FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Cálculo tridimensional de linhas elétricas aéreas de alta tensão

João Pedro Nunes Barbosa



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores

Orientador FEUP: Prof. José Neves dos Santos

14 de fevereiro de 2023

© João Barbosa, 2023

Resumo

A presente dissertação, proposta pela E-REDES, tem como principal objetivo desenvolver uma aplicação de cálculo e representação tridimensional dos elementos constituintes de uma linha área de transporte de eletricidade, com base nos elementos de projeto pré-definidos.

Para a realização de um projeto de linha aérea, é necessário tomar várias decisões e saber vários conceitos associados ao projeto. Nas suas diversas etapas, estão sujeitas a restrições causadas pela regulamentação, terreno, meteorologia e o fator custo-benefício.

Na presente dissertação é apresentado o desenvolvimento de um programa de cálculo e representação tridimensional de uma linha elétrica aérea, com base nos elementos de projeto pré-definidos, denominado de LAT3D.

Com o intuito de verificar o funcionamento do programa desenvolvido, foram utilizados como dados de entrada os dados Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso. Na interface gráfica do LAT3D é possível visualizar as vistas superior e lateral da linha em estudo. Quando são abertos os ficheiros *KML*, gerados pelo LAT3D, no *Google Earth* é possível visualizar uma representação dos vários elementos constituintes da linha em estudo.

No fim da presente dissertação, são feitas as conclusões do do trabalho realizado, por fim, possíveis trabalhos futuros são sugeridos.

Abstract

This dissertation, proposed by E-REDES, has as main objective to develop an application for calculation and three-dimensional representation of the constituent elements of an overhead line for electricity transmission, based on pre-defined design elements.

To carry out an overhead line project, it is necessary to make several decisions and know several concepts associated with the project. In its various stages, they are subject to constraints caused by regulations, terrain, meteorology and the cost-benefit factor.

In the present dissertation it is presented the development of a program of calculation and three-dimensional representation of an aerial electric line, based on pre-defined project elements, called LAT3D.

In order to verify the operation of the developed program, were used as input data the Nogueira da Regedoura - Pedroso line. In the LAT3D graphical interface it is possible to visualize the upper and lateral views of the line under study. When the *KML* files, generated by LAT3D, are opened on *Google Earth* it is possible to view a representation of the various constituent elements of the line under study.

At the end of this dissertation, the conclusions of the work carried out are made, finally, possible future works are suggested.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador na E-REDES o Engº Ricardo Pina, por todo o tempo dispensado, pela excelente orientação e apoio prestados que foram essenciais para a realização deste trabalho.

Agradeço de igual modo, ao meu orientador Professor José Neves dos Santos, pela sua mentoria e pela confiança que depositou em mim e que possibilitou a realização desta dissertação com a colaboração de uma empresa como a E-REDES.

Agradeço à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, e a todos os docentes que me me acompanharam neste dois anos, que contribuíram, com novos e desafiantes desafios, para uma aquisição sólida de conhecimentos, essenciais à realização da presente dissertação.

Aos meus pais e irmã, agradeço por todo o apoio e carinho e pelas condições que me ofereceram que em muito facilitaram esta jornada.

À minha namorada Ana, agradeço por estar sempre ao meu lado, por todo o carinho e por todo o apoio, levantando sempre a minha moral nos momentos mais difíceis. Agradeço pela motivação e pelo tempo que abdicou para estar na minha companhia para eu realizar a dissertação. Juntamente com a minha família, é o pilar do sucesso que foi esta etapa e por isso estou-lhe eternamente grato.

João Barbosa

"I have to build my own boat this time.
It's a big sea out there, and I have a pretty small boat. I have a lot of belief in it."

Brian May

Conteúdo

1 Introdução **1**
- 1.1 E-REDES . . . 1
- 1.2 Objetivo desta dissertação . . . 2
- 1.3 Estrutura da Dissertação . . . 2

2 Área de Investigação e Estado de Arte **5**
- 2.1 Área de Investigação . . . 5
  - 2.1.1 Linhas Aéreas de Alta Tensão - Elementos Constituintes . . . 6
  - 2.1.2 Cálculo Elétrico . . . 18
  - 2.1.3 Cálculo Mecânico . . . 21
- 2.2 Estado de Arte . . . 26
  - 2.2.1 *MATLAB*® . . . 26
  - 2.2.2 Sistemas de Coordenadas Geográficas . . . 27
  - 2.2.3 Evolução Histórica do Projeto de Linhas Aéreas . . . 28
  - 2.2.4 Sistema de Informação Técnica – Design Manager . . . 30
  - 2.2.5 Fases do Projeto de uma Linha Aérea AT . . . 31

3 Aplicação de Cálculo Desenvolvida **37**
- 3.1 Dados de Entrada . . . 37
- 3.2 Cálculo Mecânico Realizado pelo Programa . . . 43
- 3.3 Exemplo de Validação . . . 48
- 3.4 Cálculo Tridimensional Realizado pelo Programa . . . 49
  - 3.4.1 Código de Cálculo e Representação 3D . . . 51

4 Utilização da Aplicação LAT3D **57**
- 4.1 Instalação da Aplicação . . . 57
- 4.2 Utilização da Aplicação . . . 60

5 Caso de Estudo **63**
- 5.1 Linha AT de Nogueira da Regedoura - Pedroso . . . 63
  - 5.1.1 Características do Condutor e Cabo de Guarda . . . 64
  - 5.1.2 Apoios da Linha . . . 64
- 5.2 Dados de Entrada . . . 66
- 5.3 Resultados do Cálculo Mecânico . . . 67
  - 5.3.1 Fases . . . 67
  - 5.3.2 Cabo de Guarda . . . 69
- 5.4 Resultados do Cálculo Tridimensional . . . 71
  - 5.4.1 Resultados no LAT3D . . . 71

5.4.2 Resultados no *Google Earth* 72

6 Conclusões e Trabalho Futuro **81**
6.1 Conclusões 81
6.2 Trabalho Futuro 82

Referências **85**

A Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth* **87**

Lista de Figuras

3.1 Folha "Condutores_Utilizados" 38
3.2 Folha "Apoios" 38
3.3 Variáveis de Entrada dos condutores das fases. 39
3.4 Conversão de graus para UTM. 39
3.5 Código de construção da matriz L 40
3.6 Código de obtenção dos comprimentos de braços e das distâncias entre fases e correção das distâncias se necessário. 40
3.7 Código de entrada de dados da interface gráfica. 41
3.8 Código de atribuição dos valores das caraterísticas do condutor das fases. 41
3.9 Código de busca do ficheiro com os dados dos apoios da linha. 42
3.10 Código de busca do ficheiro de 43
3.11 Código que representa a Tabela 2.1 que auxilia na escolha do coeficiente de forma. 43
3.12 Código que representa a Tabela 2.2 que auxilia na escolha da pressão dinâmica do vento. 44
3.13 Código que representa a Tabela 2.2 que auxilia na escolha da pressão dinâmica do vento. 44
3.14 Código do cálculo da Força do Vento e Coeficientes de Carga. 45
3.15 Código de cálculo do Vão Crítico. 45
3.16 Código de cálculo dos Vãos Equivalentes. 46
3.17 Código de escolha do Pior Estado Atmosférico. 47
3.18 Código de resolução de equação de estados. 47
3.19 Código de cálculo das flechas. 48
3.20 Esquema da linha exemplo. 48
3.21 Vista lateral esquemática de um vão. 50
3.22 Vista superior esquemática de um vão. 51
3.23 Código de determinação do vetor perpendicular em x e y do vão e variável de correto comprimento do braço. 52
3.24 Código de atribuição dos valores de x, y e z aos pontos de inicio e fim de vão. . . 52
3.25 Esquema de obtenção do ponto A_L11, que pertence à fase L11. 53
3.26 Código de obtenção do ponto A_L11 e B_L11, que pertence à fase L11. 53
3.27 Código de cálculo dos parâmetros "b", "c", "m"e "r"do vão de A_L11 a B_L11. . 54
3.28 Código de representação dos braços e cadeias de isoladores do apoio inicial do vão de A_L11 a B_L11. 54
3.29 Código de cálculo e representação do vão de A_L11 a B_L11. 55
3.30 Código de conversão de coordenadas e criação de ficheiros *KML* para uma linha dupla. 55
3.31 Código de representação do Pórtico inicial. 56

4.1 Janela inicial da instalação do Programa LAT3D. 57
4.2 Escolha do local a instalar o LAT3D. 58
4.3 Escolha do local a instalar o MATLAB Runtinme. 58
4.4 Aceitação da Licença de Contrato do MATLAB Runtinme. 59
4.5 Ordem de Instalação do LAT3D e MATLAB Runtime. 59
4.6 Janela de Interface Gráfica do programa LAT3D. 60
4.7 Local de introdução de dados sobre a linha. 60
4.8 Botão de importação do ficheiro *CSV*. 61
4.9 Exemplo do inicio de um ficheiro *CSV* 61
4.10 Local dos resultados do cálculo mecânico do LAT3D 61
4.11 Local dos resultados do cálculo mecânico do LAT3D 61

5.1 Perfil de elevação do terreno da linha Nogueira da Regedoura-Pedroso. 63
5.2 Entrada de dados iniciais no LAT3D referentes à linha AT Nogueira da Regedoura - Pedroso. 66
5.3 Ficheiro de entrada de dados dos apoios e pórticos no LAT3D referentes à linha AT Nogueira da Regedoura - Pedroso. 67
5.4 Resultados da Força do Vento e Coeficiente de Sobrecarga para o condutor de fase no LAT3D. 68
5.5 Resultados da Força do Vento e Coeficiente de Sobrecarga para o condutor de fase no LAT3D. 69
5.6 Resultados da Força do Vento e Coeficiente de Sobrecarga para o cabo de guarda no LAT3D. 69
5.7 Resultados da Força do Vento e Coeficiente de Sobrecarga para o condutor de fase no LAT3D. 70
5.8 Vista Lateral da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no LAT3D. 71
5.9 Vista Superior da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no LAT3D. 72
5.10 Ficheiros *KML* gerados pelo LAT3D. 73
5.11 Vista Superior da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. . . 73
5.12 Pórtico Inicial da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. . . 74
5.13 Vão 2-3 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 74
5.14 Vão 5-6 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 75
5.15 Apoio 8 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 76
5.16 Apoio 16 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 77
5.17 Derivação na Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 78
5.18 Pórtico Final da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. . . . 79
5.19 Vão 5-6 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 79
5.20 Pórtico Final da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. . . . 80

A.1 Vãos do Pórtico inicial ao Apoio 3 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 87
A.2 Vãos do Apoio 3 ao Apoio 5 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 87
A.3 Vãos do Apoio 5 ao Apoio 7 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 87
A.4 Vãos do Apoio 7 ao Apoio 9 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 88
A.5 Vãos do Apoio 9 ao Apoio 11 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 88

A.6 Vão do Apoio 11 ao Apoio 12 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 88
A.7 Vão do Apoio 12 ao Apoio 13 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 88
A.8 Vão do Apoio 13 ao Apoio 14 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 88
A.9 Vãos do Apoio 14 ao Apoio 16 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 89
A.10 Vãos do Apoio 16 ao Apoio 18 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 89
A.11 Vãos do Apoio 18 ao Apoio 20 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 89
A.12 Vãos do Apoio 20 ao Apoio 22 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 89
A.13 Vãos do Apoio 22 ao Apoio 24 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 89
A.14 Vãos do Apoio 24 ao Apoio 26 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 90
A.15 Vãos do Apoio 26 ao Apoio 28 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 90
A.16 Vãos do Apoio 28 ao Apoio 30 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 90
A.17 Vãos do Apoio 30 ao Apoio 32 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 90
A.18 Vãos do Apoio 32 ao Pórtico final da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*. 90

Lista de Tabelas

2.1 Coeficientes de Forma segundo o RSLEAT. 23
2.2 Valores da pressão dinâmica do vento segundo o RSLEAT. 23

3.1 Parâmetros do cabo ALACO160 48
3.2 Resultados obtidos pelo CLINHAS e pelo Programa criado 49

5.1 Características do Condutor ALACO160 64
5.2 Características do Cabo de Guarda ACO80 64
5.3 Apoios da Linha AT de Nogueira da Regedoura - Pedroso. 65
5.4 Resultados dos cálculos mecânicos para os vãos de fase 68
5.5 Resultados dos cálculos mecânicos para os vãos do cabo de guarda. 70

Abreviaturas e Símbolos

Abreviaturas:

AT	Alta Tensão
ACSR	*Aluminium Conductor Steel Reinforced*
BFD	*Bird Flight Diverters*
CSV	*Comma Separated Values*
EDP	Energias de Portugal
FBF	*Firefly Bird Flappers*
GPS	*Global Positioning System*
KML	*Keyhole Markup Language*
LAAT	Linha Aérea de Alta Tensão
LAMAT	Linha Aérea de Muito Alta Tensão
MT	Média Tensão
OPGM	*Optical Power Ground Wire*
REN	Redes Energéticas Nacionais
RNT	Redes Nacional de Transporte
RSLEAT	Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão
SEE	Sistema Elétrico de Energia
SIT-DM	Sistema de Informação Técnica - Design Manager
UTM	*Universal Transversal Mercator*
WGS84	*World Geodetic System*

Símbolos:

I	Intensidade de corrente de serviço
S_N	Potência aparente
U_c	Tensão composta
$cos\varphi$	Fator de potência
d_I	Densidade de corrente
σ	Secção do condutor
R	Resistência
ρ_θ	Resistividade de um condutor a uma temperatura θ
ρ_{20}	Resistividade de um condutor a uma 20 ºC
l	Comprimento do condutor
R_k	Resistência Quilométrica
β	Coeficiente de temperatura de resistividade
X_k	Reactância Quilométrica
L_k	Coeficiente de auto-indução
ω_{rad}	Velocidade angular
μ	Permeabilidade relativa
D	Distância geométrica equivalente entre condutores
r	Raio do cabo
p	Perdas por efeito Joule
ΔU	Queda de tensão
T_r	Tração de rutura
t_{seg}	Tensão de segurança
F_v	Força do vento
α	Coeficiente de redução
q	Pressão dinâmica do vento
d_A	Diâmetro do cabo
m	Coeficiente de sobrecarga
ρ_{gelo}	Densidade do gelo
d	Diâmetro do cabo
ω	Peso próprio do cabo
$L_{critico}$	Comprimento do vão crítico
L_i	Comprimento do vão "i"
$L_{equivalente}$	Comprimento do vão equivalente
t_{max}	Tensão máxima
α_d	Coeficiente de dilatação
$\theta_{Inverno}$	Temperatura ambiente do estado Inverno
$\theta_{Primavera}$	Temperatura ambiente do estado Primavera
$m_{Inverno}$	Coeficiente de sobrecarga do estado Inverno
$m_{Primavera}$	Coeficiente de sobrecarga do estado Primavera
E	Módulo de Young
p	Parâmetro da catenária
f	Flecha

Capítulo 1

Introdução

A presente dissertação foi desenvolvida no Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores no ramo de Energia, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O objetivo deste projeto foi aplicar o conhecimento adquirido durante o curso de mestrado. A dissertação foi desenvolvida em colaboração com a empresa E-REDES. Neste capítulo, é abordado o contexto do projeto assim como a motivação para a realização do mesmo. Também é feita uma breve apresentação da E-REDES e dos objetivos da dissertação.

1.1 E-REDES

A E-REDES, anteriormente designada EDP Distribuição, é uma empresa portuguesa pertencente ao grupo Energias de Portugal (EDP). Em 1976, a empresa Eletricidade de Portugal nasce como resultado da fusão de 13 empresas do sector elétrico português, nacionalizado em 1975. No ano 2000, na quarta fase de privatização, a maioria do capital da EDP torna-se privado e nasce assim a EDP Distribuição. A 29 de Janeiro de 2021, a EDP Distribuição passa a designar-se E-REDES. A E-REDES é o principal operador da rede de distribuição de energia elétrica em Portugal Continental das redes de alta, média e baixa tensão [1].



Figura 1.1: Logótipo da E-REDES.

1.2 Objetivo desta dissertação

O objetivo desta dissertação é desenvolver uma aplicação de cálculo e representação tridimensional dos elementos constituintes de uma linha área de transporte de eletricidade, com base nos elementos de projeto pré-definidos. O *software* utilizado, ao longo desta dissertação, para desenvolver a aplicação de cálculo é o *MATLAB*®, com recurso a folhas *Excel* que funcionam como base de dados das características dos elementos constituintes de uma linha elétrica aérea.

É essencial que a aplicação desenvolvida seja testada com dados referentes aos de uma linha elétrica já estudada em diversos desafios numéricos e que apresente diferentes elementos constituintes ao longo da linha. Deste modo, é possível verificar se o cálculo e a representação realizados pela aplicação, estão em conformidade com o mundo real e perceber se esta aplicação pode ser utilizada como apoio antes de uma visita ao terreno para manutenção da linha ou no caso de uma linha em desenvolvimento qual será o seu aspeto no terreno depois de construida.

Para atingir este objetivo é necessário conhecer os vários elementos constituintes de uma linha elétrica aérea, os cálculos mecânicos associados ao projeto de linhas elétricas aéreas que são necessários ao desenvolvimento da aplicação, para que no fim desta dissertação o programa criado, seja capaz de calcular e representar tridimensionalmente, com rigor, linhas aéreas de alta tensão.

1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação está organizada em 6 capítulos, dos quais o primeiro é a introdução (capítulo presente). Os restantes capítulos são enumerados e brevemente descritos a seguir.

- **Capítulo 2 - Área de Investigação e Estado de Arte**

  Neste capítulo é introduzido a área de investigação e o estado de arte desta dissertação. Primeiramente, a área de investigação é abordada, cobrindo conceitos teóricos que são usados ao longo da dissertação. Na segunda parte do capítulo é abordado o estado de arte, onde começa a apresentação do software utilizado para desenvolver a aplicação de cálculo desta dissertação, são apresentados os sistemas de coordenadas geográficas usados na dissertação e por último a evolução história dos projetos de linhas elétrica aéreas.

- **Capítulo 3 - Ferramenta de Cálculo Desenvolvida**

  No Capítulo 3, é apresentada a aplicação desenvolvida para calcular e representar tridimensionalmente uma linha aérea de alta tensão, assim como o cálculo mecânico realizado pela aplicação e como esta calcula e representa as linhas tridimensionalmente.

- **Capítulo 4 - Utilização da Aplicação LAT3D**

  No Capítulo 4, são apresentados os passos para a correta instalação da aplicação desenvolvida LAT3D é também apresentada a interface gráfica do programa bem como o modo de inserir os dados de entrada da linha elétrica a calcular e os locais de saída dos resultados dos cálculos realizados pelo LAT3D.

- **Capítulo 5 - Caso de Estudo**

  Neste capítulo são apresentadas as características de uma linha elétrica aérea de alta tensão que serve de exemplo de aplicação do programa LAT3D, são ainda apresentados os resultados obtidos na interface gráfica do programa, bem como a representação obtida no *Google Earth*.

- **Capítulo 6 - Conclusões e Trabalho Futuro**

  Neste capítulo final, são feitas as conclusões do do trabalho realizado, por fim, possíveis trabalhos futuros são sugeridos.

Capítulo 2

Área de Investigação e Estado de Arte

Neste capítulo, a área de investigação e o estado de arte da presente dissertação são abordados. Primeiramente, a área de investigação é abordada, engloba conceitos teóricos que são usados ao longo da dissertação. Inicia-se com uma pequena abordagem ao Sistema Elétrico de Energia (SEE) a sua função e como este se encontra dividido. Depois são enumerados e descritos os principais elementos constituintes das linhas de transporte de energia, onde serão expostos alguns dos seus fundamentos teóricos e aspetos de construção. Por fim, são apresentados os cálculos elétricos necessários para a construção de uma linha elétrica de alta tensão e os cálculos mecânicos necessários ao desenvolvimento da presente dissertação.

A segunda parte deste capítulo aborda o estado de arte. Este parte começa com a apresentação do *software* utilizado para desenvolver a aplicação de cálculo desta dissertação. De seguida, são apresentados os sistemas de coordenadas geográficas utilizados na dissertação e por fim é abordada a evolução história dos projetos de linhas elétrica aéreas, as diferentes fases de um projeto e o *software* atualmente usado pela E-REDES para projeto de linhas aéreas de alta tensão.

2.1 Área de Investigação

O SEE, tem como principal função transportar a energia elétrica desde os centros de produção até aos locais de consumo, dividindo-se em cinco grandes áreas:

- Produção;
- Transmissão;
- Distribuição;
- Comercialização;
- Operação do mercado elétrico;

Em Portugal, a Redes Energéticas Nacionais (REN) opera a Rede Nacional de Transporte (RNT) que é constituída pelas Linhas Aéreas de Muito Alta Tensão (LAMAT) de 150 kV, 220 kV e 400

kV, esta liga os produtores aos centros de consumo, assegurando o equilíbrio entre a procura e a oferta de energia.[2]

Através da exploração da Rede Nacional de Distribuição, é assegurada a distribuição de eletricidade, podendo considerar-se uma divisão entre infra estruturas de alta, de média e de baixa tensão. A generalidade das Linhas Aéreas de Alta Tensão (LAAT) de 60 kV destinam-se à alimentação das subestações de AT/MT da rede de distribuição da E-REDES. [3]

Uma linha elétrica, segundo o RSLEAT, é definida como o conjunto de condutores, de isolantes, de acessórios e de suportes destinados ao transporte e distribuição de energia elétrica.

2.1.1 Linhas Aéreas de Alta Tensão - Elementos Constituintes

Neste capítulo são enumerados e descritos os principais elementos constituintes das linhas elétricas aéreas de alta tensão, onde serão expostos alguns dos seus fundamentos teóricos e aspetos de construção.

Numa linha AT, os principais elementos constituintes são os seguintes: [4]

- Condutores;
- Cabos de Guarda;
- Isoladores;
- Apoios;
- Sistemas de Ligação à Terra;
- Balizagem Aeronáutica;
- Dispositivos de Proteção à Avifauna.

Condutores

Os condutores são os elementos responsáveis pela condução da energia elétrica. Os condutores podem ser unifilares ou multifilares. Os condutores unifilares apresentam um único fio e relativamente aos condutores multifilares têm um diâmetro menor e peso maior. Por outro lado, os condutores multifilares que por sua vez apresentam um diâmetro maior e uma secção menor, ainda são caracterizados por uma resistência mecânica superior, visto serem mais flexíveis comparativamente aos condutores unifilares.

Nas linhas aéreas de alta tensão, os condutores utilizados podem ser homogéneos, apenas constituídos por um único metal, ou heterogéneos se forem constituídos por liga composta por mais do que um metal. Usualmente os condutores homogéneos são constituídos por cobre ou alumínio, relativamente aos heterogéneos o mais usual são condutores de alumínio-aço (ACSR – *Aluminium Conductor Steel Reinforced*). [5]

Um condutor ACSR é constituído por uma ou várias camadas de fios de alumínio, dispostos em camadas concêntricas em torno de um núcleo (alma) de aço galvanizado de alta resistência. É

possível variar a proporção relativa da área de secção transversal de alumínio e aço, a fim de se obter a melhor relação entre capacidade de transporte de corrente e resistência mecânica para cada aplicação. Apresenta também boa resistência à corrosão e boa relação entre peso e força.

Na Figura 2.1 é apresentado um exemplo de um condutor ACSR.

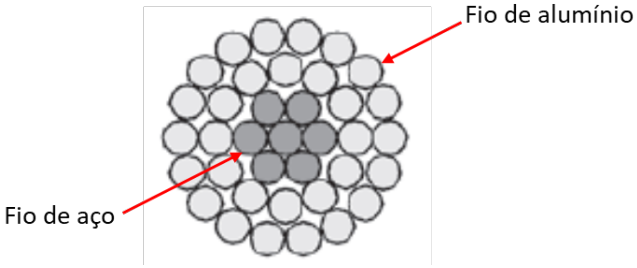


Figura 2.1: Secção exemplo de um condutor ACSR

As posições que mais usualmente se dispõe os condutores em linhas aéreas AT são as seguintes:[6]

- **Esteira horizontal** - Esta disposição é caraterizada pela disposição dos condutores de fase num único plano horizontal. Utiliza-se preferencialmente em linhas de circuito simples e proporcionam estruturas de menor altura. Na Figura 2.2 é mostrado um exemplo da esteira horizontal.

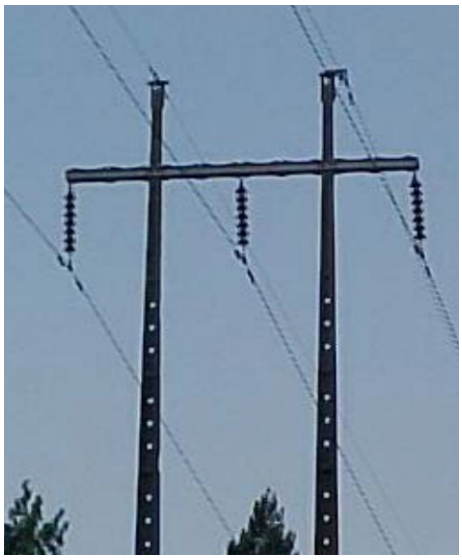


Figura 2.2: Esteira horizontal. [7]

- **Esteira vertical** - Esta disposição é caraterizada pela disposição dos condutores num plano vertical. A sua utilização destaca-se em situações de largura de vias públicas limitadas e são utilizadas em linhas de circuito simples. Na Figura 2.3 é mostrado um exemplo da esteira vertical.



Figura 2.3: Esteira vertical com um único circuito. [7]

- **Esteira vertical dupla** - Esta disposição é caraterizada pela disposição dos condutores num plano vertical. Utiliza-se preferencialmente em linhas de circuito duplo, reduzindo assim a área ocupacional dos caminhos de servidão. Na Figura 2.4 é mostrado um exemplo da esteira vertical dupla.

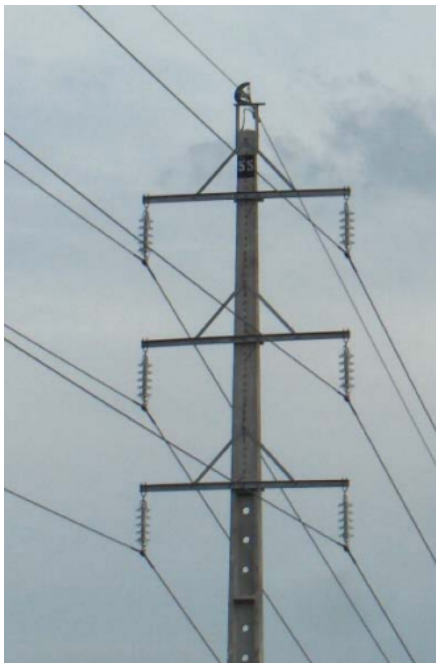


Figura 2.4: Esteira vertical com circuito duplo. [7]

- **Galhardete** - Esta disposição é caraterizada por os condutores estarem dispostos segundo os vértices de um triângulo, garantindo assim um maior afastamento entre fases. A sua utilização é empregue em todos os níveis de tensão e resulta em estruturas com alturas intermédias entre a disposição horizontal e vertical. Na Figura 2.5 é mostrado um exemplo de galhardete.

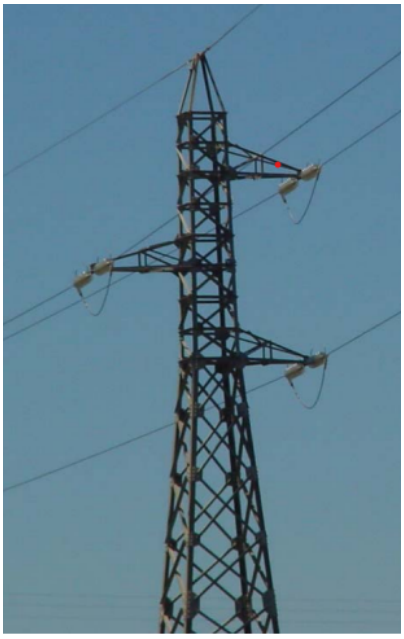


Figura 2.5: Galhardete. [7]

Cabos de Guarda

As linhas aéreas de distribuição de energia, no caso de sofrerem descargas atmosféricas, estão sujeitas a falhas de isolamento que levam a curto-circuitos, o que pode levar a uma interrupção do serviço de fornecimento de energia. Assim a função principal dos cabos de guarda nas linhas aéreas de transmissão, é a de intercetar as descargas atmosféricas e evitar que atinjam os condutores, reduzindo assim as possibilidades de ocorrerem interrupções no fornecimento de energia.[8]

Os cabos de guarda são instalados a uma altura superior aos condutores da linha e encontram-se conectados às redes de terra, de maneira a conseguirem intercetar descargas atmosféricas e conduzindo-as até ao solo, impedindo assim que as correntes de defeito atinjam e danifiquem os condutores e os outros elementos das linhas aéreas.

O cabo de guarda normalmente implementado é um ACSR ou um cabo de aço. Quando é pretendido adicionar a capacidade de comunicação opta-se por um cabo do tipo OPGW (*Optical Power Ground Wire*), este tipo de cabo contém uma estrutura tubular com uma ou mais fibras óticas no seu interior, sendo rodeado por camadas de aço e fios de alumínio, conforme mostra a Figura 2.6.

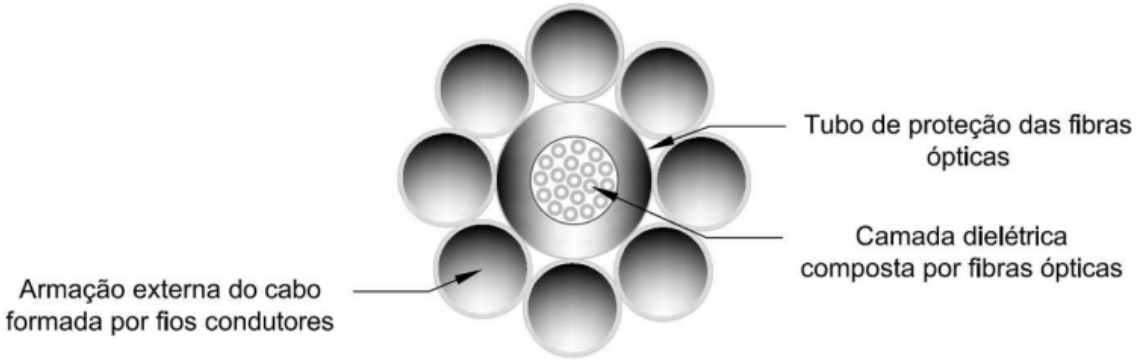


Figura 2.6: Secção exemplo de um cabo OPGW [9]

Como foi referido anteriormente os cabos de guarda são instalados na parte mais alta dos apoios e ligados à terra através desses apoios, de acordo com as seguintes recomendações:

- Um cabo de guarda, é montado de forma a que os pontos de fixação de todos os condutores fiquem dentro de um ângulo de 20º com vértice no ponto de fixação do cabo de guarda e a bissetriz vertical com mostra Na Figura 2.7.
- Dois cabos de guarda, são estabelecidos por forma a que cada um dos condutores fique relativamente a algum dos cabos de guarda, nas condições do ponto anterior.

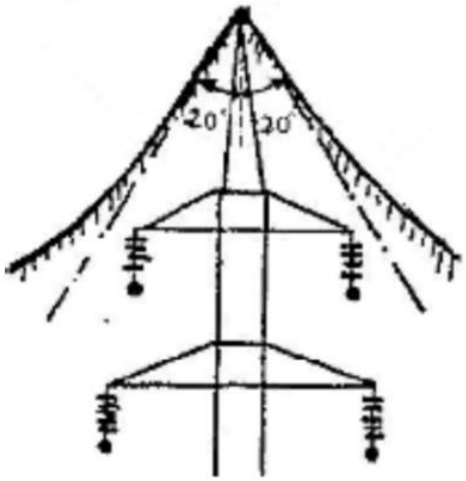


Figura 2.7: Geometria do Cabo de Guarda - Ângulo de Proteção. [10]

Isoladores

Os isoladores são os elementos das linhas aéreas que têm como principal função impedir a passagem de corrente elétrica para os apoios, aliada à função mecânica de suporte dos cabos condutores [11].

Para se escolher os isoladores, é necessário ter em conta o nível de poluição das zonas por onde a linha é projetada. A nível construtivo os isoladores podem ser feitos em cerâmica, vidro, resina

ou material compósito. Atualmente, uma vez que o fabrico de isoladores de porcelana é mais dispendioso, os isoladores de vidro são a escolha preferencial por possuírem boas características de isolamento, baixa fragilidade levando a baixos custos e uma melhor resposta às exigências de serviço [12]. Na Figura 2.8 são apresentados exemplos de diferentes tipos de isoladores.



Figura 2.8: Diferentes tipos de isoladores.

Os isoladores podem ser categorizados como sendo do tipo rígido ou de cadeia. Os rígidos tem vantagens a nível económico, pelo seu menor custo de produção, mas são menos utilizados em linhas de alta tensão pela sua complicada montagem e ao facto de em caso de ocorrer um defeito é necessário a substituição do isolador. Nos isoladores de cadeia, como são emparelhados, em caso de defeito não é necessário remover a cadeia toda mas sim a campânula danificada. Para níveis de tensão de 60 kV, as cadeias ainda tem um sistema de anti-arco, denominado de hastes de descarga, por onde são orientados possíveis arcos de contornamento originários de sobretensões atmosféricas.

As cadeias de isoladores podem ser classificadas como [8]:

- **Suspensão** - As cadeias de suspensão são um conjunto de campânula isoladoras dispostos em série numa posição vertical. O cabo condutor fica então suspenso na extremidade inferior e a extremidade superior é ligada ao braço de apoio. Na figura 2.9 é possível observar um isolador em suspensão.

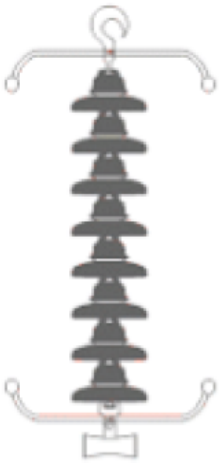


Figura 2.9: Cadeia de suspensão.

- **Amarração** - As cadeias de amarração têm uma disposição horizontal, quase anulando assim o desvio que a cadeia de isoladores poderia sofrer pela sua oscilação devido a ventos fortes. Este tipo de cadeias são preferencialmente escolhidas para apoios que estejam sujeitos a esforços mais elevados, nomeadamente apoios onde existam mudanças de direção da linha, travessias com vãos de comprimentos elevado, apoios de ângulo, fim de linha e de reforço. Apesar de todas estas garantias oferecidas, têm um custo superior, devido ao facto de ser necessário instalar o dobro de cadeias por apoio. Na figura 2.10 é possível observar um isolador em suspensão.



Figura 2.10: Cadeia de amarração.

Apoios

Os apoios de uma linha aérea têm como função o suporte de todos os elementos das linhas aéreas mencionados neste capítulo, nomeadamente: cabos condutores, cabos de guarda, isoladores e outros acessórios presentes na linha [13].

Para a escolha dos apoios a implementar num projeto de linhas aéreas tem de ser levado em consideração os esforços que irão sustentar, o local onde serão implantados, as suas características físicas e mecânicas e também aspetos económicos, tal como o custo da sua implementação.

Numa linha aérea existem vários tipos de apoios, que apresentam funções diferentes, conforme os esforços a que estão sujeitos [13]:

- **Apoio de alinhamento** - Apoios colocados em troços retilíneos, sem existência de ângulos ou derivações (Figura 2.11);

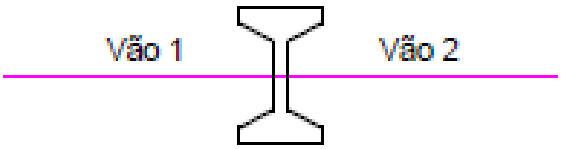


Figura 2.11: Apoio de Alinhamento [12]

- **Apoio de reforço em alinhamento ou ângulo** - Apoios que suportam esforços longitudinais, capazes de reduzir os efeitos negativos resultantes da rutura de cabos de guarda ou condutores (Figura 2.12);



Figura 2.12: Apoio de Reforço [12]

- **Apoio de ângulo** - Apoios colocados onde a linha perfaz uma mudança de direção, perfazendo um ângulo (Figura 2.13);

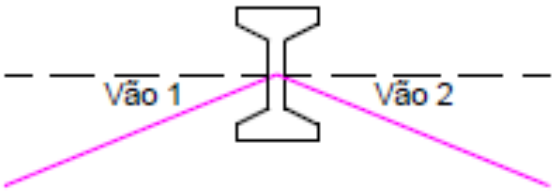


Figura 2.13: Apoio de Ângulo [12]

- **Apoio de Derivação** - Apoios onde são estabelecidas, uma ou mais derivações de outras linhas (Figura 2.14);

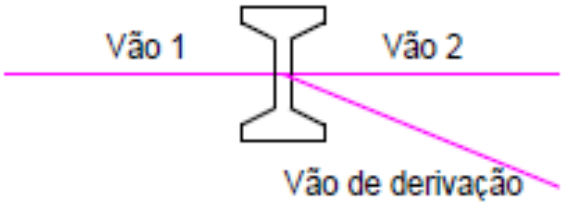


Figura 2.14: Apoio de Derivação [12]

- **Apoio de Fim de Linha** - Apoios colocados no princípio e no fim das linhas, tendo como função suportar a totalidade dos esforços transmitidos pelos condutores e cabos de guarda num só lado da linha (Figura 2.15).

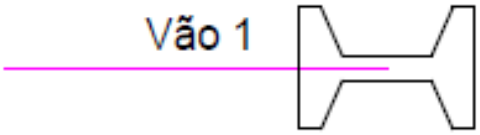


Figura 2.15: Apoio de Fim de Linha [12]

Sistemas de Ligação à Terra

Nas linhas aéreas é essencial a existência de um sistema de ligação à terra, para garantir a segurança de pessoas, equipamentos e instalações.

A função de um sistema de terra é de escoar as correntes de defeito para o solo. Estas correntes fluem para o solo sob a forma de correntes de fuga que se distribuem ao longo dos elétrodos de terra enterrados nesse mesmo solo [8]. Os sistemas de ligação à terra são constituídos pelos elétrodos de terra e pelos seus conjuntos de condutores, possibilitando uma ligação elétrica eficaz ao solo.

São instalados obrigatoriamente quatro elétrodos nos apoios metálicos através de interligação dos terminais de terra existentes em cada um dos montantes aos elétrodos de terra. Junto a cada maciço de betão são colocados dois elétrodos de terra, como mostra na Figura 2.16.

Para os apoios de betão, a interligação é feita entre o terminal de terra existente na parte inferior do apoio com o elétrodo terra, como mostra na Figura 2.16 .

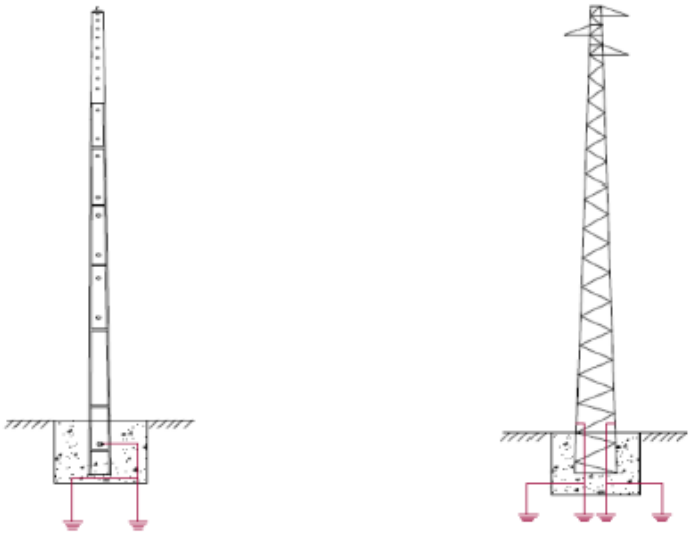


Figura 2.16: Ligação à terra de postes de betão(à esquerda) e metálicos(à direita) [8]

Balizagem Aeronáutica

A balizagem aeronáutica tem como finalidade a fácil identificação dos vários elementos das linhas aéreas de energia, pelos pilotos de aeronaves, e assim facilitar a realização das suas operações de voo em segurança.

A forma de implementação nos cabos consiste na colocação de bolas de balizagem (balizas), ao longo dos cabos, cumprindo um conjunto de normas relacionadas com as cores, dimensões e distâncias.

As balizas são esferas de fibra de vidro ou resina de poliéster com cerca de 50 cm de diâmetro e 5 kg de peso. Na figura 2.17, é mostrado uma balizagem num troço de uma linha aérea.

As cores usadas durante a balizagem de uma linha, dependem essencialmente do número de balizas que são utilizadas, sendo estabelecido o seguinte critério [14]:

- Cada baliza pode ser laranja, branca ou vermelha, sendo escolhida aquela que apresente maior contraste com o meio envolvente;
- Cada conjunto de baliza instalado ao longo de um cabo depende do número de balizas necessárias:
  - Uma cor, quando são precisas até quatro balizas;
  - Duas cores, quando são precisas cinco ou mais balizas. A colocação das balizas é feita alternadamente;

O espaçamento verificado entre uma baliza e o apoio da linha mais próximo ou entre duas balizas consecutivas depende do diâmetro da baliza em questão. Esse espaçamento não pode ultrapassar, em caso algum, as seguintes distâncias [14]:

- 30 metros, quando o diâmetro da baliza for de 60 cm;
- 35 metros, quando o diâmetro da baliza for de 80 cm;
- 40 metros, quando o diâmetro da baliza for de pelo menos 130 cm;
- 12 metros, independentemente do diâmetro adotado, quando se localizem sob os canais de aproximação/descolagem.

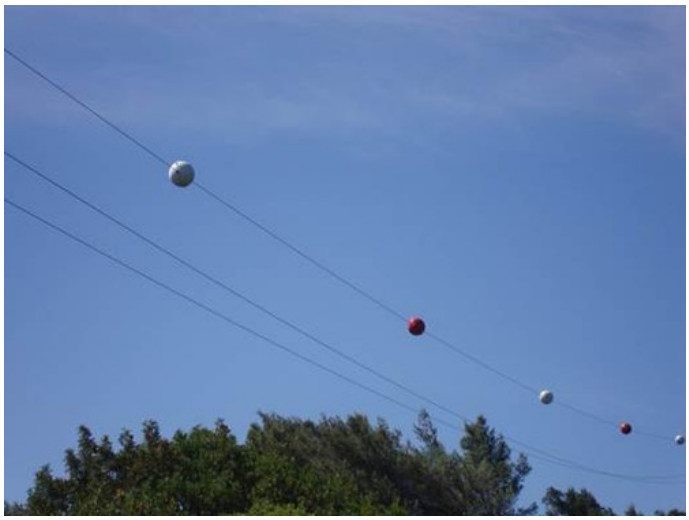


Figura 2.17: Exemplo de Balizagem Diurna [15]

As principais situações nas quais é necessário balizar as linhas elétricas aéreas são as seguintes [14]:

- Atravessamento das linhas aéreas por lagos, lagoas, albufeiras ou outros cursos de água que tenham uma largura superior a 80 metros;
- Localização dos apoios em áreas delimitadas geograficamente, onde é interdita qualquer espécie de construção (zonas "non-aedificandi");
- Cruzamento de vales ou cursos de água por parte de qualquer ponto da linha , sendo que a altura sob o terreno deve ser de 60 metros e largura exceder os 80 metros;

A sinalização luminosa que está prevista para a identificação das linhas localizadas na proximidade de aeroportos, aeródromos, heliportos e nas zonas non aedificandi das AE, IP ou IC e deve ser colocada do topo dos apoios, estar acesa entre o pôr e o nascer do sol, ser de cor vermelha e de baixa intensidade, mas ter de ser visível a uma distância mínima de 1000 m [16]. Na Figura 2.18 é apresentado um exemplo de um balizador noturno.



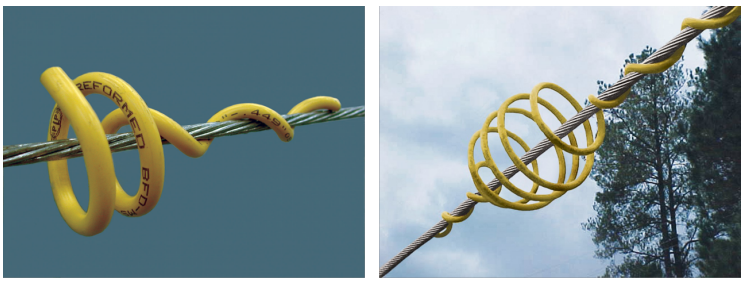
Figura 2.18: Exemplo de Balizagem Noturna [17]

Dispositivos de Proteção à Avifauna

As linhas de distribuição de energia elétrica apresentam um risco para as aves, que frequentemente morrem, devido ao choque com os cabos condutores ou por eletrocussão nos apoios. Para mitigar este risco a utilização de equipamento de sinalização para avifauna é definida pelo Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF), resultando na aplicação de dispositivos salva-pássaros, de dispositivos anti-nidificação e anti-poiso, e ainda, de plataforma para ninhos.

A proteção à avifauna consiste na colocação de dispositivos de anti-colisão para aves. Estes dispositivos de sinalização, devem ser instalados nos cabos de guarda e nos cabos condutores, fornecendo assim às aves, a capacidade de identificar o obstáculo, evitando o embate com a linha. No mercado existem dois tipos de dispositivos anti-colisão [18]:

- *Bird Flight Diverters* (BFD) - Os dispositivos BFD possuem uma forma helicoidal e são de plástico, ajustando-se ao cabo por enrolamento. Podem ser constituídos por espirais simples e por espirais duplas, sendo esta última, a solução convencional mais utilizada na E-REDES. A necessidade de colorir os dispositivos, pretende facilitar a visibilidade e o reconhecimento do obstáculo a grandes distâncias. Na Figura 2.19, são apresentados dois tipos de BFD.



(a) Espiral Simples (b) Espiral Dupla

Figura 2.19: Tipos de BFD [19]

- *Firefly Bird Flappers* (FBF) - Os dispositivos FBF podem ser do tipo fitas ou do tipo rotativo, tratando-se de uma tecnologia mais recente, com capacidade rotativa e luminescência após o pôr do sol. Estes dispositivos, são feitos de um material luminoso especial que absorve a luz, melhorando a eficácia dos sistemas durante a noite, num período até 10 horas. Na Figura 2.20, são apresentados dois tipos de FBF.

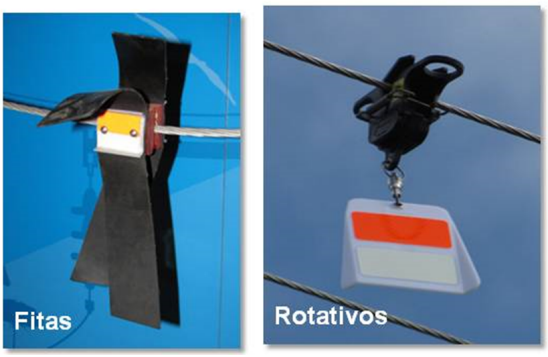


Figura 2.20: Tipos de FBF [18]

2.1.2 Cálculo Elétrico

O cálculo elétrico é uma fase de um projeto de linhas aérea de extrema importância, para que as limitações técnicas impostas pelos condutores não sejam excedidas.

A sua aplicação tem como objetivo determinar a tensão nominal da linha a projetar, bem como a secção transversal dos condutores que a constituem [32]. Conhecidos os parâmetros da linha, é possível calcular o principal objetivo desta fase, nomeadamente a intensidade de corrente de serviço as perdas de energia e as quedas de tensão.

Algumas destas características estão dependentes do cálculo mecânico, uma vez que os tipos de apoio utilizados influenciam alguns dos parâmetros elétricos da linha.

Neste Capítulo, são apresentadas as fórmulas de cálculo necessárias para o correto estudo do cálculo elétrico.

Intensidade de Corrente de Serviço

A intensidade da corrente estipulada que transita numa linha depende da tensão estipulada da linha e da potência instalada na carga. A corrente é obtida através da Expressão 2.2

$$I = \frac{S_N}{\sqrt{3} * U_c * cos\varphi} \quad [A] \tag{2.1}$$

Em que:

- S_N - Potência aparente [VA];
- U_c - Tensão composta da linha [V];
- $cos\varphi$ - Fator de potência.

Obtendo o valor da intensidade de corrente é possível calcular a densidade de corrente por fase da linha utilizando a Expressão 2.1.2.

$$d_I = \frac{I}{\sigma} \quad [A/mm^2] \tag{2.2}$$

Em que:

- I - Intensidade de Corrente [A];
- σ - Secção dos Condutores [mm^2].

Resistência Elétrica

A resistência elétrica de um condutor é calculada através da Expressão 2.3.

$$R = \rho_\theta * \frac{l}{\sigma} \quad [\Omega] \tag{2.3}$$

Em que:

- ρ_θ - Resistividade do condutor a uma temperatura θ [Ωmm^2/ km];
- l - Comprimento do condutor [km];
- σ - Secção do condutor [mm^2].

A resistência quilométrica é dada pela Expressão 2.4.

$$R_k = \frac{R}{l} = \frac{\rho_\theta}{\sigma} \quad [\Omega/km] \tag{2.4}$$

A resistividade do condutor a uma temperatura θ é calculada através da Expressão 2.5.

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

Em que:

- ρ_{20} - Resistividade do condutor a uma temperatura de 20 ºC [Ωmm^2/ km];
- β - Coeficiente de temperatura da resistividade.

Reactância Elétrica

A reactância influencia diretamente a queda de tensão na linha e a capacidade de transporte da mesma. A reactância quilométrica é dada pela Expressão 2.6.

$$X_k = L_k * \omega_{rad} \quad [\Omega/km] \tag{2.6}$$

Em que:

- L_k - Coeficiente de auto-indução [H/km];

- ω_{rad} - Velocidade angular [rad/s].

Para se obter a reactância total da linha utiliza-se a Expressão 2.7.

$$X = X_k * l \quad [\Omega] \tag{2.7}$$

Em que l é o comprimento total da linha.

Coeficiente de Auto-Indução

O coeficiente de auto-indução é um dos parâmetros com maior influência na capacidade de transporte de energia em linhas aéreas de transmissão.

A corrente elétrica que circula através de um condutor produz um campo magnético e um fluxo magnético associado a este campo. A indutância permite simbolizar os campos magnéticos criados pela passagem de corrente, e a sua fórmula de cálculo em linhas aéreas, por fase e por quilómetro é obtido a partir da Expressão 2.8

$$L_k = \left[\frac{\mu}{2n} + 4,6 * log\left(\frac{D}{r}\right)\right] * 10^{-4} \quad [H/km] \tag{2.8}$$

Em que:

- μ - Permeabilidade relativa do condutor:
  - μ=1 para condutores de cobre, alumínio, ligas de alumínio e cabos de alumínio-aço;
  - μ=200 para condutores de aço galvanizado.
- n - Número de condutores por fase:
  - n=1 para linhas simples;
  - n=2 para linhas duplas.
- D - Distância geométrica equivalente entre condutores [mm];
- r - Raio do cabo [mm].

Perdas de Energia

Um dos principais objetivos desta fase de cálculos é o cálculo das perdas de energia. Uma linha aérea tem como principal objetivo garantir o transporte de energia com fiabilidade e garantias ao consumidor acartando ainda a responsabilidade de minimizar o valor das perdas do sistema. As perdas de energia , por efeito de Joule, são dadas pela Expressão 2.9.

$$p = n * R * I^2 \quad [W] \tag{2.9}$$

Em que:

- n - Número de condutores da linha;
- R - Resistência elétrica do condutor [Ω];

- I - Intensidade de corrente [A].

Percentualmente, pode-se obter as perdas de energia através da Expressão 2.10.

$$p = \frac{n * R * I^2}{S * cos\varphi} * 100 \quad [\%] \tag{2.10}$$

Queda de Tensão

O cálculo da queda de tensão é dependente dos parâmetros dos condutores, nomeadamente a resistência e reactância. Outro fator que influencia o valor da queda de tensão é o comprimento da linha, uma vez que maiores comprimentos de linha maiores quedas de tensão. A queda de tensão de uma linha pode ser obtida através da Expressão 2.11.

$$\Delta U = \sqrt{3} * I * (R * cos\varphi + X * sen\varphi) \quad [V] \tag{2.11}$$

Em que:

- I - Intensidade de corrente [A];
- R - Resistência elétrica do condutor [Ω];
- X - Reactância elétrica do condutor[Ω].

Percentualmente, pode-se obter a queda de tensão através da Expressão 2.12.

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U}{U_c} \quad [\%] \tag{2.12}$$

A queda de tensão tem de ser inferior a 5% da tensão nominal da linha.

2.1.3 Cálculo Mecânico

O cálculo mecânico é uma fase essencial de um projeto de uma linha aérea, pois garante as condições de segurança e estabilidade da linha [20].

De modo a avaliar o impacto de diferentes condições atmosféricas, principalmente causadas pelas variações do vento e da temperatura existentes, deve-se recorrer a um conjunto de ferramentas matemáticas, que permitem assegurar que todos os esforços mecânicos são suportados, nos diversos estados atmosféricos verificados.

O cálculo mecânico inclui várias fases:

- Fixação da tensão máxima;
- Estabelecimento da ação dos agentes atmosféricos e coeficientes de sobrecarga;
- Determinação do pior estado atmosférico;
- Resolução da equação dos estados;

Tensão Mecânica Máxima

Antes de o projeto ser iniciado, é necessário definir o valor da tensão máxima que será aplicada em todos os vãos da linha. O valor máximo a fixar deve ser aquele a que os cabos vão estar sujeitos quando se verificarem as condições atmosféricas mais desfavoráveis.

O valor é calculado através do quociente entre a Tração de rutura (T_r) e o coeficiente de segurança para cabos e secção do cabo (σ), como se pode observar na Expressão 2.13. No cálculo da tensão de segurança, que é o valor limitador para o risco de rutura, deve considerar-se este coeficiente 2,5.

$$t_{seg} = \frac{T_r}{2,5 * \sigma} \quad [daN/mm^2] \tag{2.13}$$

Num projeto pode ser definido outro valor de tensão máxima desde que este seja inferior ao calculado recorrendo à Expressão 2.13. Ao definir um valor de tensão máxima, é necessário ter em atenção o seguinte:

- A flecha será maior quanto menor for a tensão mecânica;
- Um valor de tensão elevado vai originar maiores esforços mecânicos nos apoios.

Ação dos agentes atmosféricos e coeficientes de sobrecarga

Os agentes atmosféricos têm uma influência direta no comportamento mecânico das linhas de acordo com as regiões, estações do ano e do local de instalação da linha.

Para iniciar o cálculo mecânico é necessário determinar a força do vento, deve considerar-se que o vento atua numa direção horizontal e a força proveniente da sua ação considera-se paralela aquela direção, a força do vento vento é determinada utilizando a Expressão 2.14.

$$F_v = \alpha * c * q * d_A \quad [daN/m] \tag{2.14}$$

Em que:

- α - Coeficiente de redução, pode tomar dois valores:
  - 0,6, nos condutores e cabos de guarda;
  - 1, nos apoios, nas travessas e nos isoladores.
- c - Coeficiente de forma;

  Na Tabela 2.1, são apresentados os valores para o coeficiente de forma dos condutores, cabos de guarda e isoladores, e para os apoios e travessas.
- q - Pressão dinâmica do vento [Pa];

  Na Tabela 2.2, são apresentados os valores para a pressão dinâmica do vento em função da altura em que os elementos de estudo se encontram.

  A intensidade do vento vai permitir que se considerem dois estados: primavera, em que o vento é máximo, e inverno, em que o vento é reduzido como se pode observar na tabela anterior.

Tabela 2.1: Coeficientes de Forma segundo o RSLEAT.

	Diâmetro(mm)	**Coeficiente de forma "c"**
Condutores nus e cabos de guarda	<12.5	1.2
	12.5≤σ <15.8	1.1
	<15.8	1.0
Cabos isolados em feixe (torçada)		1.3
Cabos auto-suportados e cabos tipo 8		1.8
Isoladores		1.0

Tabela 2.2: Valores da pressão dinâmica do vento segundo o RSLEAT.

Altura acima do solo (m)	**Pressão dinâmica "q"(Pa)**	
	Vento Máximo	**Vento Reduzido**
Até 30	750	300
De 30 a 50	900	360
Acima de 50	1050	420

- d_A - Diâmetro do cabo $[m]$.

Para efetuar o cálculo dos coeficientes de sobrecarga, para os dois estados é utilizada a Expressão 2.15.

$$m = \frac{\sqrt{(w + \rho_{gelo} * \frac{\pi}{4} * [(d+2e)^2 - d^2])^2 + F_v^2}}{w} \quad [sem\ \ unidades] \tag{2.15}$$

Em que:

- ρ_{gelo} - Densidade do gelo = 0.9 kg/dm^3;
- d - Diâmetro do cabo $[m]$;
- w - Peso próprio do cabo $[daN/m]$;
- e = 10x10^{-3}, é a espessura da manga de gelo em metros, se não existir gelo e = 0.

Determinação do pior estado atmosférico

Uma vez calculados os coeficientes de sobrecarga e conhecendo previamente as características do cabo a utilizar, estão reunidos os dados necessários para calcular o vão crítico e o vão equivalente para cada cantão.

Sabemos que se designa por vão crítico, o vão, relativo a uma dada tensão máxima, para o qual os condutores ficam sujeitos a essa tensão em ambos os estados, o de Inverno e o de Primavera. O vão critico é calculado através da Expressão 2.16.

$$L_{crtico} = \frac{\sigma * t_{max}}{w} \sqrt{\frac{24 * \alpha_d * (\theta_{Inverno} - \theta_{Primavera})}{m^2_{Primavera} - m^2_{Inverno}}} \quad [m] \tag{2.16}$$

Em que:

- σ - Secção do cabo [mm^2];
- t_{max} - Tensão máxima [daN/mm^2];
- w - Peso próprio [daN/m];
- α_d - Coeficiente de dilatação [$^{\circ}C^{-1}$];
- $\theta_{Inverno}$ - Temperatura ambiente do estado de inverno [$^{\circ}C$];
- $\theta_{Primavera}$ - Temperatura ambiente do estado de primavera [$^{\circ}C$];
- $m_{Inverno}$ - Coeficiente de sobrecarga no estado de inverno;
- $m_{Primavera}$ - Coeficiente de sobrecarga no estado de primavera.

O pior estado atmosférico depende do vão equivalente, este representa o valor médio dos comprimentos dos vãos do cantão em causa. Através da Expressão 2.17, é possível calcular o vão equivalente para cada cantão.

$$L_{equivalente} = \sqrt{\frac{\sum L_i^3}{\sum L_i}} \quad [m] \tag{2.17}$$

Em que:

- L_i - Comprimento do vão "i"de um dado cantão.

O estado mais desfavorável é determinado recorrendo ao diagrama de decisão apresentado na Figura 2.21.

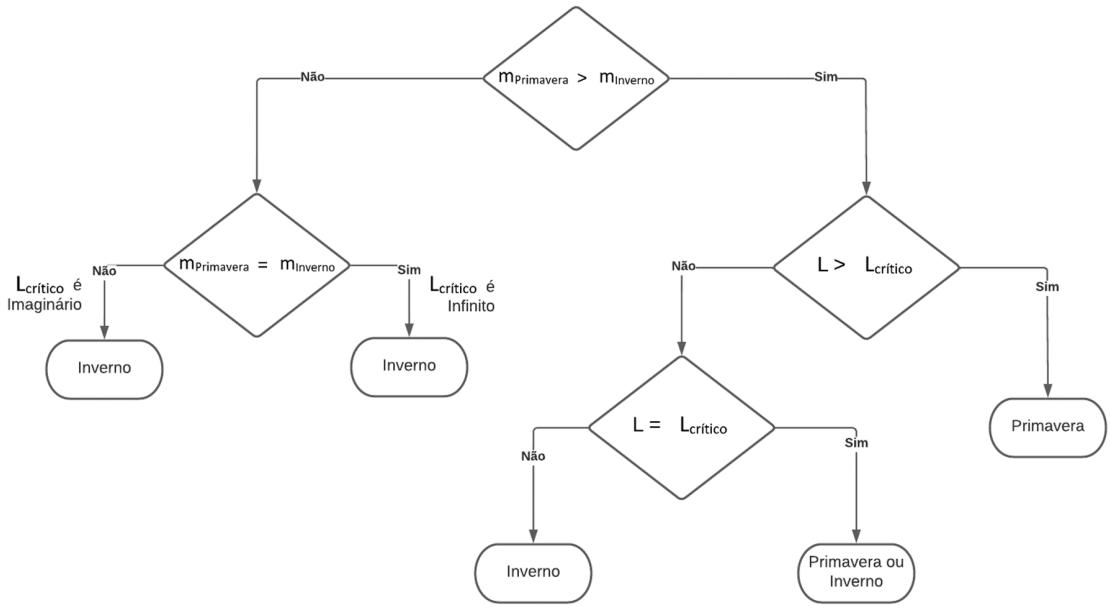


Figura 2.21: Diagrama de decisão do estado mais desfavorável [4].

Equação dos Estados

A equação dos estados determina a tensão mecânica nos condutores de um vão num dado estado atmosférico qualquer, desde que seja conhecido o seu valor noutro estado.

Após determinar o estado mais desfavorável, é necessário recorrer à equação dos estados para calcular a tensão de montagem. O cálculo é efetuado para o estado "verão", permitindo assim o cálculo do parâmetro de curva que representa a flecha máxima. Na Expressão 2.18, é apresentada a equação de estados.

$$\theta_i + \frac{t_{\theta i}}{\alpha_d * E} - \frac{w^2 * L_{eq}^2}{24 * \alpha_d * \sigma^2 * t_{\theta i}^2} = \theta_k + \frac{t_{max}}{\alpha_d * E} - \frac{m_k^2 * w^2 * L_{eq}^2}{24 * \alpha_d * \sigma^2 * t_{max}^2} \tag{2.18}$$

Em que:

- θ_i e θ_k - Temperatura dos estados a considerar [ºC];
- $t_{\theta i}$ - Valor da tensão a determinar $[daN/mm^2]$;
- t_{max} - Tensão máxima $[daN/mm^2]$;
- α_d - Coeficiente de dilatação $[ºC^{-1}]$;
- E - Módulo de Young $[daN/mm^2]$;
- σ - Secção de cabo $[mm^2]$;
- L_{eq} - Vão equivalente $[m]$;
- w - Peso próprio $[daN/m]$;
- m_k - Coeficiente de sobrecarga do pior estado atmosférico.

O parâmetro de catenária, representa geometricamente o raio de curvatura no ponto onde a tangente à curva é horizontal e é representado pela relação entre a força de tração horizontal do condutor e o peso linear do mesmo. Utilizando a Expressão 2.19 é possível obter o parâmetro de catenária.

$$p = \frac{\sigma * t_{\theta i}}{w} \quad [m] \tag{2.19}$$

Em que:

- $t_{\theta i}$ - Tensão determinada apartir da equação de estados $[daN/mm^2]$;
- σ - Secção do cabo $[mm^2]$;
- w - Peso próprio do cabo $[daN/m]$.

A flecha corresponde à distância desde o ponto onde a tangente à curva é horizontal até à interceção da vertical com a linha horizontal que cruza o ponto de fixação dos condutores. Para determinar o valor da fecha de cada vão utiliza-se a Expressão 2.20.

$$f = \frac{w * L_i^2}{8 * \sigma * t_{\theta i}} \quad [m] \tag{2.20}$$

Em que:

- w - Peso próprio do cabo $[daN/m]$;
- L_i - Comprimento do vão "i"de um dado cantão $[m]$;
- σ - Secção do cabo $[mm^2]$;
- $t_{\theta i}$ - Tensão determinada apartir da equação de estados $[daN/mm^2]$.

2.2 Estado de Arte

2.2.1 *MATLAB*®

O *Software* utilizado para desenvolver o trabalho da presente dissertação é o *MATLAB*®.

O *MATLAB*® é um *Software* da *Math Works*®, este *Software* é uma plataforma de programação e computação numérica usada por milhões de engenheiros e cientistas para analisar dados, desenvolver algoritmos e criar modelos.

O *MATLAB*® combina um ambiente de trabalho para análises iterativas e desenvolvimento de processos com uma linguagem de programação que representa matrizes e vetores numéricos diretamente [21].

As principais funcionalidades do *software* são apresentadas na Figura 2.22.



Figura 2.22: Funcionalidades do *MATLAB*®

2.2.2 Sistemas de Coordenadas Geográficas

Os sistemas de coordenadas geográficas utilizados na presente dissertação são os seguintes:

- *World Geodetic System* (WGS84)

  A WGS 84 é uma norma utilizada na cartografia de origem geocêntrica utilizado pelo *Global Positioning System* (GPS), definida em 1984 e cuja última revisão se deu em 2021. A coordenada de origem da WGS 84 é suposto estar localizada no centro de massa da Terra, estima-se que a incerteza é menor de que 2 cm [22]. Na aplicação desenvolvida os dados de entrada são em graus.

- Universal Transversal Mercator (UTM)

  O UTM utiliza um sistema baseado na projeção cartográfica cujas unidades estão em metros ao nível do mar. Entre as principais características encontramos que se trata de uma projeção cilíndrica. Isso significa que ele é projetado em todo o globo em uma superfície cilíndrica. É também uma projeção transversal. O eixo do cilindro é coincidente com o eixo equatorial. Desta forma, o valor dos ângulos é mantido para estabelecer uma melhor precisão no cálculo de localização e distâncias [23]. Estas coordenadas vão ser utilizadas nos cálculos da ferramenta desenvolvida por serem em metros. Na Figura 2.23 são apresentadas as zonas UTM da Europa.

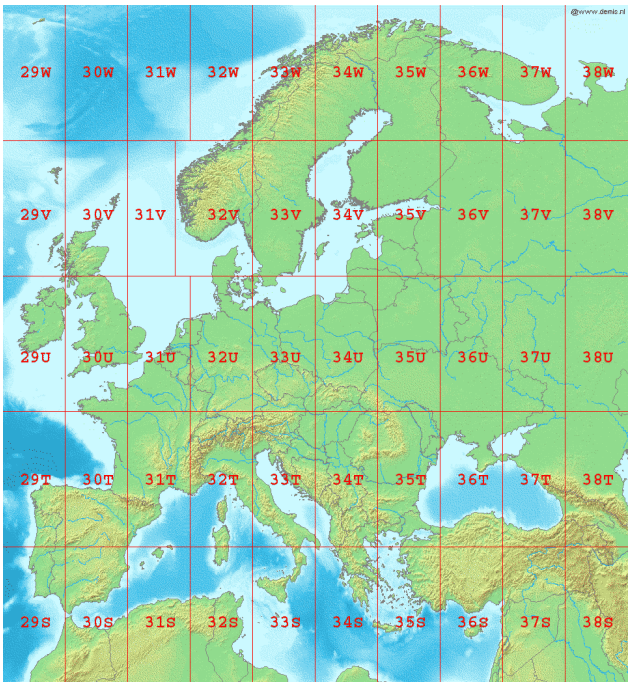


Figura 2.23: Mapa Europeu de zonas UTM [24].

2.2.3 Evolução Histórica do Projeto de Linhas Aéreas

No passado, o projeto de uma linha era um processo muito complicado e demorado, visto que não existia acesso às tecnologias que atualmente estão disponíveis, era tudo feito sem recurso a um computador ou a máquinas de cálculo avançadas, sendo necessário realizar o planeamento e dimensionamento do projeto manualmente [25].

Durante a fase de planeamento, para se definir os traçados iniciais, os topógrafos e projetistas tinham apenas ao seu dispor cartas militares, levando a que fosse necessário visitar constantemente o terreno, de forma a aferir se o que se encontrava nas cartas era coincidente com a realidade do local, especificamente, a existência de obstáculos e os pontos onde iriam ocorrer mudança de direção da linha.

Durante a fase de levantamento topográfico os aparelhos utilizados eram muito simples e analógicos, em comparação com os atuais, na Figura 2.24 é possível observar um destes aparelhos. Era definida uma estação base, com o intuito de referenciar os pontos que eram levantados; no entanto, em situações onde a visualização frontal não fosse possível, recorriam a uma estação móvel, que se deslocava para um determinado ponto, onde eram lidas as suas coordenadas e, de seguida, avançava para o próximo ponto. Uma vez que também não tinham acesso ao GPS, utilizavam para a altura de referência do terreno a cota disponibilizada nas cartas militares, sendo as restantes, posteriormente, determinadas pelo aparelho. Este disponibilizava os valores das alturas face a ângulos horizontais e verticais, medidos por marcas geodésicas [12].



Figura 2.24: Estação base usada pelos topógrafos, no passado [25].

Feito o levantamento, o passo seguinte consistia em realizar o perfil do terreno e a planta parcelar da área envolvente e, para isso, os topógrafos desenhavam, em papel milimétrico, um esboço sem escala de ambos. Na Figura 2.25, é possível observar um destes esboços feito por um topógrafo.

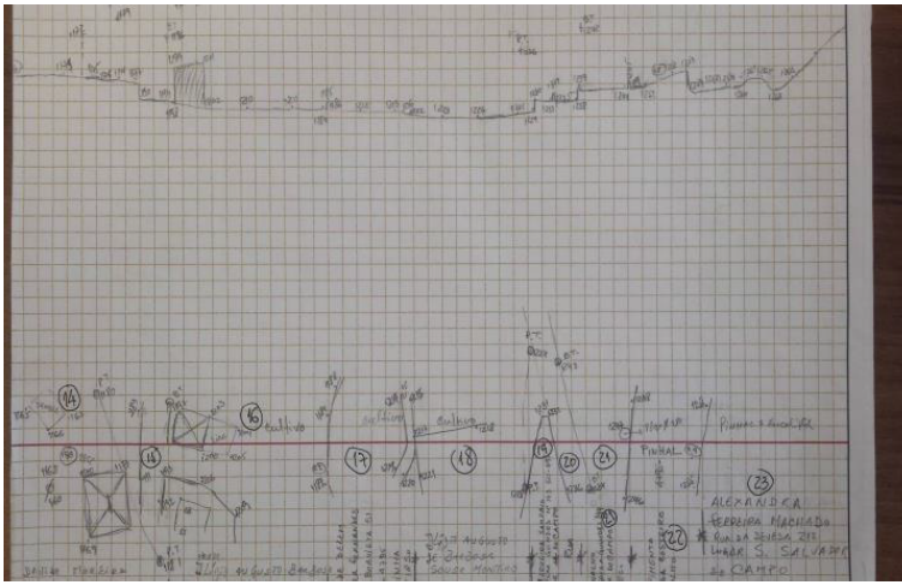


Figura 2.25: Exemplo de um esboço feito por um topógrafo [12].

Estes esboços eram depois enviados para os desenhadores, que traçavam o perfil da linha, agora à escala e com a identificação das cotas, e traçavam também as plantas parcelares com todas as informações dos ângulos da linha, proprietários dos terrenos e obstáculos.

De seguida estes desenhos eram entregues ao projetista, para se proceder ao dimensionamento da linha, onde era feito o cálculo elétrico e mecânico da mesma. Uma vez que estes cálculos eram todos feitos manualmente, e as máquinas de cálculo na altura não tinham a capacidade de realizar cálculos complexos, esta fase era um processo muito difícil para os projetistas. Isto porque, quando o projetista realizava os cálculos de verificação de apoios, ângulo de inclinação de cadeias de isoladores e distâncias mínimas regulamentares, caso houvesse algum incumprimento, ou anomalia no cálculo, poderia ser necessário redesenhar tudo novamente e recomeçar os cálculos.

Posteriormente, os fabricantes dos cabos começaram a fornecer tabelas técnicas relativas a cada tipo de condutor, com a indicação dos parâmetros de curva para diferentes situações, como por exemplo, tração máxima, vento máximo, gelo, vãos de comprimentos variados. Assim, através destas informações, o projetista passou a conseguir calcular facilmente o parâmetro de curva para cada cantão [12].

Com os parâmetros das curvas conhecidos, os projetistas tinham de desenhar as curvas das catenárias, bem como as alturas iniciais dos apoios, no desenho milimétrico fornecido pelos desenhadores. Para facilitar a representação destas no papel, existiam duas ferramentas, ambas em acrílico. Uma representava uma curva da catenária, de um certo valor (existiam diferentes acrílicos, para diferentes gamas de valores), que permitiam desenhar a curva facilmente, sendo apenas necessário colocá-la por cima do papel, alinhar com os apoios e traçar a curva. O outro acrílico consistia numa esquematização com as diferentes alturas dos apoios. Em alternativa a este último existia também o chamado escalímetro, que consistia numa régua, com diferentes escalas, sendo esta ainda muito utilizada atualmente.

Por último, eram realizados os cálculos já mencionados a cima, relativos ao dimensionamento dos apoios, ângulos das cadeias, distâncias regulamentares, entre outros, sempre na esperança de que tudo estivesse correto, senão seria necessário recomeçar todo o processo. No fim deste longo e iterativo processo, um desenhador fazia os desenhos finais do projeto da linha.

Em Portugal, na década de 90 surgiram, na Energias de Portugal - Distribuição S.A. (EDP), os primeiros programas que deram início à automatização dos cálculos inerentes aos projetos de linhas aéreas, como o DLinhas®, MLinhas® e o CLINHAS®. No entanto, estes ainda eram muito simples, onde apenas era possível realizar o cálculo mecânico de um determinado cabo.

No entanto, em 1993, o programa CLINHAS® sofreu um processo de reestruturação, onde foi criada uma interface de uso simples, onde o projetista podia inserir os dados relativos ao projeto, tais como, os dados do cabo, as informações referentes à topografia do terreno e localização dos apoios a serem usados. Após a sua execução, o programa gerava vários relatórios, onde era possível verificar a viabilidade do projeto. Através deles era possível identificar as violações das condições que o projeto eventualmente não cumpria, a necessidade de colocar, ou não, mais apoios, ou variar a altura dos mesmos. Com o passar dos anos, o CLinhas® foi evoluindo, sendo inserido no seu sistema um inovador módulo de desenho e topografia, levando à extinção do DLinhas®, passando assim, a ser o único programa a ser utilizado para cálculos de linhas aéreas, pela EDP. Em 2003, este tornou-se na base do programa que é utilizada atualmente, designada de Sistema de Informação Técnica – Design Manager (SIT-DM) [12].

2.2.4 Sistema de Informação Técnica – Design Manager

O SIT-DM é um é um software muito completo utilizado na E-REDES para a gestão, consulta e monitorização da evolução da obra do projeto com a ajuda da interligação ao Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA). Através deste sistema tem-se à disposição toda a informação geográfica de linhas elétricas existentes, de projetos em fase de planeamento e mesmo de obras a decorrer. Com a utilização de ortofotos, precisas e atuais, o programa possibilita a representação espacial do espaço urbano e permite, também, a partilha de informação entre os vários departamentos da empresa contribuindo, assim, para que as informações relacionadas a ações internas estejam sempre atualizadas [12].

Esta ferramenta melhora a gestão e coordenação logística das tarefas a realizar dos diferentes projetos, uma vez que permite a troca e partilha de informação entre os vários departamentos da empresa, garantindo uma atualização imediata de todos os acontecimentos internos.

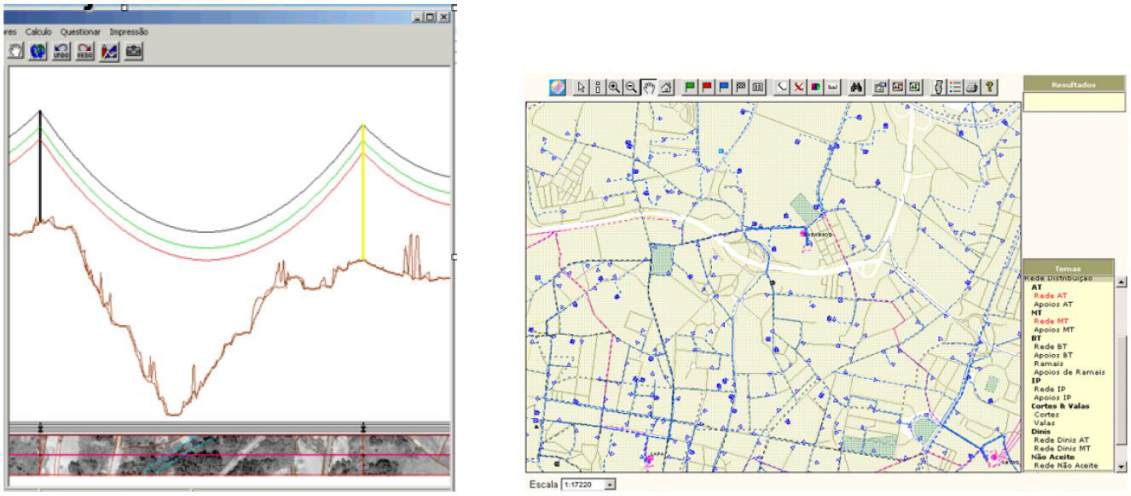


Figura 2.26: Imagens do *Software* SIT-DM [25].

2.2.5 Fases do Projeto de uma Linha Aérea AT

Num projeto de uma linha aérea de alta tensão o fator com maior influência nas decisões de investimento, é o custo-benefício. Atualmente considera-se também importante reduzir o impacto que a linha provocará no meio ambiente. Com isto, os proprietários e as entidades reguladoras impõem um nível de exigência alto, no que diz respeito a fatores de carácter ambiental e ocupacional, limitando assim, o desenvolvimento dos projetos.

Com vista a responder a estas limitações, foram definidos um conjunto de fases a ser seguidas e respeitadas durante a realização de um projeto desta dimensão [12].

2.2.5.1 Pré-Estudo

O projeto de linhas de alta tensão inicia-se sempre por uma etapa de pré-estudo.

O projeto a ser desenvolvido tem que trazer benefícios para a empresa, destacando-se os seguintes aspetos: a melhoria da qualidade de serviço do sistema; a minimização das perdas; a otimização do desempenho da rede; e o aumento da segurança da redes existentes.

As razões que levam à necessidade de construção de uma nova linha AT são as seguintes[20]:

- Necessidade de ligação de novos clientes;
- Alterações de traçados de linhas existentes;
- Remodelação de redes;
- Exploração e desenvolvimento da rede para melhoria da qualidade de serviço;
- Interligação de linhas;
- Imposições dos agentes reguladores.

Esta fase é da responsabilidade do Departamento de Planeamento da E-REDES, sendo que este inicia o projeto com a seleção da área de intervenção no SIT-DM, esta escolha é dependente dos acessos à rede e das restrições de caráter sócio-económico, físico e ambiental da região [12].

2.2.5.2 Estudo

Depois de definida a zona onde se pretende realizar o projeto da linha aérea, é essencial efetuar um estudo rigoroso sobre essa área, mais concretamente, sobre os aspetos que afetam a escolha do traçado futuro da linha. Para isso, deve-se ter em conta variados fatores que afetam a escolha do traçado, tais como:

- Autoestradas, Estradas Municipais e vias reservadas a automóveis e motociclos;
- Caminhos férreos;
- Existência de habitações;
- Vegetação do terreno;
- Altimetria do plano;
- Rios, ribeiras, linhas e cursos de agua;
- Zonas protegidas.

Cumprir com todos os critérios é uma tarefa complexa, na medida em que não será possível dar resposta a todos. No entanto, deve-se tentar reduzir ao máximo os possíveis inconvenientes para o meio envolvente, mantendo uma combinação entre o custo/impacto aceitável. Existem também zonas em que a passagem de linhas aéreas é completamente proibida, estando essas devidamente descriminadas no Artigo nº 5 e 6 do RSLEAT [5].

Para se avaliar o terreno envolvente e definir quais as zonas onde não poderá passar a linha, o Departamento de Planeamento recorre a cartas topográficas militares e às ortofotos do SIT-DM. Na Figura 2.27, são apresentados um exemplo de uma carta militar e de uma ortofoto retirada do SIT-DM.

No entanto, existem questões topográficas que estes meios não conseguem detalhar, sendo necessário realizar uma vistoria ao local, que irá contribuir para se obter uma melhor perceção do meio envolvente [12].

Com a informação toda recolhida, combina-se os dados retirados no campo com os obtidos no acesso a cartas militares e ferramentas informáticas e realiza-se vários caminhos alternativos do perfil da linha. Desta forma é possível contornar com maior facilidade eventuais limitações que se encontrem na fase de elaboração do projeto [25].

Após a elaboração dos traçados, é feita uma avaliação pela equipa de topografia, escolhendo-se o traçado mais rentável.

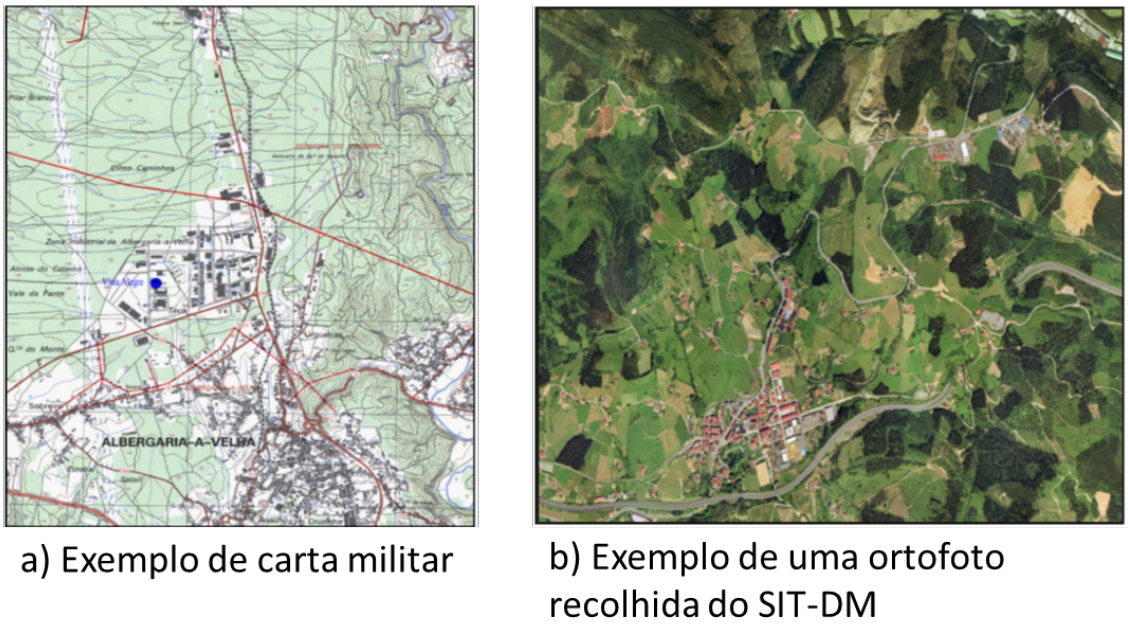


Figura 2.27: Formas de avaliar geograficamente o local do projeto. [12].

2.2.5.3 Indemnizações aos Proprietários

Esta etapa consiste na elaboração dos primeiros contactos com os proprietários dos terrenos que a linha irá afetar, comunicando-lhes a intenção de proceder à implantação de apoios, ou corte de árvores, para estabelecimento da faixa de proteção da linha, de acordo com a Lei em vigor.

2.2.5.4 Levantamento Topográfico

Nesta fase é feito um exame minucioso sobre o lugar onde vão ser implementadas as infraestruturas.

Apesar de a E-REDES possuir o seu próprio sistema de informação técnica, os levantamentos topográficos são sempre essenciais num projeto, dadas as limitações encontradas no campo na maioria dos casos.

O levantamento topográfico permite definir o perfil do terreno e a planta parcelar [26]. No decorrer de um levantamento topográfico utiliza-se sempre que possível o GPS, de modo a fazer-se o levantamento dos pontos que caracterizam, quer o perfil do terreno, quer a planta parcelar.

O levantamento topográfico começa com a definição do perfil do terreno. Para tal, escolhe-se alguns pontos relevantes, nomeadamente os pontos de fixação dos apoios e os pontos que retratam a passagem da futura linha com alguns elementos delimitadores, como as casas, as árvores, as linhas aéreas e as linhas de telecomunicações.

A parte final do levantamento topográfico é feita recorrendo a trabalhos de piquetagem e de marcação dos caboucos dos apoios, ou seja, é executada uma sinalização do terreno, através de estacas ou marcas, que permite marcar os pontos de localização dos apoios e o seu alinhamento [26].

2.2.5.5 Definição do Traçado Final

Após o levantamento topográfico estar feito, o traçado final é definido, criando-se posteriormente um ficheiro em *AutoCad* com as informações do perfil do terreno e com a planta parcelar.

No perfil do terreno, devem estar contidas todas as informações sobre o percurso da linha. Para isso, marca-se com pontos especiais as zonas que correspondem a passagem por linhas aéreas de telecomunicações ou de energia e mostra-se as limitações encontradas no terreno. Também são marcados os vértices que fazem ângulos e que correspondem necessariamente a apoios de amarração.

Na planta parcelar, são marcados os locais que requerem maior atenção na vizinhança da linha, como as linhas de água, os cursos de água, as árvores, os edifícios e as linhas aéreas já existentes de energia e telecomunicações. Também são apresentadas as restrições do terreno, como os muros, os rochedos e os terrenos que pertencem aos proprietários.

2.2.5.6 Preparação e Elaboração do Projeto

Sabendo-se o perfil cotado da linha, o próximo passo consiste na elaboração e dimensionamento do projeto. Todas as etapas envolvidas neste processo são dependentes uma das outras, uma vez que uma simples correção realizada em alguma fase, influencia diretamente os resultados da outra fase.

O engenheiro começa por calcular os parâmetros iniciais do cálculo elétrico dos cabos utilizados, posteriormente, procede ao cálculo mecânico. Com os parâmetros determinados, o objetivo seguinte passa por dimensionar os apoios, determinando a localização e função dos apoios e calculando todos os esforços envolvidos. Do mesmo modo, deve-se ter em atenção os cumprimentos de todas as distâncias regulamentares impostas pelo RSLEAT. Após concluído o cálculo mecânico, volta-se ao cálculo elétrico e analisa-se a viabilidade económica do projeto, em termos de perdas e de quedas de tensão.

Por último, é realizada a memória descritiva e justificativa do projeto e o desenho em *AutoCad* do perfil da linha.

2.2.5.7 Licenciamento

Depois de concluído o projeto, é obrigatório garantir que este obtenha a sua licença de estabelecimento junto do Ministério da Economia e da Inovação. Por sua vez, esta instituição envia a informação geral do projeto, para algumas das seguintes entidades [27]:

- Força Aérea Portuguesa;
- Estradas de Portugal, S.A;
- Câmara Municipal;
- Instituto Português do Património Arquitetónico;

- Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional;
- ARH - Administração da Região Hidrográfica;
- ANACOM- Autoridade Nacional de Comunicações;
- Outras entidades, dependendo das infraestruturas.

Estas entidades têm responsabilidades específicas no licenciamento de projetos de linhas aéreas, analisando possíveis constrangimentos que possam surgir. Caso não existam oposições ao plano apresentado, o Ministério da Economia e da Inovação emite a licença de estabelecimento que autoriza a construção da obra projetada.

2.2.5.8 Construção

Após a emissão da licença, avança-se para a construção no terreno das infraestruturas. Os trabalhos a serem realizados nesta fase são [27] :

- Piquetagem dos apoios, com a marcação do apoio no terreno e o acordo com o proprietário;
- Abertura de Valas;
- Betonagem;
- Montagem dos apoios;
- Abertura da faixa de proteção;
- Montagem dos condutores aéreos e cabos de guarda;
- Ensaios;
- Execução das caixas terminais;
- Comissionamento;
- Vistoria com o Ministério da Economia.

Capítulo 3

Aplicação de Cálculo Desenvolvida

Neste Capítulo é apresentado o desenvolvimento da aplicação de cálculo em *Matlab* com recurso a folhas *Excel* que servem de base de dados às caraterísticas dos diferentes elementos constituintes da linha elétrica área calculada. Primeiramente é explicado como são inseridos os dados de entrada da aplicação e como estão divididas as folhas de bases de dados.

Na segunda parte deste capítulo é explicado o cálculo mecânico realizado pela aplicação e é apresentado um exemplo que permite a verificar que o código desenvolvido realiza os cálculos mecânicos corretamente.

Por fim, é abordada a metodologia de cálculo e respetiva representação tridimensional presentes nesta dissertação. Posteriormente, é apresentada uma explicação do desenvolvimento do código utilizado para o calculo e representação tridimensional

3.1 Dados de Entrada

Os dados de entrada para o correto funcionamento do programa são colocados num ficheiro *Excel*, denominado de "Dados_Entrada". O ficheiro de entrada tem as seguintes folhas:

- A folha "Cabos" serve de base de dados para a folha "Condutores_Utilizados", esta contém os diferentes tipos de cabos que podem ser utilizados nas linhas aéreas, várias informações relativas a cada cabo podem ser consultadas na folha, tais como:
  - Secção [mm^2];
  - Diâmetro [mm];
  - Peso próprio [daN/m];
  - Módulo de elasticidade [daN/mm^2];
  - Coeficiente de dilatação [$^{o}C^{-1}$];
  - Tração de rutura [daN].
- A folha "Condutores_Utilizados", é o local onde o utilizador define parâmetros gerais sobre a linha, tais como o tipo de condutor e cabo de guarda a utilizar, tensão máxima, temperatura

de verão, altura ao solo, se no inverno existe gelo nas linhas ou não, tipo de linha (Galhardete, Dupla) e comprimento das cadeias de isoladores quando o apoio é em suspensão. Na Figura 3.1 é apresentada a folha "Condutores_Utilizados", onde as células a branco são as células em que o utilizador insere os dados necessários.

Cabo de Linha	Secção(mm^2)	Diâmetro(mm)	Peso Próprio (daN/m)	Mod. Elasticidade(daN/mm^2)	Coef. Dilatação(ºC^-1)	Tmax(daN)
ALACO160	157.2	16.28	0.545	7750	0.000019	4920
Cabo de Guarda	**Secção(mm^2)**	**Diâmetro(mm)**	**Peso Próprio (daN/m)**	**Mod. Elasticidade(daN/mm^2)**	**Coef. Dilatação(ºC^-1)**	**Tmax(daN)**
ACO80	81.91	11.96	0.649	18940	0.000012	6941
	tmax(daN/mm^2)	**thetai(ºC)**	**Alt_solo(m)**	**gelo(sim-1;não-0)**	**F.Vento(Pa)**	
Cabo de Fase	8	80	35	0	0	
Cabo de Guarda	18	80	35	0	0	
	Tipo de Linha (Galhardete=1;Dupla=2;Horizontal=3)				2	
	Comprimeto da cadeia de isoladores(m)				1.2	

Figura 3.1: Folha "Condutores_Utilizados"

- A folha "Localização_Postes", é o local onde o utilizador coloca as coordenadas dos apoios no formato WGS84, a cota do terreno, se o apoio é de amarração ou suspensão e a altura total do apoio, designação do poste e da armação, altura do poste fora do solo, alturas do cabo de guarda e das 3 fases em relação à altura do poste fora do solo e por último os comprimentos dos braços das 3 fases. Na figura 3.2 é apresentada a folha "Localização_Postes",onde as células a branco são as células em que o utilizador insere os dados necessários.

Apoio	Latitude	Longitude	z(Elevação)	Tipo(1-Amarração;0-Suspensão)	Altura do Apoio(m)
1	41.00792370420410	-8.59657867812291	100	1	22
2	41.00952993836700	-8.59533033222089	93	1	32
3	41.01134938661620	-8.59230440614601	106.04211	1	21
4	41.01243505862970	-8.59201518885231	102.31928	0	19.79999924

Designação	Armação	htotalposte	Hcg	H1	H2	H3	L1	L2	L3
RR4-25	RR4	22.000000	0.000000	-3.000000	-5.000000	-7.000000	2.000000	2.250000	2.500000
R5-34,5	R5	32.000000	0.000000	-3.000000	-5.000000	-7.000000	2.000000	2.250000	2.500000
RR4-24	RR4	21.000000	0.000000	-3.000000	-5.000000	-7.000000	2.000000	2.250000	2.500000
AS1	AS	19.799999	0.000000	-2.900000	-5.100000	-7.300000	2.350000	2.700000	2.350000

Figura 3.2: Folha "Apoios"

- A folha "Armações" serve de base de dados para a folha "Localização_Postes", onde estão as informações sobre as distâncias do cabo de guarda e fases ao topo do poste e os comprimentos dos braços de cada fase.

- A folha "Postes" serve de base de dados para a folha "Localização_Postes", esta contém informações sobre a altura do poste fora do solo.

Os dados de entrada são lidos pelo *script Matlab* através da função *xlsread*. Na Figura 3.3, são apresentadas as variáveis em que são guardados os dados de entrada relativos ao condutor utilizado nas fases da linha, os dados relativos ao cabo de guarda são guardados de forma semelhante por isso não são apresentados na figura.

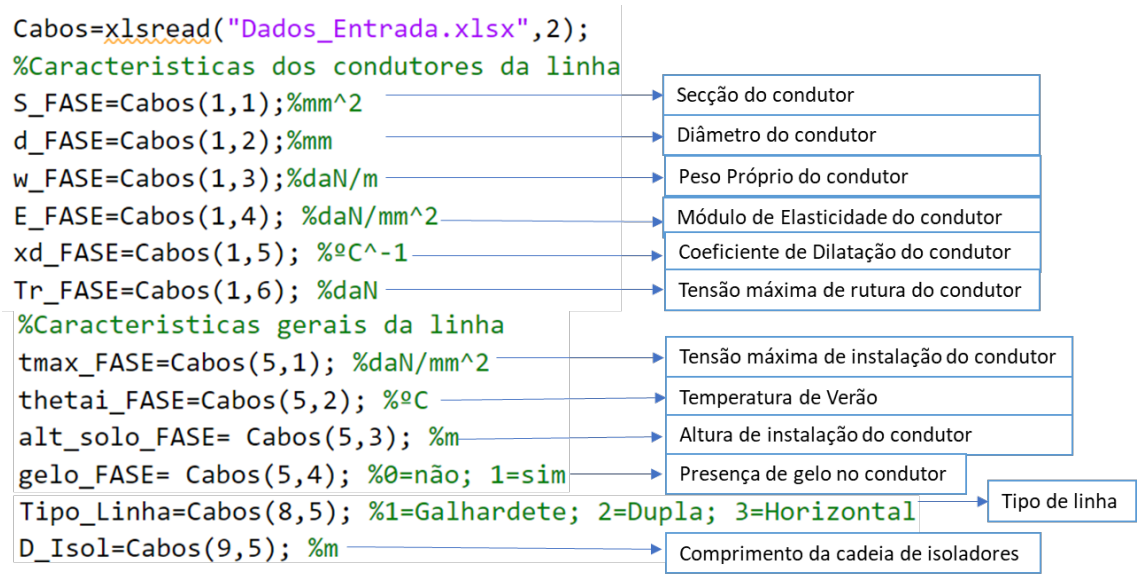


Figura 3.3: Variáveis de Entrada dos condutores das fases.

São também importados os dados de entrada da folha "Localização_Postes", para os dados da Latitude e Longitude puderem ser utilizados é necessário converte-los para formato UTM (Figura 3.4), pois este formato tem como unidade o metro e assim é possível realizar os cálculos mecânicos necessários.

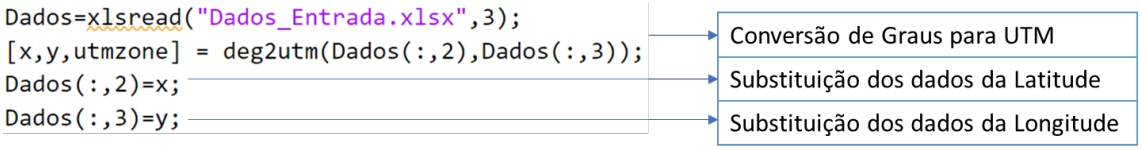


Figura 3.4: Conversão de graus para UTM.

Depois da conversão feita é criada uma matriz "L", esta consiste em que cada linha é um vão sendo a primeira coluna o número do apoio onde o vão começa, a segunda coluna é o número do apoio onde o vão acaba, a terceira coluna é o comprimento do vão em metros e por fim a quarta coluna é número do cantão a que o vão pertence, o número do cantão é determinado pelo facto se o apoio inicial do vão é de suspensão ou amarração e também se o apoio final do vão é de suspensão ou amarração . Esta matriz nova é obtida através do código apresentado na Figura 3.5.

Por fim, os últimos dados de entrada importados são as distâncias das fases ao topo de cada poste e o comprimento dos braços das fases de cada poste, também é feita uma correção das distâncias das fases para que estas sejam sempre relativamente ao cabo de guarda e não ao topo do poste, como mostra na Figura 3.6.

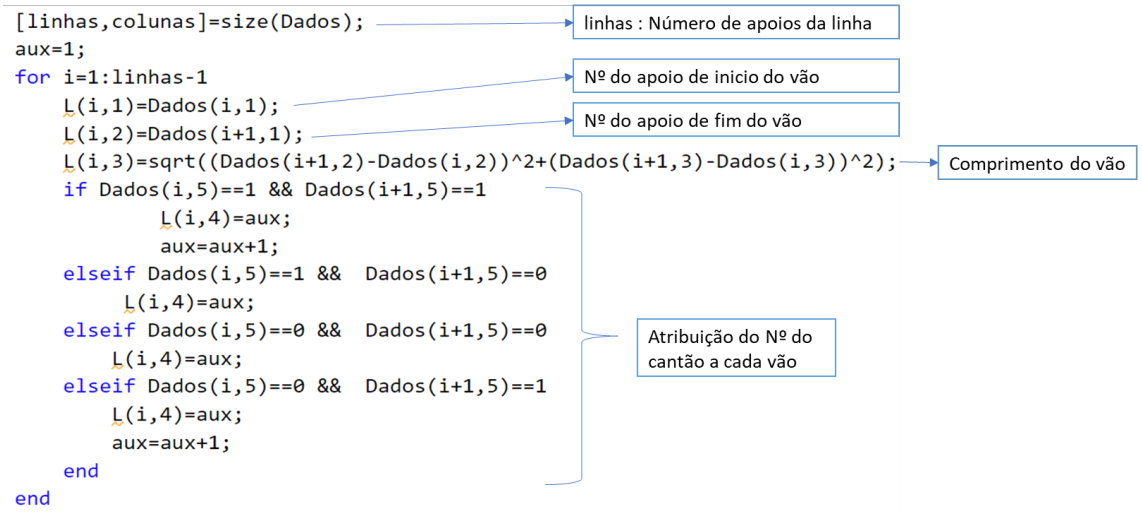


Figura 3.5: Código de construção da matriz L

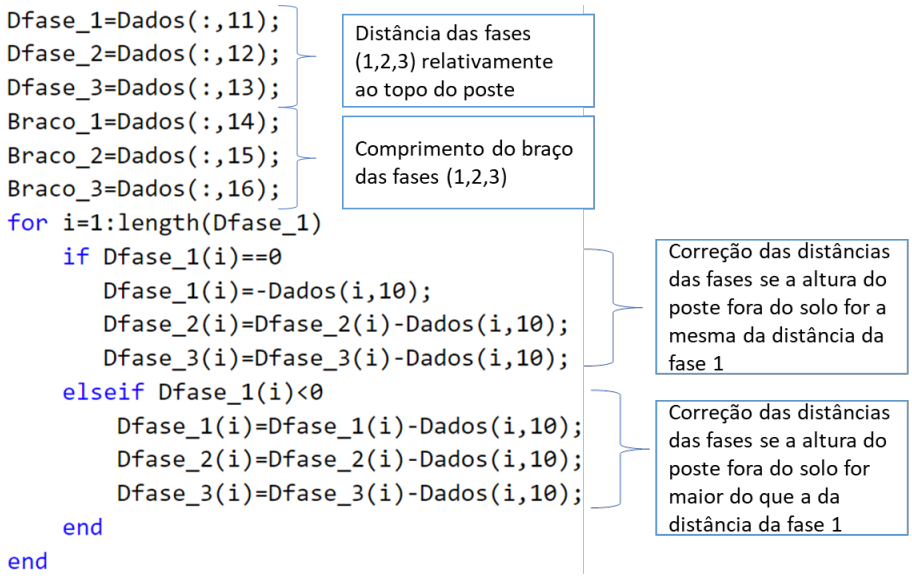


Figura 3.6: Código de obtenção dos comprimentos de braços e das distâncias entre fases e correção das distâncias se necessário.

A forma apresentada, anteriormente, de inserir os dados de entrada foi a utilizada na fase de desenvolvimento e testes da ferramenta de cálculo. Como vai ser abordado mais à frente nesta dissertação, a aplicação desenvolvida passará a ter uma interface gráfica com o utilizador. Desta forma, a introdução e processamento de dados será diferente.

Primeiramente, o que se mantém inalterado é a utilização das folhas "Cabos", "Armações"e "Postes"como base de dados para o funcionamento do programa.

Na Figura 3.7 é apresentada o local de introdução dos dados de entrada bem como o código usado para os obter. Os dados inseridos são semelhantes aos que são necessários inserir na folha "Condutores_Utilizados", com a adição das tensões de fase e cabo de guarda para as ligações aos pórticos que na fase de desenvolvimento não foram considerados.

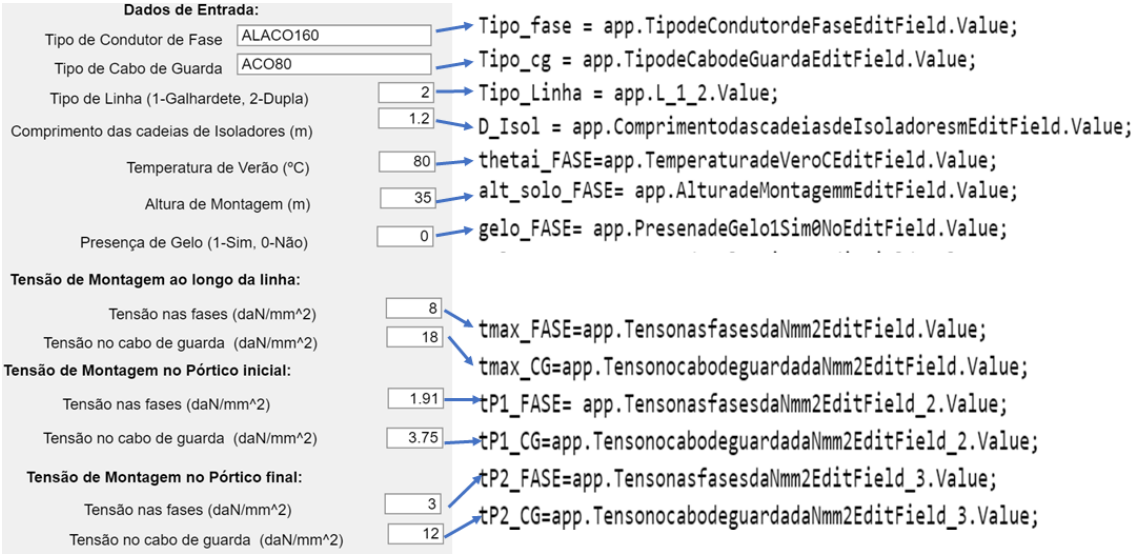


Figura 3.7: Código de entrada de dados da interface gráfica.

Com o tipo de condutor utilizado definido são então definidas as suas características automaticamente com o uso da folha "Cabos" para servir de base de dados. Na Figura 3.8 é apresentado o código que permite obter as características do cabo utilizado nas fases da linha, para o cabo de guarda o processo é semelhante. O código compara o nome do condutor introduzido com os nomes disponíveis na base de dados e enquanto não o encontrar vai avançando na lista de nomes e guardando o valor da posição. Quando encontra o nome tem a posição guardada e sai do ciclo *While* e atribui o valor às variáveis que representam as características do condutor.

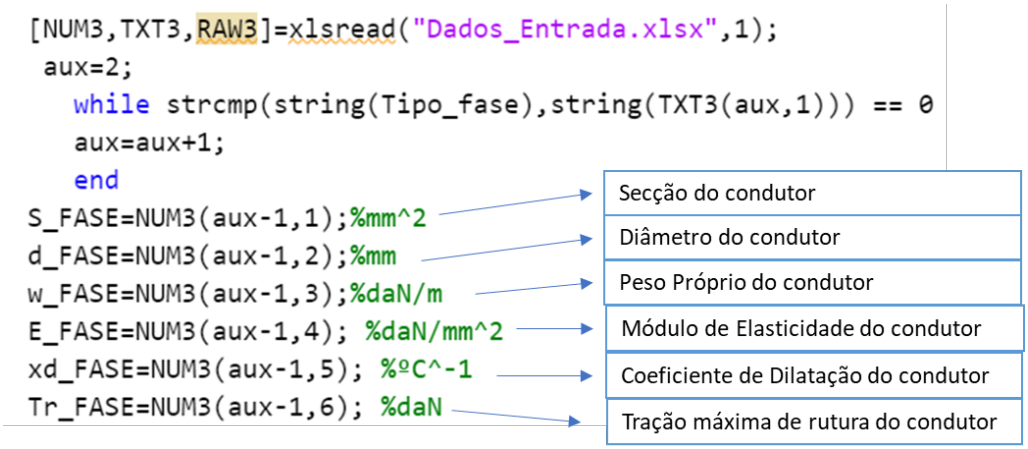


Figura 3.8: Código de atribuição dos valores das caraterísticas do condutor das fases.

Com estas alterações o preenchimento da folha "Condutores_Utilizados"já não é realizado.

Na Figura 3.9 é apresentado o botão da interface gráfica que quando carregado vai abrir uma janela de procura em que o utilizador deve selecionar um ficheiro *CVS* que contenha as seguintes informações, pela ordem apresentada, sobre os apoios e pórticos da linha:

- Número apoio;
- Latitude;
- Longitude;
- Elevação do terreno;
- Tipo de Cadeias de Isoladores (Suspensão ou Amarração);
- Nome do Poste;
- Nome da Armação.

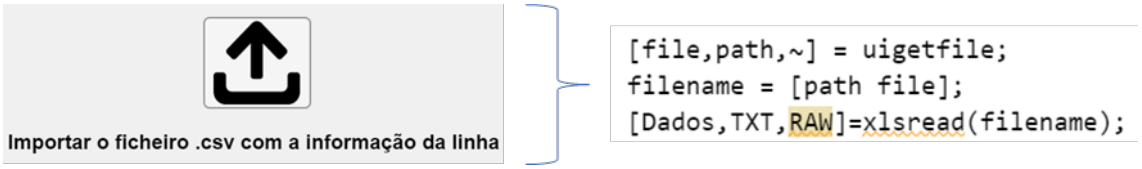


Figura 3.9: Código de busca do ficheiro com os dados dos apoios da linha.

Com a introdução do ficheiro *CVS* têm que ser adicionadas algumas informações a cada apoio, estas informações encontram-se nas folhas "Armações"e "Postes"e são as seguintes:

- Altura fora do solo do poste;
- Distâncias das fases e cabo de guarda ao fim do poste;
- Comprimento dos braços das fases.

Com estes valores é construida uma matriz "Dados" igual à que foi utilizada da fase de desenvolvimento. Para determinar os valores o pensamento do código é semelhante ao utilizado para obter as caraterísticas dos condutores. Assim na Figura 3.10 é apresentado o código de criação da matriz "Dados".

Assim não é necessário realizar mais nenhuma alteração aos dados de entrada visto que assim o código apresentado na Figura 3.5 e na Figura 3.6 vão funcionar também corretamente com estas alterações.



Figura 3.10: Código de busca do ficheiro de

3.2 Cálculo Mecânico Realizado pelo Programa

Previamente, são definidos os parâmetros necessários ao cálculo mecânico da linha, em função dos dados de entrada, tais como:

- Coeficiente de forma - Na Figura 3.11 é apresentado o código que representa a Tabela 2.1 que auxilia na escolha do coeficiente de forma em função do diâmetro do cabo.

```
%Coeficiente de forma
if d_FASE<12.5
    c_FASE=1.2;
elseif d_FASE<15.8
    c_FASE=1.1;
else
    c_FASE=1;
```

Figura 3.11: Código que representa a Tabela 2.1 que auxilia na escolha do coeficiente de forma.

Em que:

- d_Fase - Diâmetro do condutor de fase [mm];
- c_Fase - Coeficiente de forma do condutor de fase.

- Pressão dinâmica do vento - Na Figura 3.12 é apresentado o código que representa a Tabela 2.2 que auxilia na escolha da pressão dinâmica do vento na Primavera e no Inverno em função da altura de montagem da linha.

```
%Pressão dinamica no Inverno
% e na Primavera(Pa)
if alt_solo<30
    q1=300;
    q2=750;
elseif alt_solo<50
    q1=360;
    q2=900;
else
    q1=420;
    q2=1050;
end
```

Figura 3.12: Código que representa a Tabela 2.2 que auxilia na escolha da pressão dinâmica do vento.

Em que:

  - alt_solo - Altura a que o condutor está montado do solo [m];
  - q1 - Pressão dinâmica do vento no Inverno [Pa];
  - q2 - Pressão dinâmica do vento na Primavera [Pa].

- Na Figura 3.13 é apresentado o código que representa a definição da temperatura de Inverno, espessura e densidade do gelo em função se o gelo existe ou não no Inverno na linha.

```
%Temperatura de Inverno se
% existir ou não gelo
if gelo==0
    e=0;
    ro_gelo=0;
    theta_1=-5;
else
    e=10*10^-3;
    ro_gelo=900;
    theta_1=-10;
end
```

Figura 3.13: Código que representa a Tabela 2.2 que auxilia na escolha da pressão dinâmica do vento.

Em que:

- gelo - Presença de gelo na linha (0 = não existe, 1 = existe);
- e - Espessura da camada de gelo [m];
- ro_gelo - Densidade do gelo [kg/m^3];
- theta_1 - Temperatura de Inverno [^oC].

O código que vai ser apresentado é referente ao condutor de fase, pois para o cabo de guarda os cálculos são semelhantes.

Depois de terem sido definidos todos os parâmetros necessários e importados todos os dados de entrada, o Programa realiza os cálculos mecânicos a seguir apresentados;

- Força do Vento e Coeficiente de Carga - Na Figura 3.14, é apresentado o código que calcula a força do vento no Inverno e na Primavera (Equação 2.14) e o coeficiente de carga também para o Inverno e Primavera (Equação 2.15);

```
%% Cálculo Força do Vento e Coeficiente de Carga
% Inverno
Fv_Inv_FASE=0.6*c_FASE*(q1/10)*(d_FASE*10^-3); %daN/m
m_Inv_FASE=(sqrt((w_FASE+ro_gelo*(pi/4)*((d_FASE+2*e)^2-d_FASE))^2+Fv_Inv_FASE^2))/w_FASE;
% Primavera
Fv_Pri_FASE=0.6*c_FASE*(q2/10)*(d_FASE*10^-3); %daN/m
m_Pri_FASE=sqrt(w_FASE^2+Fv_Pri_FASE^2)/w_FASE;
```

Figura 3.14: Código do cálculo da Força do Vento e Coeficientes de Carga.

Em que:

- Fv_Inv_FASE e Fv_Pri_FASE - Força do vento no Inverno e Primavera, respetivamente [daN/m];
- m_Inv_FASE e m_Pri_FASE - Coeficiente de carga no Inverno e Primavera, respetivamente;
- q1 e q2 - Pressão dinâmica do vento no Inverno e na Primavera, respetivamente [Pa];
- c_FASE - Coeficiente de forma do condutor de fase;
- d_Fase - Diâmetro do condutor de fase [mm];
- w_FASE - Peso próprio do condutor [daN/m].

- Vão crítico - Na Figura 3.15, é apresentado o código que calcula o vão critico para o condutor de fase (Equação 2.16) ;

```
%% Determinação do vão critico
Lcr_FASE=((S_FASE*tmax_FASE)/w_FASE)*sqrt((24*xd_FASE*(theta_2-theta_1))/(m_Pri_FASE^2-m_Inv_FASE^2));
```

Figura 3.15: Código de cálculo do Vão Crítico.

Em que:

- Lcr_FASE - Vão crítico [m];
- S_FASE - Secção do condutor [mm^2];
- tmax_FASE - Tensão máxima aplicada ao condutor [daN/mm^2];
- w_FASE - Peso próprio do condutor [daN/m];
- xd_FASE - Coeficiente de dilatação [$ºC^{-1}$];
- theta_1 e theta_2 - Temperatura de Inverno e Primavera (15ºC), respetivamente[ºC];
- m_Inv_FASE e m_Pri_FASE - Coeficiente de carga no Inverno e Primavera, respetivamente.

- Vãos equivalentes - Na Figura 3.16. é apresentado o código que calcula os vãos equivalentes dos cantões da linha. Este código é equivalente à Equação 2.17, em que Leq_FASE(i) é o vão equivalente do cantão "i"e a 3ª coluna da matriz "L"do vão "aux"é o comprimento desse mesmo vão "aux".

```
%% Determinação dos Vãos Equivalentes
t=L(linhasL,colunasL);
aux=1;
Leq_FASE=zeros(t,1);
for i=1:t
   while L(aux,4)==i
    Leq_FASE(i)= sqrt((Leq_FASE(i)^3+L(aux,3)^3)/(Leq_FASE(i)+L(aux,3)));
    aux=aux+1;
        if aux>linhasL
        break
        end
   end
end
```

Nº de Cantões da linha

Variável que representa o número do vão que está ser utilizado no cálculo

Se a variável "aux" for superior ao número total de vãos o ciclo "while" para

Figura 3.16: Código de cálculo dos Vãos Equivalentes.

- Pior estado atmosférico - Na Figura 3.17, é apresentado o código (à esquerda) que representa o diagrama de decisão (à direita) da Figura 2.21. Tem-se assim, a temperatura e coeficiente de carga mais desfavorável para cada cantão ;

```
%% Pior Estado Atmosférico
[linhasLeq_FASE,colunasLeq_FASE]=size(Leq_FASE);
for i=1:linhasLeq_FASE
    if m_Pri_FASE > m_Inv_FASE
        if Leq_FASE(i)>Lcr_FASE
        m_FASE(i)=m_Pri_FASE;
        thetak_FASE(i)= 15;
        elseif Leq_FASE(i)==Lcr_FASE
        m_FASE(i)=m_Pri_FASE;
        thetak_FASE(i)= 15;
        else m_FASE(i)= m_Inv_FASE;
            if gelo_FASE==0
            thetak_FASE(i)= -5;
            else thetak_FASE(i)= -10;
            end
        end
    elseif m_Pri_FASE==m_Inv_FASE
    m_FASE(i)=m_Inv_FASE;
        if gelo_FASE==0
            thetak_FASE(i)= -5;
        else thetak_FASE(i)= -10;
        end
    else
    m_FASE(i)=m_Inv_FASE;
        if gelo_FASE==0
            thetak_FASE(i)= -5;
        else thetak_FASE(i)= -10;
        end
    end
end
```

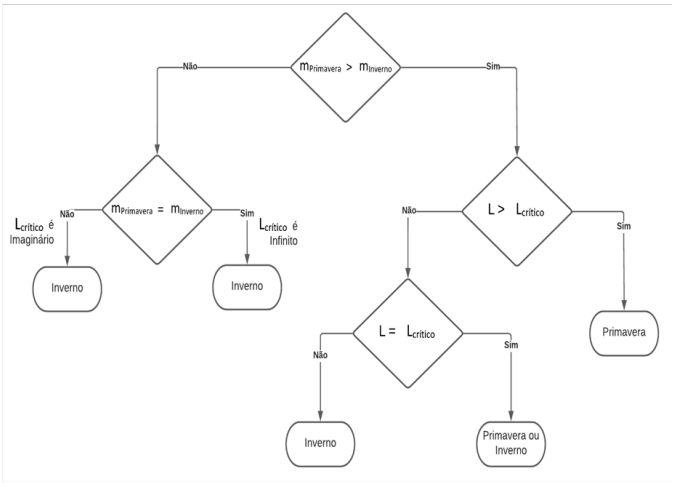


Figura 3.17: Código de escolha do Pior Estado Atmosférico.

- Resolução da equação de estado - Na Figura 3.18, é apresentado o código que resolve a equação de estados(Equação 2.18) para cada cantão, obtendo-se assim: uma matriz da tensão máxima de cada cantão[daN/mm^2] - ti_FASE, uma matriz da tensão de cada cantão[daN] - T_FASE e ainda uma matriz com os parâmetros da catenária para cada cantão [m] - p_FASE;

```
%% Equação de Estados
syms t80
for i=1:t
eq_FASE= thetai_FASE+(t80/(xd_FASE*E_FASE))-((w_FASE^2*Leq_FASE(i)^2)/(24*xd_FASE*S_FASE^2*t80^2)) ==
      thetak_FASE(i) +(tmax_FASE/(xd_FASE*E_FASE))-((m_FASE(i)^2*w_FASE^2*Leq_FASE(i)^2)/(24*xd_FASE*S_FASE^2*tmax_FASE^2));
xpto_FASE=double(solve(eq_FASE,t80));
idx_FASE=xpto_FASE>0;
ti_FASE(i)=xpto_FASE(idx_FASE);
T_FASE(i)=double(ti_FASE(i)*S_FASE);
p_FASE(i)=double(T_FASE(i)/w_FASE);
end
```

Variável simbólica que representa a tensão máxima de cada cantão na equação de estados

Resolução da equação em função da variável simbólica "t80"

Guarda a posição em que o resultado é positivo

Figura 3.18: Código de resolução de equação de estados.

- Cálculo das Flechas - Na Figura 3.19, é apresentado o código que calcula a flecha para cada vão da linha (Equação 2.20) .

```
%% Flechas
r=1;      → Variável que representa o número do cantão
aux=1;    → Variável que representa o número do vão
for i=1:t
   while L(aux,4)==r && r<t+1
     flecha_FASE(aux,1)=(1*w_FASE*L(aux,3)^2)/(8*S_FASE*ti_FASE(r));
    aux=aux+1;
    if aux>linhasL
        break
    end
   end
r=r+1;
end
```

Figura 3.19: Código de cálculo das flechas.

3.3 Exemplo de Validação

Para validar se os cálculos realizados pelo código apresentado no Capítulo 3.2 estão corretos, é resolvido no *software CLINHAS* e no programa desenvolvido, um exemplo de uma linha simples para verificar o seu correto funcionamento. Na Figura 3.20, é representada esquematicamente, a linha exemplo para validação do programa.

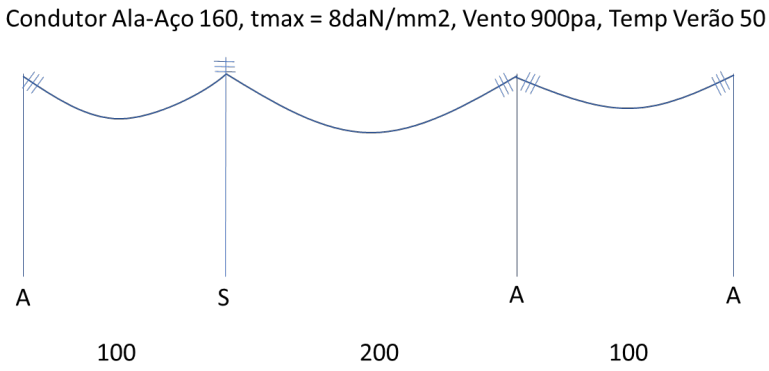


Figura 3.20: Esquema da linha exemplo.

O condutor utilizado é o ALACO160 e as suas características são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Parâmetros do cabo ALACO160

Parâmetro	Valor	Unidades
Secção	157.2	mm^2
Diâmetro	16.28	mm
Peso Próprio	0.545	daN/m
Mod. Elasticidade	7750	daN/mm
Coef. Dilatação	0.000019	$^{o}C^{-1}$
Tensão de Rutura	4920	daN

A linha é constituída por 4 apoios, sendo o 1º de amarração, o 2º de suspensão e o 3º e 4º de amarração. Tem 3 vãos e 2 cantões, o 1º vão mede 100 m, o 2º vão mede 200 m e o 3º vão mede 100 m. A altura de montagem dos condutores é de 35 m, a tensão máxima utilizada foi 8 daN/mm^2 e por fim a temperatura de Verão definida foi de 50 ºC.

Depois de inseridos os dados no Programa criado e no *CLINHAS* e decorridos os cálculos obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Resultados obtidos pelo CLINHAS e pelo Programa criado

Parâmetro	CLINHAS	Programa	|Desvio|	Desvio(%)	Unidades
Vão Equivalente 1	173.2051	173.2051	0	0	m
Vão Equivalente 2	100	100	0	0	m
Tração Montagem 1	615	614.6289	0.3711	0.060341	daN
Tração Montagem 2	486	486.4994	0.4994	0.102757	daN
Parâmetro da Catenária 1	1128	1127.8	0.2	0.01773	m
Parâmetro da Catenária 2	893	892.7	0.3	0.033595	m
Flecha Vão1-2	1.11	1.1084	0.0016	0.144144	m
Flecha Vão2-3	4.44	4.4336	0.0064	0.144144	m
Flecha Vão3-4	1.4	1.4003	0.0003	0.021429	m

Como se pode observar na Tabela 3.2 os resultados do *CLINHAS* e do Programa criado são muito semelhantes ou em alguns parâmetros iguais, sendo o maior desvio percentual verificado no cálculo da flecha do vão 1-2 e vão 2-3, sendo este inferior a 0.2 %. Pode-se assim verificar que os cálculos mecânicos realizados pelo Programa criado estão ser feitos corretamente.

3.4 Cálculo Tridimensional Realizado pelo Programa

O Programa desenvolvido tem como saída ficheiros *KML* que contém as coordenadas dos diferentes condutores e apoios de uma linha aérea AT. Para tal, foi necessário definir que a forma de calcular a parábola de cada vão. Temos então que $A(x_A, y_A, z_A)$ são as coordenadas do inicio do vão e $B(x_B, y_B, z_B)$ são as coordenadas do fim do vão.

Para determinar os valores de z das restantes coordenadas da linha, é necessário resolver o sistema de equações 3.1.

$$\begin{cases} A = (x_A, y_A, z_A) \\ B = (x_B, y_B, z_B) \\ z = \frac{x^2}{2p} + bx + c \end{cases} \tag{3.1}$$

Em que:

- p é o parâmetro da catenária;
- b, c são variáveis a calcular para cada um dos vãos.

O Sistema de equações 3.1 resolvido em ordem às variáveis b e c, é o mostrado na equação 3.2.

$$\begin{bmatrix} b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_A & 1 \\ x_B & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_A - \frac{x_A^2}{2*p} \\ z_B - \frac{x_B^2}{2*p} \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

Depois de determinadas as variáveis b e c, e definido o passo de integração em x, que neste Programa é a distância do vão em x dividida por 20, é determinar o valores de z para os pontos do vão. Na figura 3.21, é apresentada uma vista lateral esquemática de um vão que sumariza o que foi referido anteriormente.

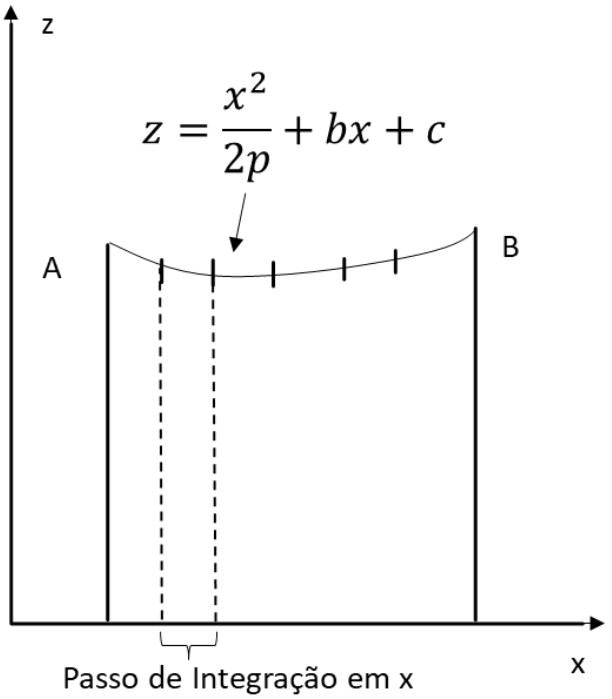


Figura 3.21: Vista lateral esquemática de um vão.

Para determinar os valores de y das restantes coordenadas da linha, é necessário resolver o sistema de equações 3.3.

$$\begin{cases} A = (x_A, y_A, z_A) \\ B = (x_B, y_B, z_B) \\ y = mx + r \end{cases} \tag{3.3}$$

Em que:

- m, r são variáveis a calcular para cada um dos vãos.

A variável m é obtida através da resolução da Equação 3.4.

$$m = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \tag{3.4}$$

Depois de obtida a variável m, obtém-se a variável r através da Equação 3.5.

$$r = y_B - m * x_B \tag{3.5}$$

Depois de determinadas as variáveis m e r, e com o mesmo passo de integração em x anteriormente definido, é possível determinar o valores de y para os pontos do vão. Na figura 3.22, é apresentada uma vista superior esquemática de um vão que sumariza o que foi referido anteriormente.

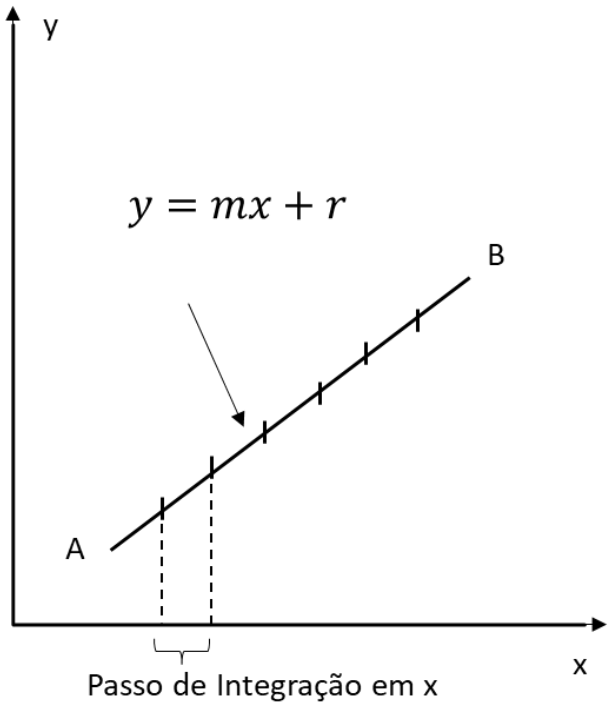


Figura 3.22: Vista superior esquemática de um vão.

Repetindo o processo para todos os condutores de fase e de cabo de guarda, em todos os vãos da linha, obtém-se todos as coordenadas dos pontos que tornam a representação da linha possível.

O Programa desenvolvido tem a capacidade de representar tridimensionalmente dois tipos de linhas (Galhardete e Dupla). Depois de os pontos serem determinados o Programa exporta-os para ficheiros *KML* e abre-os no *Google Earth*.

3.4.1 Código de Cálculo e Representação 3D

Neste Capítulo, vai ser apresentado só o código que permite obter a representação tridimensional de um cabo de uma das fases de uma linha dupla, pois para os restantes cabos e tipos de linha o processo é similar.

Primeiramente, é necessário determinar os vetores perpendiculares aos vãos da linha, para isso é necessário as coordenadas x e y do apoio inicial e do apoio final do vão, com estes dados

aplicando a Equação 3.4 obtemos o valor do declive m da reta para esse vão. Com o valor de m é possível determinar o vetor perpendicular ao vão em x e y, pois este é o inverso de o valor de m. De seguida, multiplica-se o vetor perpendicular por uma variável (comp_1) É IGUALADO ao comprimento do braço do apoio inicial, resolvendo em ordem à variável comp_1 temos o valor que é necessário multiplicar o vetor perpendicular para ser possível representar o braço de cada apoio. Na figura 3.23 é apresentado o código que realiza os passos descritos neste parágrafo.

```
syms comp_1 comp_2 comp_3
aux=2;
aux1=1;
for i=2:t-1
   while L(aux,4)==i
    A=[Dados(aux,2),Dados(aux,3)];
    B=[Dados(aux+1,2),Dados(aux+1,3)];

    m_FASE(aux1)=double((B(2)-A(2))/(B(1)-A(1)));
    u(aux1,:)=[-m_FASE(aux1),1,0];

    eq_1= sqrt((comp_1*u(aux1,1))^2+(comp_1*u(aux1,2))^2)==Braco_1(aux,1);
    xpto_FASE_1=double(solve(eq_1,comp_1));
    idx_FASE_1=xpto_FASE_1>0;
    Comp_Braco_1(aux1)=xpto_FASE_1(idx_FASE_1);

        aux=aux+1;
    aux1=aux1+1;
    if aux1>linhasL
        break
    end
   end
end
```

Coordenadas x e y do apoio inicial e final do vão

Cálculo de "m"

Vetor Perpendicular

Determinação da variável necessária para obter o correto comprimento do braço do apoio

Figura 3.23: Código de determinação do vetor perpendicular em x e y do vão e variável de correto comprimento do braço.

De seguida, é realizado o cálculo tridimensional da linha aérea de transporte, para isso são necessárias as coordenadas x, y e z do apoio inicial do vão(A) e do apoio final do vão (B), o valor z é a altura da cota mais a altura total do apoio, mas se o apoio for em suspensão subtrai-se ao z o comprimento da cadeia de isoladores, como mostra na Figura 3.24.

```
if Dados(aux,5)==1 && Dados(aux+1,5)==0
 A=[Dados(aux,2),Dados(aux,3),Dados(aux,4)+Dados(aux,6)];
 B=[Dados(aux+1,2),Dados(aux+1,3),Dados(aux+1,4)+Dados(aux+1,6)-D_Isol];
elseif Dados(aux,5)==1 && Dados(aux+1,5)==1
 A=[Dados(aux,2),Dados(aux,3),Dados(aux,4)+Dados(aux,6)];
 B=[Dados(aux+1,2),Dados(aux+1,3),Dados(aux+1,4)+Dados(aux+1,6)];
elseif Dados(aux,5)==0 && Dados(aux+1,5)==0
  A=[Dados(aux,2),Dados(aux,3),Dados(aux,4)+Dados(aux,6)-D_Isol];
  B=[Dados(aux+1,2),Dados(aux+1,3),Dados(aux+1,4)+Dados(aux+1,6)-D_Isol];
elseif Dados(aux,5)==0 && Dados(aux+1,5)==1
  A=[Dados(aux,2),Dados(aux,3),Dados(aux,4)+Dados(aux,6)-D_Isol];
  B=[Dados(aux+1,2),Dados(aux+1,3),Dados(aux+1,4)+Dados(aux+1,6)];
end
```

aux - número do vão
Nº da coluna da matriz Dados:
2 – x;
3 – y;
4 – cotado terreno;
5 – (1-Amarração, 0-Suspensão)
6 – altura total do poste.
D_Isol – Comprimento da cadeia de isoladores

Figura 3.24: Código de atribuição dos valores de x, y e z aos pontos de inicio e fim de vão.

Após A e B estarem determinados são criadas novas variáveis em função destes dois, pois os condutores não se encontram alinhados com os apoios, estes estão fixos em braços e cadeias de amarração (cadeia de amarração desprezada nos apoios em amarração).

Primeiramente, atribui-se às novas variáveis as coordenadas de A e B deslocadas perpendicularmente para a esquerda ou direita (dependendo da fase a calcular) do comprimento do seu braço. De seguida subtrai-se ao valor de z a distância do topo do apoio ao braço da fase, os passos não dependem se o apoio é de amarração ou suspensão, pois essa distensão é feita com a subtração ao valor de z o comprimento da cadeia de isoladores.

Na Figura 3.25, é apresentado um esquema com os passos anteriormente referidos para a obtenção do ponto A_L11, que pertence à fase L11.

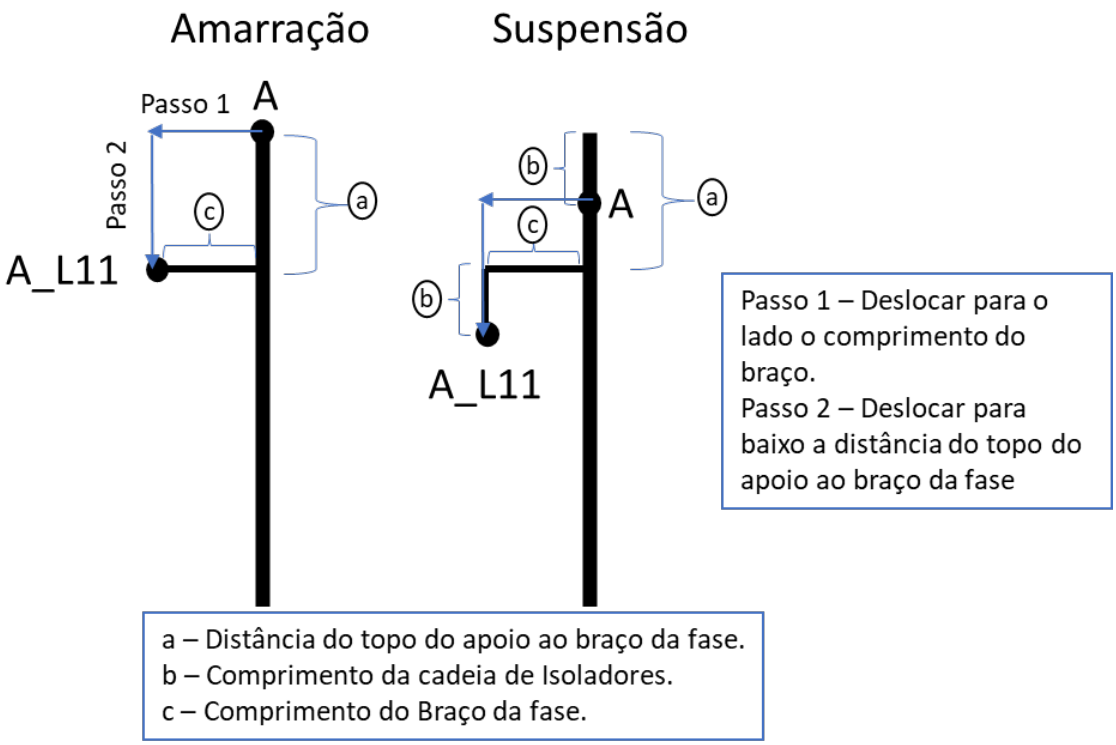


Figura 3.25: Esquema de obtenção do ponto A_L11, que pertence à fase L11.

Na Figura 3.26 é apresentado o código que permite obter o ponto A_L11 e B_L11. Na primeira linha de código é feita a deslocação do comprimento do braço e na segunda linha é feita a deslocação da distância distância do topo do apoio ao braço.

```
A_L11(aux1,:)= A(1,:)-(Comp_Braco_1(aux1)*u(aux1,:));
A_L11(aux1,3)=A(1,3)+(-abs(Dfase_1(aux)));
B_L11(aux1,:)=B(1,:)-(Comp_Braco_1(aux1+1)*u(aux1+1,:));
B_L11(aux1,3)=B(1,3)+(-abs(Dfase_1(aux+1)));
```

Figura 3.26: Código de obtenção do ponto A_L11 e B_L11, que pertence à fase L11.

Com os pontos A_L11 e B_L11 determinados pode-se calcular tridimensionalmente o vão. No ponto 1 da Figura 3.27, é apresentado o código da Equação 3.2 que calcula o valor de "b"e

"c"para o vão a calcular. No ponto 2 da Figura 3.27, é apresentado o código da Equação 3.4 e da Equação 3.5 que calculam os valores de "m"e "r", respetivamente, para o vão a calcular.

```
XA_L11=[A_L11(aux1,1) 1
        B_L11(aux1,1) 1];
XB_L11=[A_L11(aux1,3)-((A_L11(aux1,1)^2)/(2*p_FASE(i)))
        B_L11(aux1,3)-((B_L11(aux1,1)^2)/(2*p_FASE(i)))];
XR_L11=double(XA_L11\XB_L11);
b_L11(aux1)=XR_L11(1);
c_L11(aux1)=XR_L11(2);
m_L11(aux1)=double((B_L11(aux1,2)-A_L11(aux1,2))/(B_L11(aux1,1)-A_L11(aux1,1)));
r_L11(aux1)=double(B_L11(aux1,2)-m_L11(aux1)*B_L11(aux1,1));
```

1

2

Figura 3.27: Código de cálculo dos parâmetros "b", "c", "m"e "r"do vão de A_L11 a B_L11.

Com os parâmetros "b", "c", "m"e "r"para o vão calculados, a aplicação inicia a representação do vão com a representação tridimensional do braço e da cadeia de isoladores (caso o apoio seja de suspensão) para o apoio inicial do vão. Na Figura 3.28, é apresentado o código para representação dos braços e cadeias de isoladores do apoio inicial do vão de A_L11 a B_L11 com a indicação do que cada ponto representa fisicamente. Como a representação é feita através de segmentos de reta ligados é necessário voltar ao ponto de partida pelo mesmo caminho para que a representação seja bem realizada, tal como é apresentado na figura.

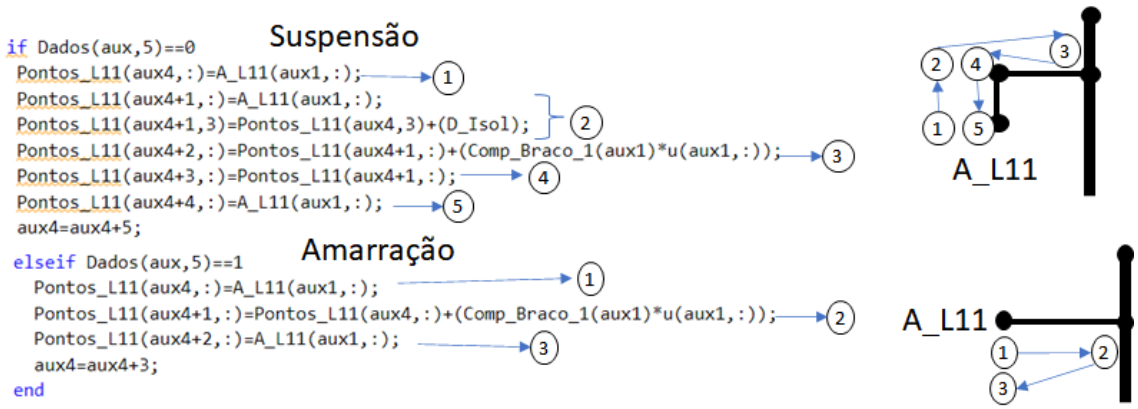


Figura 3.28: Código de representação dos braços e cadeias de isoladores do apoio inicial do vão de A_L11 a B_L11.

Depois de realizada a representação do braço e cadeia de isoladores do apoio inicial do vão, a aplicação realiza o cálculo e representação tridimensional da cabo do vão, começando por calcular o passo de integração em "x", que é igual a 1/20 do comprimento do vão em "x". O passo de em "x"é utilizado num processo iterativo para calcular as coordenadas de pontos do vão utilizando a Equação 3.1 e a Equação 3.3. Na Figura 3.29 é apresentado o código de cálculo do passo de integração em "x"e e do processo iterativo referido anteriormente.

```
  aux2_L11=(abs(A_L11(aux1,1)-B_L11(aux1,1)))/20;
  aux3_L11=0;
for f=1:20
    z_L11(f,aux1)=double((((A_L11(aux1,1)+aux3_L11)^2)/(2*p_FASE(i)))+b_L11(aux1)*(A_L11(aux1,1)+aux3_L11)+c_L11(aux1));
    x_L11(f,aux1)=double(A_L11(aux1,1)+aux3_L11);
    y_L11(f,aux1)=double((A_L11(aux1,1)+aux3_L11)*m_L11(aux1)+r_L11(aux1));
    aux3_L11=aux3_L11+aux2_L11;
    Pontos_L11(aux4,1)= x_L11(f,aux1);
    Pontos_L11(aux4,2)= y_L11(f,aux1);
    Pontos_L11(aux4,3)= z_L11(f,aux1);
    aux4=aux4+1;
end
```

Passo de Integração em x

Coordenada x

Coordenada y

Coordenada z

Figura 3.29: Código de cálculo e representação do vão de A_L11 a B_L11.

Os passos anteriormente descritos são repetidos para todos os condutores de todos os vãos da linha. De seguida, as coordenadas de utm são convertidas em graus (WGS 84) com a função "utm2deg", depois de convertidas as unidades das coordenadas é gerado um ficheiro *KML* que permite a visualização da linha no *Google Earth*, o ficheiro é gerado através de uma função denominada de "kmlwriteline2". Na Figura 3.30 é apresentado o código de conversão de coordenadas e criação de ficheiros *KML* para uma linha dupla.

```
[Lat_CG,Lon_CG] = utm2deg(Pontos_CG(:,1),Pontos_CG(:,2),utmzone_CG);
[Lat_L11,Lon_L11] = utm2deg(Pontos_L11(:,1),Pontos_L11(:,2),utmzone_braco);
[Lat_L12,Lon_L12] = utm2deg(Pontos_L12(:,1),Pontos_L12(:,2),utmzone_braco);
[Lat_L21,Lon_L21] = utm2deg(Pontos_L21(:,1),Pontos_L21(:,2),utmzone_braco);
[Lat_L22,Lon_L22] = utm2deg(Pontos_L22(:,1),Pontos_L22(:,2),utmzone_braco);
[Lat_L31,Lon_L31] = utm2deg(Pontos_L31(:,1),Pontos_L31(:,2),utmzone_braco);
[Lat_L32,Lon_L32] = utm2deg(Pontos_L32(:,1),Pontos_L32(:,2),utmzone_braco);
```

Conversão de Coordenadas

```
filename1=[path 'Caboguarda.kml'];
filename2=[path 'L11.kml'];
filename3=[path 'L12.kml'];
filename4=[path 'L21.kml'];
filename5=[path 'L22.kml'];
filename6=[path 'L31.kml'];
filename7=[path 'L32.kml'];
```

Nomear os ficheiros kml gerados

```
kmlwriteline2(filename1,Lat_CG,Lon_CG,real(Pontos_CG(:,3)));
kmlwriteline2(filename2,Lat_L11,Lon_L11,real(Pontos_L11(:,3)));
kmlwriteline2(filename3,Lat_L12,Lon_L12,real(Pontos_L12(:,3)));
kmlwriteline2(filename4,Lat_L21,Lon_L21,real(Pontos_L21(:,3)));
kmlwriteline2(filename5,Lat_L22,Lon_L22,real(Pontos_L22(:,3)));
kmlwriteline2(filename6,Lat_L31,Lon_L31,real(Pontos_L31(:,3)));
kmlwriteline2(filename7,Lat_L32,Lon_L32,real(Pontos_L32(:,3)));
```

Criação dos ficheiros kml

Figura 3.30: Código de conversão de coordenadas e criação de ficheiros *KML* para uma linha dupla.

Por fim, é feita a representação dos pórticos de inicio e fim de linha. Só vai ser apresentado o de inicio de linha, pois o de fim de linha é realizado de forma similar.

Para calcular e representar os condutores que ligam o pórtico ao apoio o processo é o mesmo do acima descrito. Desta forma a único processo novo é o de representação tridimensional do pórtico. Na Figura 3.31, é apresentado o código de representação do pórtico inicial da linha, a representação deste assenta todo no ponto A_P1_L2, pois é o ponto central do pórtico e a coordenada

deste é um dado de entrada.

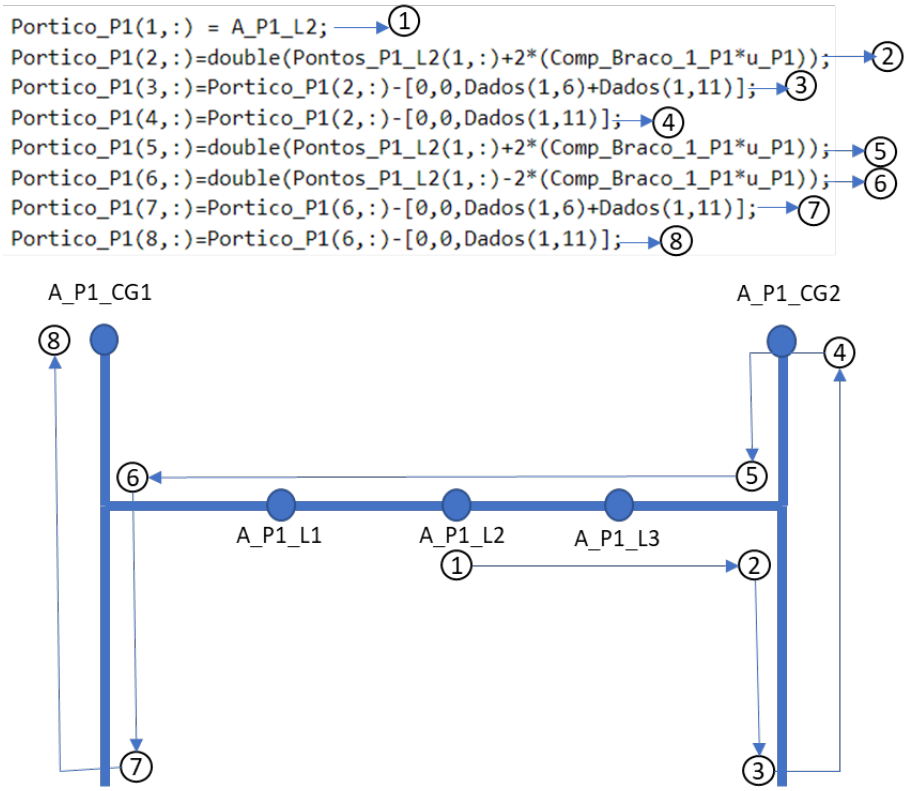


Figura 3.31: Código de representação do Pórtico inicial.

Como se pode observar na Figura 3.31, para representar um pórtico são apenas necessários 8 pontos.

Capítulo 4

Utilização da Aplicação LAT3D

Neste Capítulo é apresentado o manual de instruções da aplicação desenvolvida nesta dissertação, denominada de LAT3D. Primeiramente, é mostrado o processo de instalação do executável. De seguida é apresentado o modo de utilização do programa, são abordados a forma de entrada de dados e alguns cuidados a ter para uma correta utilização do *software*.

4.1 Instalação da Aplicação

Para iniciar a instalação é necessário executar como administrador o ficheiro "LAT3D_installer.exe". Depois de ser fornecida a autorização para instalar a aplicação, surge a janela apresentada na Figura 4.1.

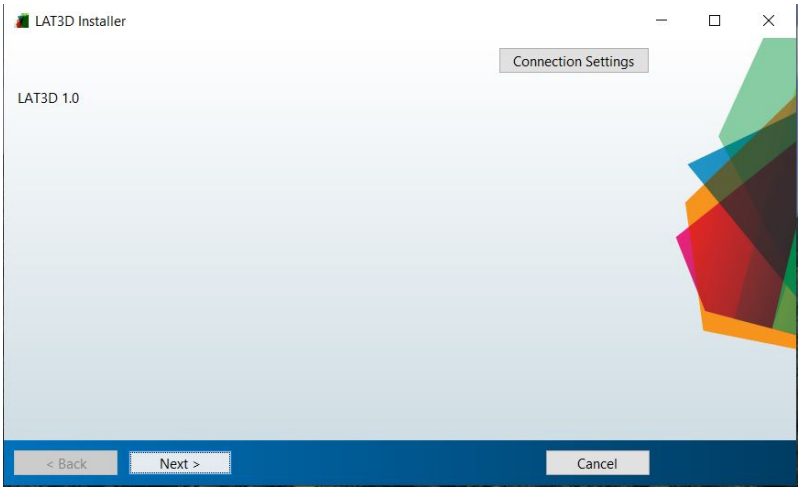


Figura 4.1: Janela inicial da instalação do Programa LAT3D.

Carrega-se no botão "Next"e aparece de seguida a janela apresentada na Figura 4.2 onde o utilizador define o local onde vai ser instalada a aplicação e se que gerar um icon da aplicação no ambiente de trabalho, quando terminar o utilizador pressiona o botão "Next".

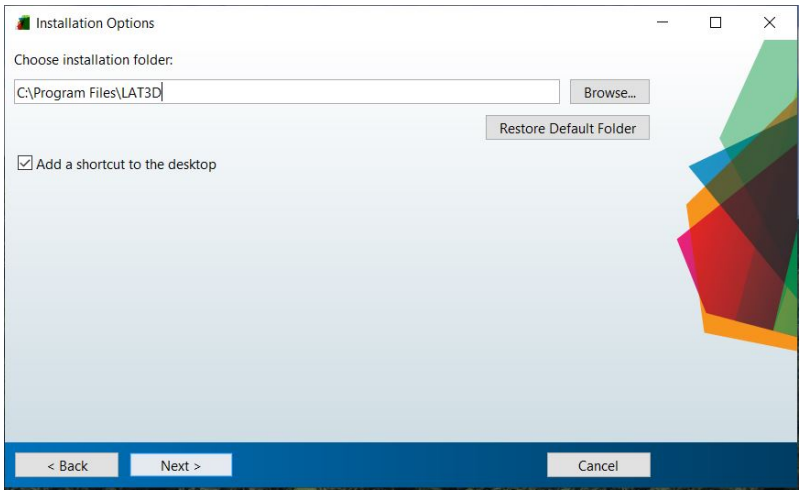


Figura 4.2: Escolha do local a instalar o LAT3D.

De seguida aparece a janela mostrada na Figura 4.3 onde o utilizador define o local de instalação do MATLAB Runtime, este programa é necessário para o programa LAT3D funcione, quando o local estiver escolhido o utilizador carrega mais uma vez no botão "Next".

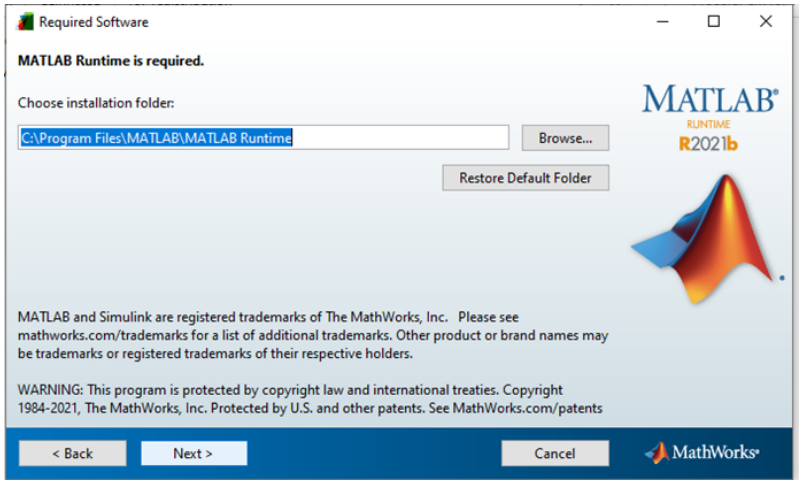


Figura 4.3: Escolha do local a instalar o MATLAB Runtinme.

Aparece então a janela apresentada na Figura 4.4 onde o utilizador precisa de selecionar a opção "Yes"aceitando assim o contrato de licença para prosseguir com a instalação do MATLAB Runtime.

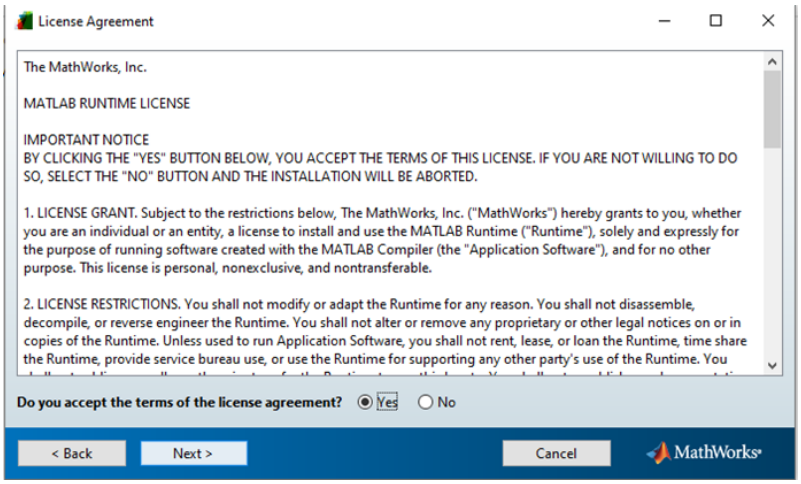


Figura 4.4: Aceitação da Licença de Contrato do MATLAB Runtinme.

Por fim, aparece uma janela como mostra a Figura 4.5 onde é apresentado o resumo das aplicações a instalar e o local. O utilizador carrega no botão "Install"e a instalação começa. No final da instalação surge uma janela com a mensagem "Installation completed successfully,"e o programa está pronto a ser usado.

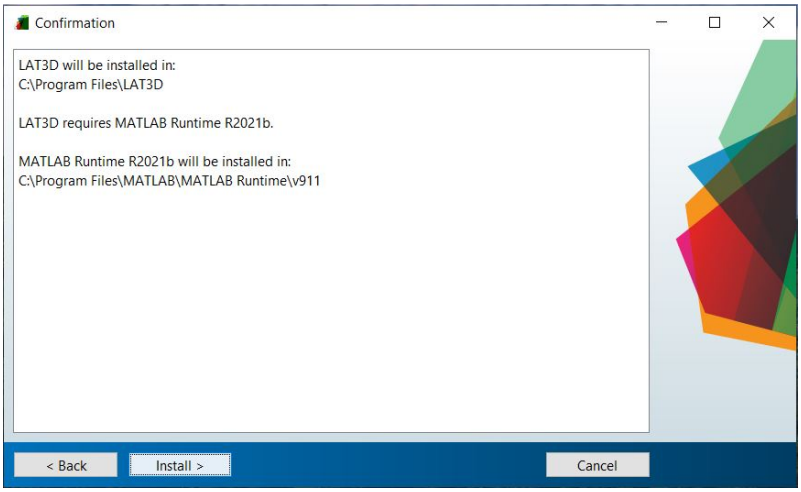


Figura 4.5: Ordem de Instalação do LAT3D e MATLAB Runtime.

4.2 Utilização da Aplicação

Quando a instalação do programa LAT3D está concluída o programa está pronto a ser utilizado. Quando inicializado o programa, surge a janela de interface gráfica apresentada na Figura 4.6.

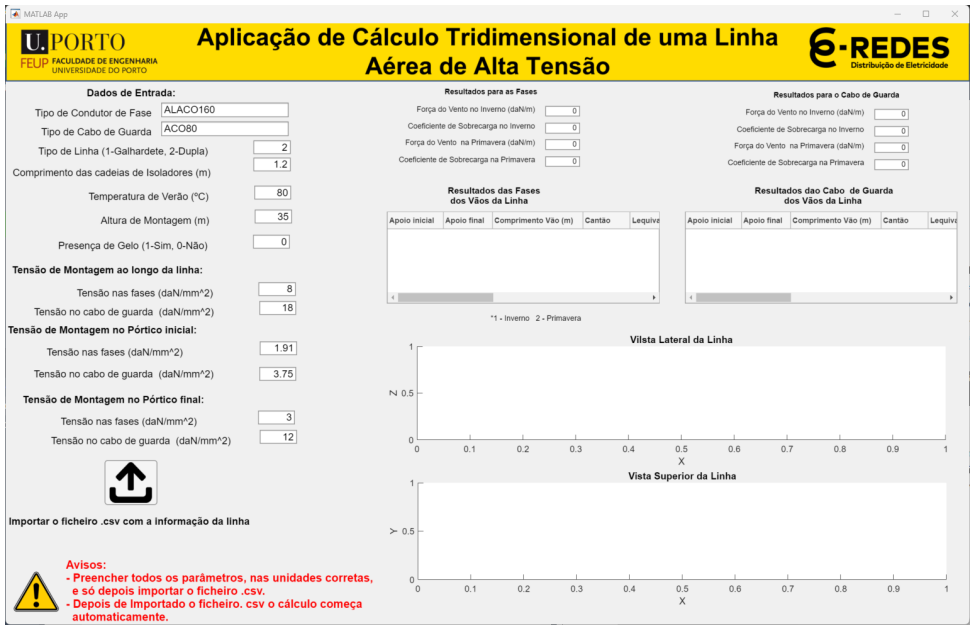


Figura 4.6: Janela de Interface Gráfica do programa LAT3D.

No lado esquerdo da janela de interface gráfica encontram-se os dados de entrada. Por defeito surgem sempre os valores e nomes de condutores da forma apresentada na Figura 4.7, no entanto estes dados podem alterados conforme a necessidade do utilizador.

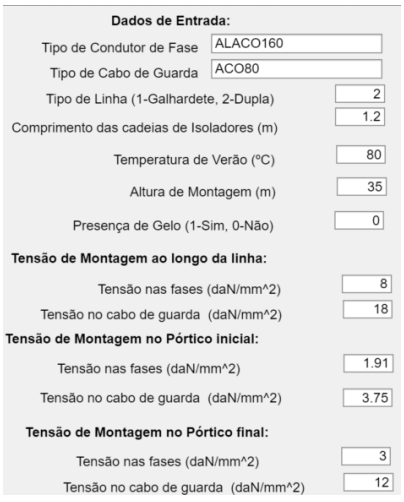


Figura 4.7: Local de introdução de dados sobre a linha.

Depois de introduzidos os dados de entrada iniciais nas caixas o utilizador deve clicar no botão apresentado na Figura 4.8. Depois de clicar vai abrir uma janela onde permite ao utilizador

procurar no seu dispositivo o ficheiro *CSV* que contém a restante informação da linha.



Figura 4.8: Botão de importação do ficheiro *CSV*.

A primeira fila de dados do ficheiro *CSV* tem que ser igual ao apresentado na Figura 4.9 senão o LAT3D não vai funcionar, e a segunda linha deve conter a informação do pórtico inicial da linha e a partir dai as seguintes linhas são os apoios por ordem da linha e a última linha tem que conter a informação do pórtico final da linha.

```
Apoio;Latitude;Longitude;z(Elevação);"Tipo(1-Amarração;0-Suspensão)";Poste;Armação
1;41.0078106;-8.596538801;100;1;PORTICO;PORTICO
2;41.0079237;-8.596578678;100;1;RR4-25;RR4
```

Figura 4.9: Exemplo do inicio de um ficheiro *CSV* .

Depois de carregar o ficheiro *CSV* para a aplicação o cálculo começa automaticamente. No lado direito de interface gráfica são apresentados os valores obtidos para os cálculos mecânicos efetuados para os condutores de fase e cabo de guarda (Figura 4.10) e as representações tridimensionais obtidas quando procedemos ao cálculo tridimensional de uma linha elétrica aérea (Figura 4.11). Os ficheiros .kml serão criados e armazenados no mesmo local em que estiver o ficheiro de entrada *CSV*.

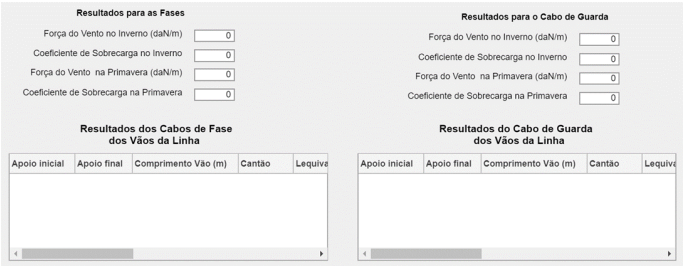


Figura 4.10: Local dos resultados do cálculo mecânico do LAT3D .

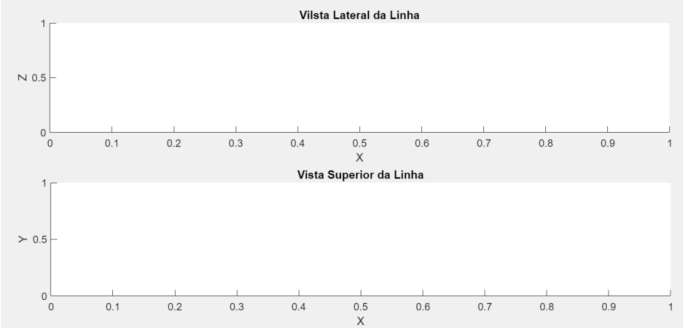


Figura 4.11: Local dos resultados do cálculo mecânico do LAT3D .

Capítulo 5

Caso de Estudo

Na primeira parte deste capítulo é apresentada a linha escolhida para testar as capacidades da aplicação desenvolvida. Primeiramente, são apresentadas as características da linha, assim como quais os cabos utilizados, número e tipo de apoios e a sua localização.

De seguida, são apresentados os resultados obtidos dos cálculos mecânicos realizados pela aplicação para a linha elétrica aérea escolhida.

Por último é mostrado o resultado dos cálculos de representação tridimensional para a linha em estudo.

5.1 Linha AT de Nogueira da Regedoura - Pedroso

A linha aérea AT escolhida para testar as capacidades do programa LAT3D é a linha aérea de Nogueira da Regedoura - Pedroso, é uma linha dupla de tensão 60 kV, com um comprimento total de 7317 metros. Na Figura 5.1, é apresentado o perfil de elevação do terreno onde se encontra instalada a linha. Como se pode observar pela figura, trata-se de um percurso com ganhos e perdas de elevação, com uma cota mínima de cerca de 80 metros e uma cota máxima de 182 metros.

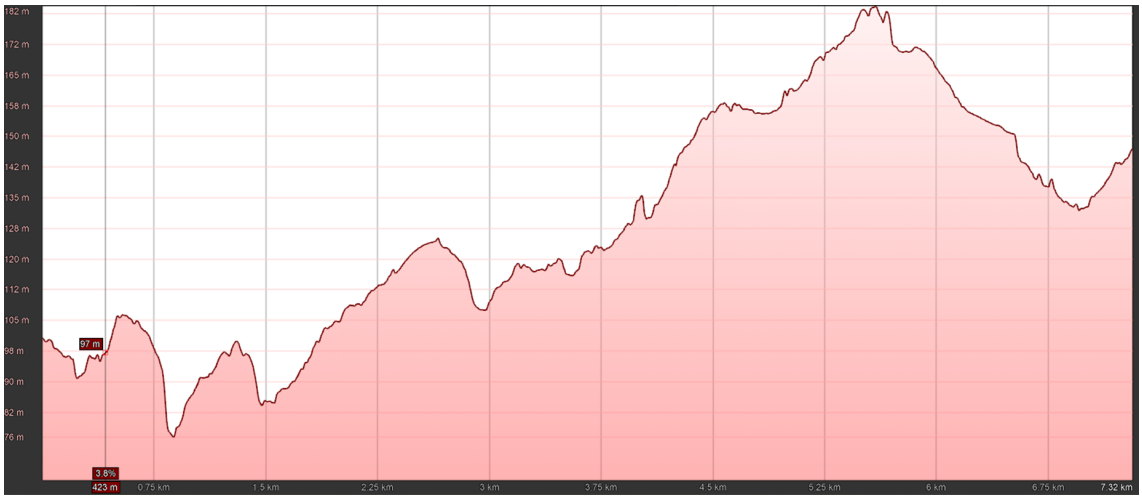


Figura 5.1: Perfil de elevação do terreno da linha Nogueira da Regedoura-Pedroso.

5.1.1 Características do Condutor e Cabo de Guarda

Nesta linha em estudo o cabo que se encontra em utilização para os condutores de fase é o ALACO160, cujas características são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Características do Condutor ALACO160

Parâmetro	Valor	Unidades
Secção	157.2	mm^2
Diâmetro	16.28	mm
Peso Próprio	0.545	daN/m
Mod. Elasticidade	7750	daN/mm
Coef. Dilatação	0.000019	$^{o}C^{-1}$
Tensão de Rutura	4920	daN

O cabo utilizado nesta linha para cabo de guarda é ACO80, cujas características são apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Características do Cabo de Guarda ACO80

Parâmetro	Valor	Unidades
Secção	81.91	mm^2
Diâmetro	11.96	mm
Peso Próprio	0.649	daN/m
Mod. Elasticidade	18940	daN/mm
Coef. Dilatação	0.000012	$^{o}C^{-1}$
Tensão de Rutura	6941	daN

5.1.2 Apoios da Linha

A linha é composta por 36 apoios, desses um é o pórtico na subestação de Nogueira da Regedoura e um é o pórtico na subestação de Pedroso.

As coordenadas dos apoios, o tipo de apoio (amarração ou suspensão), a designação dos postes e respetivas armações são apresentados na Tabela 5.3

Tabela 5.3: Apoios da Linha AT de Nogueira da Regedoura - Pedroso.

Apoio	**Latitude**	**Longitude**	**z(Elevação)**	**Tipo (1-Amarração; 0-Suspensão)**	**Poste**	**Armação**
1	41.00781	-8.59654	100.00	1	PORTICO	PORTICO
2	41.00792	-8.59658	100.00	1	RR4-25	RR4
3	41.00953	-8.59533	93.00	1	R5-34,5	R5
4	41.01135	-8.59230	106.04	1	RR4-24	RR4
5	41.01244	-8.59202	102.32	0	AS1	AS
6	41.01367	-8.59169	93.08	0	AS1	AS
7	41.01596	-8.59108	90.42	0	AS1	AS
8	41.01743	-8.59068	96.70	0	AS2	AS
9	41.01877	-8.59033	96.37	1	AR1	AR
10	41.02102	-8.58868	87.65	0	AS2	AS
11	41.02273	-8.58742	102.03	0	AS2	AS
12	41.02438	-8.58622	108.84	1	AR2	AR
13	41.02671	-8.58451	117.95	0	AE-32	AE
14	41.02886	-8.58293	123.41	0	AE-32	AE
15	41.03180	-8.58077	112.84	0	AS2	AS
16	41.03327	-8.57970	118.38	0	AS1	AS
17	41.03496	-8.57846	117.51	0	AS1	AS
18	41.03707	-8.57691	121.11	0	AS2	AS
19	41.03931	-8.57527	129.55	0	AS2	AS
20	41.04150	-8.57366	145.73	0	AS1	AS
21	41.04267	-8.57280	153.55	1	P3000/28	P3000/EV3
22	41.04470	-8.57155	155.96	1	AS2	AS
23	41.04669	-8.57036	156.13	0	SD3	SD3
24	41.04822	-8.56945	165.33	0	P3000/26	P3000/EV3
25	41.04992	-8.56844	169.92	0	P3000/30	P3000/EV3
26	41.05157	-8.56746	179.91	0	P3000/24	P3000/EV3
27	41.05269	-8.56679	181.18	0	AS1	AS
28	41.05381	-8.56612	170.00	0	SD3	SD3
29	41.05559	-8.56506	163.59	0	SD2	SD2
30	41.05712	-8.56415	153.59	0	DS8	DS8
31	41.05865	-8.56324	152.00	1	RD5	RD5
32	41.06110	-8.56180	136.76	1	RS140-26,8	RS140/41 A
33	41.05977	-8.55938	130.86	1	RS31-29,6	RS31/5 a
34	41.05849	-8.55692	141.11	1	RS42-29,3	RS42/5 a
35	41.05775	-8.55573	144.17	1	RS63-21,6	RS63/110 D
36	41.05769	-8.55550	145.10	1	PORTICO	PORTICO

5.2 Dados de Entrada

Para a realizar o cálculo e representação tridimensional da linha elétrica aérea Nogueira da Regedoura - Pedroso foi definido que a temperatura de Verão são 80 ºC, altura de montagem é 35 metros e que não há presença de gelo no Inverno. O comprimento da cadeia de isoladores é de 1.2 metros.

As tensões de montagem para os condutores das fases são :

- Ao longo da linha : 8 daN/mm^2
- Do pórtico inicial para o primeiro apoio : 1.91 daN/mm^2
- Do último apoio para o pórtico final : 3 daN/mm^2

As tensões de montagem para os condutores do cabo de guarda são :

- Ao longo da linha : 18 daN/mm^2
- Do pórtico inicial para o primeiro apoio : 3.75 daN/mm^2
- Do último apoio para o pórtico final : 12 daN/mm^2

No Programa LAT3D os dados de entrada, anteriormente, referidos são introduzidos como mostra na Figura 5.2.

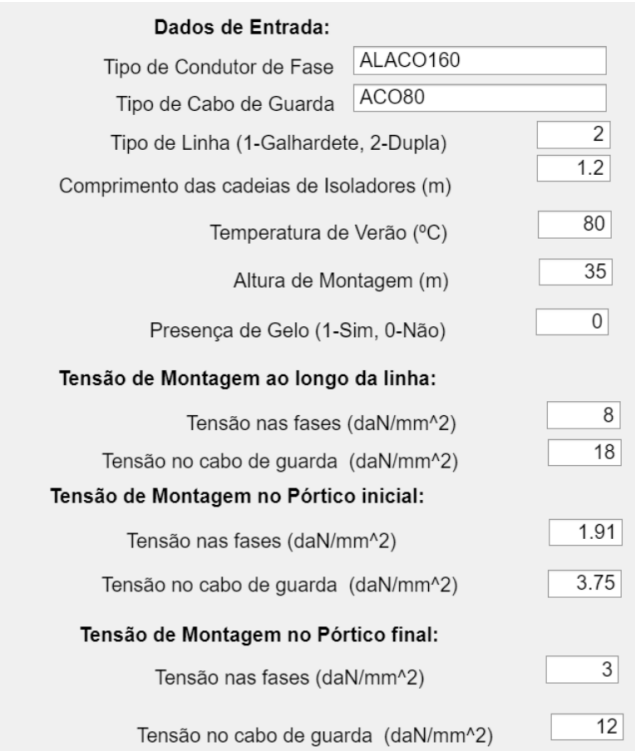


Figura 5.2: Entrada de dados iniciais no LAT3D referentes à linha AT Nogueira da Regedoura - Pedroso.

Com os dados sobre os apoios, mencionados no Capítulo 5.3,é criado um ficheiro *CSV* denominado de "Apoios_L1134", como mostra na Figura 5.3.

*Apoios_L1134 - Bloco de notas

Ficheiro Editar Ver

```
Apoio;Latitude;Longitude;z(Elevação);"Tipo(1-Amarração;0-Suspensão)";Poste;Armação
1;41.0078106;-8.596538801;100;1;PORTICO;PORTICO
2;41.0079237;-8.596578678;100;1;RR4-25;RR4
3;41.00952994;-8.595330332;93;1;R5-34,5;R5
4;41.01134939;-8.592304406;106.04211;1;RR4-24;RR4
5;41.01243506;-8.592015189;102.31928;0;AS1;AS
6;41.01367077;-8.591685989;93.081045;0;AS1;AS
7;41.01595684;-8.591076926;90.421444;0;AS1;AS
8;41.01743086;-8.590684191;96.699334;0;AS2;AS
9;41.0187725;-8.590326713;96.374429;1;AR1;AR
10;41.02101613;-8.588681928;87.654057;0;AS2;AS
11;41.0227323;-8.587423736;102.03343;0;AS2;AS
12;41.0243776;-8.586217427;108.8377;1;AR2;AR
13;41.02670777;-8.584508866;117.94637;0;AE-32;AE
14;41.02886473;-8.582927178;123.40951;0;AE-32;AE
15;41.03180099;-8.580773861;112.83719;0;AS2;AS
16;41.03326517;-8.579700006;118.37591;0;AS1;AS
17;41.03495762;-8.578458671;117.50877;0;AS1;AS
18;41.03706727;-8.576911247;121.10545;0;AS2;AS
19;41.03931071;-8.575265554;129.55157;0;AS2;AS
20;41.04149902;-8.573660177;145.72541;0;AS1;AS
21;41.04267105;-8.572800308;153.55436;1;P3000/28;P3000/EV3
22;41.0447036;-8.571547689;155.961;1;AS2;AS
23;41.04669001;-8.570364363;156.12567;0;SD3;SD3
24;41.04822493;-8.569449935;165.32501;0;P3000/26;P3000/EV3
25;41.04991581;-8.568442539;169.9185;0;P3000/30;P3000/EV3
26;41.05156564;-8.567459539;179.90631;0;P3000/24;P3000/EV3
27;41.05269015;-8.566789511;181.18443;0;AS1;AS
28;41.05380644;-8.566124355;170;0;SD3;SD3
29;41.05558758;-8.565062993;163.58653;0;SD2;SD2
30;41.05712247;-8.564148309;153.5926;0;DS8;DS8
31;41.05864914;-8.563238478;152;1;RD5;RD5
32;41.06109716;-8.5617976;136.75823;1;RS140-26,8;RS140/41 A
33;41.05977285;-8.55937781;130.86453;1;RS31-29,6;RS31/5 a
34;41.05848523;-8.55692371;141.10586;1;RS42-29,3;RS42/5 a
35;41.05775359;-8.55573183;144.16929;1;RS63-21,6;RS63/110 D
36;41.05769333;-8.55549505;145.1042;1;PORTICO;PORTICO
```

Figura 5.3: Ficheiro de entrada de dados dos apoios e pórticos no LAT3D referentes à linha AT Nogueira da Regedoura - Pedroso.

5.3 Resultados do Cálculo Mecânico

Neste Capítulo são apresentados os resultados obtidos com o Programa LAT3D para os cálculos mecânicos para as fases da linha e cabo de guarda.

5.3.1 Fases

Primeiramente, são calculados para o condutor de fase a Força do Vento no Inverno e na Primavera e de seguida o coeficiente de sobrecarga para o Inverno e Primavera. Com o uso das Equações 2.14 e 2.15 no LAT3D para a linha a linha aérea em estudo foram obtidos os seguintes valores para a Força do Vento e Coeficiente de Sobrecarga:

- Força do Vento no Inverno : 0.3516 daN/m
- Força do Vento na Primavera : 0.8791 daN/m

- Coeficiente de Sobrecarga no Inverno : 1.1900
- Coeficiente de Sobrecarga na Primavera : 1.8980

Na Figura 5.4, é possível observar o modo como são apresentados os resultados anteriormente referidos na interface gráfica do programa LAT3D.

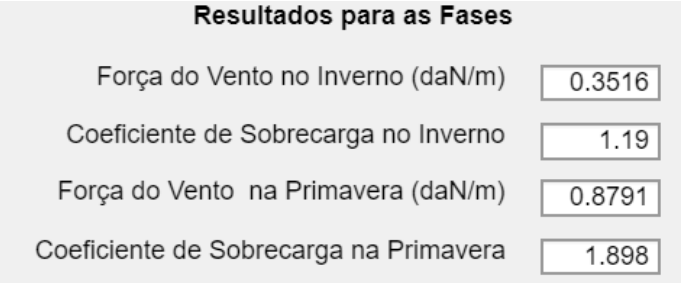


Figura 5.4: Resultados da Força do Vento e Coeficiente de Sobrecarga para o condutor de fase no LAT3D.

Com os valores anteriormente calculados e com os dados de entrada o LAT3D realiza o cálculo do vão equivalente em metros para cada cantão (Equação 2.17), o cálculo da tensão de montagem para cada cantão (Equação 2.18), o cálculo da tração de montagem para cada cantão, o parâmetro da catenária para cada cantão (Equação 2.19), o cálculo da flecha de cada vão e determina o estado mais desfavorável de cada cantão. Na Tabela 5.4 são apresentados os resultados obtidos pelo LAT3D para os vãos entre os apoios da linha aérea dos condutores de fase.

Tabela 5.4: Resultados dos cálculos mecânicos para os vãos de fase

Apoio Inicial	Apoio Final	Comprimento do vão (m)	Cantão	Vão Equivalente (m)	Tensão (daN/mm^2)	Tração (daN)	Parâmetro da Catenária (m)	Flecha (m)	Estado mais Desfavorável
1	2	206.9168	1	206.9168	3.4054	535.335	982.2661	5.4484	Primavera
2	3	324.8688	2	324.8688	3.7964	596.7902	1.10E+03	12.0476	Primavera
3	4	122.9509	3	182.048	3.2639	513.0854	941.4411	2.0072	Primavera
4	5	139.9429	3	182.048	3.2639	513.0854	941.4411	2.6003	Primavera
5	6	258.8955	3	182.048	3.2639	513.0854	941.4411	8.8995	Primavera
6	7	166.9318	3	182.048	3.2639	513.0854	941.4411	3.6999	Primavera
7	8	151.94	3	182.048	3.2639	513.0854	941.4411	3.0652	Primavera
8	9	284.8845	4	237.2976	3.5426	556.9033	1.02E+03	9.9281	Primavera
9	10	217.9123	4	237.2976	3.5426	556.9033	1.02E+03	5.8089	Primavera
10	11	208.9154	4	237.2976	3.5426	556.9033	1.02E+03	5.3391	Primavera
11	12	295.8809	5	239.9242	3.553	558.5292	1.02E+03	10.6781	Primavera
12	13	273.8902	5	239.9242	3.553	558.5292	1.02E+03	9.1498	Primavera
13	14	372.8494	5	239.9242	3.553	558.5292	1.02E+03	16.9562	Primavera
14	15	185.9255	5	239.9242	3.553	558.5292	1.02E+03	4.2164	Primavera
15	16	214.9133	5	239.9242	3.553	558.5292	1.02E+03	5.6336	Primavera
16	17	267.8929	5	239.9242	3.553	558.5292	1.02E+03	8.7535	Primavera
17	18	284.8855	5	239.9242	3.553	558.5292	1.02E+03	9.8992	Primavera
18	19	277.8878	5	239.9242	3.553	558.5292	1.02E+03	9.4189	Primavera
19	20	148.8342	5	239.9242	3.553	558.5292	1.02E+03	2.7019	Primavera
20	21	248.9901	6	248.9901	3.5871	563.8867	1.03E+03	7.4899	Primavera
21	22	241.9048	7	188.8328	3.3056	519.6354	953.4595	7.6718	Primavera
22	23	186.9236	7	188.8328	3.3056	519.6354	953.4595	4.5807	Primavera
23	24	205.9177	7	188.8328	3.3056	519.6354	953.4595	5.559	Primavera
24	25	200.9199	7	188.8328	3.3056	519.6354	953.4595	5.2924	Primavera
25	26	136.9456	7	188.8328	3.3056	519.6354	953.4595	2.4587	Primavera
26	27	135.9451	7	188.8328	3.3056	519.6354	953.4595	2.4229	Primavera
27	28	216.9134	7	188.8328	3.3056	519.6354	953.4595	6.1685	Primavera
28	29	186.9255	7	188.8328	3.3056	519.6354	953.4595	4.5808	Primavera
29	30	185.9253	7	188.8328	3.3056	519.6354	953.4595	4.5319	Primavera
30	31	297.5104	8	297.5104	3.734	586.9782	1.08E+03	10.2728	Primavera
31	32	250.9076	9	250.9076	3.594	564.9716	1.04E+03	7.5912	Primavera
32	33	250.9103	10	250.9103	3.594	564.9731	1.04E+03	7.5913	Primavera
33	34	128.9473	11	128.9473	2.7279	428.8303	786.8446	2.6415	Inverno

Na Figura 5.5, é possível observar o modo como são apresentados os resultados anteriormente referidos na interface gráfica do programa LAT3D. No LAT3D não aparece logo a informação toda disponível mas com os controlos deslizantes é possível ver todos resultados.

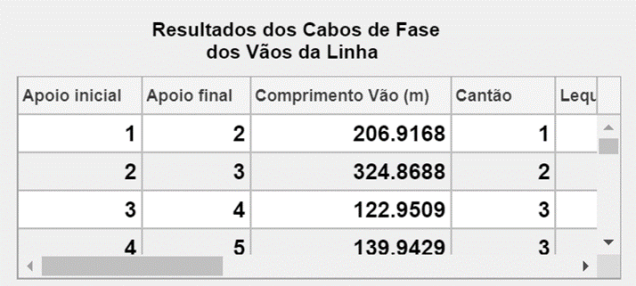


Figura 5.5: Resultados da Força do Vento e Coeficiente de Sobrecarga para o condutor de fase no LAT3D.

5.3.2 Cabo de Guarda

Primeiramente, são calculados para o cabo de guarda a Força do Vento no Inverno e na Primavera e de seguida o coeficiente de sobrecarga para o Inverno e Primavera. Com o uso das Equações 2.14 e 2.15 no LAT3D para a linha aérea em estudo foram obtidos os seguintes valores para a Força do Vento e Coeficiente de Sobrecarga:

- Força do Vento no Inverno : 0.3100 daN/m
- Força do Vento na Primavera : 0.7750 daN/m
- Coeficiente de Sobrecarga no Inverno : 1.1080
- Coeficiente de Sobrecarga na Primavera : 1.5580

Na Figura 5.6, é possível observar o modo como são apresentados os resultados anteriormente referidos na interface gráfica do programa LAT3D.

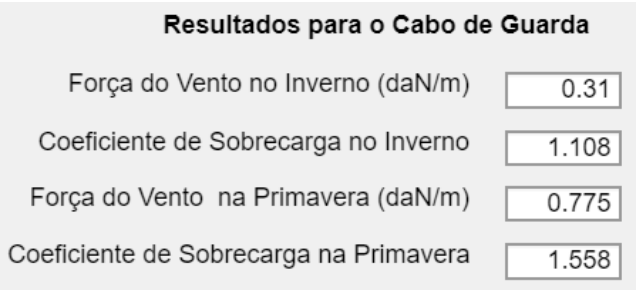


Figura 5.6: Resultados da Força do Vento e Coeficiente de Sobrecarga para o cabo de guarda no LAT3D.

Com os valores anteriormente calculados e com os dados de entrada o LAT3D realiza o cálculo do vão equivalente em metros para cada cantão (Equação 2.17), o cálculo da tensão de montagem

para cada cantão (Equação 2.18), o cálculo da tração de montagem para cada cantão, o parâmetro da catenária para cada cantão (Equação 2.19), o cálculo da flecha de cada vão e determina o estado mais desfavorável de cada cantão. Na Tabela 5.5 são apresentados os resultados obtidos pelo LAT3D para os vãos entre os apoios da linha aérea do cabo de guarda.

Tabela 5.5: Resultados dos cálculos mecânicos para os vãos do cabo de guarda.

Apoio Inicial	Apoio Final	Comprimento do vão (m)	Cantão	Vão Equivalente (m)	Tensão (daN/mm^2)	Tração (daN)	Parâmetro da Catenária (m)	Flecha (m)	Estado mais Desfavorável
1	2	206.9168	1	206.9168	9.7335	1530.10	2807.50	4.3565	Primavera
2	3	324.8688	2	324.8688	10.6012	1666.50	3057.80	9.8601	Primavera
3	4	122.9509	3	182.048	9.4233	1481.30	2718.00	1.5888	Primavera
4	5	139.9429	3	182.048	9.4233	1481.30	2718.00	2.0583	Primavera
5	6	258.8955	3	182.048	9.4233	1481.30	2718.00	7.0448	Primavera
6	7	166.9318	3	182.048	9.4233	1481.30	2718.00	2.9288	Primavera
7	8	151.94	3	182.048	9.4233	1481.30	2718.00	2.4264	Primavera
8	9	284.8845	4	237.2976	10.036	1577.70	2894.80	8.0093	Primavera
9	10	217.9123	4	237.2976	10.036	1577.70	2894.80	4.6862	Primavera
10	11	208.9154	4	237.2976	10.036	1577.70	2894.80	4.3072	Primavera
11	12	295.8809	5	239.9242	10.0589	1581.30	2901.40	8.6199	Primavera
12	13	273.8902	5	239.9242	10.0589	1581.30	2901.40	7.3862	Primavera
13	14	372.8494	5	239.9242	10.0589	1581.30	2901.40	13.6879	Primavera
14	15	185.9255	5	239.9242	10.0589	1581.30	2901.40	3.4037	Primavera
15	16	214.9133	5	239.9242	10.0589	1581.30	2901.40	4.5477	Primavera
16	17	267.8929	5	239.9242	10.0589	1581.30	2901.40	7.0663	Primavera
17	18	284.8855	5	239.9242	10.0589	1581.30	2901.40	7.9912	Primavera
18	19	277.8878	5	239.9242	10.0589	1581.30	2901.40	7.6034	Primavera
19	20	148.8342	5	239.9242	10.0589	1581.30	2901.40	2.1811	Primavera
20	21	248.9901	6	248.9901	10.1344	1593.10	2923.20	6.0588	Primavera
21	22	241.9048	7	188.8328	9.5144	1495.70	2744.30	6.0915	Primavera
22	23	186.9236	7	188.8328	9.5144	1495.70	2744.30	3.6372	Primavera
23	24	205.9177	7	188.8328	9.5144	1495.70	2744.30	4.4139	Primavera
24	25	200.9199	7	188.8328	9.5144	1495.70	2744.30	4.2023	Primavera
25	26	136.9456	7	188.8328	9.5144	1495.70	2744.30	1.9522	Primavera
26	27	135.9451	7	188.8328	9.5144	1495.70	2744.30	1.9238	Primavera
27	28	216.9134	7	188.8328	9.5144	1495.70	2744.30	4.8979	Primavera
28	29	186.9255	7	188.8328	9.5144	1495.70	2744.30	3.6373	Primavera
29	30	185.9253	7	188.8328	9.5144	1495.70	2744.30	3.5984	Primavera
30	31	297.5104	8	297.5104	10.4613	1644.50	3017.50	8.3798	Primavera
31	32	250.9076	9	250.9076	10.1497	1595.50	2927.60	6.1432	Primavera
32	33	250.9103	10	250.9103	10.1497	1595.50	2927.60	6.1433	Primavera
33	34	128.9473	11	128.9473	8.1035	1273.90	2337.40	2.0322	Inverno

Na Figura 5.7, é possível observar o modo como são apresentados os resultados anteriormente referidos na interface gráfica do programa LAT3D. No LAT3D não aparece imediatamente a informação toda disponível mas com os controlos deslizantes é possível ver todos resultados.

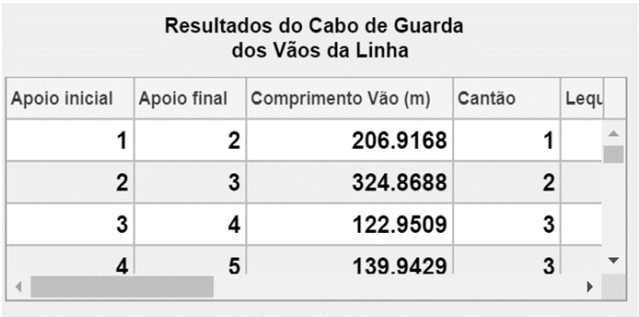


Figura 5.7: Resultados da Força do Vento e Coeficiente de Sobrecarga para o condutor de fase no LAT3D.

5.4 Resultados do Cálculo Tridimensional

Neste capítulo são apresentados os resultados do cálculo tridimensional para a linha Nogueira da Regedoura - Pedroso. Em primeiro lugar são apresentados os resultados apresentados na interface gráfica do LAT3D e por último são apresentados os resultados no *Google Earth*.

5.4.1 Resultados no LAT3D

Na interface gráfica do programa LAT3D são apresentados dois tipos de vista da linha. A primeira é a vista lateral da linha, ou seja, a vista da linha de z em função de x. A segunda é a vista superior da linha, ou seja, a vista de y em função de x.

Vista Lateral

Na Figura 5.8 é apresentada a vista lateral da linha Nogueira da Regedoura - Pedroso. Na vista lateral da linha, é possível observar a representação dos postes, o cabo de guarda e 3 dos 6 condutores de fase pois os outros 3 estão por detrás e não é possível visualiza-los. Com o plano aproximado de uma secção da linha é possível ver que o cabo de guarda tem dados de entrada diferentes no cálculo pois as flechas que apresenta são muito menores comparativamente com as flechas dos condutores das fases. Também se pode verificar que o LAT3D realiza o calculo tridimensional da linha aérea corretamente pois a representação dos vãos é correta mesmo com os desníveis da linha.

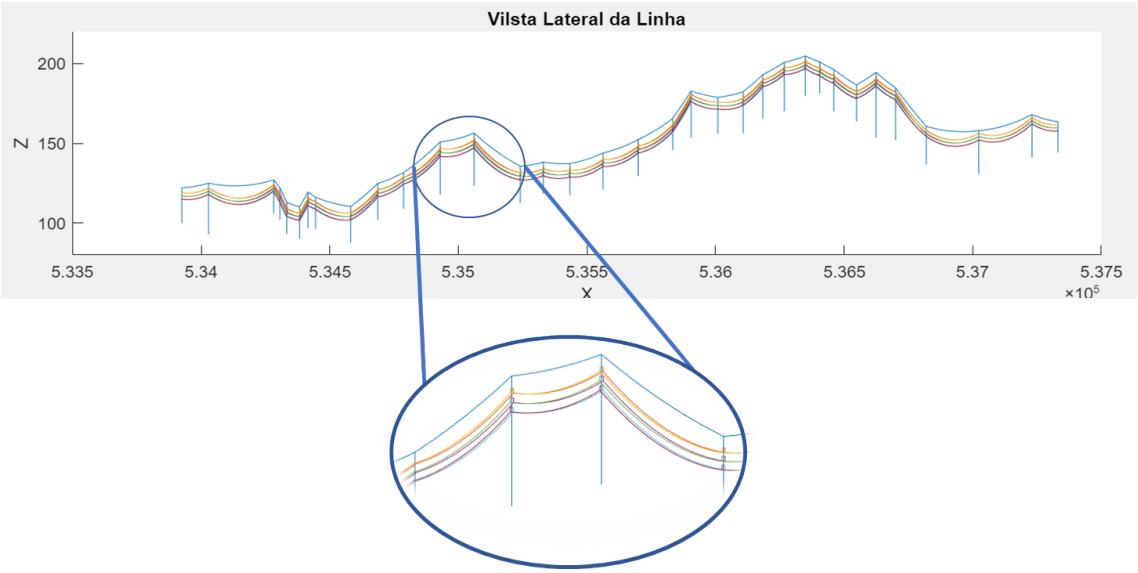


Figura 5.8: Vista Lateral da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no LAT3D.

Vista Superior

Na vista superior da linha é possível observar a representação dos braços que unem os condutores aos apoios, o cabo de guarda e dois condutores de fase superiores pois os restantes 4 tem as mesmas coordenadas x e y alterando a só a sua coordenada em z como foi observado anteriormente.

Na Figura 5.9 é apresentada a vista superior da linha Nogueira da Regedoura - Pedroso. Com o plano aproximado de uma secção da linha é possível ver ao centro o cabo de guarda e dos lados os cabos das duas fases superiores.

É ainda também possível visualizar que os vãos começam e terminam sempre no fim do braço ou se for um apoio de suspensão no fim da cadeia de isoladores mas como a vista é superior não dá para diferenciar os dois tipos de apoio.

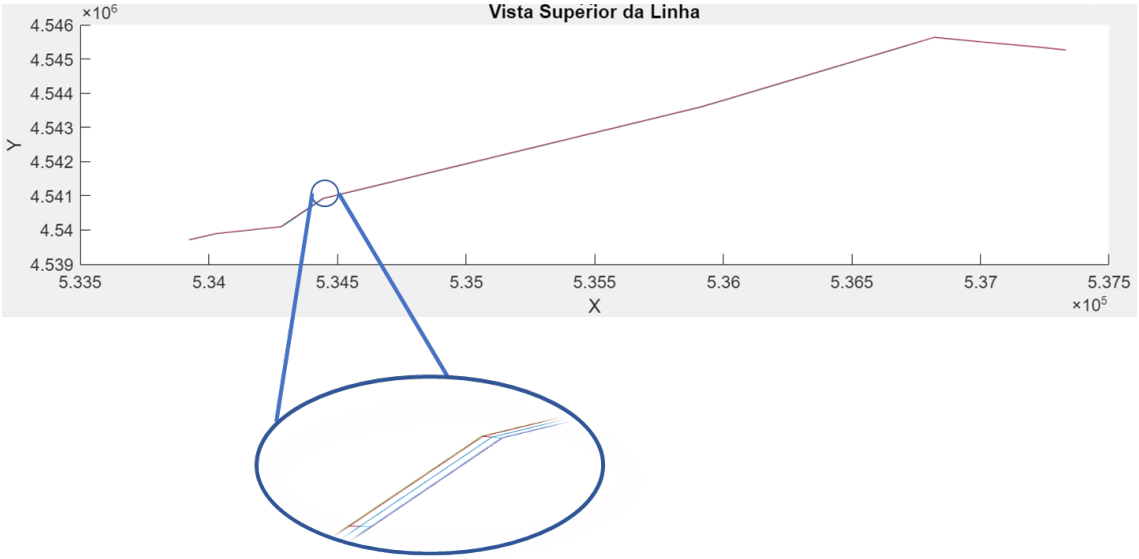


Figura 5.9: Vista Superior da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no LAT3D.

5.4.2 Resultados no *Google Earth*

O LAT3D quando finaliza os cálculos, na pasta onde se encontra o ficheiro de entrada "Apoios_L1134.csv", o conjunto de ficheiros *KML*, que são necessários à visualização da linha no *Google Earth*, é criado. Na Figura 5.10 são apresentados os ficheiros *KML* criados pelo LAT3D para a linha AT Nogueira da Regedoura - Pedroso.

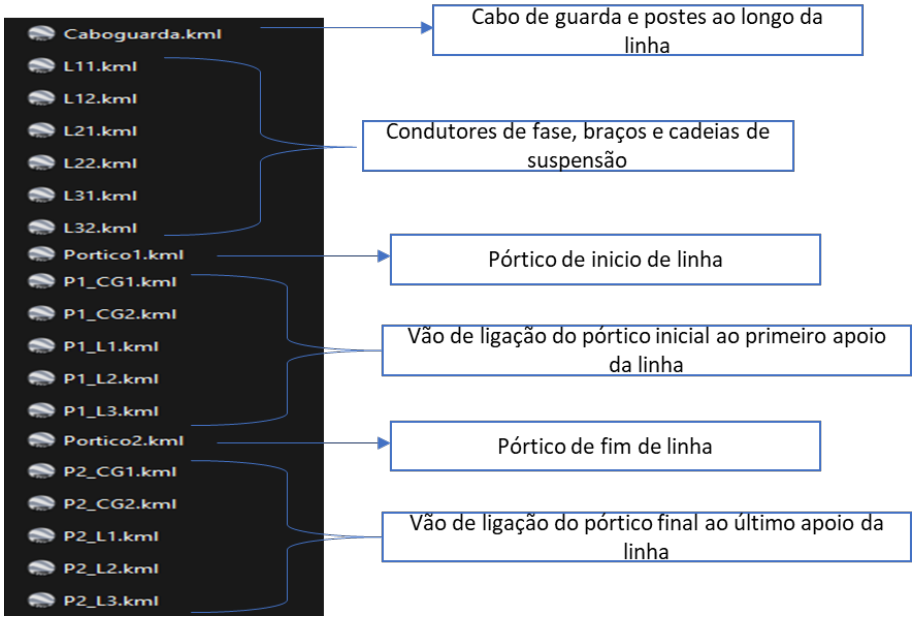


Figura 5.10: Ficheiros *KML* gerados pelo LAT3D.

Ao abrir os ficheiros *KML* anteriormente referidos no *Google Earth* é possível visualizar a linha em três dimensões. A vista superior da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso é apresentada na Figura 5.11, como se pode observar esta é semelhante á vista superior obtida na interface gráfica do LAT3D (Figura 5.9)

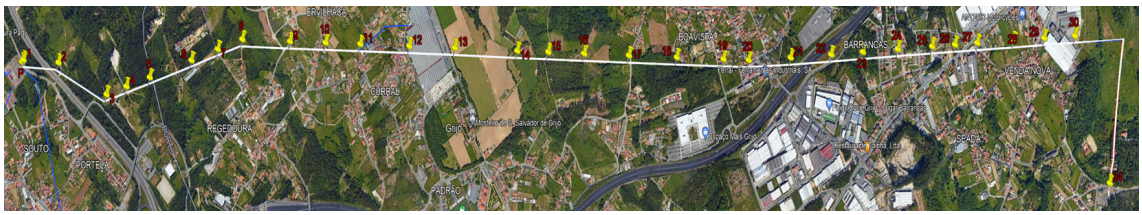
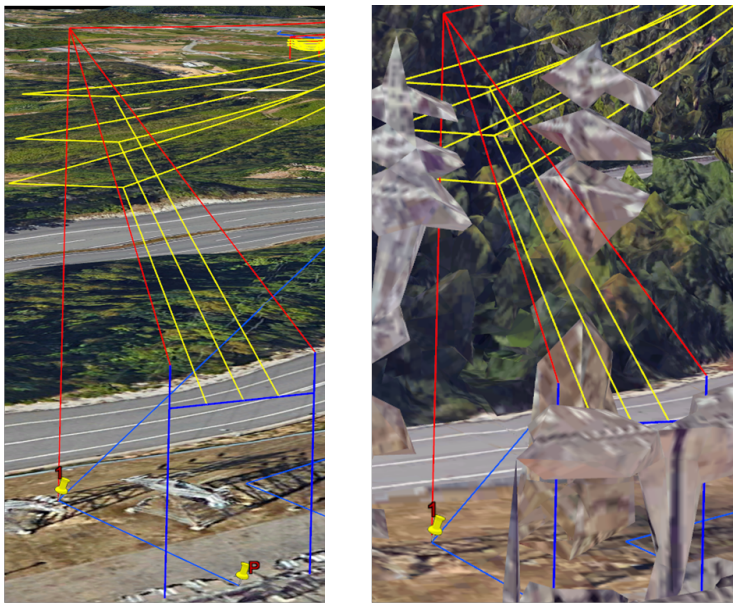


Figura 5.11: Vista Superior da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

Como se trata de uma linha aérea de grande dimensão não é possível capturar uma imagem da vista lateral, no *Google Earth*, da linha em que seja possível ver os detalhes da mesma. Por esse motivo de seguida vão ser apresentados alguns exemplos de pormenores da linha, alguns deles repetem-se ao longo da linha, capturados com o detalhe necessário de forma a facilitar a visualização e da linha.

Na Figura 5.12 é possível observar no *Google Earth* a representação do pórtico inicial (cor azul) da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso e o primeiro apoio, composto pelo poste (cor vermelha) e pelos braços (cor amarela). À direita foi desligada a função de representação dos edifícios em três dimensões do *Google Earth* para que se possa ver melhor o Pórtico inicial da linha. Este tem um condutor (cor amarela) por cada fase a ligar ao primeiro apoio e dois cabos de guarda (cor vermelha), como se pode observar na figura.



a) Com "Edifícios 3D" desligado b) Com "Edifícios 3D" ligado

Figura 5.12: Pórtico Inicial da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

Na Figura 5.13 é possível observar o vão do Apoio 2 para o Apoio 3, estes dois apoios são de amarração. O vão 2-3 pertence ao cantão 2 da linha. Nesta figura pode-se ver claramente as flechas dos condutores do vão tal como dá para perceber que o cabo de guarda (cor vermelha) é diferente e está montado a uma tensão superior, pois a sua flecha é muito inferior aos dos restantes condutores (cor amarela).

Com a Figura 5.13 é ainda possível observar o modo como o vão está inserido no meio circundante quando a opção "Edifícios 3D" do *Google Earth* encontra-se ligada.

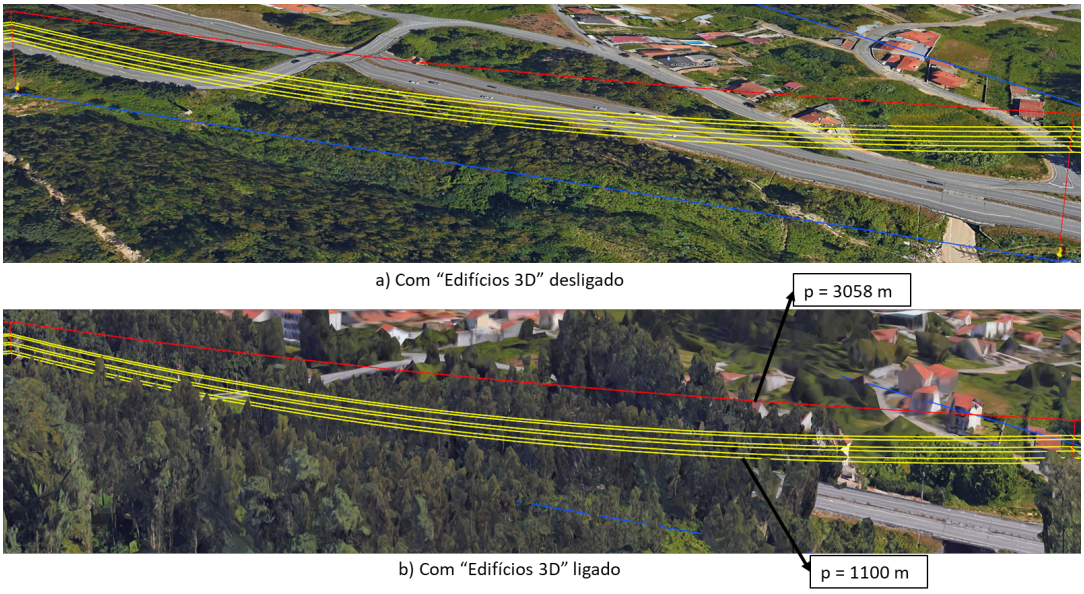


Figura 5.13: Vão 2-3 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

Todos os vãos da linha são calculados e representados utilizando o parâmetro da catenária, calculado para para o cantão a que o vão pertence. Na Figura 5.14 é apresentado o vão entre o Apoio 5 e o Apoio 6, estes dois apoios são de suspensão. O vão 5-6 pertence ao cantão 3 da linha e é calculado com parâmetros de catenária diferentes dos utilizados para calcular o vão 2-3 (Figura 5.13).

No vão 2-3 o valor do parâmetro de catenária utilizado para o cabo de guarda é de 3058 m e para os cabos condutores é de 1100 m.

No vão 5-6 o valor do parâmetro de catenária utilizado para o cabo de guarda é de 2718 m e para os cabos condutores é de 941 m.

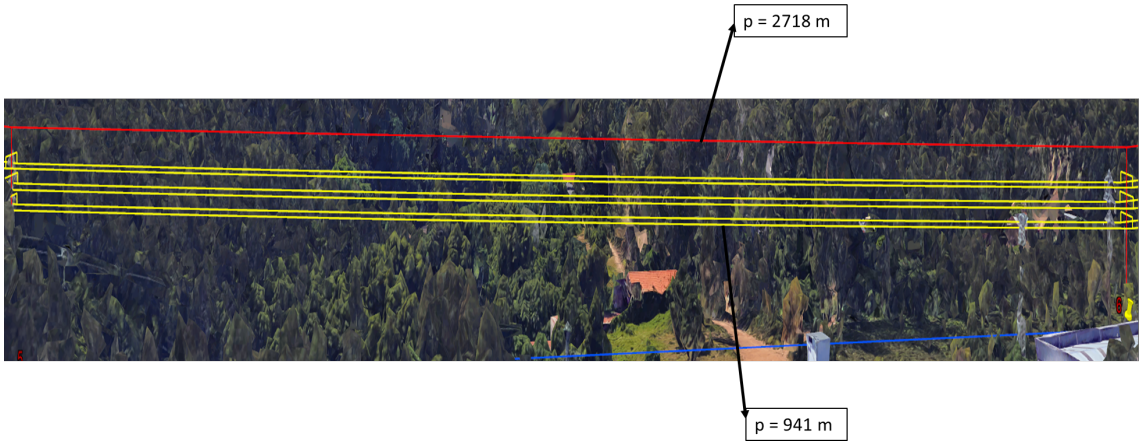


Figura 5.14: Vão 5-6 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

Na Figura 5.15 é apresentado o Apoio 8 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso, este apoio é de amarração e é utilizado como exemplo analisado para representar os restantes apoios em amarração. Na captura desta imagem do apoio 8 no *Google Earth* a opção de "Edifícios 3D" foi desligada para uma melhor visualização do apoio. O Apoio 8 é composto por um poste AR1 e uma armação AR. A armação AR tem braços de tamanhos diferentes como é possível observar na Figura 5.15. Os restantes apoios de amarração diferem do Apoio 8 na altura total do apoio, no comprimento dos braços e na distância entre fases, consoante o tipo de postes e armações que os constituem.

Como o Apoio 8 é de amarração não existe a necessidade de representar as cadeias de isoladores pois o ângulo que estas tem na sua instalação física é semelhante ao ângulo com que o cabo chega ao braço no seu cálculo tridimensional, assim as cadeias de isoladores são só representadas nos apoios de suspensão como vai ser mostrado a seguir.

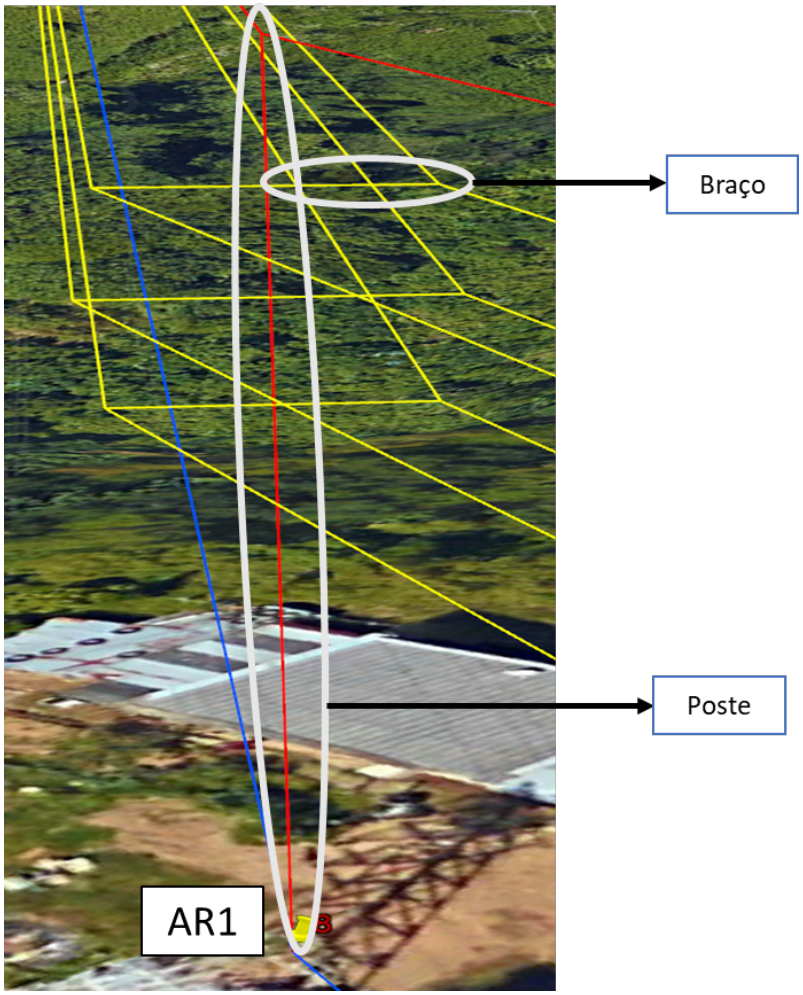


Figura 5.15: Apoio 8 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

Na Figura 5.16 é apresentado o Apoio 16 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso, este apoio é de suspensão e é utilizado como exemplo analisado para representar os restantes apoios em suspensão. O Apoio 16 é composto por um poste AS1 e uma armação AS. Os restantes apoios de suspensão diferem do Apoio 16 na altura total do apoio, no comprimento dos braços e na distância entre fases, consoante o tipo de postes e armações que os constituem.

Na Figura 5.16 é possível observar a representação de diversos elementos para a verificação do correto funcionamento do LAT3D, tais como:

- Cadeia de isoladores

  Verifica-se que o LAT3D representa as cadeias de isoladores (cor amarela) para todas as fases do apoio com os mesmo comprimento em todos as fases e que os vãos começam e acabam na ponta inferior da cadeia de isoladores tal como é pretendido.

- Braços do apoio

  Verifica-se que o LAT3D representa os braços (cor amarela) para todas as fases do apoio. Contrariamente, ao comprimento das cadeias de isoladores que é definido pelo utilizador nos dados de entrada, os comprimentos dos braços são variáveis e dependem da fase e do tipo de apoio. É possível observar que no apoio 16 os comprimentos dos braços na fase do meio são diferentes das outras duas fases.

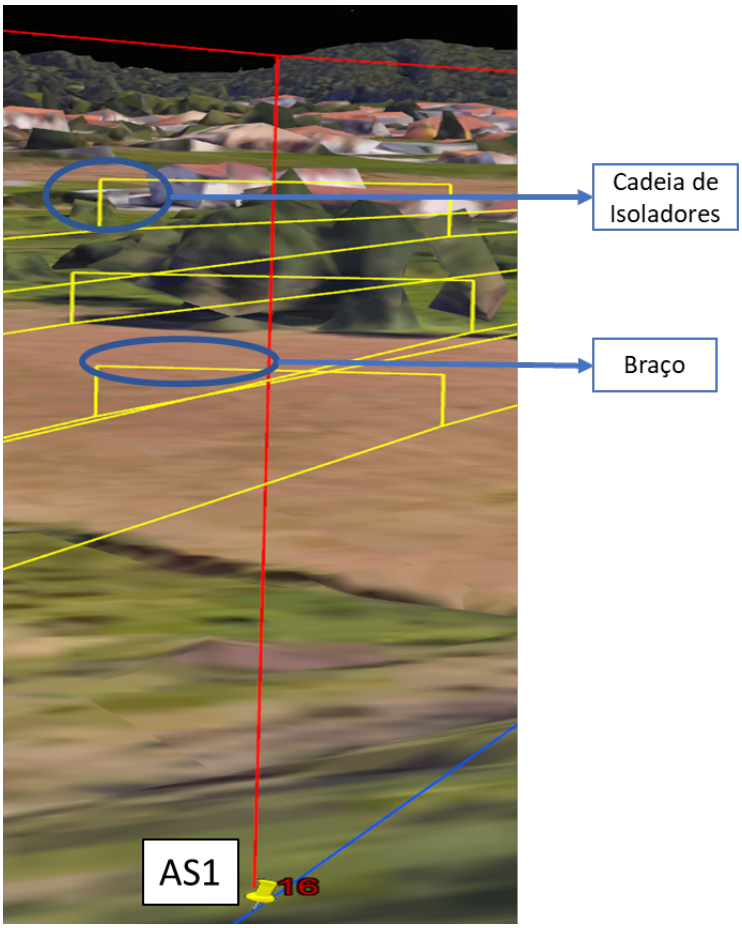


Figura 5.16: Apoio 16 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

Na Figura 5.17 e apresentada secção da linha onde ocorre uma derivação. A representação realizada pelo LAT3D é diferente do que se verifica na realidade. No entanto é capaz de realizar uma representação muito semelhante com o que se verifica na realidade. A diferença está, como se pode observar no pormenor da Figura, nos condutores de fase terminam o vão em 6 locais distintos enquanto que na realidade terminariam em apenas nos 3 locais mais à esquerda na Figura 5.17.

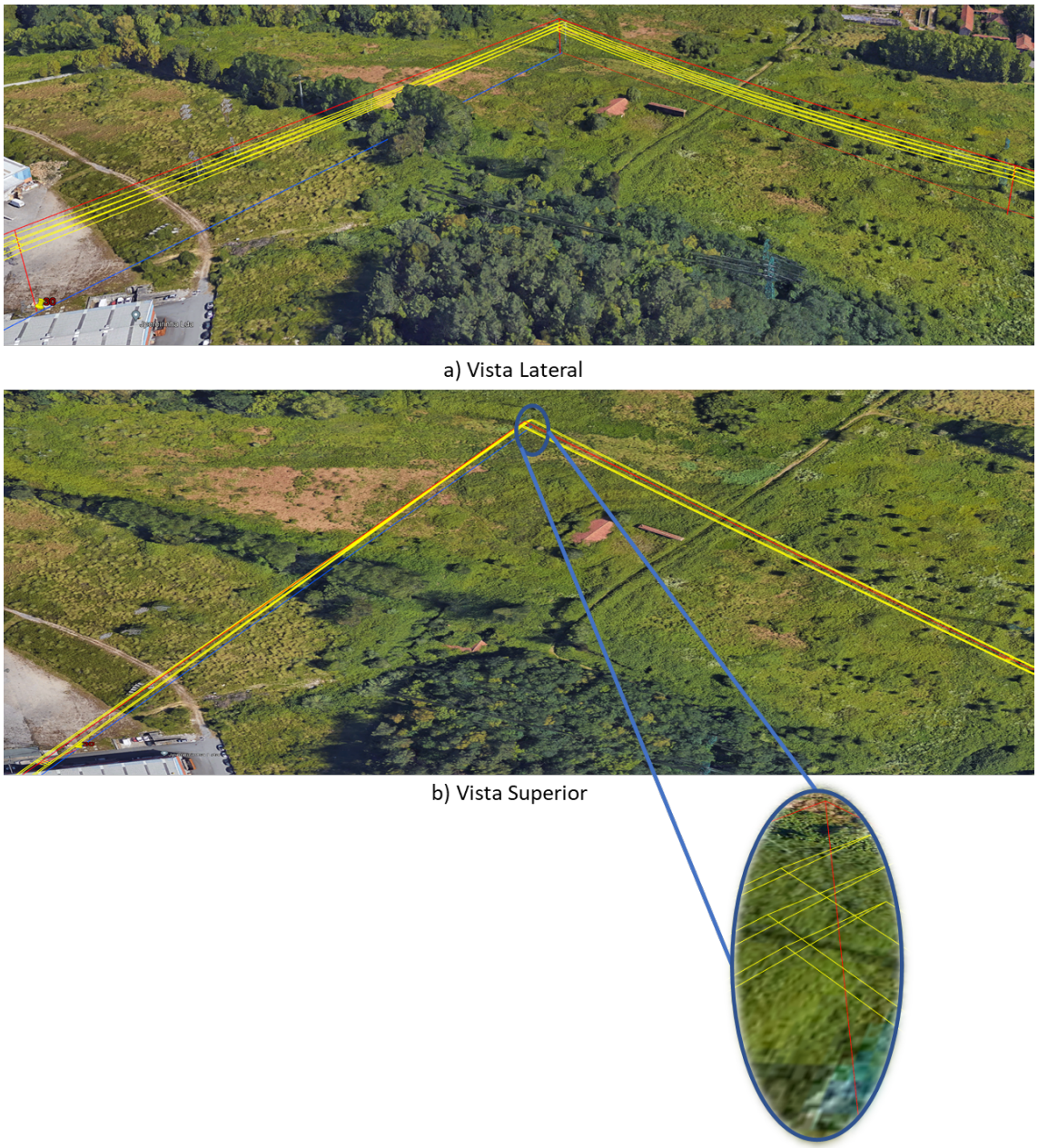


Figura 5.17: Derivação na Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

Na Figura 5.18 é apresentada a captura feita no *Google Earth* da ligação do Pórtico final ao último apoio da linha. Como o comprimento do vão do pórtico final ao último apoio é maior que o do vão do pórtico inicial ao primeiro apoio, são já percetíveis as flechas nos condutores de fase, comprovando assim que o LAT3D realiza de igual forma os cálculos para os vãos entre os apoios da linha e para os vãos entre os pórticos e os apoios .

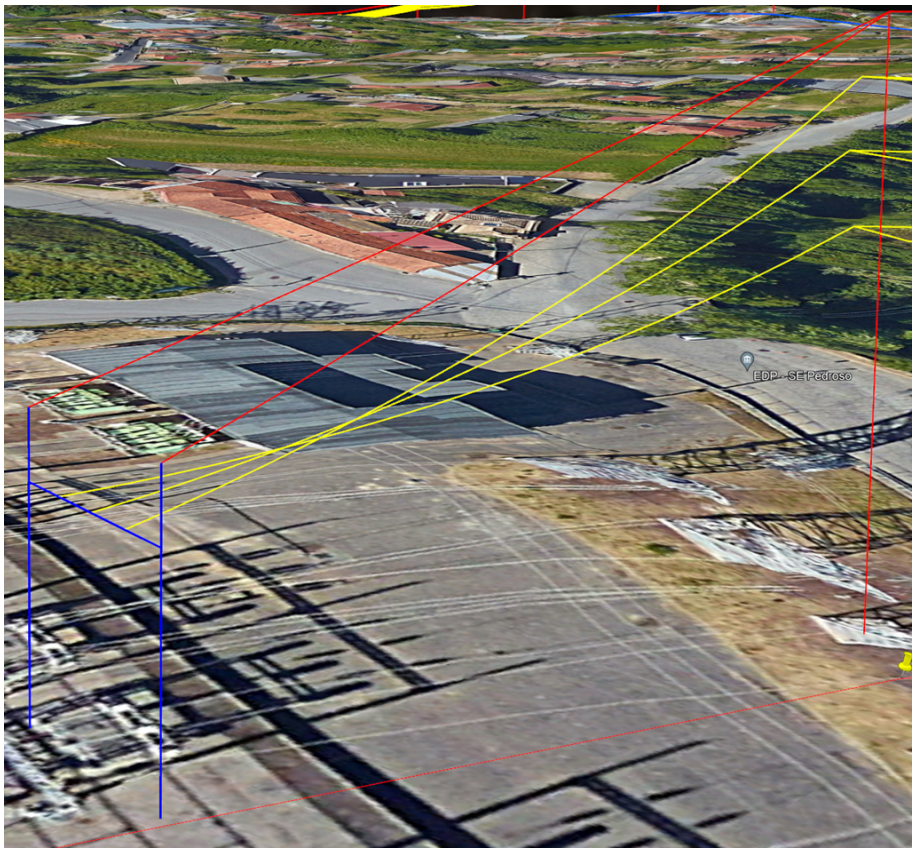


Figura 5.18: Pórtico Final da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

Na Figura 5.19 é possível observar o vão entre o Apoio 1 e o Apoio 2. Como é possível observar o vão atravessa uma zona de vegetação densa.

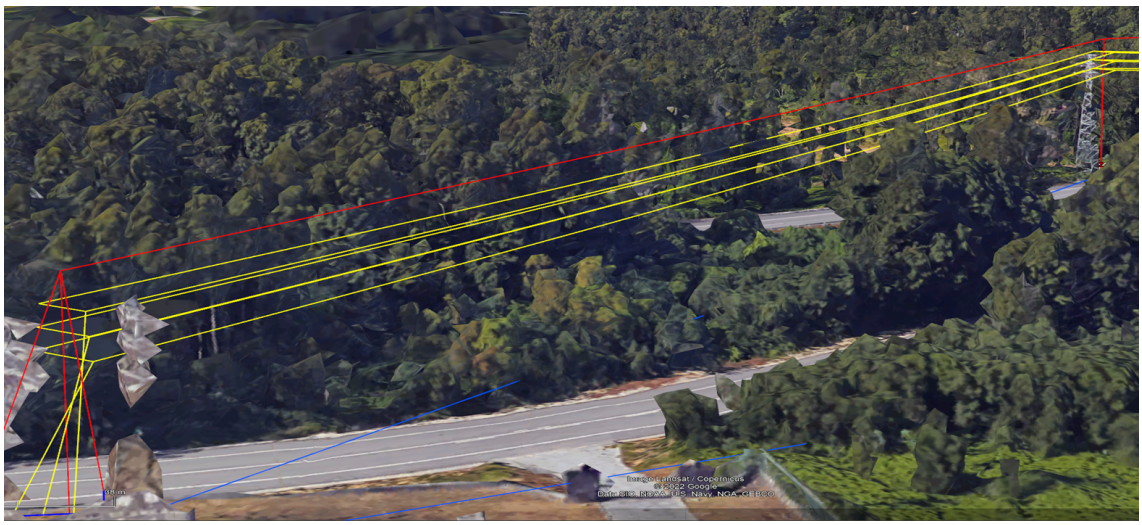


Figura 5.19: Vão 5-6 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

Na Figura 5.20 é apresentada uma vista do vão 1-2 mais aproximada, onde é possível verificar a importância do LAT3D, pois com a representação 3D da linha consegue-se visualizar as distâncias

que o meio envolvente se encontra dos condutores. Periodicamente a E-REDES passa por cima das linhas, com um helicóptero, um laser que capta a vegetação nas proximidades da linha e dá indicação de proximidade da mesma às linhas. Nas medições podem sempre surgir erros, erros estes que podem levar a tomadas de decisão que muitas vezes não são as mais indicadas para uma manutenção eficiente.

Com a junção dos dados recolhidos pelo laser com a linha tridimensional calculada pelo LAT3D, é possível prever trabalhos de limpeza de vegetação e deter possíveis erros na captação da vegetação.

Assim, com o LAT3D é possível realizar um trabalho de manutenção mais eficiente, pois se for detetado que efetivamente a vegetação encontra-se demasiado próxima dos condutores, em vez de um responsável ter de ir ao terreno verificar e só depois chamar a equipa de limpeza, o responsável pode levar logo a equipa de limpeza consigo reduzindo assim os custos de manutenção. No caso de existir um falso alarme, que seja detetado pela utilização do LAT3D, só necessita de ir ao local um responsável verificar que está tudo bem, poupando assim a mobilização desnecessária, de uma equipa de limpeza.

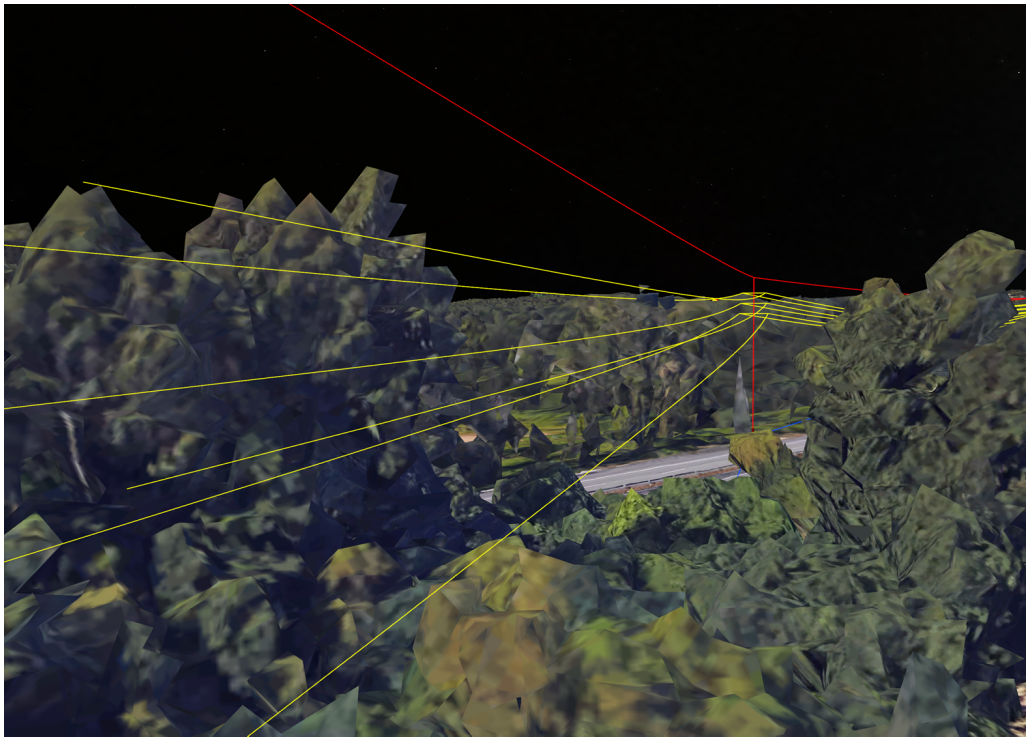


Figura 5.20: Pórtico Final da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

A representação de todos os vãos da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth* pode ser observada no Anexo A.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

Neste Capítulo são apresentadas as conclusões tiradas da presente dissertação e são ainda sugeridos trabalhos futuros.

6.1 Conclusões

O objetivo desta dissertação é desenvolver uma aplicação de cálculo e representação tridimensional dos elementos constituintes de uma linha área de transporte de eletricidade, com base nos elementos de projeto pré-definidos.

Para a realização de um projeto de linha aérea, é necessário tomar várias decisões. Nas suas diversas etapas, estão sujeitas a restrições causadas pela regulamentação, terreno, meteorologia e o fator custo-benefício.

Nestas etapas incluem-se o cálculo mecânico, o cálculo elétrico e as considerações económicas.

Relativamente ao cálculo mecânico, é uma etapa crítica para a implementação da linha, visto que, sem a sua avaliação, não se consegue garantir a estabilidade do sistema e a futura colocação das infraestruturas.

Apesar de o cálculo elétrico dos condutores não ter sido utilizado no Programa criado na presente dissertação, pois este sai do âmbito dos objetivos propostos. O cálculo elétrico dos condutores é essencial para o conhecimento de todas as características elétricas do sistema, no que diz respeito a intensidades de correntes, perdas e quedas de tensão.

Na presente dissertação é apresentado o desenvolvimento de um programa de cálculo e representação tridimensional de uma linha elétrica aérea ,com base nos elementos de projeto pré-definidos, denominado de LAT3D.

Numa fase inicial do projeto foram averiguadas quais as variáveis de entrada necessárias e a forma como inseri-las no programa.

De seguida foram introduzidos os cálculos mecânicos necessários ao programa. Para verificar que a forma de cálculo inserida no programa é a correta, foi resolvido um exemplo simples de uma linha no programa CLINHAS. O CLINHAS é um programa desenvolvido e utilizado pela

E-REDES há muitos anos e, devido ao conhecimento empírico da empresa, os resultados são seguramente corretos. Com os resultados obtidos pelo CLINHAS e pelo programa desenvolvido, é possível afirmar que o código desenvolvido para efetuar os cálculos mecânicos está correto, pois percentualmente o maior desvio de valores obtidos é inferior a 0.2%.

Com os cálculos mecânicos corretamente inseridos na aplicação, é apresentada a metodologia de cálculo tridimensional de uma linha elétrica aérea. Depois é implementada a metodologia de cálculo no programa que foi desenvolvido.

Com o intuito de verificar o funcionamento do programa desenvolvido, foram utilizados como dados de entrada os dados Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso. Na interface gráfica do LAT3D é possível visualizar as vistas superior e lateral da linha em estudo. Quando são abertos os ficheiros *KML*, gerados pelo LAT3D, no *Google Earth* é possível visualizar os seguinte elementos da linha:

- Pórtico de inicio e Pórtico de fim de linha;
- Postes, braços e cadeias de isoladores (nos apoios de suspensão);
- Cabo de guarda e todos os cabos condutores da linha.

Em suma, os objetivos propostos para a presente dissertação foram alcançados com sucesso, visto que no fim do trabalho obteve-se uma aplicação que realiza os cálculos mecânicos e tridimensionais de uma linha aérea corretamente. A ferramenta desenvolvida também gera os ficheiros *KML* necessários para a correta representação de uma linha AT no *Google Earth*. Com a representação feita pelo LAT3D é possível fazer uma visita virtual a uma linha AT, antes de uma intervenção na mesma, e perceber as particularidades do terreno e principais desafios e obstáculos.

6.2 Trabalho Futuro

O programa desenvolvido, efetua o cálculo mecânico de uma linha AT e o cálculo tridimensional dessa mesma linha. De forma a estudar e melhorar as capacidades do programa desenvolvido são sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

- Adicionar ao LAT3D as funcionalidades do cálculo elétrico de uma linha elétrica aérea;
- Adicionar ao cálculo mecânico já existente no LAT3D os seguintes cálculos:
  - Desvio Transversal da Cadeia de Isoladores:
  - Ângulo dos Condutores nas Fixações;
  - Distâncias de Segurança Regulamentares;
  - Estabilidade de Apoios.
- Adaptar o estudo feito pela Idalina Ferreira no seu trabalho "Projecto de Linha de Alta Tensão e Estudo do Campo Electromagnético Produzido pela Linha"ao programa desenvolvido LAT3D. Assim o LAT3D passaria a ter a capacidade de representar tridimensionalmente o campo eletromagnético para uma dada linha.

- Com recurso ao LAT3D calcular a mesma linha AT para diferentes temperaturas de funcionamento e verificar as diferentes flechas obtidas no *Google Earth*.
- Adicionar o fator vento ao cálculo da representação da linha AT e verificar o deslocamento dos cabos da linha.
- Comparar os resultados obtidos com o LAT3D para a linha Nogueira da Regedoura - Pedroso com a linha física.

Referências

[1] E-REDES. A e-redes distribuímos energia. Disponível em https://www.e-redes.pt/pt-pt/sobre-nos.

[2] Manuel Bolotinha. Linhas aéreas tipologias, características, equipamentos e princípios construtivos, 2020.

[3] REN. O setor elétrico. Disponível em https://www.ren.pt/pt-PT/o_que_fazemos/eletricidade/o_setor_eletrico/.

[4] Jéssica L. da Silva. Análise a um algoritmo para projeto de linhas aéreas baseado em minimização de custos. Technical report, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, julho 2016.

[5] Direcção de Serviços de Energia Eléctrica. Edição dge do regulamento de segurança de linhas eléctricas de alta tensão, 1993.

[6] R. D. Fuchs e M. T. d. Almeida P. R. Labegalini, J. A. Labegalini. Projetos mecânicos das linhas Áereas de transmissão, 1992.

[7] EDP Distribuição. Drp-c11-602/r - trabalhos em tensÃo - alta tensão, 2005.

[8] João Miguel Oliveira Carvalho. Projeto e construção de linhas aéreas mt e at - estabelecimento de linhas elétricas em zonas com alto risco de incêndios. Technical report, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, julho 2018.

[9] Filipe Cordeiro e Jonny Durão e Robson Santos. Estudo do desempenho de cabos do tipo optical ground wire (opgw) quando submetidos aos ensaios de descargas atmosféricas e curto-circuito. Technical report, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

[10] Francisco Távora. Linhas de transmissão de energia eléctrica.

[11] J. M. B. Forte. Projecto e licenciamento de linhas mt - isoladores. Disponível em https://paginas.fe.up.pt/~ee99047/LNMT-Isoladores.html.

[12] João António Santos Costa Verde. Desenvolvimento de projeto de linha aérea de alta tensão – viabilidade técnica do uso de condutores de alta temperatura. Technical report, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, julho 2016.

[13] EDP Distribuição. Guia de boas práticas para a integração paisagística de infraestruturas (vol. 2), 2011.

[14] EDP Distribuição. Guia de boas práticas para a integração paisagística de infraestruturas elétricas. (vol. 2), 2011.

[15] NOTICIAS DO RIBATEJO. Vila franca de xira: Sinalização de linhas junto ao hospital. Disponível em https://noticiasdoribatejo.blogs.sapo.pt/vila-franca-de-xira-sinalizacao-de-3240715.

[16] ANAC. Limitações em altura e balizagem de obstáculos artificiais à navegação aérea. Disponível em https://www.anac.pt/vpt/generico/informacaoaeronautica/circularesinformacaoaeronautica/Documents/cia_10_2003.pdf.

[17] FRATA. Balizador aeronáutico solar de média intensidade. Disponível em https://frata.com.br/produtos/balizador-aeronautico-solar-de-media-intensidade-cod-2064/.

[18] Life Estepárias. Minimizar a mortalidade de aves estepárias em linhas elétricas. Disponível em http://www.lifeesteparias.lpn.pt/Noticias-e-Destaques/News.aspx?tabid=2332&code=pt&ItemID=230.

[19] PLP. Bird-fligh diverter. Disponível em https://preformed.com/id/component/eshop/energy/distribution/wildlife-protection/bird-flight-diverter.

[20] Hélder Leite. Elaboração de projetos de linhas aéreas de distribuição de energia, 2008/09.

[21] MATLAB. Overview. Disponível em https://www.mathworks.com/products/matlab.html.

[22] Office of Geomatics. World geodetic system 1984(wgs84). Disponível em https://earth-info.nga.mil/?dir=wgs84&action=wgs84.

[23] Meteorologia en Vermelho. Coordenadas utm. Disponível em https://www.meteorologiaenred.com/pt/coordenadas-utm.html.

[24] Wikipedia. Zonas utm da europa. Disponível em ://pt.wikipedia.org/wiki/Universal$_Transversa_de_Mercator/media/Ficheiro:LA2-Europe-UTM-zones.png$.

[25] Daniel Teixeira. Projeto de uma linha aérea de alta tensão. viabilidade técnica e económica na aplicação da tecnologia cross-bonding numa linha subterrânea, 2017.

[26] Luís Silva. Fases de instalação de uma linha aérea de transmissão de energia, 2012.

[27] Luís Rocha. Projeto de linha aérea de alta tensão–estudo sobre a utilização de cabo de guarda, 2014.

Anexo A

Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*

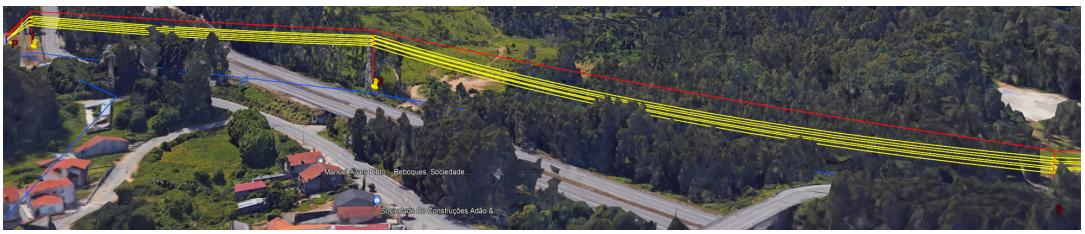


Figura A.1: Vãos do Pórtico inicial ao Apoio 3 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

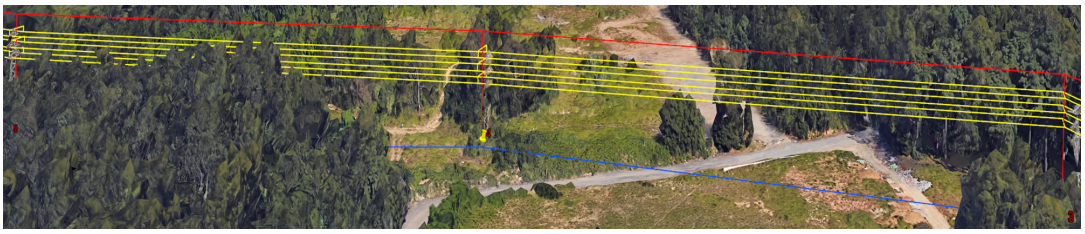


Figura A.2: Vãos do Apoio 3 ao Apoio 5 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

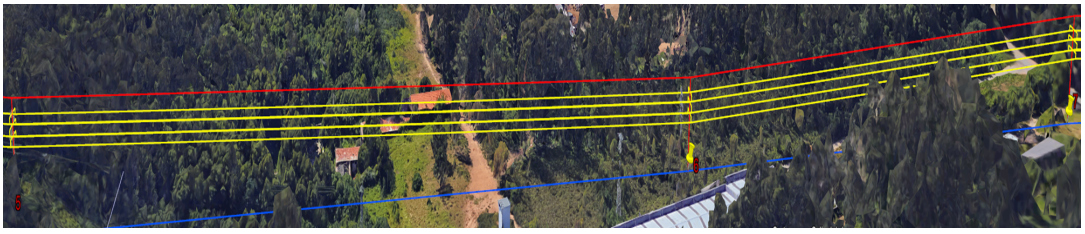


Figura A.3: Vãos do Apoio 5 ao Apoio 7 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

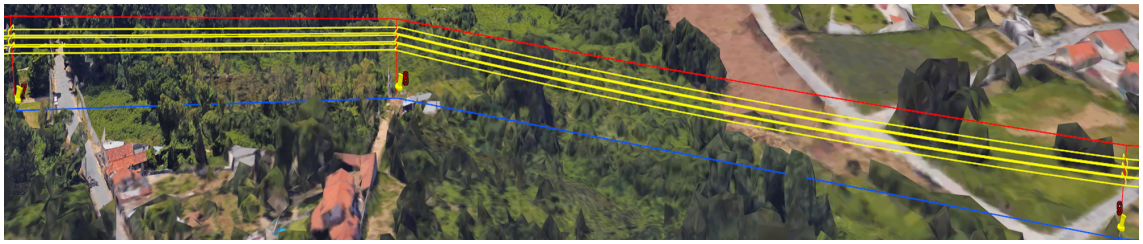


Figura A.4: Vãos do Apoio 7 ao Apoio 9 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

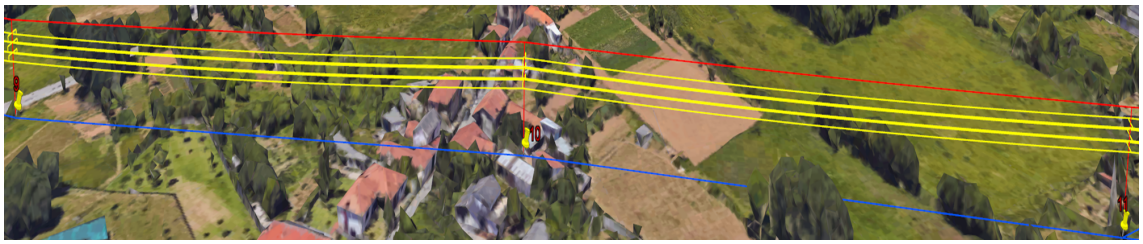


Figura A.5: Vãos do Apoio 9 ao Apoio 11 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

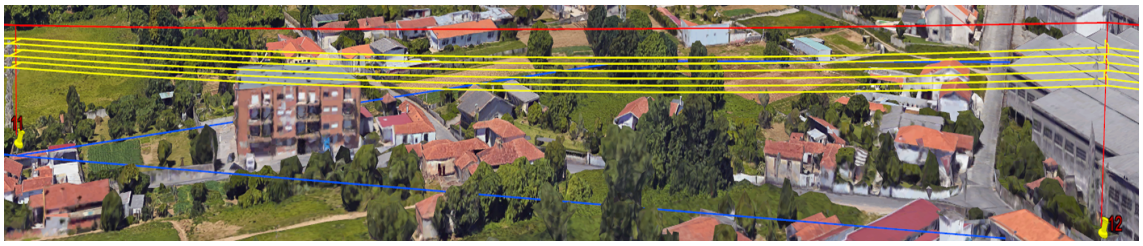


Figura A.6: Vão do Apoio 11 ao Apoio 12 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

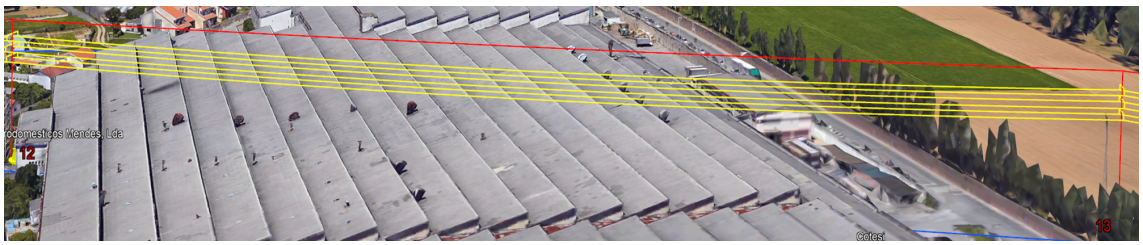


Figura A.7: Vão do Apoio 12 ao Apoio 13 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

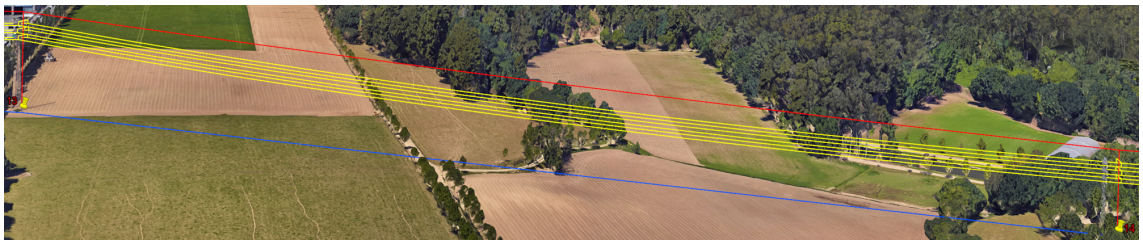


Figura A.8: Vão do Apoio 13 ao Apoio 14 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

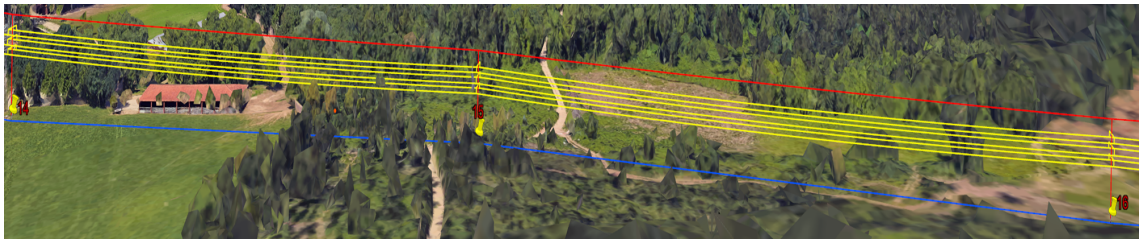


Figura A.9: Vãos do Apoio 14 ao Apoio 16 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

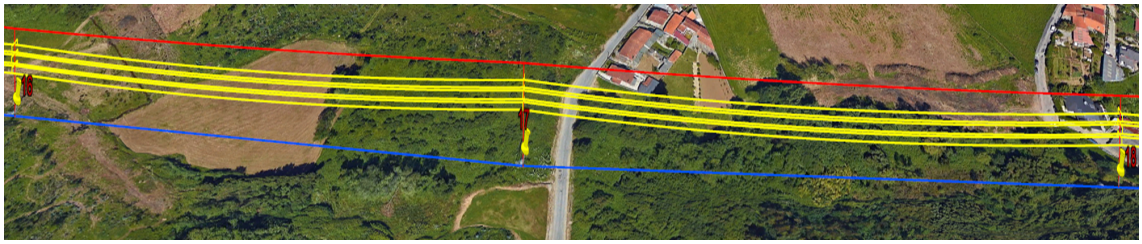


Figura A.10: Vãos do Apoio 16 ao Apoio 18 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.



Figura A.11: Vãos do Apoio 18 ao Apoio 20 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

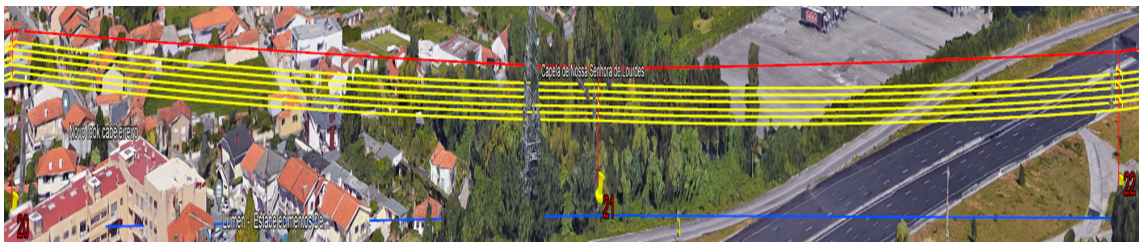


Figura A.12: Vãos do Apoio 20 ao Apoio 22 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

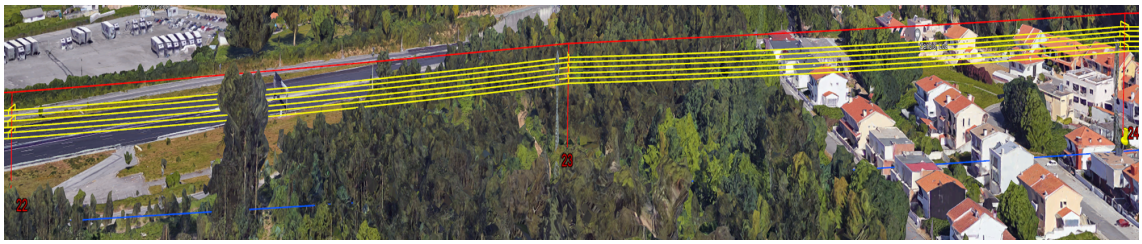


Figura A.13: Vãos do Apoio 22 ao Apoio 24 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.



Figura A.14: Vãos do Apoio 24 ao Apoio 26 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

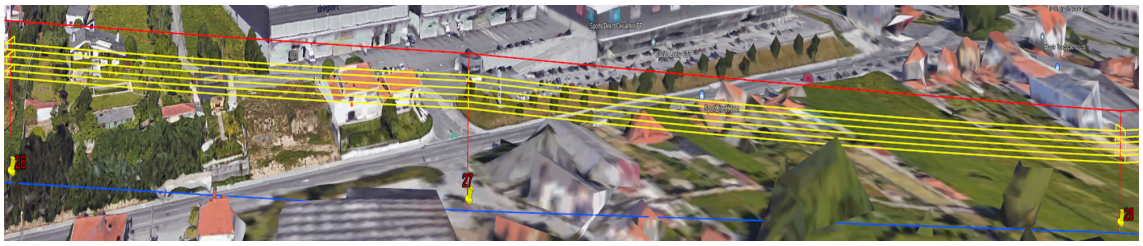


Figura A.15: Vãos do Apoio 26 ao Apoio 28 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.



Figura A.16: Vãos do Apoio 28 ao Apoio 30 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

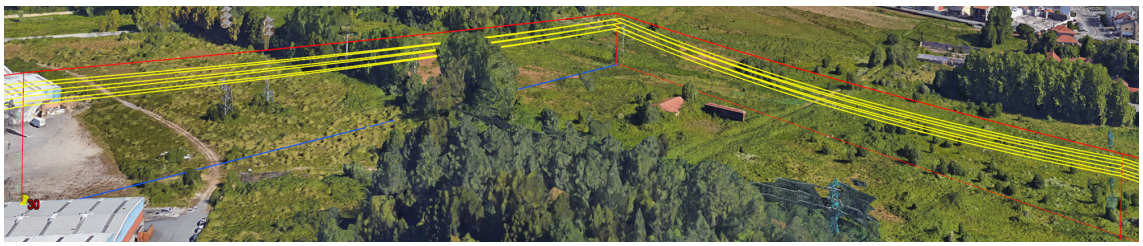


Figura A.17: Vãos do Apoio 30 ao Apoio 32 da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.

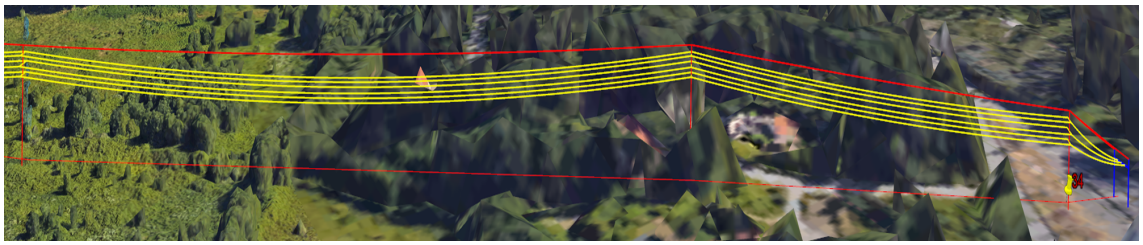


Figura A.18: Vãos do Apoio 32 ao Pórtico final da Linha Nogueira da Regedoura - Pedroso no *Google Earth*.