforço Total referente à componente vertical:

$$F_z = 3 * (58,53 + 1,71 + 36 + 18) = 342,72 \text{ [daN]} \quad (163)$$

**Hipótese 2:**

**Componente transversal (eixo y):**

Força do vento no condutor da derivação:

$$F_{VCDd} = 0,6 * 75 * 1,2 * 6,00^{-3} * \frac{21,33}{2} * \cos^2(17,56) = 3,14 \text{ [daN]} \quad (164)$$

Tração do condutor sobre a linha de derivação:

$$T_{CDx} = 30,6 * 1 * \text{sen}(17,56) = 9,23 \text{ [daN]} \quad (165)$$

Força do vento na cadeia de isoladores da derivação:

$$F_{Visola} = 10 \text{ [daN]} \quad (166)$$

Esforço total referente à componente transversal:

$$F_y = 3,14 + 9,23 + 10 = 22,37 \text{ [daN]} \quad (167)$$

$$F_{Ty} = 3 * 22,37 = 67,11 \text{ [daN]} \quad (168)$$

**Componente vertical (eixo z):**

Peso de um condutor sobre a linha principal:

$$P_{CD} = 0,545 * \frac{116,89 + 97,91}{2} = 58,53 \text{ [daN]} \quad (169)$$

Peso de um condutor sobre a linha principal:

$$P_{CD} = 0,200 * \frac{21,33}{2} = 2,13 \text{ [daN]} \quad (170)$$

Peso das cadeiras de isoladores da linha principal:

$$P_{isol} = 18 * 2 = 36 \text{ [daN]} \quad (171)$$

Peso das cadeiras de isoladores da linha de derivação:

$$P_{isol} = 18 \text{ [daN]} \quad (172)$$

Esforço Total referente à componente vertical:

$$F_z = 3 * (58,53 + 36 + 2,13 + 18) = 343,98 \text{ [daN]} \quad (173)$$

**Componente longitudinal (eixo x):**

Força do vento no condutor da derivação:

$$\begin{aligned} F_{VCDd} &= 0,6 * 75 * 1,2 * 6,00^{-3} * \frac{21,33}{2} * \text{sen}(17,56) * \cos(17,56) \\ &= 0,99 \text{ [daN]} \end{aligned} \quad (174)$$

Tração do condutor sobre a linha de derivação:

$$T_{CDx} = 30,6 * 1 * \cos(17,56) = 29,18 \text{ [daN]} \quad (175)$$

Esforço total referente à componente longitudinal:

$$F_x = 29,18 + 0,99 = 30,17 \text{ [daN]} \quad (176)$$

$$F_{Tx} = 3 * 30,17 = 90,51 \text{ [daN]} \quad (177)$$

Estabilidade do Apoio do 22M2750:

$$\frac{F_y}{2987} + \frac{F_x}{6589} \leq 1$$
$$\frac{368,00}{2750} + \frac{91,05}{1300} \leq 1$$
$$0,20 \leq 1$$

### **6.2.6.5 APOIOS DE FIM DE LINHA**

No projeto desta dissertação o apoio que foi considerado como fim de linha, foi o apoio referente ao PTD OAZ 0003, uma cabine alta que recebe os condutores da linha aérea numa consola no exterior da sua edificação, será exemplificado para efeitos de cálculo os esforços referentes à cabine alta.

#### **Hipótese 1:**

##### **Componente longitudinal (eixo x):**

Tração do condutor sobre a linha:

$$T_{CD} = 157,9 * 3,5 = 552,65 [daN] \quad (178)$$

Esforço Longitudinal Total:

$$F_x = 3 * 552,65 = 1657,95 [daN] \quad (179)$$

##### **Componente transversal (eixo y):**

Força do vento no condutor:

$$F_{VCD} = 0,6 * 1 * 75 * 16,28 * 10^{-3} * \frac{49,84}{2} = 18,26 [daN] \quad (180)$$

Força do vento sobre as cadeias de isoladores sobre a linha:

$$F_{Visol} = 10 * 2 = 20 [daN] \quad (181)$$

Esforço Transversal Total:

$$F_y = 3 * (18,26 + 20) = 114,78 [daN] \quad (182)$$

##### **Componente Vertical (eixo z):**

Peso de um condutor sobre a linha:

$$P_{CD} = 0,545 * \frac{49,84}{2} = 13,58 [daN] \quad (183)$$

Peso das cadeiras de isoladores:

$$P_{isol} = 18 * 2 = 36 [daN] \quad (184)$$

Esforço Total referente à componente vertical:

$$F_z = 3 * (13,58 + 36) = 148,74 [daN] \quad (185)$$

## **Hipótese 2:**

**Componente longitudinal (eixo x):**

Esforço a que o apoio estará sujeito caso exista a queda de um condutor:

$$F_x = 2 * 3,5 * 157,9 = 1105,3 [daN] \quad (186)$$

**Componente Vertical (eixo z):**

Peso de um condutor sobre a linha:

$$P_{CD} = 0,545 * \frac{49,84}{2} = 13,58 [daN] \quad (187)$$

Peso das cadeiras de isoladores:

$$P_{isol} = 18 * 2 = 36 [daN] \quad (188)$$

Esforço Total referente à componente vertical:

$$F_z = 3 * (13,58 + 36) = 148,74 [daN] \quad (189)$$

## **6.3 CONCLUSÃO**

Neste capítulo foram efetuados os cálculos de esforço mecânico referentes a uma linha de ALACO 160 a uma temperatura de funcionamento de 65°C, este projeto está inserido nos casos de estudo que serão discutidos no capítulo seguinte. A importância deste capítulo rege-se pelos aspetos técnicos associados à construção de linhas aéreas e as diversas variáveis a ter em conta ao executar o projeto.

No próximo capítulo, será realizada uma análise a casos de estudo constituídos por dois projetos cada, de modo, a averiguar a viabilidade do aumento de temperatura de funcionamento como solução para as exigências elétricas.

# 7. ANÁLISE SWOT

Este capítulo fará um enquadramento ao problema atual do sistema energético e a justificação da proposta estudada na presente dissertação.

Será depois efetuada uma análise *Strength Weaknesses Opportunities Threats* (SWOT) a fim de averiguar a viabilidade ou não da execução de projetos de linhas aéreas tendo por base o aumento da temperatura máxima de funcionamento dos condutores.

## 7.1 ENQUADRAMENTO

Face às crescentes necessidades energéticas, as redes de distribuição são alvo de constantes reconfigurações, remodelações ou até mesmo novas interligações. Estes projetos apresentam grandes custos monetários podendo até por vezes não serem exequíveis.

De modo a solucionar a recorrente prática de substituição de condutores, apoios ou até mesmo a elaboração de novas linhas elétricas, propôs-se a hipótese de aumentar a temperatura de funcionamento dos condutores elétricos, onde as linhas elétricas seriam remodeladas ou concebidas tendo essa ideia por base.

Esta hipótese não só permitiria o transporte de mais corrente elétrica, que por sua vez significaria num maior número de cargas alimentadas, como também, uma grande redução nos investimentos na elaboração de novos projetos, diminuindo por sua vez o impacto socioambiental que as mesmas teriam.

Com o intuito de averiguar a fiabilidade desta teoria, foram realizados quatro projetos. Dois projetos com o condutor ALACO 160, condutor tipicamente utilizado à saída de subestações AT/MT e os restantes com condutor ALACO 90 normalmente usado nas interligações de linhas MT, para ambos os condutores foram efetuados projetos, considerando a sua temperatura máxima de funcionamento, 50°C e aos 65°C.

Com este estudo da exploração das linhas elétricas a 65°C foram examinadas as vantagens técnicas, económicas face à exploração em regime normal de 50°C

## 7.2 CASOS DE ESTUDO

Para demonstrar as vantagens e desvantagens do aumento de temperatura serão considerados os seguintes cenários:

**Cenário 1.0:** Existência de uma linha simples com o condutor ALACO 90 com uma temperatura máxima de funcionamento de 50°C. Supondo agora que é necessário aumentar o transporte de corrente para os 300 A.

Serão exemplificados dois tipos de soluções, a solução convencional que tem por base a desmontagem da linha aérea existente, tendo por base a elaboração de uma nova linha aérea com o condutor ALACO 160 que é capaz de transportar 361,6 A a 50°C.

A solução alternativa neste cenário será, a remodelação da linha existente, mantendo o condutor, mas aumentando a sua temperatura de funcionamento de 50°C para 65°C, uma vez que o ALACO 90 a 65°C tem possibilidade de transportar 311,4 A.

**Cenário 1.1:** O departamento de planeamento de redes necessita de uma nova linha com capacidade de transporte nominal de 300 A, pelo que possuem duas opções:

A solução convencional, que tem por base a construção de uma linha aérea, tendo por base o condutor ALACO 160 com a respetiva capacidade de transporte nominal de 361,6 A a 50°C.

A solução alternativa neste cenário será, a implementação de uma linha aérea em ALACO 90, com uma temperatura de funcionamento de 65°C.

**Cenário 2:** Necessidade de construir uma linha com capacidade de transporte nominal de 400 A, para o caso de estudo propôs-se:

Projeção de uma linha aérea dupla, em que existem 2 condutores de ALACO 90 que estão fisicamente, mas não eletricamente em paralelo, definindo a sua temperatura de funcionamento para os 50°C.

Elaboração de uma linha simples de ALACO 160 com a possibilidade de operar a uma temperatura máxima de 65°C.

De salientar que, todos os cenários contemplam uma extensão de linha de 2,536km para ambas as soluções.

## 7.2.1 CENÁRIO 1.0

Realizou-se então uma análise na vertente técnica e económica das diferentes soluções para o cenário em estudo. A solução que visa utilizar o condutor AA160 será denominada de solução 1 e a solução que pretende utilizar o condutor AA90 a solução 2.

### 7.2.1.1 IMPACTO TÉCNICO - ELÉTRICO

Neste subcapítulo foram abordados os aspetos técnicos das duas soluções propostas, começando por calcular a potência associada à intensidade de corrente máxima de os condutores.

Potência Aparente e Densidade de corrente:

$$S_{\text{Solução}} = 300 * \sqrt{3} * 15000 * 0,9 = 7.794,23 \text{ [kVA]} \quad (190)$$

$$d_{\text{Solução1}} = \frac{300}{157,9} = 1,90 \text{ [A/mm}^2\text{]} \quad (191)$$

$$d_{\text{Solução2}} = \frac{300}{88} = 3,41 \text{ [A/mm}^2\text{]} \quad (192)$$

Em seguida foram calculadas as perdas para os diferentes condutores, começando pelo cálculo da resistência equivalente para o comprimento total da linha, tendo por base o método de Kuipers-Brown determinou-se que a temperatura para o condutor ALACO 160 para este caso é de 42°C enquanto o ALACO 90 necessita de estar a 61,5°C para conseguir transportar 300 A.

Com recurso a 193, consegue-se calcular a temperatura do condutor para qualquer temperatura:

$$R_{\text{Solução1}} = 0,2124 [1 + 3,9 * 10^{-3} * (42 - 20)] = 0,2306 \left[ \frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (193)$$

$$R_{\text{Solução1}} = 0,2306 * 2,536 = 0,5848 \text{ [\Omega]} \quad (194)$$

$$R_{Solução2} = 0,3806 [1 + 3,9 * 10^{-3} * (61,5 - 20)] = 0,4422 \left[ \frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (195)$$

$$R_{Solução2} = 0,4422 * 2,536 = 1,121 [\Omega] \quad (196)$$

Deste modo as perdas por efeito de Joule são iguais a:

$$pJ_{Solução1} = 3 * 0,5848 * 300^2 = 158.896 [W] \quad (197)$$

$$pJ_{Solução2} = 3 * 1,121 * 300^2 = 326.970 [W] \quad (198)$$

Percentualmente as perdas são equivalentes a:

$$pJ_{Solução1}(\%) = \frac{158.896}{7.794,23 * 10^3} * 100 = 2,04 \% \quad (199)$$

$$pJ_{Solução2}(\%) = \frac{326.970}{7.794,23 * 10^3} * 100 = 4,20 \% \quad (200)$$

A seguir calculou-se as quedas de tensão de ambas a linha, no entanto, é necessário primeiro calcular o coeficiente de autoindução, a distância geométrica entre fases e a reactância elétrica.

Na conceção deste projeto, foram utilizadas armações do tipo GAL, GAN 80, GAN 120, HRFSC e as armações referentes aos postes metálicos F45CM e F95MD.

Através do catálogo de armações fornecido pela E-Redes é possível constatar que as distâncias entre os condutores das armações GAN usadas neste projeto são iguais, pelo que a expressão referente ao cálculo das distâncias apenas fará referência à GAN, F45CM F95MD e HRFSC.

$$Df = \sqrt[3]{D_{12} * D_{23} * D_{13}} = (m) \quad (201)$$

$$Df_{GAL/GAN} = \sqrt[3]{D_{12} * D_{23} * D_{13}} = \sqrt[3]{2,32 * 2,32 * 1,5} = 2,01 m \quad (202)$$

$$Df_{HRFSC} = \sqrt[3]{D_{12} * D_{23} * D_{13}} = \sqrt[3]{0,8 * 0,8 * 2} = 1,085 m \quad (203)$$

$$Df_{F45CM} = \sqrt[3]{D_{12} * D_{23} * D_{13}} = \sqrt[3]{2,94 * 2,94 * 1,8} = 2,50 m \quad (204)$$

$$Df_{F95MD} = \sqrt[3]{D_{12} * D_{23} * D_{13}} = \sqrt[3]{3,76 * 3,76 * 3,6} = 3,71 m \quad (205)$$

Após o cálculo das distâncias geométricas entre condutores, procede-se ao cálculo do coeficiente de autoindução:

$$L_{kGAL/GAN} = \left[ \frac{1}{2 * 1} + 4,605 * \log \left( \frac{2,01}{2,87 * 10^{-3}} \right) * 10^{-4} \right] \quad (206)$$

$$= 1,36 * 10^{-3} \left[ \frac{H}{km} \right]$$

$$L_{kHRFSC} = \left[ \frac{1}{2 * 1} + 4,605 * \log \left( \frac{1,085}{2,87 * 10^{-3}} \right) \right] * 10^{-4} \quad (207)$$

$$= 1,10 * 10^{-3} \left[ \frac{H}{km} \right]$$

$$L_{kF45CM} = \left[ \frac{1}{2 * 1} + 4,605 * \log \left( \frac{2,50}{2,87 * 10^{-3}} \right) \right] * 10^{-4} \quad (208)$$

$$= 1,40 * 10^{-3} \left[ \frac{H}{km} \right]$$

$$L_{kF95MD} = \left[ \frac{1}{2 * 1} + 4,605 * \log \left( \frac{3,71}{2,87 * 10^{-3}} \right) \right] * 10^{-4} \quad (209)$$

$$= 1,48 * 10^{-3} \left[ \frac{H}{km} \right]$$

Com o cálculo do coeficiente de autoindução realizado parte-se para a reactância elétrica.

O qual começa com o cálculo do valor de cada uma das reactâncias individuais para os diversos apoios. Como já foi mencionado previamente, as armações utilizadas nos projetos foram as GAL, GAN 80, GAN 120, F45CM, F95MD e HRFSC.

Deste modo, sendo L o comprimento total dos vãos onde os diferentes tipos de armações são usadas, a reactância para cada uma delas pode ser obtida através de:

$$X_{kGAL/GAN} = L_{GAL/GAN} * \omega * L = 1,36 * 10^{-3} * 2 * \pi * 50 * 1,968 \quad (210)$$

$$= 0,82 \Omega$$

$$X_{F45CM} = 1,40 * 10^{-3} * 2 * \pi * 50 * 0,3069 = 0,13 \Omega \quad (211)$$

$$X_{LkHRFSC} = 1,10 * 10^{-3} * 2 * \pi * 50 * 0,110 = 0,04 \Omega \quad (212)$$

$$X_{F95MD} = 1,48 * 10^{-3} * 2 * \pi * 50 * 0,1505 = 0,07 \Omega \quad (213)$$

A reactância total da linha é então dada por:

$$X_T = X_{kGAL/GAN} + X_{HRFSC} + X_{F45CM} + X_{F95MD} = \quad (214)$$

$$X_T = 0,82 + 0,04 + 0,13 + 0,07 = 1,06 \Omega \quad (214)$$

Finalmente calculam-se as quedas de tensão em relação à solução 1, considerando um fator de potência de 0,9 para todos os cenários.

$$U = \sqrt{3} * 300 * (0,5848 * 0,9 + 1,06 * 0,436) [V] \quad (215)$$

$$U = 513,63 [V] \quad (215)$$

Relativamente à solução 2 temos:

Distância geométrica entre fases das diferentes armações:

$$Df_{GAL/GAN} = \sqrt[3]{D_{12} * D_{23} * D_{13}} = \sqrt[3]{2,32 * 2,32 * 1,5} = 2,01 \text{ m} \quad (216)$$

$$Df_{HRFSC} = \sqrt[3]{D_{12} * D_{23} * D_{13}} = \sqrt[3]{0,8 * 0,8 * 2} = 1,09 \text{ m} \quad (217)$$

$$Df_{F45CM} = \sqrt[3]{D_{12} * D_{23} * D_{13}} = \sqrt[3]{2,94 * 2,94 * 1,8} = 2,50 \text{ m} \quad (218)$$

$$Df_{F15CM} = \sqrt[3]{D_{12} * D_{23} * D_{13}} = \sqrt[3]{2,75 * 2,75 * 1,8} = 2,39 \text{ m} \quad (219)$$

Respetivos coeficientes de autoindução:

$$\begin{aligned} L_{kGAL/GAL} &= \left[ \frac{1}{2 * 1} + 4,605 * \log \left( \frac{2,01}{2,87 * 10^{-3}} \right) \right] * 10^{-4} \\ &= 1,36 * 10^{-3} \left[ \frac{H}{km} \right] \end{aligned} \quad (220)$$

$$\begin{aligned} L_{kHRFSC} &= \left[ \frac{1}{2 * 1} + 4,605 * \log \left( \frac{1,09}{2,87 * 10^{-3}} \right) \right] * 10^{-4} \\ &= 1,24 * 10^{-3} \left[ \frac{H}{km} \right] \end{aligned} \quad (221)$$

$$\begin{aligned} L_{kF45CM} &= \left[ \frac{1}{2 * 1} + 4,605 * \log \left( \frac{2,50}{2,87 * 10^{-3}} \right) \right] * 10^{-4} \\ &= 1,40 * 10^{-3} \left[ \frac{H}{km} \right] \end{aligned} \quad (222)$$

$$\begin{aligned} L_{kF15CM} &= \left[ \frac{1}{2 * 1} + 4,605 * \log \left( \frac{2,39}{2,87 * 10^{-3}} \right) \right] * 10^{-4} \\ &= 1,39 * 10^{-3} \left[ \frac{H}{km} \right] \end{aligned} \quad (223)$$

Relativamente à reactância elétrica:

$$\begin{aligned} X_{kGAL/GAN} &= L_{GAL/GAN} * \omega * L = 1,36 * 10^{-3} * 2 * \pi * 50 * 1,968 \\ &= 0,82 \Omega \end{aligned} \quad (224)$$

$$X_{F45CM} = 1,40 * 10^{-3} * 2 * \pi * 50 * 0,151 = 0,06 \Omega \quad (225)$$

$$X_{LkHRFSC} = 1,10 * 10^{-3} * 2 * \pi * 50 * 0,110 = 0,04 \Omega \quad (226)$$

$$X_{F15CM} = 1,39 * 10^{-3} * 2 * \pi * 50 * 0,1505 = 0,13 \Omega \quad (227)$$

A reactância total da linha é então dada por:

$$X_T = X_{kGAL/GAN} + X_{HRFSC} + X_{F45CM} + X_{F15CM} = 1,05 \Omega \quad (228)$$

Finalmente as quedas de tensão relativas à solução 2 são iguais a:

$$U = \sqrt{3} * 300 * (1,121 * 0,9 + 1,05 * 0,436) [V] \quad (229)$$

$$U = 762,12 [V] \quad (229)$$

Com base nos dados calculados, temos a tabela 11, que efetua a comparação entre a solução 1 e 2 a nível técnico.

**Tabela 11 - Comparação técnica da Solução 1 e Solução 2**

	Potência Aparente (kVA)	Perdas de Energia (W)	Perdas de Energia (%)	Quedas de Tensão (V)
Solução 1	7.794,23	158.896	2,04	513,63
Solução 2	7.794,23	326.970	4,20	762,12

$$\Delta U_{Solução1(\%)} = \frac{513,63}{15000} * 100 = 3,42 \% \quad (230)$$

$$\Delta U_{Solução2(\%)} = \frac{762,12}{15000} * 100 = 5,08 \% \quad (231)$$

Pelo que é possível observar, consta-se que para a mesma corrente, o condutor de ALACO 90 possui perdas superiores, o mesmo é devido as características técnicas dos condutores, pois o cabo ALACO 90 possui uma resistência linear maior, o que levará ao aumento de perdas por efeito de Joule, assim como terá influência nas quedas de tensão, estando as mesmas dentro dos limites regulamentares, uma vez que são inferiores a 10%.

### 7.2.1.2 IMPACTO ECONÓMICO

Neste subcapítulo será calculado para ambas as soluções os aspetos económicos.

Tendo por base a tabela 12 e 13, efetuou-se uma análise ao custo de implementação de ambas as soluções:

**Tabela 12 - Custos da Solução Convencional – Condutor ALACO160 a 50°C**

Designação da Atividade	Mão-de-Obra (€)	Material (€)	Total (€)
Armações/Isoladores e Jogo de Acessórios	1.867,7	7.557,8	9.425,5
Condutor e Piquetagem da Linha	8.499,0	14.782,4	23.281,4
Apoios de Betão e Ferro	34.855,8	50.565,1	85.420,9
Desmontagem da Linha Existente	5.250	0	5.250
	50.472,5	72.905,3	123.377,7

**Tabela 13- Remodelação da Linha ALACO 90 A 50°C Para 65°C**

Designação da Atividade	Mão-de-Obra (€)	Material (€)	Total (€)
Armações/Isoladores e Jogo de Acessórios	0	0	0
Condutor ALACO90 e Piquetagem da Linha	0	0	0
Apoios de Betão e Ferro	4.627,7	13.685,3	18.313,0
	4.627,7	13.685,3	18.313,0

Avaliando apenas os valores totais resulta:

**Tabela 14 - Comparação dos custos de Implementação das Soluções**

	Mão-de-Obra (€)	Material (€)	Total (€)
Solução 1	50.472,5	72.905,3	123.377,7
Solução 2	4.627,7	13.685,3	18.313,0
Diferença	45.844,8	59.220,0	105.064,7

Constata-se que a Solução 1, em todas as vertentes tem custos maiores que a solução 2. Isto é validado pelo facto que a solução 1 tem por base a desmontagem de uma linha existente e, posterior, construção de uma nova linha, enquanto a solução 2 idealiza apenas a remodelação da linha existente para garantir as distâncias de segurança.

A diferença entre as duas soluções é de 41.429,30 €/km.

No que se refere ao custo de perdas de energia, o cálculo baseia-se num período de 20 anos (n=20), numa taxa de atualização de 6,75% (i=6,75%), e na hipótese de que as implementações ocorreriam no ano 2023 (ano zero).

A expressão (232) é utilizada para calcular as perdas:

$$perdas = 3 * R * I^2 * km * benefício \quad (232)$$

Em que:

- R – Resistência elétrica do condutor ( $\Omega$ /km);
- I – Intensidade de Corrente por fase (kA);
- km – Comprimento da linha (km);
- Benefício - Benefício de Energia de Perdas valorizado (C/kWh).

Os *cash flows* anuais para o período definido são obtidos através de 117:

$$C_0 = \frac{C_n}{(1+i)^n} \quad (233)$$

Onde:

- $C_0$  – Atualização do capital para o ano zero (€);
- $C_n$  – *Cash flow* anual (€);
- $i$  – Taxa de aproveitamento;
- $n$  – Ano em que se calcula o *cash flow*.

$$perdasSolução1 = 3 * 0,2306 * (300)^2 * 2,536 * 0,0919 = 14.510,68 \text{ €} \quad (234)$$

$$perdasSolução2 = 3 * 0,4422 * (300)^2 * 2,536 * 0,0919 = 27.825,77 \text{ €} \quad (235)$$

Considerando o custo inicial para ambos os casos os seguintes valores, obtém-se os *cash-flows* totais para os 20 anos de exploração:

$$C_{0Solução1} = \frac{14.510,68}{(1 + 0,0065)^1} = 14.416,97 \text{ €} \quad (236)$$

$$C_{0Solução2} = \frac{27.825,77}{(1 + 0,0065)^1} = 27.646,07 \text{ €} \quad (237)$$

Isto é apenas um dos exemplos dos fluxos de caixa obtidos, neste caso para o ano de 2023. Ao longo dos 20 anos, os valores dos fluxos de caixa seriam diferentes, porém, para tornar a análise mais realista, considerou-se que, a partir do ano 10, os valores dos *cash flows* seriam mantidos constantes.

O mesmo processo foi repetido para os anos restantes, sempre atualizando o capital para o ano zero. Para ambas as soluções o custo total das perdas durante 20 anos de exploração é de:

$$C_{0Solução1} = 122.635 \text{ €}$$

$$C_{0Solução2} = 242.835 \text{ €}$$

**Tabela 15 - Comparação Económica das duas soluções**

	Cenário 1.0	
	Solução 1 (€)	Solução 2 (€)
Investimento	123.378	18.313
Perdas	122.635	242.835
Total	246.013	261.148

A solução 2 possui um investimento muito reduzido, face à solução 1, pois trata-se apenas de uma remodelação da linha existente, face à elaboração de uma nova linha.

No entanto, verifica-se que em termos de custos de exploração (perdas) a solução 2 apresenta valores superiores à solução 1, pois o condutor ALACO 90 apresenta uma maior resistência face ao ALACO 160.

A diferença entre a solução 1 e a solução 2 é de 5.969 €/km, como é possível observar este valor é pouco significativo.

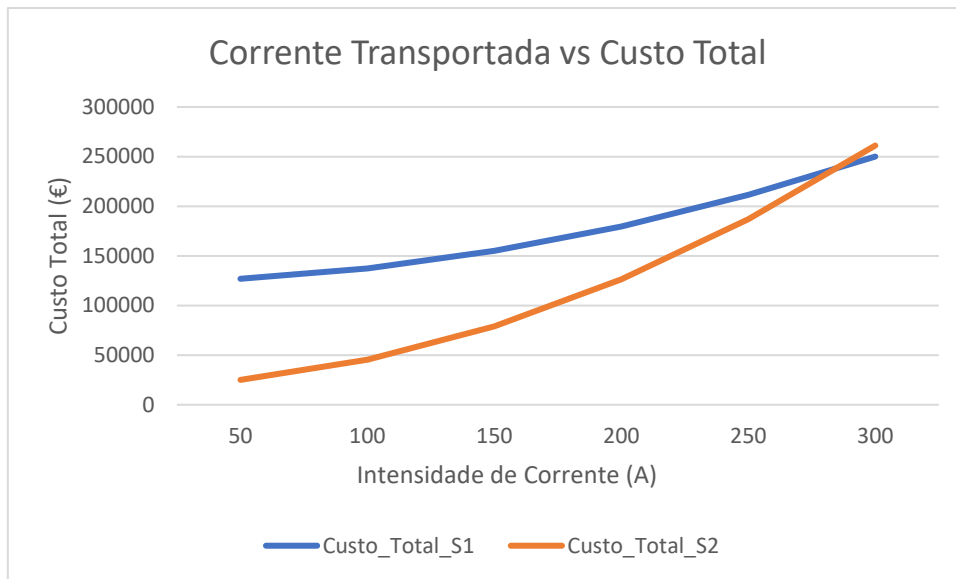
### **7.2.1.3 ANÁLISE FINAL**

A projeção de uma linha que contempla ALACO 160 oferece maior capacidade de transporte em qualquer condição, reduzindo as perdas e atendendo às necessidades energéticas futuras.

No entanto, é importante salientar que esse cenário considera a exploração das linhas a 300 A, um valor de corrente alcançável apenas em situações extremas. Se considerarmos um valor de corrente mais baixo, como é esperado no sistema elétrico, o custo das perdas na solução 2 seria menor, tornando a diferença total entre as duas soluções potencialmente significativa.

Além disso, é preciso destacar que a construção de uma nova linha, em contraste com a remodelação de uma existente, acarreta impactos ambientais significativos e pode resultar em restrições relacionadas a licenças e autorizações.

A figura 41 ilustra a diferença do custo total das duas soluções em função da intensidade de corrente que transportam.



**Figura 41 - Comparação entre custos e corrente transportada para as duas soluções.**

A solução 1 possui um menor número de perdas técnicas face à solução 2 devido ao condutor usado e temperatura de funcionamento, havendo uma diferença de 2,16 % em termos de perdas elétricas, o que equivale para este caso a 168.356 W.

É possível observar que para o valor da corrente definido para este cenário, 300 A, os custos totais da solução 2 ultrapassa a solução 1, mesmo tendo um valor de investimento bastante baixo.

No entanto, se for feita uma análise para o valor intermédio da corrente, a diferença entre custos já começa a ser significativa, podendo assim justificar ou não a implementação da solução 2.

## 7.2.2 CENÁRIO 1.1

O cenário 1.1 contempla a comparação entre a construção de uma linha de ALACO 160 com uma temperatura de funcionamento a 50°C, com uma linha de ALACO 90 com a possibilidade de operar a 65°C.

Ambas as linhas serão implementadas de base, pelo que, a grande diferença que este cenário trará face ao cenário 1.0 é o custo do investimento dos respetivos projetos.

Novamente a solução 1 será a solução que contempla o uso do condutor ALACO, enquanto, a solução 2 a que utiliza o uso do ALACO 90.

### 7.2.2.1 IMPACTO TÉCNICO - ELÉTRICO

Conforme mencionado anteriormente, não haverá alterações dos aspetos técnicos – elétricos neste cenário, pelo que, os valores previamente calculados no cenário 1.0 são iguais ao presente caso.

**Tabela 16 - Comparação técnica da Solução 1 e Solução 2**

	Potência Aparente (kVA)	Perdas de Energia (W)	Perdas de Energia (%)	Quedas de Tensão (V)
Solução 1	7.794,23	158.896	2,04	513,63
Solução 2	7.794,23	326.970	4,20	762,12

### 7.2.2.2 IMPACTO ECONÓMICO

Como já foi mencionado, o impacto económico analisa o custo de implementação de os dois projetos e o custo das perdas energéticas associadas a cada um.

No entanto, como já foi referido, não existem diferenças de custos de perdas de energia do cenário 1.0 face ao 1.1, pelo que, será feita apenas a análise ao investimento necessário para construir as duas soluções.

Com base nas seguintes tabelas, aferimos os diferentes custos relativos à construção das linhas:

**Tabela 17 Custos da Solução Convencional – Condutor ALACO160 a 50°C**

Designação da Atividade	Mão-de-Obra (€)	Material (€)	Total (€)
Armações/Isoladores e Jogo de Acessórios	1.867,7	7.557,8	9.425,5
Condutor e Piquetagem da Linha	8.499,0	14.782,4	23.281,4
Apoios de Betão e Ferro	34.855,8	50.565,1	85.420,9
	45.222,4	72.905,3	118.127,7

**Tabela 18 - Custos da Solução Alternativa – Condutor ALACO90 a 65°C**

Designação da Atividade	Mão-de-Obra (€)	Material (€)	Total (€)
Armações/Isoladores e Jogo de Acessórios	1.752,0	6.831,7	8.583,7
Condutor e Piquetagem da Linha	5.716,0	8.836,4	14.552,5
Apoios de Betão e Ferro	21.986,9	38.293,2	60.280,0
	29.454,9	53.961,3	83.416,2

Conclui-se que existe uma diferença de 13.687 €/km, a mesma é justificada pelo uso de um condutor com maior secção, apoios com maior capacidade de esforço à cabeça e respetivas armações a utilizar.

Mantendo os custos associados às perdas de energia temos:

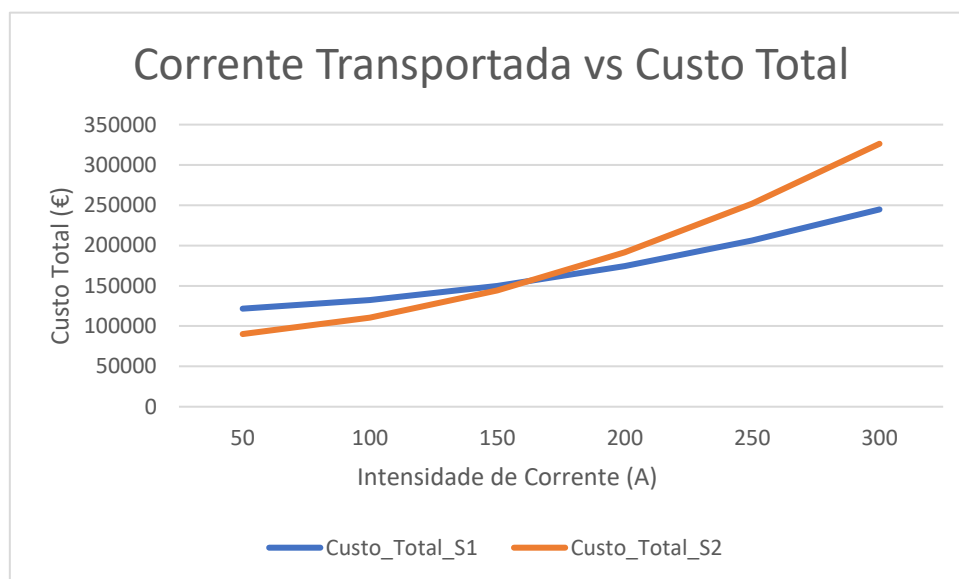
**Tabela 19 - Comparação Económica das duas soluções**

	Cenário 1.1	
	Solução 1 (€)	Solução 2 (€)
Investimento	118.128	83.416
Perdas	116.695	209.172
Total	234.823	292.588

Em termos de custos totais relativamente às duas soluções existe uma diferença de 24.518 €/km. Em que, a solução 2 possui um custo mais elevado, devido a um custo considerável da implementação do seu projeto e as grandes perdas que tem devido a uma resistência maior.

### 7.2.2.3 ANÁLISE FINAL

Ao analisar a vertente técnica e económica de ambas as soluções, com auxílio da figura 42 constata-se que:



**Figura 42 - Comparação entre custos e corrente transportada para as duas soluções.**

Ao longo do intervalo de 50 - 150 A, verifica-se que a solução que utiliza uma temperatura de funcionamento maior é mais económica, porém ao atingir os 165 A, atinge o seu *kneepoint* e a solução 1 passa a ser mais viável economicamente.

Neste cenário, foi idealizada a construção de duas linhas desde o início, considerando as vertentes técnico-económicas para ambas as soluções. Prevê-se que a solução 2 não deva

ser considerada, pois a solução 1 apresenta melhores vantagens técnicas a curto e longo prazo.

## 7.3 CENÁRIO 2

No cenário 2, como já mencionado, foi realizada uma comparação técnica e econômica entre a implementação de uma linha dupla AA 90, que é fisicamente paralela, mas não eletricamente, capaz de operar até 50°C, e uma linha simples de AA 160, com uma temperatura máxima de funcionamento de 65°C. A solução que utiliza a linha dupla será chamada de solução 1, enquanto a solução 2 será aquela que utiliza o condutor ALACO 160.

### 7.3.1.1 IMPACTO TÉCNICO - ELÉTRICO

Neste subcapítulo foram abordados os aspectos técnicos das duas soluções propostas, começando por calcular a potência associada à intensidade de corrente máxima que se pretende garantir com a operacionalidade das linhas:

Potência Aparente e Densidade de corrente:

$$S_{Solução1e2} = (400 * \sqrt{3} * 15000 * 0,9) = 9.353,07 [kVA] \quad (238)$$

$$d_{Solução1} = \frac{200}{88,0} = 2,27 [A/mm^2] \quad (239)$$

$$d_{Solução2} = \frac{400}{157,9} = 2,53 [A/mm^2] \quad (241)$$

Cálculos das resistências elétricas, baseado no modelo Kuipers-Brown

$$R_{Solução1} = 0,3806 [1 + 3,9 * 10^{-3} * (40,5 - 20)] = 0,4110 \left[ \frac{\Omega}{km} \right] \quad (242)$$

$$R_{Solução1} = 0,4110 * 2,536 = 1,042 [\Omega] \quad (243)$$

$$R_{Solução2} = 0,2124 [1 + 3,9 * 10^{-3} * (56 - 20)] = 0,2422 \left[ \frac{\Omega}{km} \right] \quad (244)$$

$$R_{Solução2} = 0,2422 * 2,536 = 0,6142 [\Omega] \quad (245)$$

Deste modo as perdas por efeito de Joule são iguais a:

$$pJ_{Solução1} = (3 * 1,042 * 200^2) = 125.040 [W] \quad (246)$$

$$pJ_{Solução1}(\%) = \frac{125.040}{9.353,07 * 10^3} * 100 = 1,34\% \quad (247)$$

$$pJ_{Solução2} = 3 * 0,6142 * 400^2 = 294.816 [W] \quad (248)$$

$$pJ_{Solução2}(\%) = \frac{294.816}{9.353,07 * 10^3} * 100 = 3,15\% \quad (249)$$

Segue-se o cálculo das quedas de tensão da solução 1, começando pelo cálculo da distância geométrica entre fases:

$$Df_{EVDAL/EVDAN} = \sqrt[3]{D_{12} * D_{23} * D_{13}} = \sqrt[3]{1,38 * 1,38 * 2,75} = 1,74 \text{ m} \quad (250)$$

$$Df_{F95MD} = \sqrt[3]{D_{12} * D_{23} * D_{13}} = \sqrt[3]{3,76 * 3,76 * 3,6} = 3,71 \text{ m} \quad (251)$$

$$Df_{F15CM} = \sqrt[3]{D_{12} * D_{23} * D_{13}} = \sqrt[3]{2,75 * 2,75 * 1,8} = 2,39 \text{ m} \quad (252)$$

Cálculo do coeficiente de autoindução:

$$\begin{aligned} L_{kEVDAL/EVDAN} &= \left[ \frac{1}{2 * 1} + 4,605 * \log \left( \frac{1,74}{2,87 * 10^{-3}} \right) * 10^{-4} \right] \\ &= 1,33 * 10^{-3} \left[ \frac{H}{km} \right] \end{aligned} \quad (253)$$

$$\begin{aligned} L_{kF95MD} &= \left[ \frac{1}{2 * 1} + 4,605 * \log \left( \frac{3,71}{2,87 * 10^{-3}} \right) * 10^{-4} \right] \\ &= 1,48 * 10^{-3} \left[ \frac{H}{km} \right] \end{aligned} \quad (254)$$

$$\begin{aligned} L_{kF15CM} &= \left[ \frac{1}{2 * 1} + 4,605 * \log \left( \frac{2,39}{2,87 * 10^{-3}} \right) * 10^{-4} \right] \\ &= 1,39 * 10^{-3} \left[ \frac{H}{km} \right] \end{aligned} \quad (255)$$

Reactância Elétrica:

$$X_{kEVDAL/EVDAN} = 1,33 * 10^{-3} * 2 * \pi * 50 * 2,0786 = 0,87 \Omega \quad (256)$$

$$X_{F15CM} = 1,39 * 10^{-3} * 2 * \pi * 50 * 0,3069 = 0,13 \Omega \quad (257)$$

$$X_{F95MD} = 1,48 * 10^{-3} * 2 * \pi * 50 * 0,1505 = 0,07 \Omega \quad (258)$$

Consequentemente:

$$X_T = X_{kEVDAL/EVDAN} + X_{F15CM} + X_{F95MD} = \quad (259)$$

$$X_T = 0,87 + 0,13 + 0,07 = 1,07 \Omega \quad (259)$$

Quedas de tensão:

$$U = \sqrt{3} * 200 * (1,042 * 0,9 + 1,07 * 0,436) [V] \quad (260)$$

$$U = 486,47 [V] \quad (260)$$

Relativamente à solução 2, apenas necessitamos de calcular as quedas de tensão, pois os restantes dados já foram calculados.

$$U = \sqrt{3} * 400 * (0,6142 * 0,9 + 1,06 * 0,436) [V] \quad (261)$$

$$U = 703,17 [V] \quad (261)$$

Resumindo, a tabela 20 ilustra as principais diferenças técnicas das duas soluções:

**Tabela 20 - Comparação Técnica da Solução 1 e Solução 2**

	Potência Aparente (kVA)	Perdas de Energia (W)	Perdas de Energia (%)	Quedas de Tensão (V)
Solução 1	9.353,07	125.040	1,34	486,47
Solução 2	9.353,07	294.816	3,17	703,17

$$\Delta U_{Solução1(\%)} = \frac{486,47}{15000} * 100 = 3,24 \% \quad (262)$$

$$\Delta U_{Solução2(\%)} = \frac{703,17}{15000} * 100 = 4,69 \% \quad (263)$$

Analisando todas as variáveis, conclui-se que a solução 1 face à solução 2, apresenta perdas e quedas de tensão menores, sendo tecnicamente mais viável.

### 7.3.1.2 IMPACTO ECONÓMICO

Neste subcapítulo será analisado para ambas as soluções as suas vertentes económicas.

**Tabela 21 - Custos da Solução 1 – 2x ALACO 90 – 50°C**

Designação da Atividade	Mão-de-Obra (€)	Material (€)	Total (€)
Armações/Isoladores e Jogo de Acessórios	3.504,0	13.663,4	17.167,4
Condutores e Piquetagem da Linha	10.400,0	17.672,8	28.072,8
Apoios de Betão e Ferro	28.272,7	40.430,7	68.703,4
	42.176,7	71.766,9	113.943,6

**Tabela 22 - Custos da Solução Alternativa – Condutor ALACO160 a 65°C**

Designação da Atividade	Mão-de-Obra (€)	Material (€)	Total (€)
Armações/Isoladores e Jogo de Acessórios	1.867,7	7.557,8	9.425,5
Condutor e Piquetagem da Linha	8.499,0	14.782,4	23.281,4
Apoios de Betão e Ferro	34.981,9	51.678,3	86.660,2
	45.348,5	74.018,5	119.367,0

Fazendo uma análise às diferenças das diferentes soluções temos:

**Tabela 23 - Comparação dos custos de Implementação das Soluções**

	Mão-de-Obra (€)	Material (€)	Total (€)
Solução 1	42.177,7	71.766,9	113.943,6
Solução 2	45.348,5	74.018,5	119.367,0
Diferença	3.171,8	2.251,6	5.423,4

A diferença entre soluções equivale a 2.138 €/km, o que traduz um valor desprezável, o que por sua vez implica, que o grande fator da análise económica será no custo das perdas de energia referente às diferentes soluções.

$$perdasSolução_1 = 2 * 3 * 0,4110 * (200)^2 * 2,536 * 0,0919 \quad (264)$$

$$perdasSolução_1 = 22.988,88 \text{ €} \quad (265)$$

$$perdasSolução_2 = 3 * 0,2422 * (400)^2 * 2,536 * 0,0919 \quad (266)$$

$$perdasSolução_2 = 27.094,44 \text{ €} \quad (267)$$

$$C_{0Solução1} = \frac{22.988,88}{(1 + 0,0065)^1} = 22.840,42 \text{ €} \quad (268)$$

$$C_{0Solução2} = \frac{27.094,44}{(1 + 0,0065)^1} = 26.919,46 \text{ €} \quad (269)$$

Considerando um período de 20 anos tem-se:

$$C_{0Solução1} = 200.624 \text{ €}$$

$$C_{0Solução2} = 236.453 \text{ €}$$

**Tabela 24 - Comparação Económica das Duas soluções**

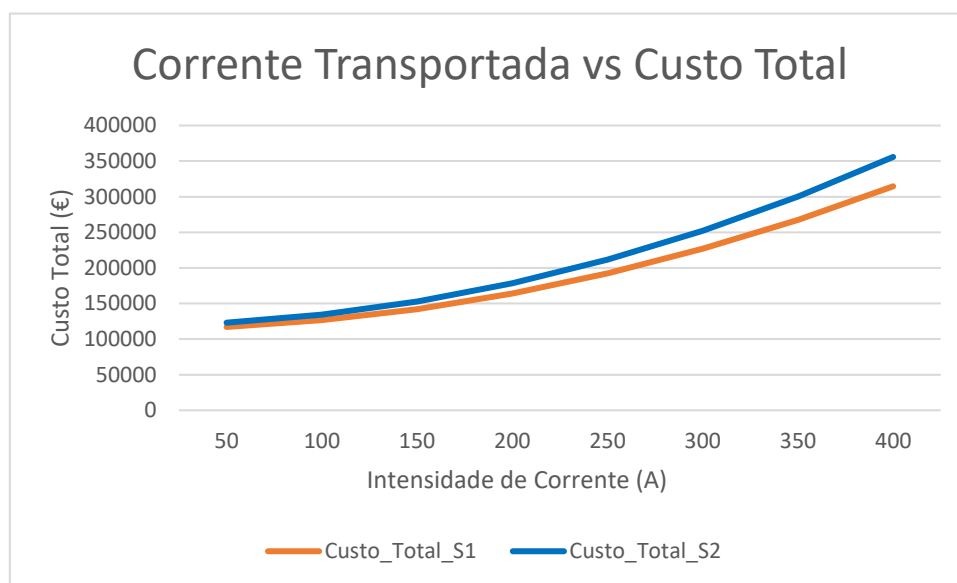
	Cenário 2	
	Solução 1 (€)	Solução 2 (€)
Investimento	113.944	119.367
Perdas	200.624	236.453
Total	314.568	355.820

Baseado na tabela 24, é possível concluir que a solução 2 requer um esforço económico maior face à solução 1, apresentando valores significativos na variável de custos de perdas de energia.

Observando-se uma diferença total de 16.267 €/km.

### 7.3.1.3 ANÁLISE FINAL

Analisando o gráfico da figura 43, assim como os dados previamente calculados, têm-se:



**Figura 43 - Comparação entre custos e corrente transportada para as duas soluções.**

A solução 1 relativamente à 2 apresenta menor perdas, isto é justificado pela solução 1 contemplar o uso de dois condutores em vez de apenas um, o que por sua vez significa que a corrente máxima que cada um transporta é da ordem dos 200 A, enquanto a solução 2 transportará 400 A.

Analisando a vertente económica, verifica-se que ambas as soluções inicialmente apresentam custos totais semelhantes, havendo diferença significativa quanto maior for a corrente transportada.

Com base na informação dos dois parágrafos anteriores, a solução 1 é uma solução mais vantajosa que a solução 2, pois apresenta melhores indicadores técnicos e económicos.

## 7.4 CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS

De modo a evidenciar algumas vantagens da conceção de projetos a temperaturas de funcionamento superiores, neste subcapítulo serão apresentadas comparações das flechas máximas dos condutores em vãos médios de linhas de média tensão e as distâncias entre condutores, para projetos com temperaturas de funcionamento de 50°C e 65°C.

### 7.4.1 FLECHAS MÁXIMAS

A figura 44 e figura 45, exemplificam um vão de 212 m e a sua flecha máxima para o condutor ALACO 160 a 50°C e 65°C respetivamente.

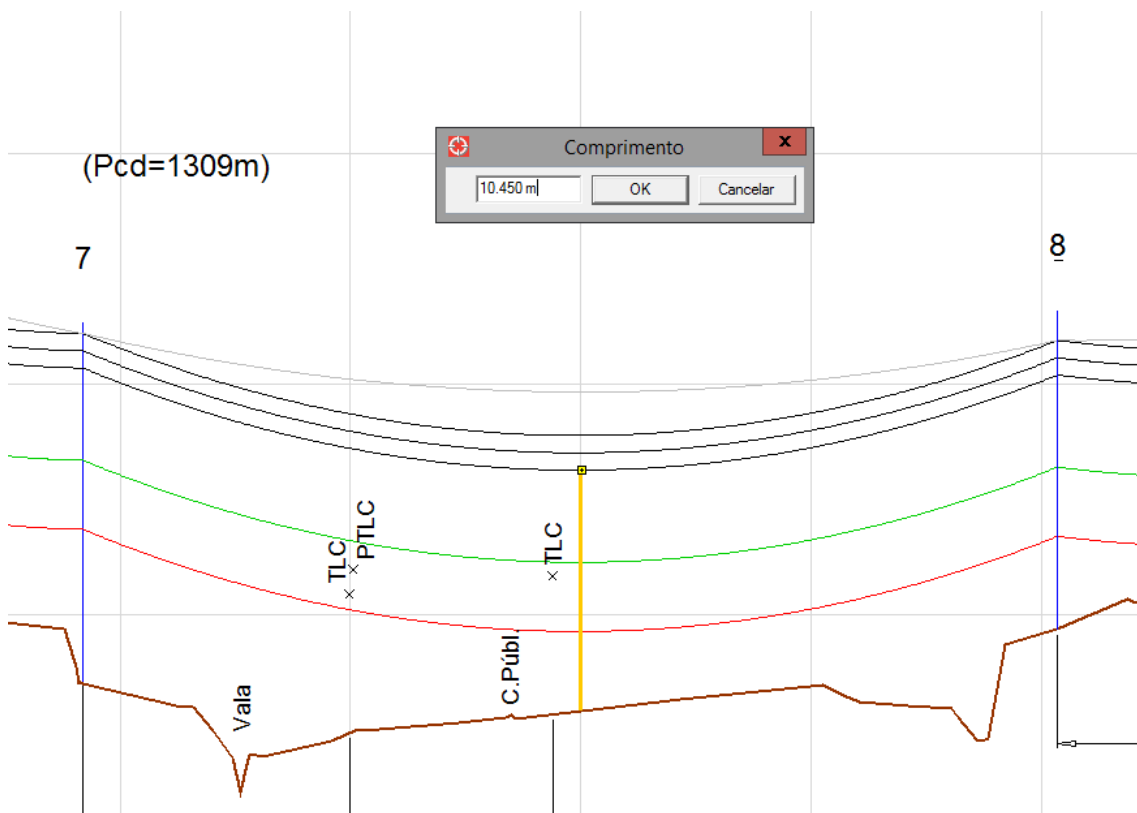
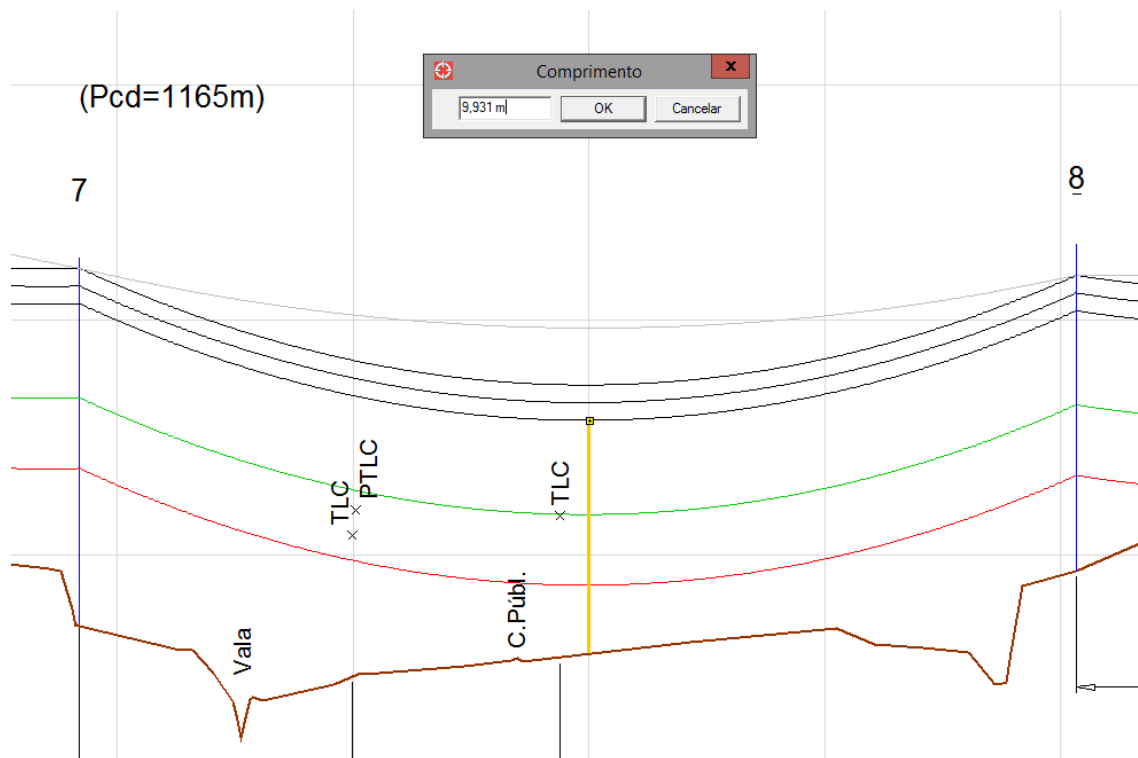


Figura 44 - Flecha Máxima para ALACO 160 a 50°C



**Figura 45 - Flecha Máxima para ALACO 160 a 65°C**

Como é possível verificar pelas respetivas figuras, as comparações entre a variação das flechas para as duas temperaturas de funcionamento são próximas, havendo uma diferença de 0,52m, a figura 46, demonstra melhor a variação das flechas para várias temperaturas de operacionalidade.

TEMP (°C)	TRACCAO MONTAGEM		F L E C H A S						PARAMETRO	
	COND.	C_GUA	V_MAX	V_REGU	V_VERI	V_MAX	V_REGU	V_VERI	CD	CG
-10	1358	0	2.25	2.25	0.98				2492	
-5	1279	0	2.39	2.39	1.04				2346	
0	1204	0	2.53	2.53	1.10				2209	
5	1134	0	2.69	2.69	1.17				2081	
10	1069	0	2.85	2.85	1.24				1962	
15	1009	0	3.02	3.02	1.31				1852	
20	954	0	3.20	3.20	1.39				1751	
25	904	0	3.37	3.37	1.47				1659	
30	858	0	3.55	3.55	1.55				1575	
35	817	0	3.73	3.73	1.62				1499	
40	779	0	3.92	3.92	1.70				1429	
45	745	0	4.10	4.10	1.78				1366	
50	713	0	4.28	4.28	1.86				1309	
55	685	0	4.45	4.45	1.94				1257	
60	659	0	4.63	4.63	2.01				1209	
65	635	0	4.80	4.80	2.09				1165	
70	613	0	4.98	4.98	2.16				1125	
75	593	0	5.14	5.14	2.24				1089	
80	575	0	5.31	5.31	2.31				1055	

**Figura 46 - Variação das Flechas Máximas para respetivas temperaturas**

## 7.4.2 DISTÂNCIAS ENTRE CONDUTORES

Este subcapítulo abordará a variação das distâncias entre condutores nas duas temperaturas de funcionamento, averiguando a necessidade de usar outras armações para garantir os limites técnicos.

As figuras 47 e 48, demonstram a variação das distâncias dos condutores para os dois casos:

APOIOS			DISTANCIAS				
N.	F+I+R	TIPO	Max.Esq.	Calc.Esq.	Max.Dir.	Calc.Dir.	Verif
19	A A N	N.I.	0.00	0.00	0.00	0.63	0
1	A A N	16M2750	1.50	0.63	1.50	0.67	1
2	S A N	16M2750	1.50	0.80	1.50	0.72	1
3	A A N	18M2750	1.50	0.57	1.50	0.91	1
4	S A N	18M2750	1.50	1.01	1.50	0.84	1
5	A A N	22M2750	1.50	0.72	1.50	0.61	1
6	S A N	22M2750	1.50	0.75	1.50	0.84	1
7	A A N	18M5000	1.50	0.71	1.50	1.01	1
8	S A N	16M2750	1.50	1.09	1.50	0.82	1
9	A A N	18M2750	1.50	0.69	1.50	0.84	1
10	A A N	F45CM/24	1.50	0.84	1.50	0.67	1
11	S A N	16M2750	1.50	0.80	1.50	1.25	1
12	S A N	24M2750	1.50	1.25	1.50	0.99	1
13	S A N	24M2750	1.50	0.99	1.50	1.10	1
14	A B R	18M7500	1.50	1.01	1.50	0.87	1
15	A A N	16M2750	1.50	0.87	1.50	0.59	1
16	A A N	F95CA/24	2.70	0.59	2.70	0.52	1
D0003	A A F	N.I.	0.00	0.52	0.00	0.00	0

Figura 47 - Variação da distância entre condutores - ALACO 160 a 50°C

APOIOS			DISTANCIAS				
N.	F+I+R	TIPO	Max.Esq.	Calc.Esq.	Max.Dir.	Calc.Dir.	Verif
19	A A N	N.I.	0.00	0.00	0.00	0.68	0
1	A A N	16M2750	1.50	0.68	1.50	0.72	1
2	S A N	16M2750	1.50	0.84	1.50	0.75	1
3	A A N	18M2750	1.50	0.61	1.50	0.97	1
4	S A N	18M2750	1.50	1.06	1.50	0.88	1
5	A A N	22M2750	1.50	0.76	1.50	0.65	1
6	S A N	22M2750	1.50	0.78	1.50	0.88	1
7	A A N	18M5000	1.50	0.77	1.50	1.06	1
8	S A N	16M2750	1.50	1.14	1.50	0.85	1
9	A A N	18M2750	1.50	0.73	1.50	0.89	1
10	A A N	F45CM/24	1.50	0.89	1.50	0.70	1
11	S A N	16M2750	1.50	0.82	1.50	1.30	1
12	S A N	24M2750	1.50	1.30	1.50	1.03	1
13	S A N	24M2750	1.50	1.03	1.50	1.15	1
14	A B R	18M7500	1.50	1.06	1.50	0.92	1
15	A A N	16M2750	1.50	0.92	1.50	0.65	1
16	A A N	F95CA/24	2.70	0.65	2.70	0.52	1
D0003	A A F	N.I.	0.00	0.52	0.00	0.00	0

Figura 48 - Variação da distância entre condutores - ALACO 160 a 65°C

Observando as distâncias entre o apoio 7 e o apoio 8 para ambos os casos, é evidente que embora haja um acréscimo mínimo entre a distância a salvaguardar entre condutores, para o caso da temperatura de funcionamento de 65°C, esse acréscimo não é suficiente para motivar uma substituição de armação ou colocação de um apoio intermédio entre o vão existente, pelo que, em termos de investimento a variação de temperatura não afeta, neste caso as armações usadas.

## **7.5 CONCLUSÃO**

Foram analisados neste capítulo, três casos de estudo, os mesmos visaram a análise de o aumento de temperatura de funcionamento e quais as vantagens/desvantagens que podem ter face a soluções convencionais.

Para o cenário 1.0, o custo do investimento da solução que tem a possibilidade de explorar a linha a uma temperatura máxima de 65°C é significativamente menor que o custo de implementação da solução 1 (desmontagem mais construção de uma nova linha em ALACO160).

Porém, a solução 2, apresenta perdas de energia maiores, o que levará a um maior custo de compensação. Com base na figura 41, é possível verificar que quanto mais próximo o valor da corrente é do máximo delimitado para o cenário, menor serão as diferenças de custo referente as perdas.

No cenário 1.1, que contemplou a comparação técnica e económica da implementação de duas novas linhas, conclui-se que o projeto que visava a temperatura de funcionamento maior não deveria de ser considerada, pois apresentava perdas maiores e um valor económico significativo face à solução que limitava a temperatura de operação a 50°C.

Finalmente, o cenário 2.0, visou uma linha dupla de ALACO 90, em que os condutores estavam eletricamente separados, transportando cada um deles 200 A, esse projeto foi comparado com uma linha de ALACO 160 a ser explorada com uma temperatura de funcionamento que permitia o transporte de uma corrente elétrica no valor de 400 A.

Conclui-se que em termos de variáveis técnicas e económicas a solução da linha dupla apresentava mais vantagens, pois apresentava menos perdas, permitia um maior transporte de energia face à ALACO 160 e era mais económico em qualquer intervalo de corrente.

Estes cenários foram todos idealizados para situações em que o valor da corrente foi definido tendo em conta a capacidade máxima de transporte do condutor e se fosse realizada uma análise com base em diagramas de carga anuais, possivelmente as soluções que permitem uma exploração a uma temperatura superior seriam mais vantajosas e aplicáveis.

Dado que poderia haver apenas um intervalo ao longo do ano em que a linha fosse explorada à sua capacidade máxima, sendo o restante do tempo explorada a uma corrente nominal significativamente inferior.

# 8. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo, são apresentadas as principais conclusões retiradas deste trabalho. Além disso, são delineadas possíveis direções para futuras pesquisas, quer no âmbito de dissertações ou possíveis projetos relacionados ao trabalho realizado.

## 8.1 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como principal foco o estudo do aumento de temperatura de funcionamento em linhas de distribuição de média tensão, para exemplificar as possíveis vantagens ou desvantagens desta hipótese, para o efeito, foram analisados três casos de estudo.

Analisando os casos de estudo, constatou-se que a possibilidade do aumento de temperatura de funcionamento nas linhas aéreas levaria a um aumento das perdas e por sua vez um acréscimo de custo associado às mesmas.

Na vertente de investimento, apenas casos, em que se efetua remodelações de linhas existentes, para sustentar uma operacionalidade a uma temperatura superior, é que são economicamente vantajosas relativamente à construção de novas linhas com seções superiores de condutores.

No entanto, a construção de raiz para esta solução pode fazer sentido, considerando o pequeno incremento de custo face à solução de 50°C o que, por sua vez, permitirá, que em situações de sobrecarga a linha esteja preparada para corresponder às necessidades impostas.

Finalmente, os casos de estudo foram idealizados para situações em que a rede elétrica exige uma carga elevada das linhas, levando a uma temperatura significativa nos

condutores, o que por sua vez irá realçar as perdas de energia. De modo a realmente se aferir a viabilidade destes projetos, deverá ser feita uma análise do diagrama de cargas anual das redes para os estudos e projetos serem os mais adequados possíveis.

## **8.2 TRABALHOS FUTUROS**

Com base na grande indefinição da hipótese do aumento de temperatura de funcionamento dos condutores e a importância de melhoria contínua no sistema elétrico, podem ser realizados os seguintes estudos:

- Análise técnica e económica a uma temperatura de funcionamento, baseado em diagramas de cargas anuais;
- Verificação do impacto socioambiental de implementação de remodelação de linhas existentes, com base num *up-rating*, face à desmontagem e construção de uma nova linha;
- Análise técnica, económica e socioambiental da utilização dos cabos de alta temperatura ACCC;

## Referências Bibliográficas

- [1] EDP. Universidade EDP - Escola de Distribuição., “ProjLEAT- Projecto de Linhas Eléctricas Aéreas de MT e AT,” 2012.
- [2] ABCM, “Análise de um Dispositivo para Mitigação de flecha em cabos condutores,” 2012, [Online]. Available: <https://www.abcm.org.br/anais/conem/2012/PDF/CONEM2012-1036.pdf>
- [3] J. Carvalho, “Projeto e construção de linhas aéreas MT e AT-Estabelecimento de linhas elétricas em zonas com alto risco de incêndios,” 2018, Accessed: Feb. 05, 2022. [Online]. Available: [https://sigarra.up.pt/feup/pt/pub\\_geral.pub\\_view?pi\\_pub\\_base\\_id=277715](https://sigarra.up.pt/feup/pt/pub_geral.pub_view?pi_pub_base_id=277715)
- [4] L. Silva, “Fases de Instalação de uma Linha Aérea de Transmissão de Energia,” 2006, [Online]. Available: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/61019>
- [5] P. Cruz, “LINHA MT - Aspectos construtivos, Projecto e Manutenção,” 2010, [Online]. Available: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/62142/1/000148810.pdf>
- [6] J. Verde, “Desenvolvimento de Projeto de Linha Aérea de Alta Tensão – Viabilidade Técnica do Uso de Condutores de Alta Temperatura,” 2016. [Online]. Available: [https://sigarra.up.pt/feup/pt/pub\\_geral.pub\\_view?pi\\_pub\\_base\\_id=140081](https://sigarra.up.pt/feup/pt/pub_geral.pub_view?pi_pub_base_id=140081)
- [7] F. Matos, “Desenvolvimento de Algoritmo para Projeto de Linhas Baseado em Minimização de Custos,” 2015. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/79299>
- [8] L. Soares, “Projeto de Construção de Linhas AT no Quadro das Boas Práticas de Integração Paisagística e de Proteção Ambiental,” 2014, [Online]. Available: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/71533?mode=full>
- [9] J. Silva, “Análise a um Algoritmo para Projeto de Linhas Aéreas Baseado em Minimização de Custos,” 2016. [Online]. Available: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/85200/2/140089.pdf>
- [10] S. Alves, “Utilização de Cabos de Alta Temperatura no Reforço e Reabilitação de Redes AT: Benefícios Económicos e Ambientais,” 2018. [Online]. Available: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/111119?mode=full>

- [11] V. Silva, “Automatização do Projeto de Linhas Elétricas: Criação de Modelo Matemático para Minimização de Custos,” 2007, [Online]. Available: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/74023?mode=full>
- [12] A. Eusébio, “Estudo de Perdas na Rede de Baixa Tensão e Possibilidade da sua Redução,” 2017. [Online]. Available: <https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/11365>
- [13] A. Teixeira, “Projeto de uma Linha Aérea de Alta Tensão. Viabilidade Técnica e Económica na Aplicação da Tecnologia Cross-Bonding numa Linha Subterrânea,” 2017. [Online]. Available: <https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/10537>
- [14] N. Tavares, “Condutores aéreos de elevada capacidade – Avaliação de up-rating – Dimensionamento elétrico e mecânico,” 2013.
- [15] E. U. E.-E. de Distribuição., “Relatório, Guia de boas práticas para a integração paisagística de infraestruturas elétricas. técnico, EDP-Distribuição, 2011”.
- [16] J. da S. Ramires, “Projecto de linha de alta tensão – Estudo do comportamento eléctrico,” 2008.
- [17] “Condutor AAAC”, [Online]. Available: <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/-all-aluminium-ally-conductor-AAAC-1987753322.html>
- [18] J. M. D. Antunes, “Conceção de Redes de Média e Baixa Tensão,” 2012, [Online]. Available: [http://files.isec.pt/DOCUMENTOS/SERVICOS/BIBLIO/Teses/Tese\\_Mest\\_Jorge-Dias-Antunes.pdf](http://files.isec.pt/DOCUMENTOS/SERVICOS/BIBLIO/Teses/Tese_Mest_Jorge-Dias-Antunes.pdf)
- [19] “Condutor ACSR.” <http://www.hdcoverheadconductor.com/acsr-drake-conductor/>
- [20] Carina Marisa da Silva Pinto, “Viabilidade Técnica e Económica dos Cabos de Alta Temperatura num Projeto de Linhas de Alta Tensão,” 2017, [Online]. Available: <https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/10540>
- [21] “Condutor ACCC.” [https://pt.made-in-china.com/co\\_huatongcable/product\\_Accc-Cable-Aluminium-Conductor-Composite-Core-Conductor\\_eusrnioy.html](https://pt.made-in-china.com/co_huatongcable/product_Accc-Cable-Aluminium-Conductor-Composite-Core-Conductor_eusrnioy.html)
- [22] “Cabos de Guarda.” <https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Tipos-de-suportes-aplicados-nas-Linhas-de-Transmissao-Fonte-Labegalini-et->

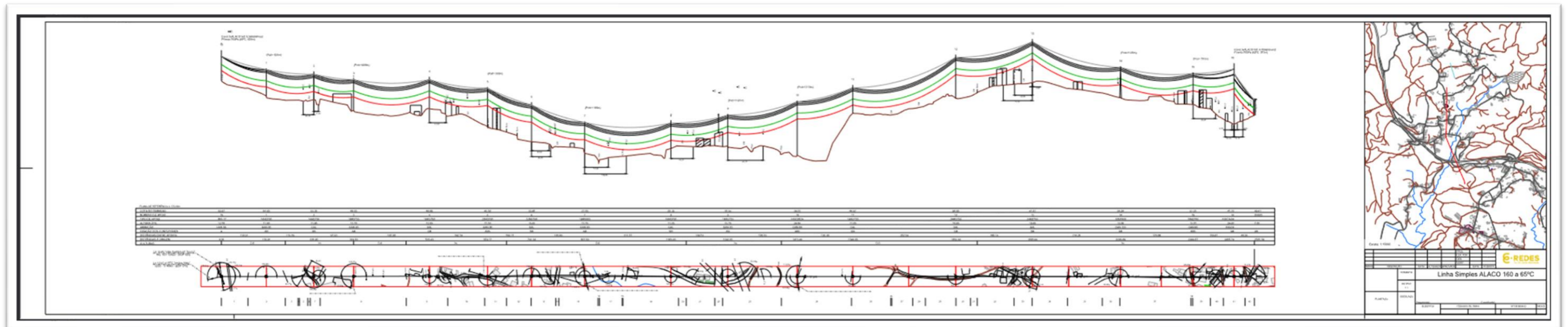
al\_fig2\_311722007

- [23] “Cabo OPGW.” [https://kr.shanghaimac.com/products/goods-Optical\\_Fiber\\_Composite\\_Overhead\\_Ground\\_Wire\\_OPGW\\_Cable-426.html?language=Turkey](https://kr.shanghaimac.com/products/goods-Optical_Fiber_Composite_Overhead_Ground_Wire_OPGW_Cable-426.html?language=Turkey)
- [24] B. F. G. Silva, “Projecto de Linhas aéreas e subterrâneas de MT e BT,” 2007, [Online]. Available: [https://paginas.fe.up.pt/~ee02063/sites/index\\_ficheiros/PosterA1.pdf](https://paginas.fe.up.pt/~ee02063/sites/index_ficheiros/PosterA1.pdf)
- [25] S. A. Metalogalva – Irmãos Silvas, “Apoios Série F,” 2003. <https://metalogalva.pt/>
- [26] D. Industry, “Sinalizador de obstáculos de LED.” <https://www.directindustry.com/pt/prod/wetra-light/product-82433-1959241.html>
- [27] “BFD Simples”, [Online]. Available: <https://georgiaunderground.net/products/bird-flight-diverter-971-1-121-yellow-bfdms11111.html>
- [28] “BFD Dupla”, [Online]. Available: <https://www.preformed.com/za/energy/distribution/wildlife-protection/swan-flight-diverter>
- [29] R. Andre, “Projeto de Linhas de Média Tensão Desenvolvimento de Modelos de Cálculo com a Instalação de Órgãos em Linhas Aéreas,” 2017.
- [30] Prysmiangroup, “Condutores de Alumínio-Aço.” [https://br.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/PD\\_009\\_01\\_PT\\_Aluminio Nu\\_CAA\\_%28ACSR%29.pdf](https://br.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/PD_009_01_PT_Aluminio Nu_CAA_%28ACSR%29.pdf)

# Anexos



# Anexo A - Projeto de uma linha aérea de ALACO 160 a 65°C



## Anexo B – Estabilidade dos apoios (ALACO 160 a 65°C)

A P O I O S			C A R G A S							
N.	F+I+R	TIPO	FXmax	FYmax	FZmax	FX	FY	FZ	Ve	TF%
19	A A N	N.I.	1	1	1	4009	145	138	0	999
						24	0	138		
1	A A N	16M2750	1300	2750	4000	0	314	293	1	11
						50	0	293		
2	S A N	16M2750	1300	2750	4000	0	269	229	1	10
						47	0	229		
3	A A N	18M2750	1300	2750	4000	26	453	343	1	18
						36	80	343		
4	S A N	18M2750	1300	2750	4000	0	419	323	1	15
						72	0	323		
5	A A N	22M2750	1300	2750	4000	0	432	313	1	16
						55	0	313		
6	S A N	22M2750	1300	2750	4000	159	471	254	1	29
						160	162	254		
7	A A N	18M5000	2350	5000	4000	119	1643	420	1	40
						211	1206	420		
8	S A N	16M2750	1300	2750	4000	0	458	341	1	17
						77	0	341		
9	A A N	18M2750	1300	2750	4000	0	2105	361	1	77
						65	0	361		
10	A A N	F45CM/24	200	4325	2000	388	487	422	0	205
						562	85	422		
11	S A N	16M2750	1300	2750	4000	0	469	372	1	17
						86	0	372		
12	S A N	24M2750	1300	2750	4000	0	533	414	1	19
						97	0	414		
13	S A N	24M2750	1300	2750	4000	0	476	385	1	17
						89	0	385		
14	A B R	18M7500	6589	2987	4000	0	582	430	1	41
						2672	0	430		
15	A A N	18M2750	1300	2750	4000	590	405	348	1	65
						618	26	348		
16	A A N	F95CA/24	6900	9021	2695	45	5229	262	1	78
						321	5166	262		
D0003	A A F	N.I.	1	1	1	1886	85	95	0	999
						11	0	95		

Anexo C – Ângulo de inclinação das Cadeias de isoladores  
(ALACO 160 a 65°C)

APOIOS			ANGULOS		
N.	F+I+R	TIPO	Maximo	Calculado	Verifica
19	A A N	N.I.	60.00	0.00	1
1	A A N	16M2750	60.00	0.00	1
2	S A N	16M2750	60.00	35.79	1
3	A A N	18M2750	60.00	0.00	1
4	S A N	18M2750	60.00	34.04	1
5	A A N	22M2750	60.00	0.00	1
6	S A N	22M2750	60.00	40.73	1
7	A A N	18M5000	60.00	0.00	1
8	S A N	16M2750	60.00	45.60	1
9	A A N	18M2750	60.00	0.00	1
10	A A N	F45CM/24	60.00	0.00	1
11	S A N	16M2750	60.00	39.25	1
12	S A N	24M2750	60.00	35.75	1
13	S A N	24M2750	60.00	29.57	1
14	A B R	18M7500	60.00	0.00	1
15	A A N	18M2750	60.00	0.00	1
16	A A N	F95CA/24	60.00	0.00	1
D0003	A A F	N.I.	60.00	0.00	1

## Anexo D – Distância entre Condutores (ALACO 160 a 65°C)

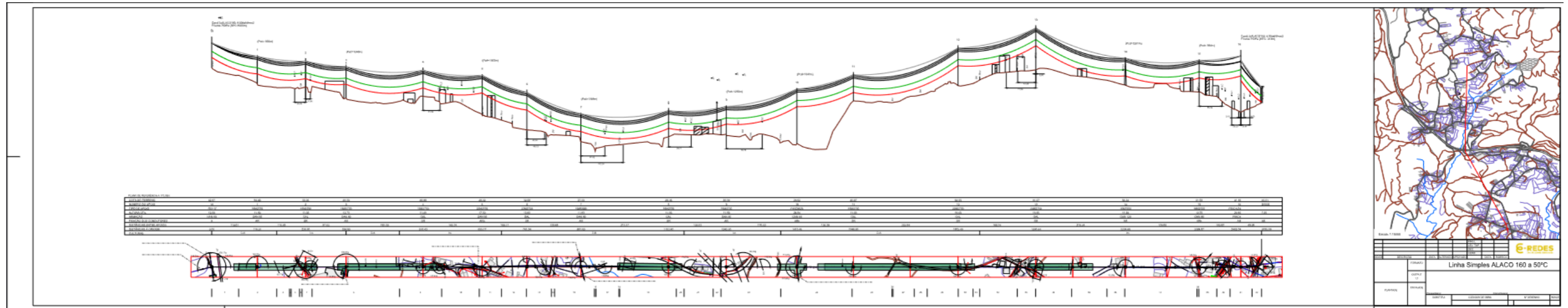
APOIOS			DISTANCIAS				
N.	F+I+R	TIPO	Max.Esq.	Calc.Esq.	Max.Dir.	Calc.Dir.	Verif
19	A A N	N.I.	0.00	0.00	0.00	0.68	0
1	A A N	16M2750	1.50	0.68	1.50	0.72	1
2	S A N	16M2750	1.50	0.84	1.50	0.75	1
3	A A N	18M2750	1.50	0.61	1.50	0.97	1
4	S A N	18M2750	1.50	1.06	1.50	0.88	1
5	A A N	22M2750	1.50	0.76	1.50	0.65	1
6	S A N	22M2750	1.50	0.78	1.50	0.88	1
7	A A N	18M5000	1.50	0.77	1.50	1.06	1
8	S A N	16M2750	1.50	1.14	1.50	0.85	1
9	A A N	18M2750	1.50	0.73	1.50	0.89	1
10	A A N	F45CM/24	1.50	0.89	1.50	0.70	1
11	S A N	16M2750	1.50	0.82	1.50	1.30	1
12	S A N	24M2750	1.50	1.30	1.50	1.03	1
13	S A N	24M2750	1.50	1.03	1.50	1.15	1
14	A B R	18M7500	1.50	1.06	1.50	0.92	1
15	A A N	18M2750	1.50	0.92	1.50	0.65	1
16	A A N	F95CA/24	2.70	0.65	2.70	0.52	1
D0003	A A F	N.I.	0.00	0.52	0.00	0.00	0



## Anexo F – Estabilidade dos apoios (2xALACO 90 a 50°C)

A P O I O S			C A R G A S							
N.	F+I+R	TIPO	FXmax	FYmax	FZmax	FX	FY	FZ	Ve	TF%
19	A A N	N.I.	1	1	1	2637	131	98	0	999
						21	0	98		
1	A A N	16M1600	740	1600	2000	0	283	212	1	18
						44	0	212		
2	S A N	16M1600	740	1600	2000	0	240	152	1	15
						42	0	152		
3	A A N	18M1600	740	1600	2000	26	420	241	1	30
						36	83	241		
4	S A N	20M1600	740	1600	2000	0	368	205	1	23
						64	0	205		
5	A A N	22M1600	740	1600	2000	160	350	228	1	44
						161	30	228		
6	S A N	22M1600	740	1600	2000	0	344	164	1	21
						46	0	164		
7	A A N	16M2750	1300	2750	4000	119	1584	298	1	76
						211	1190	298		
8	S A N	20M1600	740	1600	2000	0	399	215	1	25
						68	0	215		
9	A A N	16M1600	740	1600	2000	0	1479	250	1	92
						58	0	250		
10	A A N	F15CM/24	1599	1425	1200	388	424	312	1	54
						562	61	312		
11	S A N	16M1600	740	1600	2000	0	416	233	1	26
						76	0	233		
12	S A N	26M1600	740	1600	2000	0	471	256	1	29
						86	0	256		
13	S A N	24M1600	740	1600	2000	0	424	240	1	26
						79	0	240		
14	A A R	20M5000	2350	5000	4000	0	502	289	1	75
						1758	0	289		
15	A A N	20M1600	740	1600	2000	0	828	236	1	52
						54	0	236		
16	A A N	F45CM/24	200	4325	2000	12	3029	208	0	999
						268	2967	208		
D0003	A A F	N.I.	1	1	1	1055	78	77	0	999
						10	0	77		

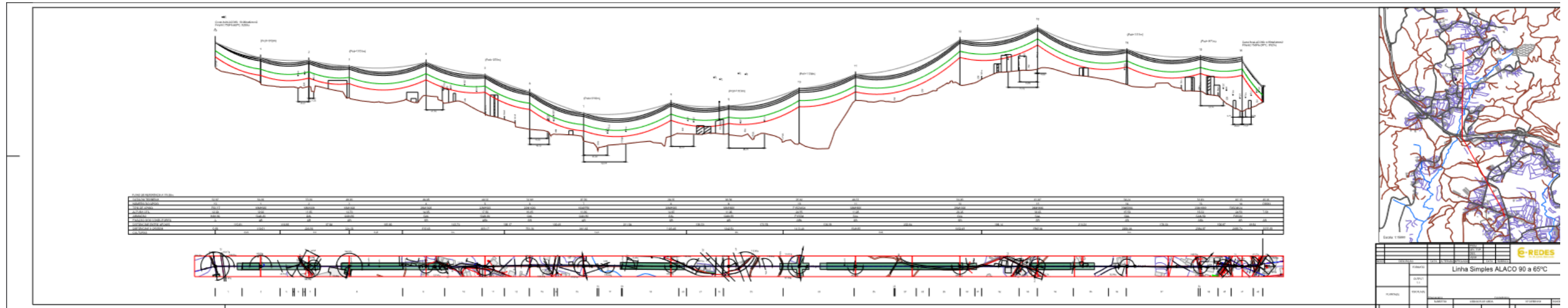
# Anexo G – Projeto de uma Linha Aérea Simples de ALACO 160 a 50°C



## Anexo H – Estabilidade dos apoios (ALACO 160 a 50°C)

A P O I O S			C A R G A S							
N.	F+I+R	TIPO	FXmax	FYmax	FZmax	FX	FY	FZ	Ve	TF%
19	A A N	N.I.	1	1	1	4009	145	138	0	999
1	A A N	16M2750	1300	2750	4000	24	0	138	1	11
2	S A N	16M2750	1300	2750	4000	0	314	293	1	10
3	A A N	18M2750	1300	2750	4000	50	0	293	1	18
4	S A N	16M2750	1300	2750	4000	0	269	229	1	15
5	A A N	22M2750	1300	2750	4000	47	0	229	1	16
6	S A N	22M2750	1300	2750	4000	26	453	343	1	29
7	A A N	16M5000	2350	5000	4000	36	80	343	1	39
8	S A N	16M2750	1300	2750	4000	0	419	323	1	17
9	A A N	16M2750	1300	2750	4000	72	0	323	1	77
10	A A N	F45CM/24	200	4325	2000	0	432	313	1	205
11	S A N	16M2750	1300	2750	4000	55	0	313	1	17
12	S A N	22M2750	1300	2750	4000	159	471	254	1	19
13	S A N	24M2750	1300	2750	4000	160	162	254	1	17
14	A B R	16M7500	6724	3048	4000	119	1643	420	1	40
15	A A N	18M2750	1300	2750	4000	211	1206	420	1	65
16	A A N	F95CA/24	6900	9021	2695	0	458	341	1	78
D0003	A A F	N.I.	1	1	1	77	0	341	1	999
						65	0	361	1	
						388	487	422	0	
						562	85	422	1	
						0	469	372	1	
						86	0	372	1	
						0	533	414	1	
						97	0	414	1	
						0	476	385	1	
						89	0	385	1	
						0	582	430	1	
						2672	0	430	1	
						590	405	348	1	
						618	26	348	1	
						45	5229	262	1	
						321	5166	262	1	
						1886	85	95	0	
						11	0	95	1	

# Anexo I – Projeto de uma Linha Aérea Simples de ALACO 90 a 65°C



## Anexo J – Estabilidade dos apoios (ALACO 90 a 65°C)

APOIOS			C A R G A S							
N.	F+I+R	TIPO	FXmax	FYmax	FZmax	FX	FY	FZ	Ve	TF%
19	A A N	N.I.	1	1	1	2637	131	98	0	999
						21	0	98		
1	A A N	16M1600	740	1600	2000	0	283	212	1	18
						44	0	212		
2	S A N	16M1600	740	1600	2000	0	240	152	1	15
						42	0	152		
3	A A N	18M1600	740	1600	2000	26	420	241	1	30
						36	83	241		
4	S A N	20M1600	740	1600	2000	0	368	205	1	23
						64	0	205		
5	A A N	22M1600	740	1600	2000	160	350	228	1	44
						161	30	228		
6	S A N	22M1600	740	1600	2000	0	344	164	1	21
						46	0	164		
7	A A N	16M2750	1300	2750	4000	119	1584	298	1	76
						211	1190	298		
8	S A N	20M1600	740	1600	2000	0	399	215	1	25
						68	0	215		
9	A A N	16M1600	740	1600	2000	0	1479	250	1	92
						58	0	250		
10	A A N	F15CM/24	1599	1425	1200	388	424	312	1	54
						562	61	312		
11	S A N	16M1600	740	1600	2000	0	416	233	1	26
						76	0	233		
12	S A N	26M1600	740	1600	2000	0	471	256	1	29
						86	0	256		
13	S A N	24M1600	740	1600	2000	0	424	240	1	26
						79	0	240		
14	A A R	20M5000	2350	5000	4000	0	502	289	1	75
						1758	0	289		
15	A A N	20M1600	740	1600	2000	0	828	236	1	52
						54	0	236		
16	A A N	F45CM/24	200	4325	2000	12	3029	208	0	999
						268	2967	208		
D0003	A A F	N.I.	1	1	1	1055	78	77	0	999
						10	0	77		