

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Análise a um Algoritmo para Projeto de Linhas
Aéreas Baseado em Minimização de Custos**

Jessica Lopes da Silva

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Professor Doutor António Machado e Moura
Co-orientador: Engenheiro Luís Miguel Santos Moreira
Julho de 2016

Resumo

O presente trabalho, proposto pela EDP-Distribuição, foca-se na realização de uma análise crítica a um algoritmo para execução de projetos de linhas elétricas aéreas de alta tensão (60kV), baseado em minimização de custos, elaborado pelo Engenheiro Filipe Matos, na sua dissertação “Desenvolvimento de um algoritmo para projetos de linhas baseado em Minimização de custos”.

A elaboração desta dissertação apresenta dois objetivos principais, o primeiro realizar uma análise crítica ao programa existente, implementando possíveis melhorias. O segundo passa por possibilitar que o *output* gerado pelo programa seja incorporado pelo Departamento de Projeto e Construção da EDP-Distribuição.

Numa fase inicial deste trabalho, foi elaborado um projeto exemplificativo de uma linha elétrica de Alta Tensão, com o objetivo de aumentar a sensibilidade em relação aos procedimentos inerentes à execução deste tipo de projetos. Foi possível ganhar alguma experiência no que toca à definição dos locais ótimos para colocação dos apoios, cálculo mecânico do projeto e a ainda cálculo da estabilidade dos apoios.

A realização do projeto exemplificativo permitiu solidificar os conhecimentos necessários para executar um projeto de linha aérea, de modo a que a análise ao programa fosse efetuada de uma forma mais intuitiva, e determinar pontos do algoritmo que pudessem ser alvo de otimizações.

A análise ao programa, permitiu identificar pontos-chave a ser alterados, nomeadamente tornar os dados de entrada do programa mais flexíveis. Neste sentido, foi implementada a funcionalidade de dar ao utilizador a possibilidade de introduzir determinados dados, aumentando o grau de liberdade na utilização do algoritmo.

Assim, o algoritmo inicial foi alvo de uma otimização cirúrgica, permitindo agora escolher o tipo de cabo a utilizar no projeto, a tensão máxima de trabalho, e efetuar projetos para linhas simples e duplas e também para diferentes níveis de tensão (15 kV, 30 kV, 60kV).

Por fim, foi cumprido o objetivo de gerar os ficheiros de saída pretendidos pela EDP-Distribuição, tornando assim viável a ponte entre o trabalho desenvolvido e a sua aplicação a projetos de linhas elétricas na EDP-Distribuição.

Abstract

The present dissertation, recommended by EDP-Distribuição, it's focused in a critical analysis on the work done by the Engineer Filipe Matos, in his dissertation "Development of a Cost Reduction Algorithm for Line Projects".

This dissertation presents two main objectives, one is implementing possible upgrades by critically analyzing the existing program. The second one is to enable the output given by the program to be integrated by the Department of Project and Construction of EDP-Distribuição.

Initially, the design of a line of 60kV was manually done. The execution of this project, allowed consolidation of the necessary knowledge to execute an aerial line project. After creating this aerial line project, the analysis of the program became more intuitive, allowing the optimization of the algorithm.

The analysis to the program allowed the identification of the key elements to be improved, therefore increasing the input data flexibility. Hence, a functionality was implemented in order to give the user the possibility to introduce specific data, increasing the freedom/ autonomy in the operation of the algorithm.

Thus, the original algorithm was accurately optimized, allowing choices such as: the type of cable to be used in the project, the maximum working tension, projection of simple or double lines, and definition of different tension levels (15 kV, 30 kV, 60kV).

Finally, EDP-Distribuição objective to generate output files was achieved, making viable the link between the current work and its applicability and EDP-Distribuição electric lines projects.

Agradecimentos

Ao longo da elaboração da dissertação, muitas foram as pessoas que prestaram o apoio, carinho e orientação, que se tornou essencial para elaborar este trabalho com sucesso.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador Professor Doutor António Carlos Sepúlveda Machado e Moura, professor catedrático da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pela confiança depositada em mim e que possibilitou a realização desta dissertação numa empresa como a EDP-Distribuição.

Agradeço de igual modo, ao meu co-orientador Eng^o Luís Miguel Santos Moreira, pelo acolhimento na empresa, por todo o tempo dispensado, pela excelente orientação e apoio prestados que foram essenciais para realização deste trabalho.

A toda a minha família, pelo carinho e confiança que sempre depositaram em mim, por estarem sempre presentes, pelo apoio e força, que permitiram que concluísse esta fase com sucesso.

Deixo também um especial agradecimento, às minhas amigas e companheiras de casa Ana e Sandra, por me acompanharem nos momentos mais complicados durante esta fase da minha vida, por partilharem comigo todas as angústias, frustrações e lágrimas, mas também muitos amizade, carinho e gargalhadas.

Não podia deixar de agradecer, ao Nuno, por me acompanhar e apoiar incondicionalmente, por todo o carinho, incentivo e motivação que impulsionaram o meu sucesso neste trabalho.

Ainda gostaria de agradecer, aos meus restantes amigos, que tive a felicidade de conhecer ao longo do meu percurso académico, que incentivaram de igual modo o meu sucesso nesta etapa.

Índice

Resumo	i
<i>Abstract</i>	iii
Agradecimentos	v
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas.....	xv
Abreviaturas e símbolos	xvii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1.Motivação e objetivos	1
1.2.Estrutura da dissertação	2
Capítulo 2	3
Apresentação do tema	3
2.1.Estado de arte	3
Capítulo 3	9
Elementos construtivos de uma linha elétrica.....	9
3.1. Introdução.....	9
3.2. Classificação de linhas	9
3.3. Aspectos gerais	10
3.4. Condutores.....	10
3.5. Isoladores	11
3.6. Apoios.....	12
3.7. Redes de terra.....	15
3.8. Conclusão	15

Capítulo 4	17
Projeto exemplificativo.....	17
4.1. Introdução.....	17
4.2. Considerações gerais para execução do projeto	17
4.3.1.Tensão máxima	18
4.3.2.Ação dos agentes atmosféricos e coeficientes de sobrecarga.....	19
4.3.3.Determinação do pior estado atmosférico	22
4.3.4.Equação dos estados	25
4.3.5.Estabilidade dos apoios.....	27
4.3.5.1.Fim de linha	28
4.3.5.2.Alinhamento	32
4.3.5.3.Ângulo	37
4.3.6.Distâncias regulamentares	42
4.3.7.Distância mínima entre condutores	45
4.3.8.Desvio transversal das cadeias de isoladores	48
4.4. Conclusão	50
Capítulo 5	51
Análise Crítica ao programa existente	51
5.1. Introdução.....	51
5.2. Explicação do programa existente	51
5.3. Limitações encontradas no programa existente.....	61
5.3.1.Dados pré-definidos para execução do programa.....	61
5.3.2.Base de dados dos ficheiros de entrada	62
5.3.3.....Avaliação da influência da colocação de mais um apoio por cantão, para o cálculo do custo	63
5.3.4.Apoios de Reforço	64
5.3.5.Nível de tensão	65
5.3.6.Modos de alocação de memória, implementada no algoritmo	71
5.3.7.Ficheiros de saída	71
5.4. Novas funcionalidades implementadas.....	72
5.4.1....Melhoria implementada para correção das limitações, a nível da base de dados para a leitura do cabo	73
5.4.2.....Melhoria implementada para correção das limitações, para possibilitar a introdução do valor da tensão máxima.....	74
5.4.3..Melhoria implementada para dar a opção ao utilizador de escolher elaborar uma linha simples ou dupla	75
5.4.4.....Melhoria implementada para dar a opção ao utilizador de escolher o nível de tensão	77
5.4.5.Melhorias implementadas no algoritmo a nível de otimização de memória	78
5.4.6.Melhoria implementada a nível dos ficheiros de saída	80
5.5. Conclusão	81

Capítulo 6	83
Demonstração de Resultados	83
6.1. Introdução.....	83
6.2. Demonstração do funcionamento do programa para linhas simples e duplas	83
6.3. Demonstração do funcionamento do programa para a média tensão	86
6.4. Comparação da solução manual versus a solução do programa	88
6.5. Comparação do custo dos projetos	91
6.6. Conclusão	93
Capítulo 7	95
Conclusões e trabalho futuro	95
7.1. Conclusões	95
7.2. Trabalho futuro	97
Referências	99
Anexos	101
Anexo A.....	101
Anexo B.....	102
Anexo C.....	103
Anexo D.....	104

Lista de figuras

Figura 1 - Documentos utilizados no passado para a elaboração de projetos.	5
Figura 2 - Aspeto da interface do programa "DM-SIT" utilizado pela EDP-Distribuição.	6
Figura 3 - Perfil obtido após introduzir os dados sobre a linha no programa "DM-SIT" utilizado pela EDP-Distribuição.	7
Figura 4 - Esquema para o cabo ALACO consultado no catálogo da Solidal.	10
Figura 5 - Cadeias em suspensão (esquerda) e cadeias em amarração (direita)	12
Figura 6 - Esquemático para apoio de alinhamento. [3]	13
Figura 7 - Esquemático para apoio em ângulo. [3]	13
Figura 8 - Esquemático para apoio em derivação. [3]	13
Figura 9 - Esquemático para apoio de reforço. [3]	13
Figura 10 - Esquemático para apoio fim de linha. [3]	14
Figura 11 - Esboço da linha para o projeto exemplificativo.	22
Figura 12 - Diagrama de decisão para o estado mais desfavorável.	23
Figura 13 - Medição da distância dos condutores ao solo para o projeto exemplificativo.	42
Figura 14 - Medição da distância dos condutores às árvores para o projeto exemplificativo. .	43
Figura 15 - Medição da distância aos edifícios para o projeto exemplificativo.	44
Figura 16 - Esquema exemplificativo para o apoio F95CA e F165CD, respetivamente para linhas simples e duplas.	46
Figura 17 - Esquema exemplificativo das forças, para cálculo do ângulo mínimo do desvio transversal das cadeias de isoladores.	48
Figura 18 - Fluxograma exemplificativo do programa.	51
Figura 19 - Exemplo para ficheiro de entrada "topografia".	52
Figura 20 - Exemplo para o ficheiro de entrada "cabo".	53
Figura 21 - Exemplo para o ficheiro de entrada "parametros_projeto".	53

Figura 22 - Exemplo para ficheiro de entrada "apoios".	54
Figura 23 - Exemplo para o ficheiro de saída "relatorio".	54
Figura 24 - Exemplo para o ficheiro de saída "relatorio_apoios".	55
Figura 25 - Fluxograma para o cálculo do vão máximo.	56
Figura 26 - Fluxograma do algoritmo implementado para a distribuição de apoios.	58
Figura 27 - Fluxograma exemplificativo para o cálculo do desvio transversal da cadeia de isoladores.	60
Figura 28 - Fluxograma para obter custo por cantão.	63
Figura 29 - Comparação entre as soluções obtidas.	63
Figura 30 - Esquema exemplificativo das armações para os apoios, de linha simples, da gama CA.	67
Figura 31 - Esquema exemplificativo das armações para os apoios F95CD e F165CD, de linha dupla da gama CD.	67
Figura 32 - Esquema exemplificativo das armações, para os apoios F20CD, F30CD e F65CD, para linhas duplas da gama CD.	67
Figura 33 - Esquema exemplificativo das armações, para os apoios de linha simples, da gama CM.	68
Figura 34 - Esquema exemplificativo das armações, para os apoios de linha dupla da gama MD.	68
Figura 35 - Exemplo do ficheiro para base de dados dos cabos.	73
Figura 36 - Fluxograma representativo da leitura do cabo.	74
Figura 37 - Fluxograma representativo da leitura da tensão máxima.	75
Figura 38 - Fluxograma representativo da introdução do número de condutores pretendido.	76
Figura 39 - Resumo das funcionalidades implementadas no programa.	78
Figura 40 - Fluxograma exemplificativo da nova gestão de memória.	79
Figura 41 - Ficheiro de saída AP6	80
Figura 42 - Ficheiro de saída LN6	80
Figura 43 - Interface para introduzir o nome do cabo.	83
Figura 44 - Interface para introduzir a tensão máxima.	84
Figura 45 - Interface para introduzir o número de condutores.	84
Figura 46 - Interface para correção dos dados de entrada.	84
Figura 47 - Interface para introduzir o número de condutores para linhas duplas.	85

Figura 48 - Ficheiro de saída AP6 para linhas duplas.	85
Figura 49 - Dados de entrada para elaborar um projeto de média tensão, para uma linha simples.	86
Figura 50 - Ficheiro de saída AP6.	87
Figura 51 - Ficheiro de saída LN6.	87
Figura 52 - Esboço da linha para o projeto exemplificativo.	88
Figura 53 - Esboço da linha para a solução do programa ajustada.	88
Figura 54 - Em cima o esboço da solução inicial do programa e em baixo o esboço da solução ajustada.	89
Figura 55 - Comparação dos custos das soluções analisadas	92

Lista de tabelas

Tabela 1 - Parâmetros do cabo ALACO160 utilizado no projeto exemplificativo.....	18
Tabela 2 - Valores para o coeficiente de forma segundo o R.S.L.E.A.T..	20
Tabela 3 - Pressão dinâmica do vento.	20
Tabela 4 - Dados relativos a cada vão.	27
Tabela 5 - Esforços transversais para a Hipótese 1.	29
Tabela 6 - Esforços longitudinais para a Hipótese1.....	29
Tabela 7 - Esforços verticais para a Hipótese1.	30
Tabela 8 - Componente horizontal para a Hipótese 2.....	30
Tabela 9 - Esforços verticais para a Hipótese 2.	31
Tabela 10 - Formulário para escolha dos apoios.	31
Tabela 11 - Comparação dos valores para escolha do apoio 1.....	31
Tabela 12 - Comparação dos valores para escolha do apoio 13.	31
Tabela 13 - Esforços transversais para a Hipótese1.	33
Tabela 14 - Esforços longitudinais para a Hipótese 1.	34
Tabela 15 - Esforços verticais para a Hipótese 1.....	35
Tabela 16 - Componente horizontal para a Hipótese 2	35
Tabela 17 - Esforços verticais para a Hipótese2.	36
Tabela 18 - Formulário para escolha do tipo de apoio.....	36
Tabela 19 - Comparação efetuada para escolha do tipo de apoio	36
Tabela 20 - Esforços transversais para a Hipótese 1.....	38
Tabela 21 - Esforços longitudinais para a Hipótese1.	39
Tabela 22 - Esforços verticais para a Hipótese1.	39
Tabela 23 - Esforços horizontais para a Hipótese2.	40

Tabela 24 - Esforços verticais para a Hipótese 2.....	40
Tabela 25 - Formulário para escolha do tipo de apoio.....	41
Tabela 26 - Comparação dos valores para escolha do apoio 4.....	41
Tabela 27 - Comparação dos valores para escolha do apoio 9.....	41
Tabela 28 - Tipo de Apoio escolhido.	41
Tabela 29 - Distâncias entre condutores.	47
Tabela 30 - Valor dos ângulos nos apoios com cadeias de suspensão.	50
Tabela 31 - Tabela representativa das gamas de apoios mais utilizada pela EDP-Distribuição.	65
Tabela 32 - Distância mínima entre condutores para todas as armações, dos apoios a incluir no programa.	68
Tabela 33 - Valores obtidos para o estudo efetuado.	70
Tabela 34 - Parâmetros a aplicar na equação dos estados	70
Tabela 35 - Cálculo dos esforços para linhas simples e duplas.	76
Tabela 36 - Parâmetros do cabo ALACO50 utilizado no teste ao programa para linhas MT. ...	86
Tabela 37 - Apoios da solução do programa na coluna1 e apoios da solução ajustada na coluna2.....	90
Tabela 38 - Custo do projeto exemplificativo.	91
Tabela 39 - Custo para a solução do programa.	91
Tabela 40 - Custo para a solução ajustada.	92

Abreviaturas e símbolos

Lista de abreviaturas

AT	Alta Tensão
MT	Média Tensão
C.C.	Curto-circuito
kV	<i>Kilovolt</i>
R.S.L.E.A.T.	Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão
DM-SIT	<i>Design management- SIT</i>
CD	Condutores

Lista de símbolos

α	Coeficiente de redução;
α_d	Coeficiente de dilatação térmica do cabo;
t_{seg}	Tração de segurança;
T_R	Tração de rotura;
σ	Secção do cabo;
c	Coeficiente de forma;
q	Pressão dinâmica do vento;
d	Diâmetro do cabo;
L	Comprimento do vão;
E	Módulo de Young;
L_{eq}	Vão equivalente;

ω	Peso específico do cabo;
F_c	Ação da gravidade sobre o condutor;
F_v	Força exercida pelo vento;
m_1	Coefficiente de sobrecarga do estado de inverno;
m_2	Coefficiente de sobrecarga do estado de Primavera;
t_{θ_i}	Tração a uma determinada temperatura θ_i ;
θ_1	Temperatura ambiente do estado de Inverno;
θ_2	Temperatura ambiente do estado de Primavera;
ω_g	Peso específico volumétrico do gelo;
$L_{critico}$	Vão crítico;
t_{max}	Tensão máxima;
$L_{vão1}$	Comprimento do vão 1;
$F_{V_condutores_xx}$	Força que o vento exerce nos condutores segundo o eixo dos xx;
$F_{V_condutores_yy}$	Força que o vento exerce nos condutores segundo o eixo dos yy;
$F_{V_isoladores}$	Força que o vento exerce nos isoladores;
$T_{condutores_yy}$	Tração exercida pelos condutores no sentido do eixo dos yy;
$P_{condutores}$	Peso exercido pelos condutores;
$P_{isoladores}$	Peso exercido pelos isoladores;
F_x	Força no sentido do eixo dos xx;
F_y	Força no sentido do eixo dos yy;
F_z	Força no sentido do eixo dos zz;
p	Parâmetro de curva;
U	Tensão;
f	Flecha;

Capítulo1

Introdução

1.1. Motivação e objetivos

Nas últimas décadas, a evolução tecnológica potenciou desenvolvimentos em várias áreas, inclusive ao nível do projeto de linhas elétricas. Ao longo do tempo, sentiu-se a necessidade de otimizar a execução destes projetos, nomeadamente no que se relacionava com a duração da realização dos mesmos, o que impulsionou a procura de soluções neste sentido.

Com o objetivo de uniformizar o procedimento do projeto de linhas elétricas, e dada a sua complexidade, surgiu a ideia de desenvolver um algoritmo que facilite a sua execução.

O trabalho realizado em dissertações anteriores, gerou avanços significativos neste sentido, iniciou-se o desenvolvimento de um algoritmo capaz de gerar uma solução genérica para a distribuição dos apoios, tendo como objetivo a minimização de custos. Deste modo, para qualquer projeto a desenvolver, o ponto de partida para todos os projetistas, seria já uma solução otimizada, procedendo a ajustes caso necessário.

A presente dissertação pretende em primeiro lugar a elaboração de um projeto exemplificativo de uma linha elétrica de 60kV, realizado com o objetivo de aumentar a sensibilidade em relação a procedimentos inerentes à execução destes projetos, para posteriormente realizar uma análise criteriosa ao algoritmo até agora desenvolvido. Após estar concluída esta fase de análise, pretende-se a implementação de melhorias ao algoritmo de modo a tornar o mesmo mais eficaz, robusto e abrangente.

Com a aplicação deste algoritmo, a realidade atual no que diz respeito à construção de linhas elétricas, irá sofrer alterações significativas, tornando-se uma ferramenta de grande utilidade para a EDP-Distribuição, permitindo soluções ainda mais uniformes, eficazes e com custos menores.

1.2. Estrutura da dissertação

Esta dissertação será constituída por sete capítulos, de seguida será resumido o trabalho desenvolvido em cada um deles.

- **Capítulo 1- Introdução:** Apresenta a motivação e objetivos do trabalho desenvolvido.
- **Capítulo 2- Estado de Arte:** Contém informação relevante, para uma melhor compreensão do contexto em que o presente trabalho se insere. Aborda-se desde a estrutura que o SEE apresenta, à evolução sentida a nível de projetos de linhas ao longo dos anos.
- **Capítulo 3- Elementos construtivos de uma linha elétrica:** Neste capítulo vão ser expostos os principais constituintes da linha, suportado pelo R.S.L.E.A.T..
- **Capítulo 4- Projeto exemplificativo:** Contém a resolução manual de um projeto, com o objetivo de adquirir sensibilidade para as dificuldades a enfrentar no projeto de uma linha elétrica. Para execução do projeto em causa é apresentado o cálculo mecânico suportado por bases teóricas, presentes no R.S.L.E.A.T..
- **Capítulo 5- Análise Crítica ao programa existente:** Neste capítulo procedeu-se a uma análise detalhada do programa desenvolvido em dissertações anteriores. Após realizar uma análise crítica do mesmo, apresentam-se as melhorias implementadas.
- **Capítulo 6- Demonstração de resultados:** Contém o estudo realizado de modo a testar o programa desenvolvido e as melhorias implementadas.
- **Capítulo 7- Conclusões e trabalho futuro:** Contém as conclusões referentes ao desenvolvimento deste trabalho. Apresentam-se ainda algumas sugestões a implementar em trabalho futuro.

Capítulo 2

Apresentação do tema

2.1. Estado de arte

O SEE (Sistema Elétrico de Energia), tem como principal função transportar a energia elétrica desde os centros de produção até aos locais de consumo, dividindo-se em seis grandes áreas: produção, transmissão, distribuição, comercialização, operação do mercado elétrico e operações logísticas.

A REN (Redes Energéticas Nacionais) opera a RNT (Rede Nacional de Transporte), que liga os produtores aos centros de consumo, assegurando o equilíbrio entre a procura e a oferta de energia. De modo a garantir a uniformização do sistema, foi estabelecido um contrato de concessão com o Estado Português, que garante que esta é a única entidade responsável pelo transporte de eletricidade.

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. [6]

Para que o sistema elétrico de energia seja robusto e de elevada fiabilidade, é necessário que toda a sua estrutura seja monitorizada em tempo real, a fim de evitar incidentes e garantir que são sempre cumpridos os critérios de qualidade e segurança.

Os principais constituintes físicos do sistema elétrico de energia são: [7]

- O sistema electroprodutor, por exemplo, uma central;
- Os transformadores de tensão;
- A rede de transporte, que pode contemplar os seguintes níveis: 150, 220 e 400kV;
- As subestações, incluindo todo o equipamento de corte, seccionamento, medida e controlo, a principal função é baixarem o nível de tensão;
- A rede de distribuição que contempla os níveis de tensão abaixo dos 60kV (inclusive).

O último ponto referido, a rede de distribuição, assume elevada importância no eficaz funcionamento do SEE. Assim, ao longo dos anos foi necessário investir em melhorias a nível da elaboração dos projetos de linhas elétricas, visto este ser um ponto crucial para o desenvolvimento rede de distribuição. [8]

A necessidade da elaboração de uma linha elétrica, é motivada, para situações de novos clientes, construção de novas linhas e interligações ou modificações no traçado de linhas já existentes. É necessário avaliar, na fase de pré-projeto, as condições que viabilizam a elaboração do mesmo. Essas condições podem ser técnicas, burocráticas, ambientais, de segurança e económicas.

As condições técnicas estabelecem o nível de tensão, a potência elétrica a transmitir, número de apoios e ainda o impacto energético associado à construção da linha.

A nível burocrático, destaca-se a necessidade de licenciamento e pedidos de autorização a entidades ou proprietários, para a implementação nos terrenos em questão.

Em termos ambientais, as preocupações passam por garantir que o impacto da linha a nível de fauna e flora, bem como alterações biofísicas introduzidas pela estrutura elétrica é mínimo. O importante é encontrar o equilíbrio, entre as infra-estruturas a construir e o ambiente onde queremos que elas sejam implementadas.

A segurança, é outra condição de destaque na execução de um projeto, existe um regulamento, R.S.L.E.A.T. (Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão) que estabelece regras a cumprir no projeto, construção e exploração de linhas elétricas de alta e média tensão, quer sejam aéreas ou subterrâneas, garantindo a proteção de pessoas e bens.

Por fim, em termos económicos procura-se encontrar sempre a opção de custo mais reduzido, sem comprometer as condições anteriormente referidas.

Para execução de projetos de linhas elétricas, é fundamental executar o levantamento topográfico dos terrenos atravessados sendo que este irá assumir um importante papel na execução de projetos de linhas, visto que só é possível a sua construção, conhecendo com elevado detalhe toda a área envolvida no projeto.

Em resumo, e complementando a informação anterior, listam-se alguns procedimentos que precedem a execução do projeto:

- O estudos de traçado, que pretende analisar as características biofísicas do terreno.
- O levantamento topográfico, pretende a representação em carta dos pontos notáveis e acidentes geográficos, possibilitando a determinação do perfil do terreno e planta parcelar. O objetivo é efetuar uma representação do terreno o mais próximo da realidade possível.
- Análise do clima, visto que o clima influencia diretamente na escolha dos materiais utilizados na linha (por ex. cabos, isoladores).
- Base regulamentar, pois é necessário ter em consideração todas as leis que possam estar em vigor e que tenham que ser implicadas na construção de uma linha.

Com a evolução registada a nível de construção de linhas, estas condições assumiram maior importância, e o facto de existirem mais recursos viabilizou o cumprimento das mesmas. Até aos anos 90, os projetos de linhas eram executados sem grande auxílio informático, tornando-se um processo bastante moroso e complexo.

Os projetistas recorriam a tabelas, construídas para tornar este processo mais eficaz, onde se resumiam dados para diferentes cabos, trações máximas, vento máximo e diferentes vãos, de modo a obter mais rapidamente os parâmetros de curva, facilitando assim o esboço da linha. Eram utilizados materiais que auxiliavam o desenho da mesma, como um acrílico com o desenho da catenária em função do parâmetro de curva.

Nesta altura o projetista tinha que verificar manualmente todos os cálculos inerentes à validação dos apoios, realizando os ajustes e alterações ao projeto, tornando este processo de extrema dificuldade e complexidade. Com o passar dos anos e com a evolução a nível informático, foram aparecendo ferramentas que ajudaram a tornar o processo mais eficiente.

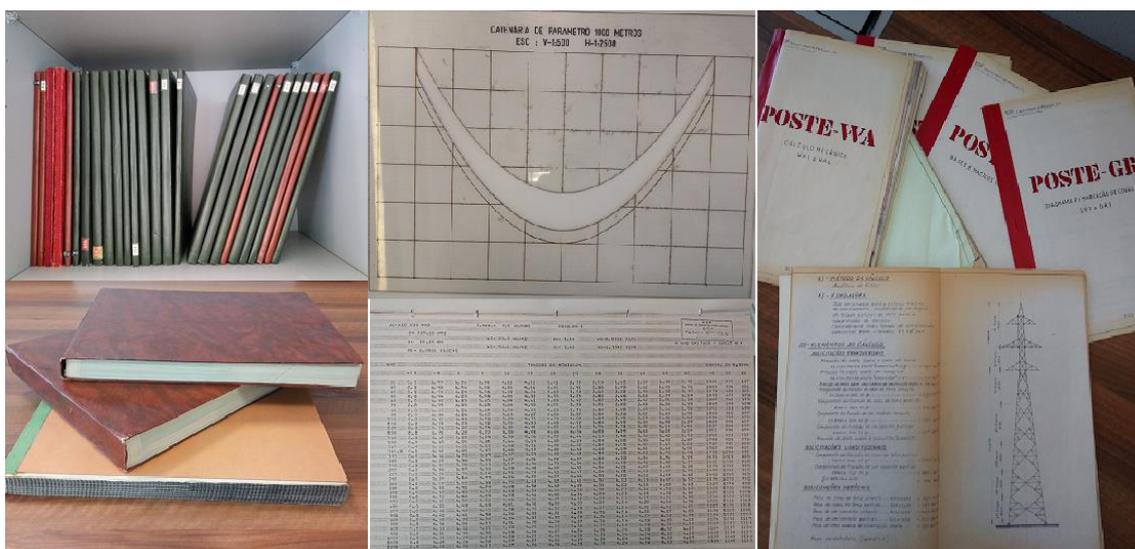


Figura 1 - Documentos utilizados no passado para a elaboração de projetos.

Em Portugal, a partir de 1990 começou a automatizar-se este processo surgindo algumas ferramentas de programação que auxiliavam de forma significativa. A partir de 1993, a EDP-Distribuição, começou a utilizar a ferramenta “CLINHAS” que veio uniformizar as principais funções de todos os programas utilizados neste procedimento.

O “CLINHAS”, veio facilitar o processo de construção de linhas elétricas, a partir de uma interface gráfica, onde era possível inserir os dados que o projetista tinha calculado e obter relatórios que resumiam os dados de maior interesse.

Estes relatórios continham informações como:

- Potenciais violações das condições previstas no RSLEAT;
- Alerta da necessidade de alteração a nível de altura dos apoios;
- Relatório de validação dos apoios definidos pelo projetista.

Numa das atualizações sofridas, o “CLINHAS” passou a ser complementado com as ferramentas de desenho, através de dados topográficos, tornando-a deste modo uma ferramenta mais completa. Em 2003 surge o “DM-SIT” que tem como base o “CLINHAS”, e integra ferramentas geográficas, de desenho e de cálculo.

Através da definição do ponto de início e fim, num mapa que integra a interface gráfica, é possível definir o esboço da linha, e ainda visualizar possíveis obstáculos que estejam presentes. A caracterização do traçado, é realizada inserindo alguns dados, desde o nível de tensão de serviço, a escala a utilizar, a distância à origem do primeiro apoio e até o regulamento a utilizar para o cálculo.

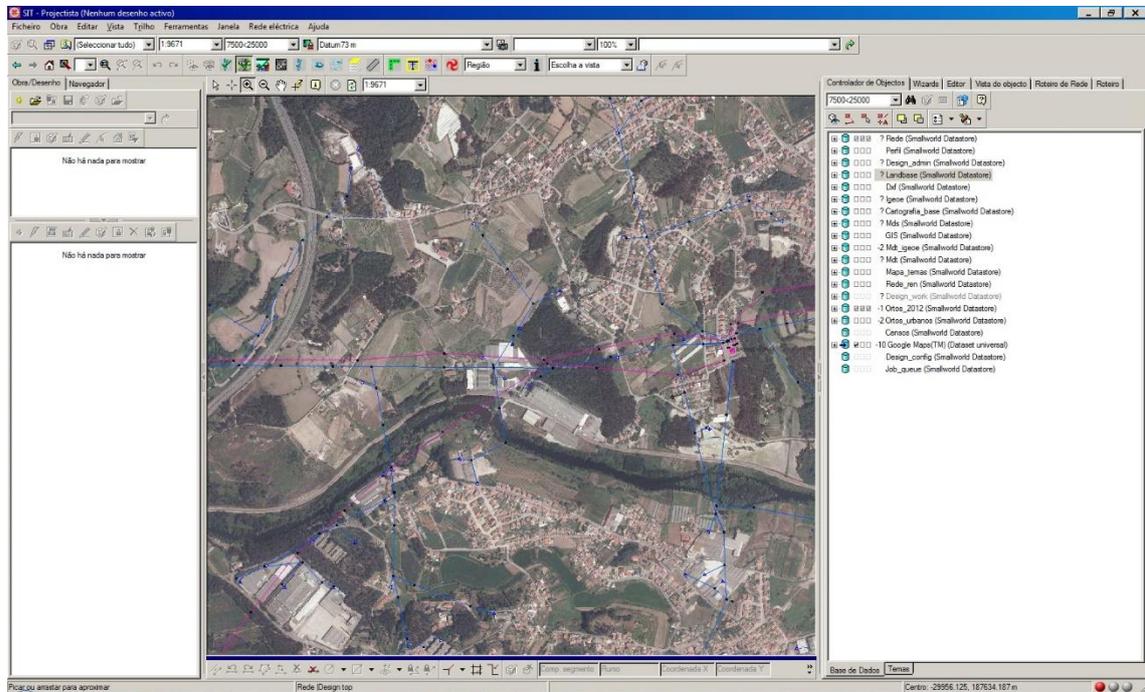


Figura 2 - Aspeto da interface do programa "DM-SIT" utilizado pela EDP-Distribuição.

Depois de gerar o perfil final da linha, é possível aceder a uma base de dados que contem informações e funcionalidades específicas para a elaboração do projeto. O programa integra funções que permitem redefinir o traçado, inserir ou mover apoios, considerando as condições de estabilidade, e ainda desenhar os cantões considerando o tipo de armações e fixação dos apoios.

Na Figura 3, mostra-se um perfil obtido após serem introduzidos os dados referidos no sistema, é nesta interface que se torna possível realizar os reajustes necessários consoante os constrangimentos encontrados.

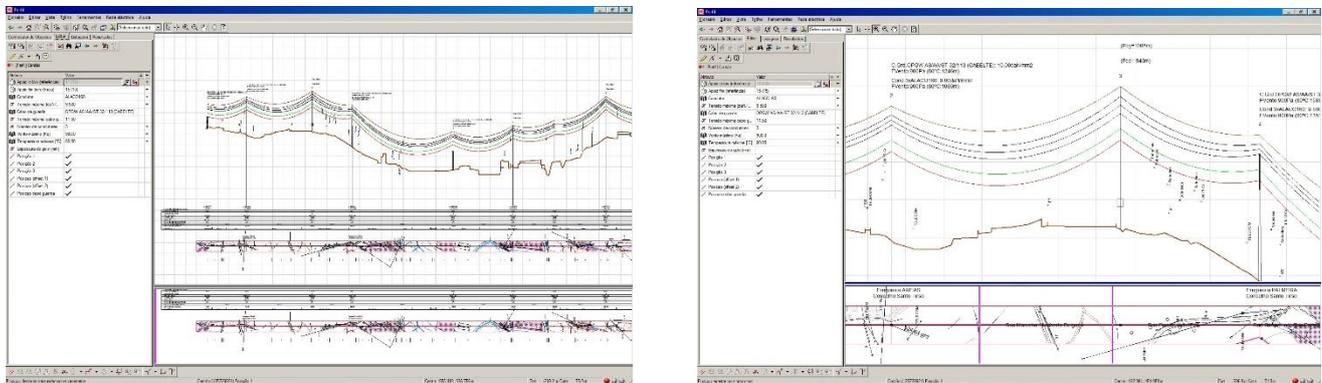


Figura 3 - Perfil obtido após introduzir os dados sobre a linha no programa "DM-SI T" utilizado pela EDP-Distribuição.

Finalmente, como output surge um relatório onde estão todos os dados resumidos como, numeração dos apoios, armação de cada apoio, distância à origem para todos os apoios, e os ângulos existentes no perfil.

De modo a tornar este processo mais sistemático, surgiu a ideia de criar um algoritmo capaz de gerar um esboço de uma linha a construir. Começou a desenvolver-se um algoritmo, em dissertações anteriores que, apenas com o perfil topográfico e a localização de apoios em ângulo, conseguia realizar uma distribuição dos apoios que cumpre as condições de estabilidade dos mesmos.

Esta nova ferramenta tem como vantagem principal, dar um ponto de partida ao projetista, gerando uma solução com localização e tipo de apoios a utilizar, minimizando o custo do projeto. O algoritmo desenvolvido seria adaptável a qualquer projeto, e ficava ao critério da equipa responsável pelo mesmo torná-lo viável, fazendo as alterações necessárias ao *output* obtido.

Podemos assim concluir que, desde que existe a necessidade de criar uma nova linha, até se tornar exequível, o processo envolve inúmeros recursos. Nesta dissertação, proceder-se-á às alterações necessárias ao algoritmo existente, de modo a que a ferramenta desenvolvida possa ser integrada na aplicação utilizada pela EDP-Distribuição e que isso acrescente valor e uniformize a forma de projetar linhas.

Capítulo 3

Elementos construtivos de uma linha elétrica

3.1. Introdução

O presente trabalho, foi desenvolvido considerando o Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão. O regulamento estabelece as condições a cumprir, para que o projeto de linhas seja executado respeitando sempre as normas legais impostas.

Neste capítulo, pretende-se realizar uma breve descrição dos materiais utilizados, bem como a referência a alguns aspetos normativos presentes no R.S.L.E.A.T. inerentes à execução de projetos de linhas aéreas de alta tensão.

3.2. Classificação de linhas

As linhas aéreas podem ser divididas em curtas, médias e longas. As linhas longas são caracterizadas por apresentar um comprimento superior a 100 km e um nível de tensão superior a 100kV, as linhas curtas são caracterizadas por apresentar um comprimento inferior a 100 km e um nível de tensão inferior a 100kV, as linhas médias apresentam características mistas das linhas curtas e longas.

Podemos ainda caracterizar as linhas elétricas como de 1ª classe, de 2ª classe e de 3ª classe. As linhas de 1ª classe, são aquelas cuja tensão nominal da instalação é inferior a 1 kV em corrente alternada e 1,5 kV em corrente contínua. As linhas de 2ª classe, são aquelas cuja tensão nominal da instalação, é superior aos valores das linhas de primeira classe e inferior a 40 kV. As linhas de 3ª classe, englobam o resto das linhas, ou seja, as linhas onde a tensão de instalação é superior a 40 kV¹.

¹ Segundo o Artigo 3º, Capítulo I, secção III do R.S.L.E.A.T.

As linhas aéreas estão regulamentadas pelo Regulamento de Segurança de Redes de Distribuição de Energia Elétrica em Baixa Tensão e pelo Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão.

3.3. Aspectos gerais

Uma linha elétrica tem como objetivo, realizar o transporte de energia entre dois pontos, e é normalmente efetuado em corrente alternada.

Nas secções seguintes, realizar-se-á a exposição de alguns dos principais constituintes de uma linha, cujas características podem variar de acordo com especificidades do próprio projeto, nomeadamente:

- Condutores;
- Cadeias de isoladores;
- Tipos de apoios;
- Redes de terra.

A EDP-Distribuição realizou testes de conformidade e certificação dos equipamentos/materiais referidos, que determinam a sua utilização nas obras efetuadas para construção de linhas elétricas.

3.4. Condutores

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-aço².

Os condutores podem ainda ser unifilares ou multifilares. Os condutores unifilares apresentam um único filamento 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.

Os condutores normalizados pela EDP para a construção de linhas de AT, são o ALACO160 e o ALACO326. [14]

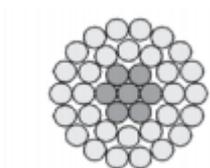


Figura 4 - Esquema para o cabo ALACO consultado no catálogo da Solidal.

² Segundo o artigo 18º, Capítulo III, Secção I, do R.S.L.E.A.T.

3.5. Isoladores

O principal objetivo dos isoladores, é como o próprio nome indica, isolar os apoios dos condutores e ainda sustentar o condutor. Os materiais isolantes mais utilizados, a nível construtivo, são a cerâmica, a porcelana vidrada, o vidro, bem como outros materiais não susceptíveis de degradação. O seu dimensionamento é realizado a fim de evitar o contornamento do isolamento.³ Caso o dimensionamento ou a manutenção tenha alguma falha, podem surgir incidentes como: [15]

- Condutividade através da massa do isolador, a corrente elétrica circula pela massa do isolador até ao apoio, este incidente não é grave, uma vez que o valor desta corrente é desprezável;
- Perfuração da massa do isolador, este incidente ao contrário do anterior já é bastante grave, uma vez que a corrente que circula já assume um valor significativo. Com o aumento do nível de tensão, aumenta a probabilidade de ocorrência deste incidente;
- Condutividade superficial, devido ao depósito de impurezas na superfície dos isoladores, pode dar-se o contornamento da parte exterior do isolador provocando a propagação da corrente elétrica pela superfície do condutor;
- Descarga disruptiva e contornamento, este incidente ocorre quando se forma um arco elétrico através do ar, entre o condutor e as partes metálicas dos suportes. Este incidente depende das condições atmosféricas e em consequência diminuição da rigidez dielétrica do ar.

Para a escolha dos isoladores, é importante ter em consideração a poluição da zona onde será implantada a linha, visto este ser um fator determinante no perigo de contornamento, obrigando a um dimensionamento mais cuidado da linha de fugas.

Quanto ao tipo de isolador, este poderá ser um isolador rígido ou uma cadeia de isoladores. Embora mais baratos, os isoladores rígidos têm caído em desuso, uma vez que, no caso de se verificar defeito no isolamento, é necessário substituir todo o isolador, ao contrário das cadeias de isoladores, uma vez que, apenas se procede à substituição da campânula que apresenta defeito. Outra desvantagem da utilização de isoladores rígidos, é apresentarem pouca fiabilidade, quando utilizados em zonas de vento.

³ Segundo os artigos 47º e 48º, Capítulo IV, Secção IX do R.S.L.E.A.T.

Em linhas aéreas de alta tensão, aplicam-se dois tipos de cadeias de isoladores: cadeias de suspensão e cadeias de amarração. Na Figura 5, podemos ver os dois tipos de cadeias de isoladores referidos.[16]

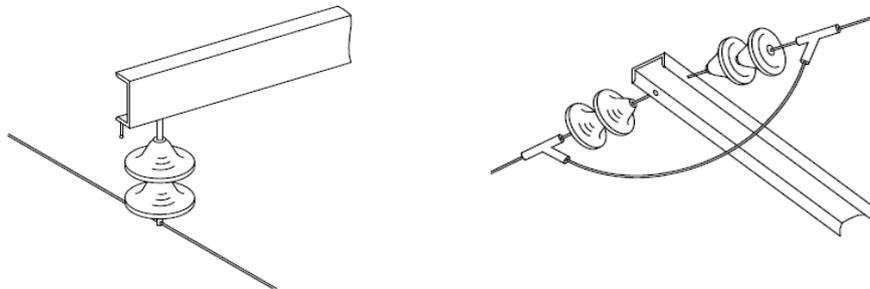


Figura 5 - Cadeias em suspensão (esquerda) e cadeias em amarração (direita)

As cadeias de suspensão são ligadas ao braço do apoio e dispõem-se na vertical, paralelas ao apoio, sendo o condutor suspenso na extremidade inferior. As cadeias de amarração fazem a ligação entre o condutor e o apoio praticamente na horizontal, sendo normalmente utilizadas em apoios sujeitos a esforços elevados, nomeadamente em apoios de ângulo, fim de linha, reforço e derivação.

Outro elemento de elevada importância são as hastes de descarga, pois asseguram a proteção contra possíveis arcos elétricos e uma melhor divisão da potência pelos elementos da cadeia, podem ser colocadas num ou noutro extremo da cadeia, ou em ambos. As hastes de descarga são também utilizadas para proteger as cadeias de isoladores em situações de descarga atmosférica, uma vez que a corrente de descarga ao encaminhar-se pela superfície da cadeia pode originar a sua destruição. [9]

Independentemente da sua constituição ou configuração, os isoladores devem estar dimensionados de modo a resistirem aos esforços mecânicos atuantes, nomeadamente a ação do vento sobre os próprios isoladores e os esforços transmitidos pelos condutores.

3.6. Apoios

Os apoios são escolhidos perante as condições impostas pelo R.S.L.E.A.T. , das quais se destacam as seguintes:

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

Os apoios podem ainda ser de diferentes tipos, consoante o tipo de esforço a que estão sujeitos. Podemos classificar os apoios, como: [3]

- Apoio de alinhamento, este tipo de apoio situado num troço retilíneo da linha;

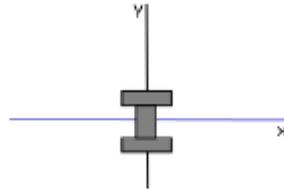


Figura 6 - Esquemático para apoio de alinhamento. [4]

- Apoio de ângulo, este tipo de apoio situado num ângulo da linha;

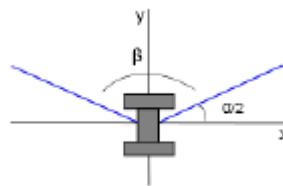


Figura 7 - Esquemático para apoio em ângulo. [4]

- Apoio de derivação, este tipo de apoio onde se estabelece uma ou mais derivações da linha;

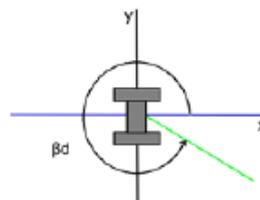


Figura 8 - Esquemático para apoio em derivação. [4]

- Apoios de reforço (alinhamento, ângulo e derivação), este tipo de apoio que suporta esforços ao ponto de ser capaz de reduzir as consequências negativas em caso de rutura de um cabo ou condutor;

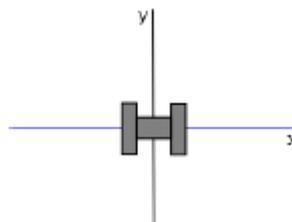


Figura 9 - Esquemático para apoio de reforço. [4]

- Apoios de fim de linha, este tipo de apoio capaz de suportar a totalidade dos esforços transmitidos pelos condutores, cabos de guarda e restantes acessórios de um só lado da linha.

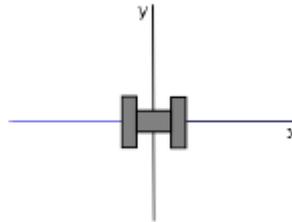


Figura 10 - Esquemático para apoio fim de linha. [4]

Os materiais mais utilizados e que são validados pelo R.S.L.E.A.T. são apoios de betão armado ou apoios metálicos, outros materiais terão que ser licenciados antes da sua aplicação na construção de apoios.⁴

Os apoios de betão armado, têm como principal constrangimento ao seu uso o de serem transportados já na sua configuração final, o que devido à altura em algumas tipologias se mostra como desvantagem. No entanto, os apoios de betão armado são mais baratos, e ocupam menos espaço comparativamente aos apoios metálicos.

⁴ Segundo o Artigo 51º, Capítulo V, Secção I do R.S.L.E.A.T.

3.7. Redes de terra

As redes de terra assumem um papel muito importante no que diz respeito à proteção de pessoas e equipamentos na ocorrência de defeitos, daí que o seu dimensionamento tenha de ser feito de forma exigente.

Os condutores de terra devem possuir boa condutibilidade elétrica, os materiais mais utilizados para este efeito são o aço galvanizado, o cobre ou outro material resistente à corrosão.

Os terrenos para a colocação dos elétrodos de terra⁵ devem ser húmidos de forma a facilitar a condutibilidade e afastados de locais de passagem, deve ainda ter-se em atenção a presença de substâncias corrosivas no solo que possam danificar os materiais.

Os elétrodos de terra deverão ser dimensionados, de modo a escoar as correntes de defeito existentes, e garantir que o sistema de terras se apresente equipotencial, e o mais próximo do potencial da terra (0V).[17] No caso de apoios metálicos implantados diretamente no solo, caso a resistência de terra seja inferior a 20Ω , é dispensada a ligação individual à terra, isto se não existir aparelhagem nem for um apoio de transição de linha aérea para subterrânea⁶.

Nos apoios de betão, as armações e suas ferragens devem ser ligadas à terra através de fio de cobre com secção igual ou superior a 16mm. Relativamente à secção dos condutores de terra, se de cobre, não poderão ter secção inferior a 16 mm^2 fora do solo, e 35 mm^2 na parte enterrada⁷. Além das armações, toda a aparelhagem que exista em apoios também tem de ser ligada à terra.

3.8. Conclusão

No presente capítulo foram apresentados os constituintes de uma linha aérea de alta tensão, focando características dos materiais utilizados, e aspetos construtivos relacionados com os mesmos e regulamentados pelo R.S.L.E.A.T..

O conhecimento dos materiais envolvidos na construção de linhas elétricas, vai permitir consolidar as bases teóricas necessárias, de modo, a efetuar o cálculo mecânico inerente ao projeto a elaborar, de modo mais eficiente.

⁵ Segundo a alínea 1 do Artigo 147º, Capítulo XV do R.S.L.E.A.T

⁶ Segundo a alínea 3 do Artigo 147º, Capítulo XV do R.S.L.E.A.T.

⁷ Segundo o Artigo 153º, Capítulo XV do R.S.L.E.A.T.

Capítulo 4

Projeto exemplificativo

4.1. Introdução

A realização de um projeto de linhas exemplificativo, tem como objetivo, aumentar a sensibilidade e compreensão da metodologia a por em prática, para elaboração de um projeto de linhas aéreas.

O projeto exemplificativo em causa pretendia criar uma linha elétrica, entre Sertã e Pedrogão, visando a minimização de custos. O propósito deste capítulo é, mostrar o cálculo mecânico inerente ao projeto em questão.

4.2. Considerações gerais para execução do projeto

O ponto de partida para iniciar este projeto, foi analisar uma planta com o perfil topográfico, fornecido pela EDP-Distribuição. Foram também fornecidos outros dados relevantes para a execução do projeto.

Após a análise dos dados referidos, foi possível identificar as características associadas ao projeto, que se apresentam de seguida.

- Comprimento da linha: 2699 m;
- Tensão máxima: 8 daN/mm²;
- Cabo: ALACO160;
- Nível de tensão: 60 kV;
- Tipos de apoios a utilizar: apoios do tipo F.
- Número de apoios em ângulo: 2,
 - 1º Apoio em ângulo: 634 m e 25º;
 - 2º Apoio em ângulo: 1866 m e 28º.

Os parâmetros relativos ao cabo utilizado encontram-se na Tabela 1.[14]

Parâmetro	Valor	Unidades
Secção	157,2	mm ²
Diâmetro	16,28	Mm
R 20°C	0,2124	Ω/Km
Módulo de Young	7750	daN/mm ²
Coef. Dilatação	0,000019	°C ⁻¹
Peso Próprio	0,545	daN/m
Tensão de rutura	4775	daN

Tabela 1 - Parâmetros do cabo ALACO160 utilizado no projeto exemplificativo.

4.3. Cálculo Mecânico

O cálculo mecânico é dividido em várias etapas: [4]

- Tensão máxima;
- Ação dos agentes atmosféricos e coeficiente de sobrecarga;
- Determinação do pior estado atmosférico;
- Equação dos estados;
- Estabilidade dos apoios;
- Verificação das distâncias regulamentares;
- Verificação do desvio transversal da cadeia de isoladores.

De seguida, vão apresentar-se os cálculos inerentes a cada etapa, obtidos para o projeto exemplificativo em questão.

4.3.1. Tensão máxima

Antes de iniciar o projeto, 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 Tensão de rutura (T_R) e o coeficiente de segurança para cabos. No cálculo da tensão de segurança, que é o valor limitador para o risco de rutura, deve considerar-se este coeficiente 2,5⁸.

$$t_{seg} = \frac{T_R}{2,5 \cdot \sigma} [daN/mm^2] \quad (4.1)$$

⁸ Segundo o artigo 24º, da Secção III, Capítulo III do R.S.L.E.A.T.

Para o cabo ALACO160 [14], cujos parâmetros se encontram na Tabela 1, vem que,

- $T_R = 4775$ daN;
- $\sigma = 157,2$ mm².

Assim,

$$t_{seg} = \frac{4775}{2,5 * 157,2} = 12 \text{ [daN/mm}^2\text{]}$$

Neste projeto em particular, foi utilizada uma tensão máxima de 8 daN/mm², por indicação da EDP- Distribuição.

Ao definir este valor, temos que ter em atenção aos seguintes pontos:

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

4.3.2. 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.

Um dos primeiros passos para iniciar o cálculo mecânico é 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 mesma é determinada pela equação seguinte⁹.

$$F_v = \alpha c q d \text{ [daN/m]} \text{ (4.2.)}$$

Onde,

- F_v , é a força proveniente da ação do vento;
- α , é o coeficiente de redução:
 - 0,6, nos condutores e cabos de guarda;
 - 1, nos apoios, nas travessas e nos isoladores.
- c , é o coeficiente de forma;
- q , é a pressão dinâmica do vento, em pascais;
- d , é a área da superfície batida pelo vento, em metros quadrados.

⁹ Segundo a alínea 1, do artigo 10º, Capítulo III do R.S.L.E.A.T.

Os valores para o coeficiente de forma, são tabelados para os condutores, cabos de guarda e isoladores, e para os apoios e travessas. Como para o cálculo mecânico em causa só se mostra relevante o valor para os condutores, mostra-se a Tabela 2, onde constam os valores a considerar para o coeficiente de forma e que pode ser consultada no RSLEAT¹⁰,

	Diâmetro (mm)	Coeficiente de forma "C"
Condutores nus e cabos de guarda	Até 12,5	1,2
	Acima 12,5	-
	Até 15,8	1,1
	Acima 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 - Valores para o coeficiente de forma segundo o R.S.L.E.A.T..

No projeto em causa, considerando o cabo acima referido o coeficiente de forma, tomará o valor 1.

Os valores para a pressão dinâmica do vento (q), são tabelados consoante a altura a que se encontram os elementos em estudo e a intensidade do vento a que vão estar sujeitos¹¹.

Altura acima do solo (m)	Pressão dinâmica, "q" (Pa)	
	Vento máximo habitual	Vento reduzido
Até 30	750	300
De 30 a 50	900	360
Acima de 50	1050	420

Tabela 3 - Pressão dinâmica do vento.

A intensidade do vento permitirá 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.

¹⁰ Segundo o Artigo 15º, Capítulo II do R.S.L.E.A.T.

¹¹ Segundo a alínea 1, do Artigo 13º, Capítulo II do R.S.L.E.A.T.

Para efetuar o cálculo dos coeficientes de sobrecarga, para os dois estados recorre-se à fórmula seguinte:

$$m = \frac{\sqrt{\left\{\omega + \rho_{gelo} \cdot \frac{\pi}{4} [(d + 2e)^2 - d^2]\right\} + F_v^2}}{\omega} \quad \text{[sem unidades]} \quad (4.3)$$

Onde,

- $\rho_{gelo} = 0.9 \text{ kg/dm}^3$;
- d , é o diâmetro do cabo em metros;
- $e = 10 \times 10^{-3}$, é a espessura da manga de gelo em metros já referida;

Para o estado primavera considera-se uma temperatura de 15°C e uma pressão dinâmica de vento de 900 Pa, e assim obtém-se uma força do vento para este estado ($Fv_{primavera}$) de :

$$Fv_{primavera} = 0,6 * 1 * 90 * 0,01628 = 0,88 \text{ [daN/m]}$$

O que por sua vez origina um coeficiente de sobrecarga ($m_{primavera}$) de,

$$m_{primavera} = \frac{\sqrt{0,545^2 + 0,88^2}}{0,555} = 1,89 \text{ [sem unidades]}$$

Para o estado de inverno, considerando a não existência de gelo, o valor da temperatura será -5°C e a pressão dinâmica de vento de 360 Pa, e assim obtém-se uma força do vento para este estado ($Fv_{inverno}$) de,

$$Fv_{inverno} = 0,6 * 1 * 36 * 0,01628 = 0,35 \text{ [daN/m]}$$

O que por sua vez origina um coeficiente de sobrecarga ($m_{inverno}$) de,

$$m_{inverno} = \frac{\sqrt{0,545^2 + 0,35^2}}{0,545} = 1,19 \text{ [sem unidades]}$$

4.3.3. 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 seu cálculo é efetuado como se pode ver na equação seguinte.

$$L_{\text{crítico}} = \frac{\sigma \cdot t_{\text{max}}}{\omega} \sqrt{\frac{24 \cdot \alpha_d (\theta_2 - \theta_1)}{m_2^2 - m_1^2}} = \frac{157,2 \cdot 8}{0,545} \sqrt{\frac{24 \cdot 1,89 \cdot 10^{-5} (15 - (-5))}{1,89^2 - 1,19^2}} = 149 \text{ [m]} \quad (4.4)$$

Onde,

- σ -secção do cabo;
- t_{max} -tensão máxima;
- ω -peso próprio;
- α_d -coeficiente de dilatação;
- θ_1 -temperatura ambiente do estado de inverno;
- θ_2 -temperatura ambiente do estado de primavera;
- m_1 -coeficiente de sobrecarga no estado de inverno;
- m_2 -coeficiente de sobrecarga no estado de primavera.

A determinação do pior estado atmosférico depende do vão equivalente, este vão representa o valor médio dos comprimentos dos vãos do cantão em causa. Através da Equação 4.5, é possível efetuar o cálculo referido, onde L_i corresponde ao comprimento do vão “i” de um dado cantão, cada cantão tem o seu vão equivalente.

$$L_{\text{equivalente}} = \sqrt{\frac{\sum L_i^3}{\sum L_i}} \text{ [m]} \quad (4.5)$$

Neste projeto, o vão equivalente foi encontrado após a ter sido efetuada a distribuição dos apoios, tendo em conta os obstáculos e a topografia do terreno. Podemos ver um esboço da linha elétrica em questão, na Figura 11.

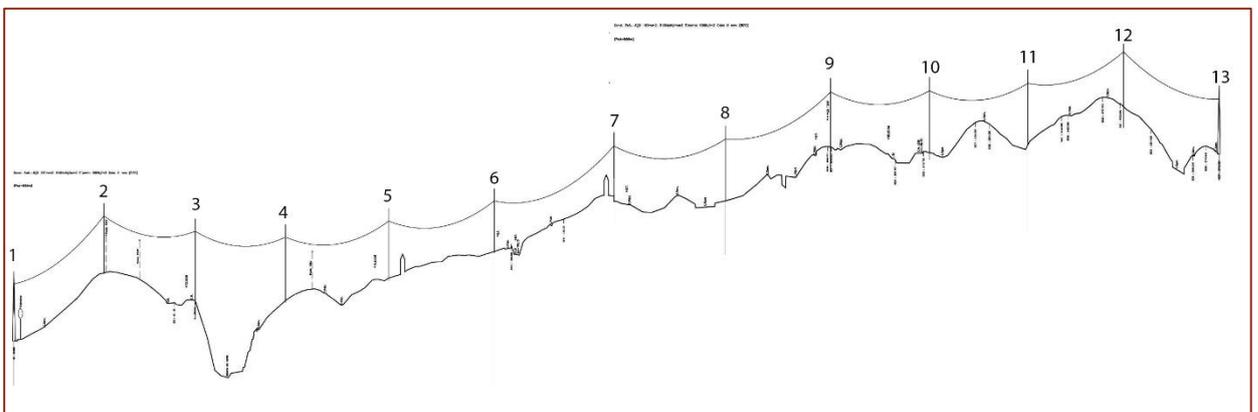


Figura 11 - Esboço da linha para o projeto exemplificativo.

De seguida apresenta-se o cálculo do vão equivalente para os três cantões do projeto.

➤ Cantão 1:

$$L_{equivalente} = \sqrt{\frac{210^3 + 214^3 + 211^3}{210 + 214 + 211}} = 211 \text{ [m]}$$

➤ Cantão 2:

$$L_{equivalente} = \sqrt{\frac{241^3 + 247^3 + 280^3 + 240^3 + 226^3}{241 + 247 + 280 + 240 + 226}} = 248 \text{ [m]}$$

➤ Cantão 3:

$$L_{equivalente} = \sqrt{\frac{213^3 + 212^3 + 206^3 + 206^3}{213 + 212 + 206 + 206}} = 209 \text{ [m]}$$

Para determinar qual o estado mais desfavorável, podemos analisar o diagrama de decisão seguinte, Figura 12, utilizando os valores calculados anteriormente. A determinação do estado mais desfavorável vai influenciar todas as etapas seguintes do cálculo mecânico.

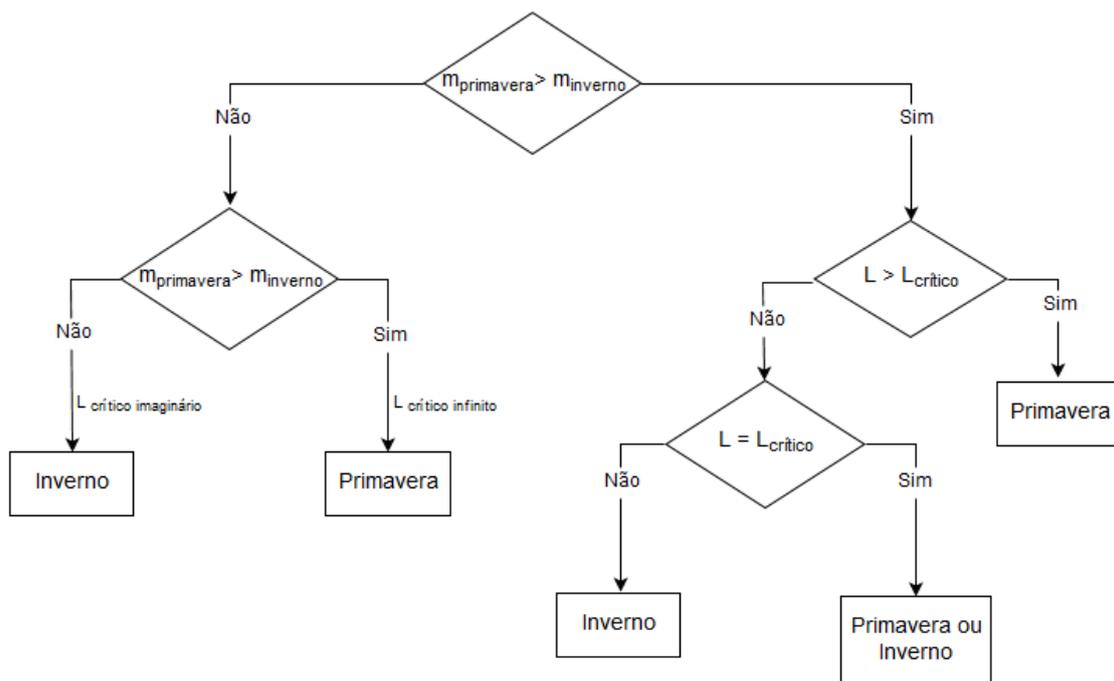


Figura 12 - Diagrama de decisão para o estado mais desfavorável.

As comparações efetuadas para determinação do pior estado atmosférico, encontram-se apresentadas de seguida, para os três cantões do projeto.

➤ Cantão 1:

$$\begin{cases} m_{primavera} > m_{inverno} \Leftrightarrow 1,89 > 1,19 \\ L_{equivalente} > L_{crítico} \Leftrightarrow 211 > 149 \end{cases} \text{ [m] (4.6)}$$

Estado mais desfavorável: Primavera – pelo que a tração máxima do condutor ocorre para uma temperatura de 15°C com um coeficiente de sobrecarga de 1,89.

➤ Cantão 2:

$$\begin{cases} m_{primavera} > m_{inverno} \Leftrightarrow 1,89 > 1,19 \\ L_{equivalente} > L_{crítico} \Leftrightarrow 248 > 149 \end{cases} \text{ [m] (4.7)}$$

Estado mais desfavorável: Primavera – pelo que a tração máxima do condutor também ocorre para uma temperatura de 15°C com um coeficiente de sobrecarga de 1,89.

➤ Cantão 3:

$$\begin{cases} m_{primavera} > m_{inverno} \Leftrightarrow 1,89 > 1,19 \\ L_{equivalente} > L_{crítico} \Leftrightarrow 209 > 149 \end{cases} \text{ (4.8)}$$

Estado mais desfavorável: Primavera – pelo que a tração máxima do condutor também ocorre para uma temperatura de 15°C com um coeficiente de sobrecarga de 1,89.

4.3.4. 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 noutra 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.

Importante referir que os parâmetros com índice “k” se referem ao estado atmosférico mais desfavorável (primavera ou inverno).

$$\theta_i + \frac{t_{\theta_i}}{\alpha_d E} - \frac{m_i^2 \omega^2 L_{eq}^2}{24 \alpha_d \sigma^2 t_{\theta_i}^2} = \theta_k + \frac{t_{max}}{\alpha_d E} - \frac{m_k^2 \omega^2 L_{eq}^2}{24 \alpha_d \sigma^2 t_{max}^2} \quad (4.9)$$

Onde,

- $\theta_{i,k}$ - temperatura para os estados a considerar;
- t_{θ_i} - valor da tensão a determinar;
- t_{max} - tensão máxima;
- α_d - coeficiente de dilatação;
- E - módulo de Young;
- σ - secção do cabo;
- L_{eq} - vão equivalente;
- ω - peso próprio;
- m_i - coeficiente de sobrecarga (assume o valor 1 para o “verão”);
- m_k - coeficiente de sobrecarga no estado mais desfavorável;

O parâmetro de curva, ou 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, Equação 4.10.

$$p = \frac{\sigma t_{\theta_i}}{\omega} \text{ [m]} \quad (4.10)$$

Onde,

- t_{θ_i} - determinado a partir da equação dos estados;
- σ - secção do cabo;
- ω - peso próprio do cabo.

A flecha corresponde à distância desde o ponto onde a tangente à curva é horizontal até à interseção da vertical com a linha horizontal que cruza o ponto de fixação dos condutores. Para determinar o valor da flecha máxima recorreu-se à Equação 4.11.

$$f = \frac{m \omega L^2}{8 \sigma t_{\theta_i}} \text{ [m]} \quad (4.11)$$

Onde,

- m - coeficiente de sobrecarga (assume o valor 1 para o “verão”);
- ω - peso próprio do cabo;
- L - vão máximo equivalente;
- σ - secção do cabo;
- t_{θ_i} - determinado a partir da equação dos estados.

De seguida apresentam-se os valores obtidos para os três cantões deste projeto e as etapas de cálculo para os mesmos.

➤ Cantão 1:

$$80 + \frac{t_{80^{\circ}\text{C}}}{1,89 * 10^{-5} * 7750} - \frac{1^2 * 0,545^2 * 211^2}{24 * 1,89 * 10^{-5} * 157,2^2 * t_{80^{\circ}\text{C}}^2} = 15 + \frac{8}{1,89 * 10^{-5} * 7750} - \frac{1,89^2 * 0,545^2 * 211^2}{24 * 1,89 * 10^{-5} * 157,2^2 * 8}$$

Onde,

$$t_{80^{\circ}\text{C}} = 3,43 \text{ [daN/mm}^2\text{]}$$

Cujo parâmetro,

$$p_{80^{\circ}\text{C}} = \frac{157,2 * 3,43}{0,545} = 989 \text{ [m]}$$

➤ Cantão 2:

$$80 + \frac{t_{80^{\circ}\text{C}}}{1,89 * 10^{-5} * 7750} - \frac{1^2 * 0,545^2 * 248^2}{24 * 1,89 * 10^{-5} * 157,2^2 * t_{80^{\circ}\text{C}}^2} = 15 + \frac{8}{1,89 * 10^{-5} * 7750} - \frac{1,89^2 * 0,545^2 * 248^2}{24 * 1,89 * 10^{-5} * 157,2^2 * 8}$$

Onde,

$$t_{80^{\circ}\text{C}} = 3,59 \text{ [daN/mm}^2\text{]}$$

Cujo parâmetro,

$$p_{80^{\circ}\text{C}} = \frac{157,2 * 3,59}{0,545} = 1034 \text{ [m]}$$

➤ Cantão 3:

$$80 + \frac{t_{80^{\circ}C}}{1,89 * 10^{-5} * 7750} - \frac{1^2 * 0,545^2 * 209^2}{24 * 1,89 * 10^{-5} * 157,2^2 * t_{80^{\circ}C}^2} = 15 + \frac{8}{1,89 * 10^{-5} * 7750} - \frac{1,89^2 * 0,545^2 * 209^2}{24 * 1,89 * 10^{-5} * 157,2^2 * 8}$$

Onde,

$$t_{80^{\circ}C} = 3,42 \text{ [daN/mm}^2\text{]}$$

Cujo parâmetro,

$$p_{80^{\circ}C} = \frac{157,2 * 3,42}{0,545} = 985 \text{ [m]}$$

Na Tabela 4, apresentam-se os valores obtidos, para todos os vãos do projeto.

Nº Cantão	Nº Apoio	Distâncias	Vão Equivalente	t _i	Flecha	Parâmetro curva	Estado mais desfavorável
1	1	0	211	-	-	-	-
	2	210		3,43	5,58	989	Primavera
	3	214		3,43	5,79	989	Primavera
	4	210		3,43	5,63	989	Primavera
2	5	241	248	3,59	7,02	1034	Primavera
	6	246		3,59	7,37	1034	Primavera
	7	280		3,59	9,48	1034	Primavera
	8	240		3,59	6,96	1034	Primavera
	9	225		3,59	6,17	1034	Primavera
3	10	212	209	3,42	5,76	985	Primavera
	11	211		3,42	5,70	985	Primavera
	12	206		3,42	5,38	985	Primavera
	13	206		3,42	5,38	985	Primavera

Tabela 4 - Dados relativos a cada vão.

4.3.5. Estabilidade dos apoios

O cálculo da estabilidade dos apoios, é realizado através de hipóteses de cálculo presentes no R.S.L.E.A.T., e variam para cada tipo de apoio.

Os cálculos serão demonstrados de acordo com a função dos apoios, não se tendo efetuado o estudo de apoios de reforço, abordando o cálculo para apoios:

- Fim de linha;
- Alinhamento;
- Ângulo.

A demonstração de resultados, para os apoios de alinhamento, fim de linha e ângulo, realizar-se-á de seguida.

4.3.5.1. Fim de linha

Os apoios de fim de linha devem ser calculados para as seguintes hipóteses, consideradas não simultaneamente:

➤ Ações normais

Hipótese 1

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

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

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

➤ Ações excepcionais

Hipótese 2

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

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

No projeto exemplificativo existem dois apoios de fim de linha, os cálculos de estabilidade para os mesmos apresentam-se de seguida.

➤ Hipótese 1 (apoio nº 1)

Nesta dissertação efetuou-se o cálculo das forças por ponto de aplicação, sendo que o esforço segundo o eixo yy, sentido transversal, é:

$$F_{y_h1} = F_{V_condutores_yy} + F_{V_isoladores} \text{ [daN]} \quad (4.12)$$

Onde,

$$F_{V_condutores_yy} = \alpha * c * q * d * \frac{L_{\text{vão_direita}}}{2} \text{ [daN]} \quad (4.13)$$

$$F_{V_isoladores} = 15 \text{ [daN]} \quad (4.14)$$

Substituindo, nas Equações 4.12, 4.13 e 4.14, para o apoio nº 1,

$$F_{V_condutores_yy} = 0,6 * 1 * 90 * 0,01628 * \frac{210}{2} = 92,3 \text{ [daN]}$$

$$F_{V_isoladores} = 15 \text{ [daN]}$$

pelo que,

$$F_{y_h1} = 107,3 \text{ [daN]}$$

O cálculo para o apoio nº 13 é semelhante, alterando o valor do comprimento do vão presente na Tabela 4, os valores encontram-se resumidos na Tabela 5.

Nº Apoio	Fv_condutores_yy	Fv_Isoladores	Fy_H1
1	92,3	15	107,3
13	90,5	15	105,5

Tabela 5 - Esforços transversais para a Hipótese 1.

No sentido longitudinal, a força corresponde à tração exercida pelos dois meios vãos adjacentes ao apoio em causa.

$$F_{x_h1} = T_{condutores_xx} = \sigma |t_{\max_vão_direita} - t_{\max_vão_esquerda}| \text{ [daN]} \quad (4.15)$$

Substituindo, na Equação 4.15, para o apoio nº 1,

$$F_{x_h1} = T_{condutores_xx} = 157,2 * |8 - 0| = 1257,6 \text{ [daN]}$$

O cálculo para o apoio nº 13 é semelhante, alterando o valor do comprimento do vão presente na Tabela 4, os valores encontram-se resumidos na Tabela 6.

Nº Apoio	T_condutores_xx	Fx_H1
1	1257,6	1257,6
13	1257,6	1257,6

Tabela 6 - Esforços longitudinais para a Hipótese 1.

Por último, para a hipótese 1, no sentido vertical, é necessário considerar o peso dos condutores dos vãos adjacentes e o peso das cadeias de isoladores.

$$F_{z_h1} = P_{condutores} + P_{isoladores} \text{ [daN]} \quad (4.16)$$

Onde,

$$P_{condutores} = \omega * \frac{L_{vão_direita} + L_{vão_esquerda}}{2} \text{ [daN]} \quad (4.17)$$

$$P_{isoladores} = 30 \text{ [daN]} \quad (4.18)$$

Substituindo nas Equações 4.16, 4.17 e 4.18, para o apoio nº 1,

$$F_{z_h1} = 0,545 * \frac{210+0}{2} + 30 = 87,2 \text{ [daN]}$$

O cálculo para o apoio nº 13 é semelhante, alterando o valor do comprimento do vão presente na Tabela 4, os valores encontram-se resumidos na Tabela 7.

Nº Apoio	P_condutores	P_isoladores	Fz_H1
1	57,2	30	87,2
13	56,1	30	86,1

Tabela 7 - Esforços verticais para a Hipótese 1.

➤ Hipótese 2 (apoio nº 1)

Tal como refere a hipótese 2, é necessário considerar as componentes horizontais das trações máximas exercidas pelos condutores, considerando a rotura de um qualquer dos condutores.

$$F_{x_h2} = \sigma * t_{\max} \text{ [daN]} \quad (4.19)$$

Substituindo na Equação anterior, para o apoio nº 1,

$$F_{x_h2} = 157,2 * 8 = 1257,6 \text{ [daN]}$$

O cálculo para o apoio nº 13 é semelhante, alterando o valor do comprimento do vão presente na Tabela 4, os valores encontram-se resumidos na Tabela 8.

Nº Apoio	Fx_H2
1	1257,6
13	1257,6

Tabela 8 - Componente horizontal para a Hipótese 2.

Como no R.S.L.E.A.T. nada refere quanto aos esforços transversais, para a hipótese 2, os mesmos são zero, para ambos os apoios.

$$F_{y_{h2}} = 0 \text{ [daN]} \quad (4.20)$$

Os esforços verticais calculam-se da mesma forma que na hipótese 1, equações 4.16, 4.17 e 4.18, para o apoio nº 1,

$$F_{z_{h2}} = 0,545 * \frac{210+0}{2} + 30 = 87,2 \text{ [daN]}$$

O cálculo para o apoio nº 13 é semelhante, alterando o valor do comprimento do vão presente na Tabela 4, os valores encontram-se resumidos na Tabela 9.

Nº Apoio	P_condutores	P_isoladores	Fz_h2
1	57,2	30	87,2
13	56,1	30	86,1

Tabela 9 - Esforços verticais para a Hipótese 2.

A fim de se efetuar a escolha da gama do apoio, procedeu-se à comparação entre os resultados obtidos, com os valores presentes nos catálogos, fornecidos pela EDP-Distribuição.

Hipótese 1	Hipótese 2
$F_{x_{h1}} + F_{y_{h1}} < F_{x_{h1_catálogo}} + F_{y_{h1_catálogo}}$ $F_{z_{h1}} < F_{z_{h1_catálogo}}$	$F_{x_{h2}} + F_{y_{h2}} < F_{x_{h2_catálogo}} + F_{y_{h2_catálogo}}$ $F_{z_{h2}} < F_{z_{h2_catálogo}}$

Tabela 10 - Formulário para escolha dos apoios.

Após a validação dos esforços considerando o catálogo de apoios utilizado nesta dissertação [10], conclui-se que o apoio do tipo F65CA, cumpre as condições impostas. Assim, para o apoio nº1 vem que,

Hipótese 1	Hipótese 2
$1257,6 + 107,3 < 50 + 1750$ $87,2 < 750$	$1257,6 + 0 < 50 + 1750$ $87,2 < 750$

Tabela 11 - Comparação dos valores para escolha do apoio 1.

O método para seleção do apoio nº 13 é semelhante, visto ser também um apoio fim de linha, conclui-se que o apoio do tipo F65CA, cumpre as condições impostas.

Hipótese 1	Hipótese 2
$1257,6 + 105,5 < 50 + 1750$ $86,1 < 750$	$1257,6 + 0 < 50 + 1750$ $86,1 < 750$

Tabela 12 - Comparação dos valores para escolha do apoio 13.

4.3.5.2. Alinhamento

Os apoios de alinhamento das linhas devem ser calculados para as hipóteses seguintes, consideradas não simultaneamente:

Hipótese 1

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

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

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

Hipótese 2

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

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

Neste projeto, existem no total nove apoios de alinhamento. Estes apoios encontram-se distribuídos do seguinte modo:

- 1º Cantão: dois apoios;
- 2º Cantão: quatro apoios;
- 3º Cantão: três apoios.

Os apoios de alinhamento estão representados na Figura 11 pelos números 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11 e 12. Quanto ao comprimento dos vãos, o mesmo pode ser consultado na Tabela 4.

➤ **Hipótese 1 (apoio nº 2)**

O cálculo do esforço segundo o eixo yy, sentido transversal, é:

$$F_{y_{h1}} = F_{V_{condutores_{yy}}} + F_{V_{isoladores}} \text{ [daN]} \quad (4.21)$$

Onde,

$$F_{V_{condutores_{yy}}} = \alpha * c * q * d * \frac{L_{v\tilde{a}o_{direita}} + L_{v\tilde{a}o_{esquerda}}}{2} \text{ [daN]} \quad (4.22)$$

$$F_{V_{isoladores}} = 15 \text{ [daN]} \quad (4.23)$$

Substituindo as Equações 4.21, 4.22, e 4.23 para o apoio nº 2,

$$F_{V_{condutores_{yy}}} = 0,6 * 1 * 90 * 0,01628 * \frac{210+214}{2} = 186,4 \text{ [daN]}$$

$$F_{V_{isoladores}} = 15 \text{ [daN]}$$

pelo que,

$$F_{y_{h1}} = 201,4 \text{ [daN]}$$

Os cálculos relativos aos restantes apoios são semelhantes, alterando-se naturalmente o valor dos vãos adjacentes. Os valores obtidos encontram-se resumidos na Tabela 13.

Nº Apoio	Fv_condutores_yy	Fv_isoladores	Fy_H1
2	186,4	15	201,4
3	186,8	15	201,8
5	214,5	15	229,5
6	231,6	15	246,6
7	228,6	15	243,6
8	204,8	15	219,8
10	186,8	15	201,8
11	183,7	15	198,7
12	181,1	15	196,1

Tabela 13 - Esforços transversais para a Hipótese1.

No sentido longitudinal, a força corresponde à tração exercida pelos dois meios vãos adjacentes ao apoio em causa.

$$F_{x_{h1}} = T_{condutores_{xx}} = \sigma |t_{\max_vão_direita} - t_{\max_vão_esquerda}| \text{ [daN]} \quad (4.24)$$

Substituindo na Equação 4.24 para o apoio nº 2,

$$F_{x_{h1}} = T_{condutores_{xx}} = 157,2 * |8 - 8| = 0 \text{ [daN]}$$

Os cálculos relativos aos restantes apoios são semelhantes, mantendo-se o valor da t_{\max} para todos os cantões. Os valores obtidos encontram-se resumidos na Tabela 14.

Nº Apoio	T_condutores_xx	Fx_H1
2	0	0
3	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0

Tabela 14 - Esforços longitudinais para a Hipótese 1.

Por último, para a hipótese 1, no sentido vertical, é necessário considerar o peso dos condutores dos vãos adjacentes e o peso das cadeias de isoladores.

$$F_{z_{h1}} = P_{condutores} + P_{isoladores} \text{ [daN]} \quad (4.25)$$

Onde,

$$P_{condutores} = \omega * \frac{L_{vão_direita} + L_{vão_esquerda}}{2} \text{ [daN]} \quad (4.26)$$

$$P_{isoladores} = 30 \text{ [daN]} \quad (4.27)$$

Substituindo as Equações 4.25, 4.26, 4.27 para o apoio nº 2,

$$F_{z_{h1}} = 0,545 * \frac{210+214}{2} + 30 = 145,5 \text{ [daN]}$$

Os cálculos relativos aos restantes apoios são semelhantes, alterando-se naturalmente o valor do vão adjacente. Os valores obtidos, encontram-se resumidos na Tabela 15.

Nº Apoio	P_condutores	P_isoladores	Fz_H1
2	115,5	30	145,5
3	115,8	30	145,8
5	133,0	30	163,0
6	143,6	30	173,6
7	141,7	30	171,7
8	127,0	30	157,0
10	115,8	30	145,8
11	113,9	30	143,9
12	112,3	30	142,3

Tabela 15 - Esforços verticais para a Hipótese 1.

➤ **Hipótese 2 (apoio nº 2)**

Tal como refere a hipótese 2, é necessário considerar uma força horizontal, de valor igual a um quinto do da resultante das forças provenientes da ação do vento normal à direção da linha sobre os condutores, nos dois meios vãos adjacentes.

$$F_{x_{h2}} = \frac{1}{5} * F_{V_{condutores_{yy_{h1}}}} \text{ [daN]} \quad (4.28)$$

Substituindo a Equação 4.28 para o apoio nº 2,

$$F_{x_{h2}} = \frac{1}{5} * 186,4 = 37,3 \text{ [daN]}$$

Os cálculos relativos aos restantes apoios são semelhantes, alterando-se naturalmente o valor do vão adjacente. Os valores obtidos encontram-se resumidos na Tabela 16.

Nº Apoio	Fx_h2
2	37,3
3	37,4
5	42,9
6	46,3
7	45,7
8	41,0
10	37,4
11	36,7
12	36,2

Tabela 16 - Componente horizontal para a Hipótese 2

Como no R.S.L.E.A.T. nada refere quanto aos esforços transversais, para a hipótese 2, os mesmos são zero. Portanto o valor é igual para todos os apoios em alinhamento do projeto exemplificativo.

$$F_{y_{h2}} = 0 \text{ [daN]} \quad (4.29)$$

Os esforços verticais calculam-se da mesma forma que na hipótese 1 Equações 4.25, 4.26 e 4.27, assim para o apoio nº 2,

$$F_{z_{h2}} = 0,545 * \frac{210+214}{2} + 30 = 145,54 \text{ [daN]}$$

Os cálculos relativos aos restantes apoios são semelhantes, alterando-se naturalmente o valor dos vãos adjacentes. Os valores obtidos encontram-se resumidos na Tabela 17.

Nº Apoio	P_condutores	P_isoladores	Fz_H1
2	115,5	30	145,5
3	115,8	30	145,8
5	133,0	30	163,0
6	143,6	30	173,6
7	141,7	30	171,7
8	127,0	30	157,0
10	115,8	30	145,8
11	113,9	30	143,9
12	112,3	30	142,3

Tabela 17 - Esforços verticais para a Hipótese2.

A fim de se efetuar a escolha da gama do apoio, procedeu-se à comparação entre os resultados obtidos, com os valores presentes nos catálogos [10], fornecidos pela EDP-Distribuição.

Hipótese 1	Hipótese 2
$F_{x_{h1}} + F_{y_{h1}} < F_{x_{h1_catálogo}} + F_{y_{h1_catálogo}}$ $F_{z_{h1}} < F_{z_{h1_catálogo}}$	$F_{x_{h2}} + F_{y_{h2}} < F_{x_{h2_catálogo}} + F_{y_{h2_catálogo}}$ $F_{z_{h2}} < F_{z_{h2_catálogo}}$

Tabela 18 - Formulário para escolha do tipo de apoio

Após a validação dos esforços, considerando o catálogo de apoios, conclui-se que o apoio do tipo F20CA, cumpre as condições impostas. Assim, para o apoio nº 2 vem que,

Hipótese 1	Hipótese 2
$0 + 201,4 < 25 + 450$ $145,54 < 750$	$37,3 + 0 < 25 + 450$ $145,54 < 750$

Tabela 19 - Comparação efetuada para escolha do tipo de apoio

Relativamente aos apoios nº 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11 e 12, o apoio do tipo F20CA também cumpre as condições impostas.

4.3.5.3. Ângulo

Os apoios em ângulo devem ser calculados para as seguintes hipóteses, consideradas não simultaneamente:

Hipótese 1

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

Simultaneamente, a resultante das componentes horizontais das trações exercidas pelos condutores e pelos cabos de guarda à temperatura de +15°C, com vento atuando segundo a direção da bissetriz do ângulo.

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

Hipótese 2

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

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

O presente projeto exemplificativo apresenta dois apoios em ângulo, o apoio nº 4 e apoio nº 9. Tal como nos casos anteriores, será descrita a metodologia de cálculo dos esforços para o apoio 4 e apresentado em tabela para o apoio nº 9.

No cálculo de estabilidade deste tipo de apoios, temos que ter em consideração o ângulo em questão,

- Apoio nº 4: 25 grados.
- Apoio nº 9: 28 grados.

Estes valores foram fornecidos pela EDP-Distribuição.

➤ **Hipótese 1 (apoio nº4)**

O cálculo do esforço segundo o eixo yy, sentido transversal, é:

$$F_{y_{h1}} = F_{V_condutores_yy} + T_{condutores_yy} + F_{V_isoladores} \text{ [daN]} \quad (4.30)$$

Onde,

$$F_{V_condutores_yy} = \alpha * c * q * d * \frac{L_{v\grave{a}o\ direita} + L_{v\grave{a}o\ esquerda}}{2} \sin^2 \left(100 - \frac{\varphi}{2} \right) \text{ [daN]} \quad (4.31)$$

$$T_{condutores_yy} = 2 * \sigma * t_{max} * \sin \left(\frac{\varphi}{2} \right) \text{ [daN]} \quad (4.32)$$

e,

$$F_{V_isoladores} = 2 * 15 \text{ [daN]} \quad (4.33)$$

Substituindo nas Equações 4.30, 4.31, 4.32 e 4.33, para o apoio nº 4, onde o valor do ângulo é $\varphi = 25^\circ$,

$$\begin{aligned} F_{V_condutores_yy} &= 0,6 * 1 * 90 * 0,01628 * \frac{211 + 241}{2} \sin^2 \left(100 - \frac{25}{2} \right) \\ &= 191 \text{ [daN]} \end{aligned}$$

$$T_{condutores_yy} = 2 * 157,2 * 8 * \sin \left(\frac{25}{2} \right) = 490,7 \text{ [daN]}$$

$$F_{V_isoladores} = 2 * 15 = 30 \text{ [daN]}$$

pelo que,

$$F_{y_{h1}} = 711,8 \text{ [daN]}$$

Relativamente ao apoio nº 9, o valor do ângulo é $\varphi = 28^\circ$, os valores obtidos encontram-se na Tabela 20,

Nº Apoio	Fv_condutores_yy	T_condutores_yy	Fv_Isoladores	Fy_H1
4	191,1	490,7	30	711,8
9	119,5	531,5	30	681,1

Tabela 20 - Esforços transversais para a Hipótese 1.

No sentido longitudinal, a força corresponde à força exercida pelo vento nos condutores dos dois meios vãos adjacentes ao apoio em causa.

$$F_{x_{h1}} = F_{v_{condutores_{xx}}} = \alpha * c * q * d * \frac{L_{vão_esquerda} - L_{vão_direita}}{2} \sin\left(100 - \frac{\varphi}{2}\right) \cos\left(100 - \frac{\varphi}{2}\right) \text{ [daN]} \quad (4.34)$$

Substituindo a Equação 4.34, para o apoio nº 4, onde $\varphi = 25^\circ$,

$$F_{x_{h1}} = 0,6 * 1 * 90 * 0,01628 * \frac{241-211}{2} \sin\left(100 - \frac{25}{2}\right) \cos\left(100 - \frac{25}{2}\right) = 2,5 \text{ [daN]}$$

Relativamente ao apoio nº 9, o valor do ângulo é $\varphi = 28^\circ$, os valores obtidos encontram-se na Tabela 21,

Nº Apoio	Fx_H1
4	2,5
9	1,2

Tabela 21 - Esforços longitudinais para a Hipótese 1.

Por último, para a hipótese 1, no sentido vertical, é necessário considerar o peso dos condutores dos vãos adjacentes e o peso das cadeias de isoladores.

$$F_{z_{h1}} = P_{condutores} + P_{isoladores} \text{ [daN]} \quad (4.35)$$

em que,

$$P_{condutores} = \omega * \frac{L_{vão_direita} + L_{vão_esquerda}}{2} \text{ [daN]} \quad (4.36)$$

$$P_{isoladores} = 2 * 30 \text{ [daN]} \quad (4.37)$$

Substituindo as Equações 4.35, 4.36 e 4.37, para o apoio nº 4, onde $\varphi = 25^\circ$, vem que,

$$F_{z_{h1}} = 0,545 * \frac{211+241}{2} + 2 * 30 = 183,2 \text{ [daN]}$$

Relativamente ao apoio nº 9, o valor do ângulo é $\varphi = 28^\circ$, os valores obtidos encontram-se na Tabela 22,

Nº Apoio	P_condutores	P_isoladores	Fz_H1
4	123,2	60	183,2
9	119,6	60	179,6

Tabela 22 - Esforços verticais para a Hipótese 1.

➤ **Hipótese 2 (apoio nº 4)**

Tal como refere a hipótese 2, é necessário considerar uma força horizontal, de valor igual a um quinto do da resultante das forças provenientes da ação do vento normal à direção da linha sobre os condutores, nos dois meios vãos adjacentes.

$$F_{x_{h2}} = \frac{1}{5} * F_{V_{condutores_{yy_{h1}}}} \quad [\text{daN}] \quad (4.38)$$

Substituindo na Equação 4.38, para o apoio nº 4, onde o valor do ângulo é $\varphi = 25^\circ$,

$$F_{x_{h2}} = \frac{1}{5} * 191,1 = 38,2 \quad [\text{daN}]$$

Relativamente ao apoio nº 9, o valor do ângulo é $\varphi = 28^\circ$, os valores obtidos encontram-se na Tabela 23,

Nº Apoio	Fx_H2
4	38,2
9	23,9

Tabela 23 - Esforços horizontais para a Hipótese2.

Como no R.S.L.E.A.T. nada refere quanto aos esforços transversais, para a hipótese 2, os mesmos são zero para ambos os apoios.

$$F_{y_{h2}} = 0 \quad [\text{daN}] \quad (5.39)$$

Os esforços verticais calculam-se da mesma forma que na hipótese 1, assim para o apoio nº 4,

$$F_{z_{h2}} = 0,545 * \frac{211+241}{2} + 2 * 30 = 183,2 \quad [\text{daN}]$$

Relativamente ao apoio nº 9, os valores obtidos encontram-se na Tabela 24.

Nº Apoio	P_condutores	P_isoladores	Fz_H2
4	123,2	60	183,2
9	119,6	60	179,6

Tabela 24 - Esforços verticais para a Hipótese 2.

A fim de se efetuar a escolha da gama do apoio, procedeu-se à comparação entre os resultados obtidos, com os valores presentes nos catálogos [10], fornecidos pela EDP-Distribuição.

Hipótese 1	Hipótese 2
$F_{x,h1} + F_{y,h1} < F_{x,h1_catálogo} + F_{y,h1_catálogo}$ $F_{z,h1} < F_{z,h1_catálogo}$	$F_{x,h2} + F_{y,h2} < F_{x,h2_catálogo} + F_{y,h2_catálogo}$ $F_{z,h2} < F_{z,h2_catálogo}$

Tabela 25 - Formulário para escolha do tipo de apoio.

Após a validação dos esforços, considerando o catálogo de apoios, conclui-se que o apoio do tipo F45CA, cumpre as condições impostas. Assim, para o apoio nº 4 vem que,

Hipótese 1	Hipótese 2
$2,52 + 711,8 < 25 + 1025$ $183,2 < 500$	$38,2 + 0 < 25 + 1025$ $183,2 < 500$

Tabela 26 - Comparação dos valores para escolha do apoio 4.

O método para seleção do apoio nº 9 é semelhante, visto ser também um apoio em ângulo, conclui-se que o apoio do tipo F45CA, cumpre as condições impostas.

Hipótese 1	Hipótese 2
$1,18 + 681 < 25 + 1025$ $179,6 < 500$	$23,9 + 0 < 25 + 1025$ $179,6 < 500$

Tabela 27 - Comparação dos valores para escolha do apoio 9.

Na tabela seguinte, encontram-se os todos os apoios escolhidos, para elaboração da linha do projeto exemplificativo,

Nº Apoio	Tipo de apoio
1	F65CA/27
2	F20CA/27
3	F20CA/33
4	F45CA/30
5	F20CA/27
6	F20CA/24
7	F20CA/24
8	F20CA/27
9	F45CA/24
10	F20CA/27
11	F20CA/27
12	F20CA/24
13	F65CA/24

Tabela 28 - Tipo de Apoio escolhido.

4.3.6. Distâncias regulamentares

Na construção de uma linha, é necessário ter em consideração a existência de certos obstáculos. Assim, de modo a manter a segurança das pessoas e também do próprio material, foi necessário estabelecer distâncias mínimas que devem ser cumpridas.

O R.S.L.E.A.T. prevê quatro situações distintas: distância dos condutores ao solo, distância dos condutores às árvores, distância dos condutores aos edifícios e distância dos condutores a obstáculos diversos.

Após ter sido efetuada a distribuição dos apoios do projeto exemplificativo, e elaborado o desenho da linha recorrendo à ferramenta de desenho *AUTOCAD*, procedeu-se à verificação do cumprimento destas distâncias, considerando o perfil topográfico do terreno.

➤ Distância dos condutores ao solo:

Nas linhas aéreas, entre os condutores nus e o solo, nas condições de flecha máxima, desviados ou não pelo vento, tem de existir pelo menos uma distância de D metros, nunca inferior a 6 m, definida pela Equação 4.40¹².

$$D = 6,0 + 0,005 U \text{ [m]} \quad (4.40)$$

em que U , em kilovolts, é a tensão nominal da linha.

Uma vez que o presente projeto corresponde a uma linha de alta tensão de 60kV,

$$D = 6,0 + 0,005 * 60 = 6,3 \text{ [m]}$$

Embora o R.S.L.E.A.T. apenas exija uma distância de 6,3 m, a EDP-Distribuição utiliza como referência o valor para distância mínima ao solo de 7 m.

Apresenta-se de seguida, um pormenor da linha onde se mostra a medição efetuada para verificação da validação da distância mínima dos condutores ao solo.

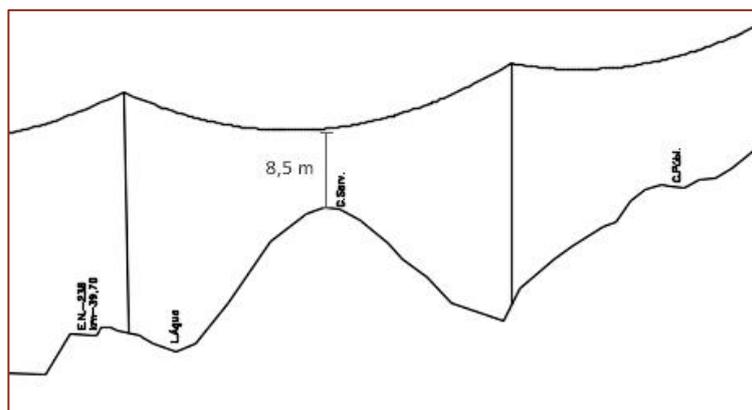


Figura 13 - Medição da distância dos condutores ao solo para o projeto exemplificativo.

¹² Segundo o Artigo 27º da Secção IV, Capítulo III do R.S.L.E.A.T.

O processo de verificação para esta distância foi semelhante para todos os vãos do projeto exemplificativo.

➤ Distância dos condutores às árvores:

Entre os condutores nus das linhas, nas condições de flecha máxima, desviados ou não pelo vento e as árvores deverá observar-se uma distância D , em metros, nunca inferior a 2,5 m, dada pela Equação 4.41.

$$D = 2,0 + 0,0075 U \text{ [m]} \quad (4.41)$$

Pelo que,

$$D = 2,0 + 0,0075 * 60 = 2,5 \text{ [m]}$$

Embora o R.S.L.E.A.T. apenas exija uma distância de 2,5 m, a EDP-Distribuição utiliza como referência o valor para distância mínima às árvores de 3 m.

Além da distância mínima, é exigido que se estabeleça ao longo das linhas uma faixa de serviço com uma largura de 5 m, dividida ao meio pelo eixo da linha, na qual se efetuará o corte das árvores necessários para tornar possível a sua montagem e conservação¹³. Por forma a garantir segurança de exploração das linhas, para uma linha de 60kv, a faixa de proteção deverá ter, no máximo, 25m¹⁴.

No perfil topográfico do projeto exemplificativo, a medição efetuada para verificação da validação da distância mínima dos condutores às árvores encontra-se na Figura 14.

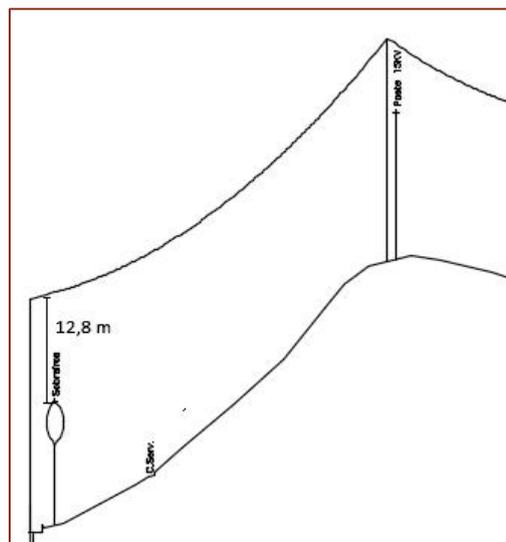


Figura 14 - Medição da distância dos condutores às árvores para o projeto exemplificativo.

¹³ Segundo o ponto 2 do Artigo 28º da Secção IV, Capítulo III do R.S.L.E.A.T.

¹⁴ Segundo o ponto 3 do Artigo 28º da Secção IV, Capítulo III do R.S.L.E.A.T.

➤ Distância dos condutores aos edifícios:

Na proximidade de edifícios, que não estejam ao serviço de instalações elétricas, as linhas em condições de flecha máxima, em relação às coberturas, chaminés e todas as partes salientes suscetíveis de ser normalmente escaladas por pessoas, devem ficar a uma distância calculada pela Equação 4.42¹⁵.

$$D = 3,0 + 0,0075 U \text{ [m]} \quad (4.42)$$

Pelo que,

$$D = 3,0 + 0,0075 * 60 = 3,5 \text{ [m]}$$

O valor calculado não deve ser inferior a 4m.

Na figura seguinte mostra-se a medição efetuada, para verificação da validação da distância mínima a edifícios.

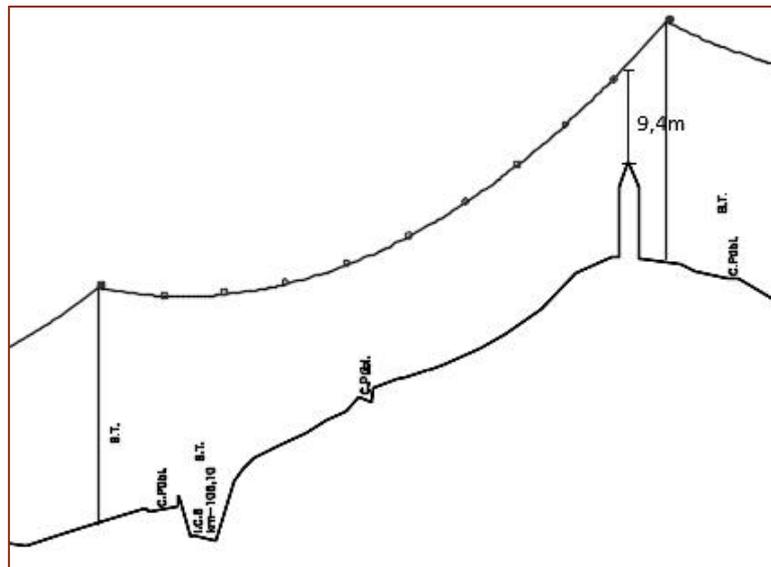


Figura 15 - Medição da distância aos edifícios para o projeto exemplificativo.

¹⁵ Segundo o ponto 1 do Artigo 29º da Secção IV, Capítulo III do R.S.L.E.A.T.

➤ Distância dos condutores a obstáculos diversos:

O regulamento de segurança, define que na vizinhança de obstáculos como terrenos de declive acentuado, falésias e construções normalmente não acessíveis a pessoas, ou quando as construções se encontram a 3 m do solo, em caso de flecha máxima, com ou sem vento devem estar a uma distância D , definida pela equação 4.43¹⁶.

$$D = 2,0 + 0,0075 U \text{ [m]} \quad (4.43)$$

Pelo que,

$$D = 2,0 + 0,0075 * 60 = 2,5 \text{ [m]}$$

Embora o R.S.L.E.A.T. apenas exija uma distância de 2,5 m, a EDP-Distribuição utiliza como referência o valor para distância mínima a obstáculos diversos de 4m.

4.3.7. Distância mínima entre condutores

Além das distâncias entre os condutores e o solo, é ainda necessário garantir uma dada distância entre condutores. Para garantir que esta distância é cumprida, o regulamento¹⁷ definiu que deve ser calculada pela equação seguinte:

$$D = k\sqrt{f + d} + \frac{U}{150} \text{ [m]} \quad (4.44)$$

Onde,

- f – é a flecha máxima, em metros;
- d – é o comprimento das cadeias de isoladores suscetíveis de oscilarem transversalmente à linha, em metros, só para os apoios em alinhamento;
- U – é a tensão nominal da linha, em quilovolts;
- k – é um coeficiente dependente da natureza dos condutores e cujo valor é:
 - 0,6, para cobre, bronze e alumínio-aço;
 - 0,7, para alumínio e ligas de alumínio.

¹⁶ Segundo o ponto 1 do Artigo 30º da Secção IV, Capítulo III do R.S.L.E.A.T.

¹⁷ Segundo a alínea b), do ponto 1, do Artigo 31º, da Secção IV, Capítulo III do R.S.L.E.A.T..

Como podemos verificar, o cálculo que permite determinar a distância em questão, depende diretamente da flecha. O seu valor, deve ser igual ou inferior a 2,7 m consoante as armações a utilizar no projeto [10], no caso da alta tensão as armações, para linhas simples e duplas, apresentam-se na Figura 16.

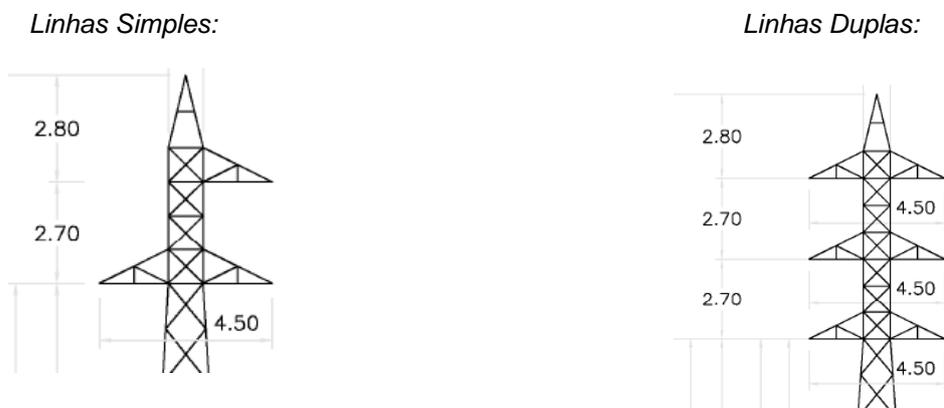


Figura 16 - Esquema exemplificativo para o apoio F95CA e F165CD, respetivamente para linhas simples e duplas.

Uma vez que já foram determinadas as flechas para todos os vãos, em função do tipo de apoios, temos todos os dados necessários para determinar a distância mínima entre condutores.

Para o primeiro apoio, visto desempenhar a função de fim de linha, apenas se consideram os condutores de um dos lados, assim para este apoio, substituindo a Equação 4.44,

$$D = 0,6\sqrt{5,58 + 0} + \frac{60}{150} = 1,82 \text{ [m]}$$

Para os apoios em alinhamento do segundo cantão, é necessário considerar-se o comprimento da cadeia de isoladores. Será efetuado o cálculo para o caso em que a flecha é maior, nomeadamente no vão entre os apoios nº 6 e nº 7, a que corresponde uma distância mínima para a esquerda do apoio nº7 de:

$$D = 0,6\sqrt{9,48 + 1,2} + \frac{60}{150} = 2,36 \text{ [m]}$$

A Tabela 29, resume as distâncias calculadas para todos os apoios, do projeto exemplificativo.

Cantão	Nº Apoio	Distância entre apoios	Flecha	Distância mínima entre condutores	
				Esquerda	Direita
1	1	0		-----	1,82
	2	210	5,58	1,96	1,99
	3	214	5,79	1,99	1,97
	4	210	5,63	1,82	1,99
2	5	241	7,02	2,12	2,16
	6	246	7,37	2,18	2,36
	7	280	9,48	2,36	2,11
	8	240	6,96	2,11	2,03
	9	225	6,17	1,89	1,84
3	10	212	5,76	1,98	1,98
	11	211	5,70	1,98	1,94
	12	206	5,38	1,94	1,94
	13	206	5,38	1,79	-----

Tabela 29 - Distâncias entre condutores.

Como podemos concluir através da Tabela 29, e verificando a geometria das armações utilizadas, todos os valores calculados são inferiores à distância mínima que as armações possuem (2,7m).

4.3.8. Desvio transversal das cadeias de isoladores

Nos apoios de alinhamento, com cadeias de isoladores em suspensão, precede-se ao cálculo do máximo desvio transversal que essa cadeia pode sofrer. Vamos demonstrar neste capítulo como é realizado o estudo do desvio transversal das cadeias de isoladores, apresentando o cálculo para o apoio nº2.

Neste tipo de apoios, as cadeias de isoladores, encontram-se fixas num ponto como podemos ver na Figura 17. É necessário garantir, que a oscilação das cadeias provocada pela ação do vento, não irá provocar situações perigosas devido à demasiada aproximação entre a cadeia e apoio.

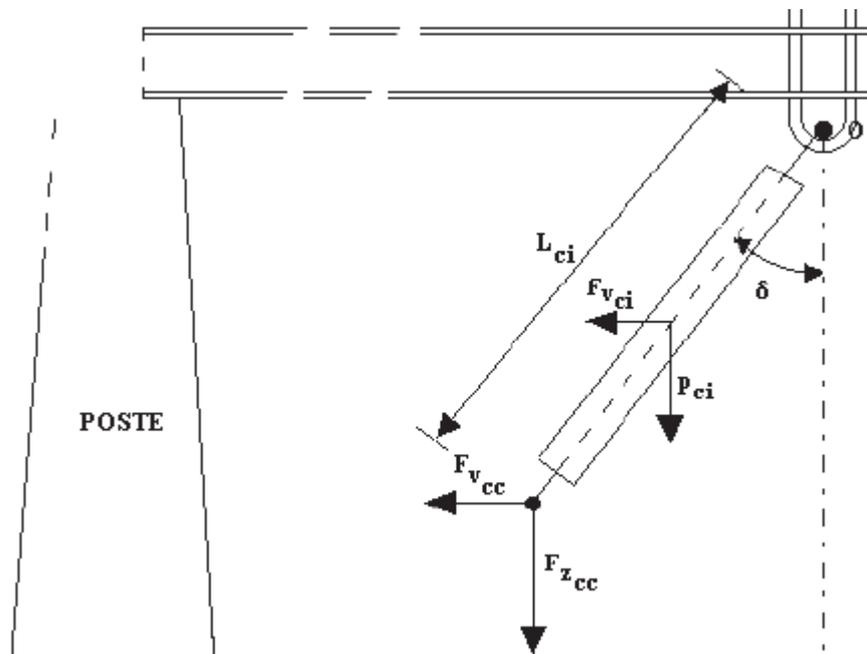


Figura 17 - Esquema exemplificativo das forças, para cálculo do ângulo mínimo do desvio transversal das cadeias de isoladores.

As cadeias de isoladores estão sujeitas à ação da carga exercida pelos condutores (F_{zcc}) e da própria cadeia (P_{ci}), bem como a ação do vento sobre os condutores (F_{vcc}) e sobre a própria cadeia (F_{vci}). A relação entre as forças referidas, vai possibilitar o cálculo do ângulo crítico (δ) para o qual a verticalidade da cadeia, deixa de ser verificada.

A EDP-Distribuição assume que, o ângulo δ tem que ser inferior a 60 graus, caso esta condição não se verifique, pode ser necessário aumentar a altura dos apoios, ou passar os mesmos para amarração.

Para o cálculo do desvio transversal da cadeia de isoladores recorre-se à seguinte fórmula:

$$\delta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{F_{VCC} + \frac{F_{VCI}}{2}}{F_{ZCC} + \frac{P_{CI}}{2}} \right) [\text{grados}] \quad (4.45)$$

Em que,

- δ – é o ângulo de rotação da cadeia, em grados;
- F_{VCI} – ação do vento sobre a cadeia de suspensão, em daN;
- P_{CI} – peso da cadeia de suspensão, em daN;
- F_{VCC} – ação do vento sobre o condutor, em daN;
- F_{ZCC} – carga vertical exercida pelo condutor, em daN;
- L_{ci} – Comprimento da cadeia de isoladores.

Onde,

$$F_{VCC} = \alpha * c * \frac{q}{2} * d * \frac{L_{v\tilde{a}o_esquerda} + L_{v\tilde{a}o_direita}}{2} \quad [\text{daN}] \quad (4.46)$$

$$F_{VCI} = 15 \quad [\text{daN}] \quad (4.47)$$

Para o cálculo de F_{ZCC} foi necessário medir as distâncias do apoio até ao ponto de inflexão da curva catenária dos vãos adjacentes, multiplicando este valor pelo peso próprio do condutor, obtendo assim o peso real na cadeia provocado pelos condutores.

$$F_{ZCC} = \omega * (L_{v\tilde{a}o_direita_medido} + L_{v\tilde{a}o_esquerda_medido}) \quad [\text{daN}] \quad (4.48)$$

$$p_{ci} = 30 \quad [\text{daN}] \quad (8.5)$$

Substituindo as Equações 4.45, 4.46, 4.47 e 4.48,

$$F_{VCC} = 0,6 * 1 * \frac{90}{2} * 0,01628 * \frac{210+214}{2} = 93,4 \quad [\text{daN}]$$

$$F_{VCI} = 15 \quad [\text{daN}]$$

$$F_{ZCC} = 0,55 * (210 + 96) = 166,8 \quad [\text{daN}]$$

$$p_{ci} = 30 \quad [\text{daN}]$$

$$\delta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{93,4 + \frac{15}{2}}{166,8 + \frac{30}{2}} \right) = 32 \quad [\text{grados}]$$

Apresenta-se na Tabela 30, o resumo dos cálculos para os três cantões, e permitindo verificar que o ângulo em todos os apoios de suspensão deste projeto é inferior a 60 graus.

Cantão	Nº Apoio	Ângulo (grados)
1	1	0
	2	32
	3	46
	4	0
2	5	43
	6	49
	7	38
	8	56
	9	0
3	10	44
	11	51
	12	33
	13	0

Tabela 30 - Valor dos ângulos nos apoios com cadeias de suspensão.

4.4. Conclusão

Neste capítulo foi elaborado um projeto de construção de uma linha elétrica de 60kV, com o principal objetivo de aumentar a sensibilidade para as metodologias a aplicar, na execução de projetos de linhas elétricas.

A elaboração deste projeto exemplificativo permitiu aprofundar o conhecimento a nível do trabalho de um projetista, e enfrentar dificuldades como, escolha do tipo e local para os apoios e imposições regulamentares a cumprir.

Numa fase posterior desta dissertação, as bases consolidadas neste capítulo, a nível do método aplicado para a elaboração de um projeto de linhas elétricas, revelar-se-á uma ferramenta muito útil na análise do algoritmo, tornando a mesma mais intuitiva.

Capítulo 5

Análise Crítica ao programa existente

5.1. Introdução

Neste capítulo, o objetivo é realizar uma análise crítica ao programa existente. É importante referir que o algoritmo desenvolvido foi implementado em linguagem de programação C, utilizando a ferramenta, *Visual Studio*. Numa fase inicial, pretende-se efetuar uma explicação genérica do funcionamento do algoritmo em causa.

Ultrapassada a fase de análise, realizar-se-á a demonstração das limitações encontradas, e melhorias implementadas, o que permitiu aumentar a robustez e flexibilidade do programa.

5.2. Explicação do programa existente

O programa em causa pretende automatizar o processo de execução de projetos de linhas elétricas, nomeadamente a nível da uniformização do projeto e minimização de custos. No fluxograma seguinte, podemos ver em resumo como se processa a aplicação do mesmo.

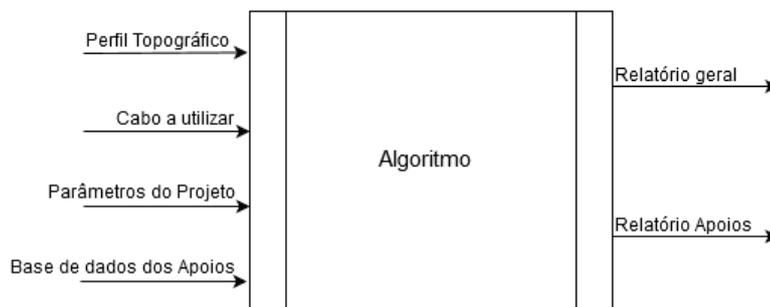


Figura 18 - Fluxograma exemplificativo do programa.

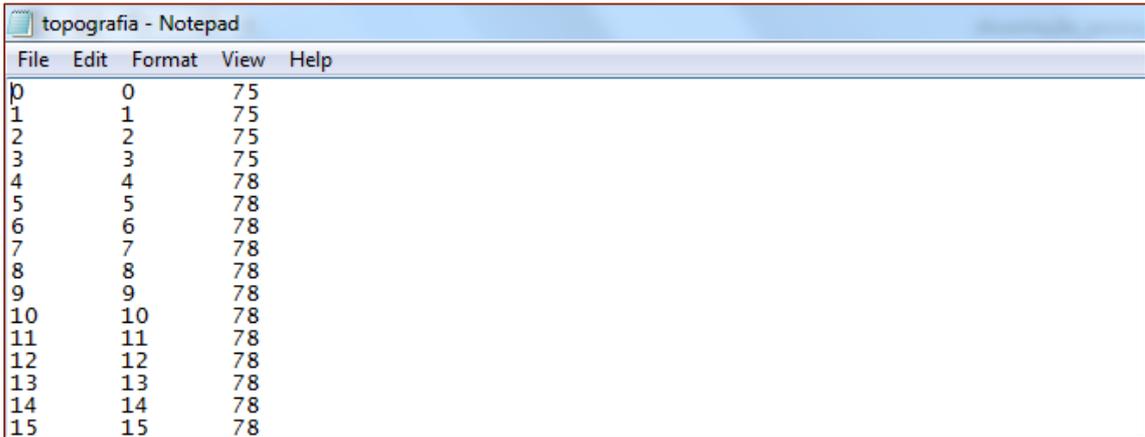
O correto funcionamento do programa dependerá dos ficheiros de entrada, que após serem processados pelo algoritmo, vão possibilitar a obtenção dos ficheiros de saída, onde se resumem as conclusões do projeto elaborado. É de notar, que todos os ficheiros de entrada e saída são ficheiros de texto.

De seguida, pretende-se explicar detalhadamente o funcionamento do programa desenvolvido em dissertações anteriores, fazendo referência a quais os ficheiros de entrada utilizados, bem como os ficheiros de saída que se obtêm após correr o algoritmo.

➤ Ficheiros de entrada

O primeiro dado de entrada referido no fluxograma anterior, é o perfil topográfico. Este perfil será introduzido no programa através de um ficheiro de texto denominado "topografia".

O ficheiro topografia, apresenta apenas alguns dos pontos mais relevantes do perfil topográfico, e encontra-se dividido em três colunas, onde constam nomeadamente, a numeração do ponto selecionado, a distância a que se encontram do ponto inicial e a sua cota, como se mostra na figura seguinte.



File	Edit	Format	View	Help
0	0	75		
1	1	75		
2	2	75		
3	3	75		
4	4	78		
5	5	78		
6	6	78		
7	7	78		
8	8	78		
9	9	78		
10	10	78		
11	11	78		
12	12	78		
13	13	78		
14	14	78		
15	15	78		

Figura 19 - Exemplo para ficheiro de entrada "topografia".

O cabo a utilizar é outro dos dados de entrada referidos no fluxograma, o mesmo será introduzido no programa através de um ficheiro de texto denominado "cabo".

Este ficheiro contém todas as especificações do cabo a utilizar para elaboração do projeto:

- Nome: ALACO160; [14]
- Secção: 157,2 mm²;
- Diâmetro: 0,01628 m;
- Peso próprio: 0,545 daN/m;
- Módulo de Young: 7750 daN/mm²;
- Coeficiente de dilatação: 0,0000190 °C⁻¹
- Tensão de rutura: 4775 daN;
- k: 0,6 para condutores de alumínio-aço.

Na figura seguinte, mostra-se um exemplo deste ficheiro.

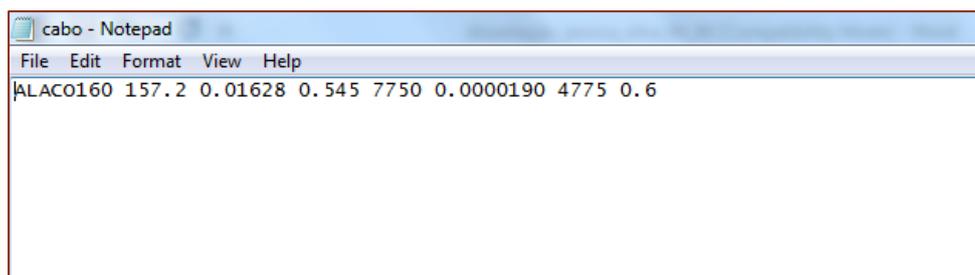


Figura 20 - Exemplo para o ficheiro de entrada "cabo".

Os parâmetros do projeto, estão apresentados no fluxograma também como ficheiro de entrada do algoritmo, que é também um ficheiro de texto e é denominado "parâmetros_projeto".

O ficheiro onde constam estes parâmetros está dividido em duas colunas, a primeira apresenta a distância à origem e a segunda o ângulo, dos apoios em ângulo presentes no projeto. Na figura seguinte apresenta-se um exemplo desse ficheiro.

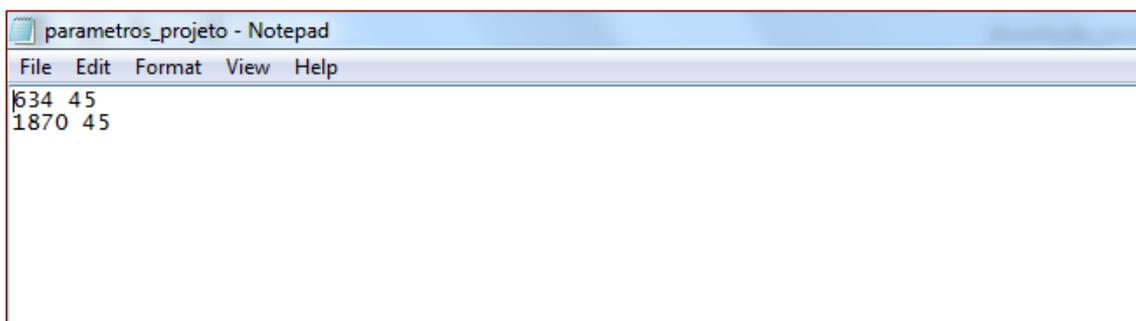


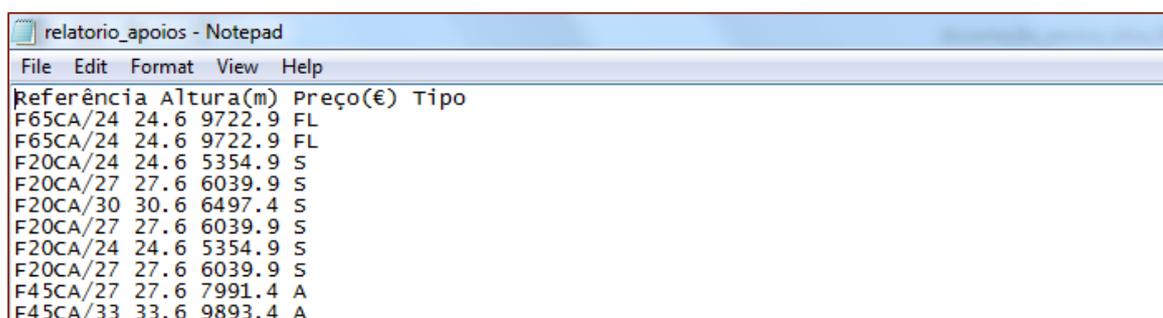
Figura 21 - Exemplo para o ficheiro de entrada "parametros_projeto".

Por último é ainda referenciado no fluxograma, como dado de entrada, a base de dados dos apoios. Este ficheiro é também um ficheiro de texto, denominado "apoios".

Neste ficheiro encontram-se os dados para cada tipo de apoio, presentes no catálogo de apoios utilizado pela EDP-Distribuição. O ficheiro está dividido em várias colunas, sendo que a primeira apresenta a designação do apoio, a segunda a altura e a terceira o preço. Nas colunas seguintes apresentam-se os valores a utilizar no cálculo de estabilidade dos apoios, nomeadamente para cálculo dos esforços transversais, longitudinais e verticais.

O último relatório gerado, é denominado “relatorio_apoio”, onde constam algumas informações sobre os apoios escolhidos pelo programa para integrar a linha. Dessas informações fazem parte, a gama do apoio, a altura, o preço e tipo de apoio.

Na Figura 24, mostra-se um exemplo para este relatório.



Referência	Altura(m)	Preço(€)	Tipo
F65CA/24	24.6	9722.9	FL
F65CA/24	24.6	9722.9	FL
F20CA/24	24.6	5354.9	S
F20CA/27	27.6	6039.9	S
F20CA/30	30.6	6497.4	S
F20CA/27	27.6	6039.9	S
F20CA/24	24.6	5354.9	S
F20CA/27	27.6	6039.9	S
F45CA/27	27.6	7991.4	A
F45CA/33	33.6	9893.4	A

Figura 24 - Exemplo para o ficheiro de saída "relatorio_apoios".

Com esta explicação, pretende-se dar a conhecer o modo de funcionamento do programa, bem como os resultados gerados pelo mesmo.

➤ Algoritmo

O grande objetivo do algoritmo desenvolvido, é gerar uma solução que minimiza o custo, para elaboração de um projeto de uma linha aérea de 60kV.

Um dos pontos-chave a ser considerado na elaboração do algoritmo, foi a influência da distância mínima entre condutores, visto esta distância ter implicações para o cálculo do comprimento do vão máximo do projeto.

Na análise do algoritmo, este foi um dos primeiros passos a considerar, pois a distribuição inicial dos apoios, é baseada no valor do vão obtido. De seguida, apresenta-se a fórmula para cálculo da distância mínima entre condutores, que foi resolvida em ordem à flecha, de modo a permitir encontrar o seu valor máximo, como se mostra nas equações seguintes.

$$D = k\sqrt{f + d} + \frac{U}{150} \text{ [m]} \quad (5.1)$$

$$f_{\text{máxima}} = \left(\frac{D - \frac{U}{150}}{k} \right)^2 - d \text{ [m]} \quad (5.2)$$

Considerando:

- D igual a 2,7 m, devido ao tipo de armação dos apoios escolhidos;
- d igual a 0 m por forma a garantir que se obtém a flecha máxima;
- U igual a 60, devido ao nível de tensão da linha;
- k igual a 0,6 devido à natureza dos condutores (alumínio-aço).

Substituindo os valores, obtemos,

$$f_{\text{máxima}} = \left(\frac{2,7 - \frac{60}{150}}{0,6} \right)^2 - 0 = 14,7 \text{ [m]}$$

Após encontrar o valor para a flecha máxima, foi implementado um bloco de código como o representado na Figura 25, executado apenas uma vez no início do programa, que determina a distância máxima que um vão pode apresentar. [1]

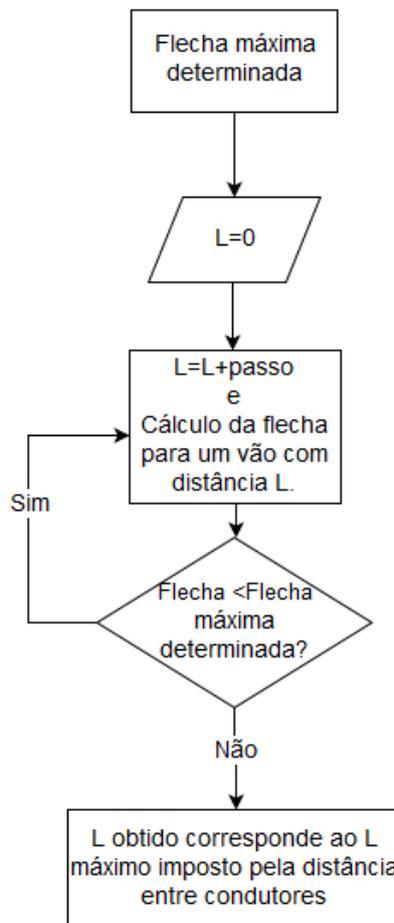


Figura 25 - Fluxograma para o cálculo do vão máximo.

Como já foi referido o algoritmo em análise, pretende encontrar os locais ótimos para a colocação dos apoios, de modo a minimizar o número de apoios a utilizar, o que por sua vez irá minimizar o custo do projeto.

Antes de avançar na análise do algoritmo, existem dois conceitos que se pretende introduzir para potenciar uma melhor compreensão do raciocínio aplicado: o conceito de *Margem* e o conceito de *Violação*. A *Margem* não é mais do que a diferença entre o vão máximo e o vão onde realmente o apoio será colocado. A *Violação* é a presença de situações não regulamentares que possam surgir na distribuição dos apoios, nomeadamente no que diz respeito à distância mínima dos condutores ao solo.

Para determinar o número mínimo de apoios que cada cantão deve apresentar, é necessário calcular o vão máximo (L), a partir da implementação do bloco de código apresentado no fluxograma da Figura 25.

O número mínimo de apoios¹⁸ presente em cada cantão, será calculado a partir do comprimento do cantão respectivo, em função do comprimento máximo para o vão (L) referido anteriormente, como se mostra na Equação 5.3.

$$N^{\circ}_{\text{mínimo apoios}} = \frac{L_{\text{cantão}}}{L_{\text{máximo}}} \quad (5.3)$$

Após efetuar este cálculo, será possível minimizar os desequilíbrios de esforços entre vãos, visto que a distribuição dos apoios será efetuada considerando o número mínimo de apoios. Os apoios são distribuídos no cantão com distâncias iguais entre eles, possibilitando assim, a existência de uma margem que vai permitir a correção de violações existentes.

¹⁸ Nota: o valor do número mínimo de apoios, calculado pela Equação 5.3, é arredondado para o inteiro seguinte e incrementado em 1 unidade.

Na Figura 26, está representado o fluxograma do programa em análise, que determina os locais para colocação dos apoios, tendo como objetivo a minimização do número de apoios e ainda a obtenção de vão equilibrados. [1]

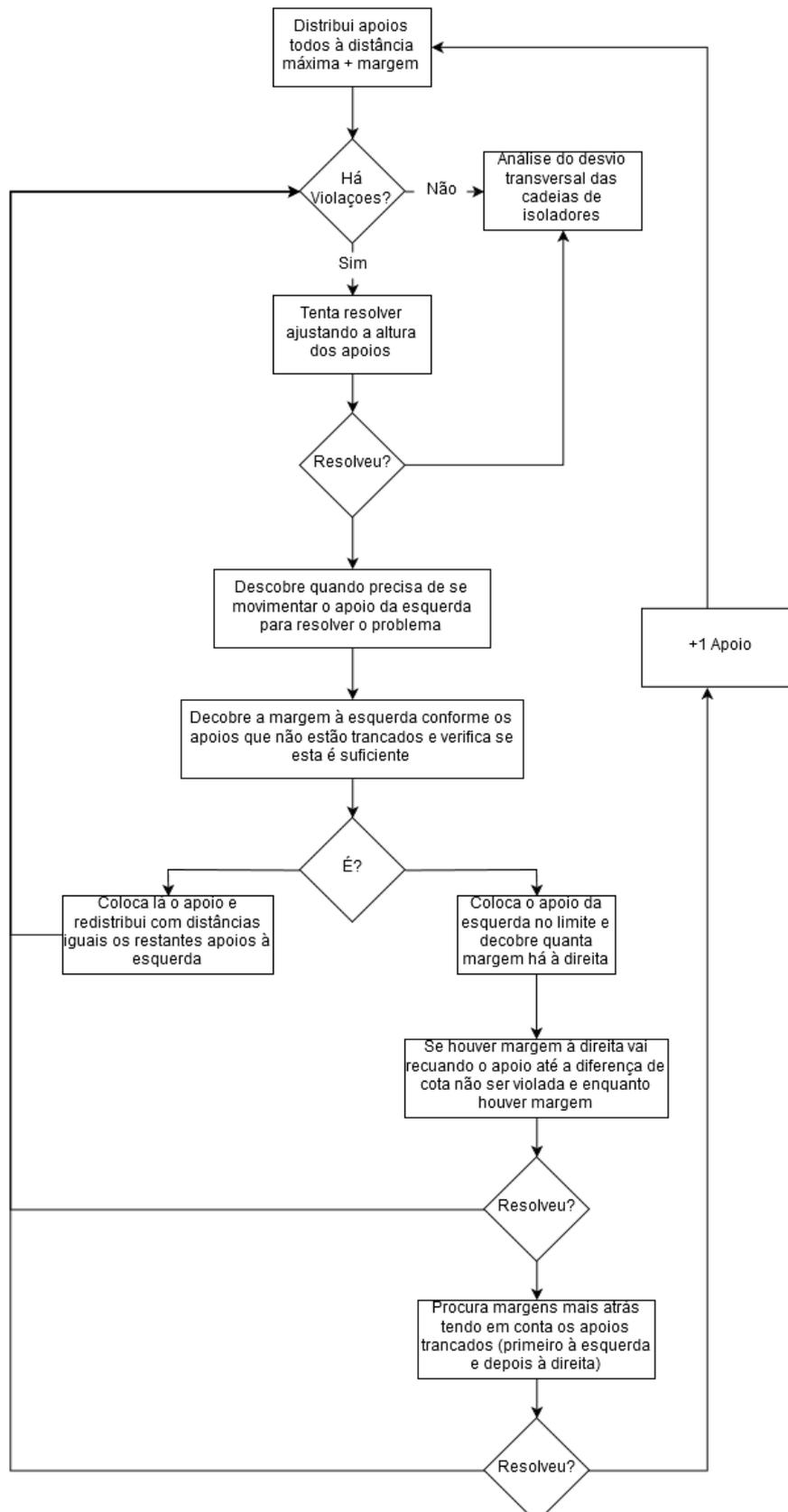


Figura 26 - Fluxograma do algoritmo implementado para a distribuição de apoios.

Apresenta-se em resumo, a explicação do fluxograma da Figura 26, que é a base do algoritmo em análise: [1]

- Após a distribuição inicial dos apoios, considerando o vão máximo e o número mínimo de apoios por cantão, será necessário verificar a existência de violações. Como já foi referido, as violações referidas dizem respeito à verificação da distância mínima dos condutores ao solo (7m), caso existam, a primeira tentativa é ajustar a altura dos apoios.
- Caso a alteração à altura dos apoios não resolva a violação, é necessário calcular a margem existente à esquerda considerando os apoios não trancados e verificar se a movimentação do apoio dentro dessa margem é suficiente para resolver a violação. Os apoios trancados são aqueles que tiveram de ser movimentados para resolver violações, e desta forma a sua localização não será alterada logo à partida.
- Existindo margem suficiente à esquerda, coloca o apoio nesse local procedendo à redistribuição equidistante dos restantes apoios à esquerda, mantendo o equilíbrio entre vãos. Caso a margem se verifique insuficiente, o apoio da esquerda é colocado no limite e é determinada a margem à direita do apoio anterior. Após determinado esse valor procede-se ao avanço da posição do apoio enquanto não existir violação da diferença de cota do vão anterior a esse apoio, e existir margem.
- No caso de se verificar ainda a existência de violações, o algoritmo verifica a existência de margem nos locais onde os apoios se encontram trancados. A margem é procurada inicialmente à esquerda, e se necessário à direita nos restantes apoios distribuídos, movimentando os apoios trancados até resolver a violação e mantendo o equilíbrio entre vãos.
- Por fim, caso ainda existam violações, o programa vai colocar mais um apoio no cantão, e repetir todas as verificações.
- Se o programa na tentativa de resolver uma violação provocar uma nova violação nos apoios precedentes, vai voltar atrás na verificação e resolve esta violação trancando os apoios. Os apoios onde foi gerada a nova violação, passaram a estar na sua situação limite, ou seja, fixos, assim, o algoritmo irá redistribuir as margens, movimentando apenas os apoios não trancados para resolver as violações. Deste modo, perante novos constrangimentos, as violações são resolvidas do início para o fim da linha.
- Quando a localização dos apoios, já cumprir todas as condições, não existindo violações, procede-se à análise do desvio transversal das cadeias de isoladores, processo que será explicado com mais detalhe no fluxograma seguinte (Figura 27).

Terminado o processo para distribuição dos apoios, é necessário verificar os desvios transversais das cadeias de isoladores. O processo para verificação deste desvio, pretende analisar o ângulo de cada cadeia em suspensão, e verificar se o seu valor é inferior a 60 graus.

A Figura 27, representa o bloco de código implementado para este fim. [1]

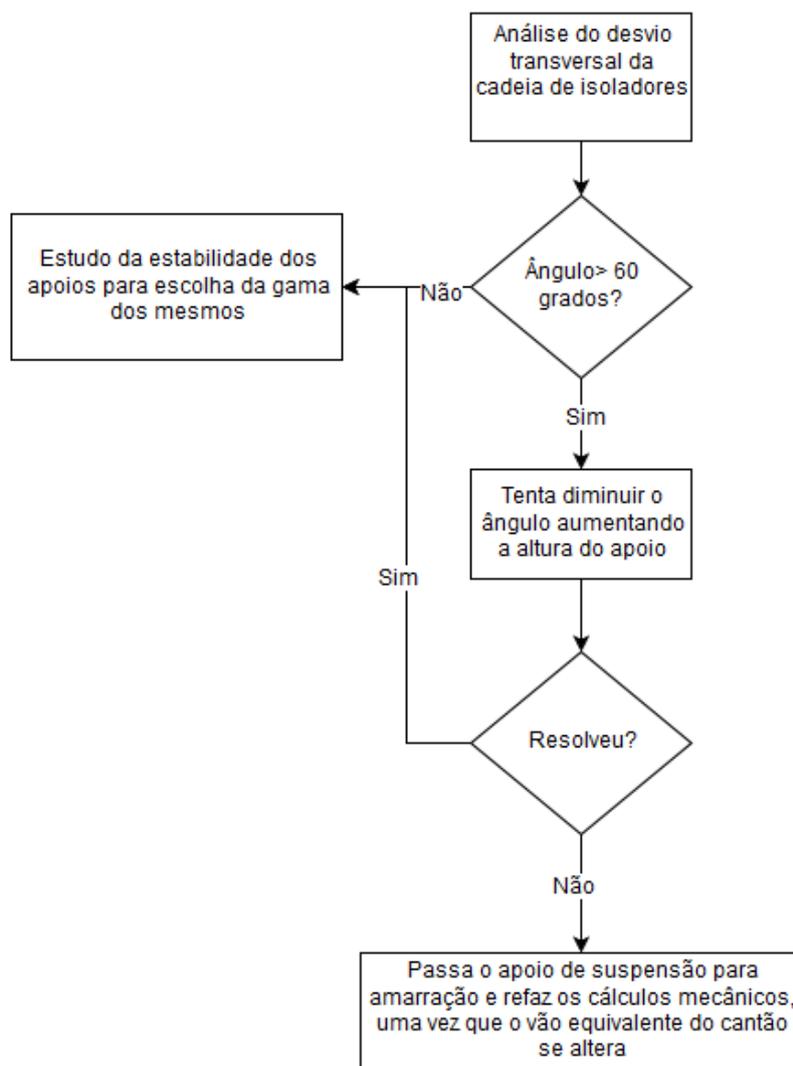


Figura 27 - Fluxograma exemplificativo para o cálculo do desvio transversal da cadeia de isoladores.

Analisando Figura 27, podemos concluir que:

- Se o valor do ângulo for superior, existem duas possibilidades, primeiro tentar aumentar a altura do apoio e verificar novamente o seu ângulo, caso este procedimento não resolva a violação, o apoio passará de suspensão para amarração e será refeito o cálculo mecânico dos novos cantões;
- Se a condição for cumprida, ou seja, o ângulo do apoio for inferior a 60 graus, é estudada a estabilidade dos apoios para posterior escolha das gamas dos mesmos.

Após elaborada a distribuição dos apoios e verificado o desvio transversal das cadeias de isoladores, estão reunidas as condições para proceder à escolha da gama dos apoios através do estudo da estabilidade dos mesmos.

5.3. Limitações encontradas no programa existente

Nesta secção, pretende-se efetuar uma exposição das principais limitações encontradas no algoritmo inicial. Foram implementadas algumas soluções, no sentido de tentar corrigir algumas destas limitações.

O objetivo, é após implementar algumas melhorias tornar o programa mais robusto e integrar o mesmo, no processo de elaboração de projetos de linhas elétricas pela EDP-Distribuição.

Enunciam-se de seguida as principais limitações encontradas no programa em análise,

- Dados pré-definidos para execução do programa;
- Bases de dados dos ficheiros de entrada;
- Método para determinação para o custo do projeto;
- Apoios de reforço;
- Níveis de tensão;
- Limitações a nível do valor usado para distância mínima entre condutores que tem implicação no cálculo do vão máximo.
- Modo de gestão de memória nível do algoritmo;
- Ficheiros de saída.

Nas secções posteriores, pretende-se explorar estas limitações encontradas, e implementar possíveis melhorias para resolução das mesmas.

5.3.1. Dados pré-definidos para execução do programa

O algoritmo em análise foi elaborado, considerando alguns dados como dados de entrada pré-definidos, como a tensão máxima, o cabo a utilizar, a distância mínima entre condutores, vento máximo e temperatura máxima, bem como o nível de tensão. O facto de o utilizador não ter liberdade para introduzir os dados referidos, tornava o programa bastante limitado.

Os dados em causa assumiam os seguintes valores:

- Tensão máxima: 8 daN/mm²;
- Cabo: ALACO160; [14]
- Vento máximo (primavera/ inverno): 90/36 Pa;
- Temperatura máxima: 80 °C;
- Distância mínima entre condutores: 2,7 m;
- Número de condutores: 3 condutores;
- Nível de tensão: 60 kV.

Para tornar o programa mais robusto neste sentido, foram implementadas melhorias no algoritmo para que estes valores, em vez de serem fixos, pudessem ser introduzidos pelo utilizador. As melhorias implementadas para correção destas limitações, vão ser abordadas nas secções 5.4.1, 5.4.2, 5.4.3. e 5.4.4.

5.3.2. Base de dados dos ficheiros de entrada

Em relação aos ficheiros de entrada foram encontradas algumas limitações, nomeadamente no ficheiro “cabo” e “apoios”, referidos na secção 5.2..

O algoritmo em análise foi pensado para uma linha simples de 60kV, onde os apoios considerados para elaboração da linha eram apoios metálicos para linha simples e o cabo introduzido era o “ALACO160”.

No que diz respeito aos apoios que a base de dados do programa utilizava, a mesma estava limitada a dezasseis apoios metálicos, da gama CA, considerando apenas os apoios para linhas simples. Em relação ao cabo escolhido, o mesmo ficaria limitado apenas ao cabo referido, em que teriam de se conhecer previamente todas as suas características e introduzi-las manualmente no ficheiro de texto “cabo” referido na secção 5.2..

A ideia inicial de modo a melhorar o programa, era usar como ficheiros de entrada, a base de dados de apoios e cabos utilizada pela EDP-distribuição. Esta ideia foi possível de implementar a nível de seleção do cabo a utilizar no projeto, no entanto não se mostrou vantajosa a nível de seleção dos apoios a utilizar.

A base de dados de apoios utilizada pela EDP-Distribuição, apresenta os apoios para linhas simples e linhas duplas, bem como os apoios metálicos e de betão. Na base de dados referida, estão incluídos os apoios normalizados, não normalizados e descontinuados, totalizando 632 apoios. Após realizar um levantamento dos apoios mais utilizados nos últimos três anos, concluiu-se que apenas uma minoria dos apoios presentes na base de dados estava a ser utilizado na execução dos projetos.

Assim, verificou-se que realizar alterações na base de dados de apoios, para que a mesma inclui-se os 632, não era uma solução viável, além do facto de sobrecarregar a base de dados, apenas tornariam o algoritmo mais lento e fazendo com que o mesmo processasse informação desnecessária, correndo o risco de escolher um apoio não normalizado ou até descontinuado.

O estudo efetuado permitiu, concluir que seleccionar os apoios mais relevantes, e adicioná-los à base dados “apoios” já existente, se tornava mais vantajoso do que carregar a totalidade dos apoios, presentes na base de dados geral, para o programa. Este procedimento vai ao encontro do objetivo da EDP-Distribuição, de minimizar e uniformizar cada vez mais a utilização de uma gama restrita de apoios.

5.3.3. Avaliação da influência da colocação de mais um apoio por cantão, para o cálculo do custo

A nível de cálculo do custo do projeto, o programa apresentava um valor final baseado na soma do custo associado a cada apoio que integrava a linha. Na tentativa de realizar uma minimização de custos, decidiu-se implementar o seguinte raciocínio.

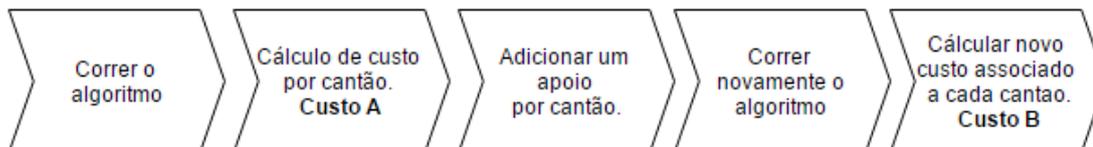


Figura 28 - Fluxograma para obter custo por cantão.

Obteve-se assim o custo para cada cantão da solução original e da solução com mais um apoio por cantão, como podemos ver na Figura 29.



Figura 29 - Comparação entre as soluções obtidas.

O objetivo passa por comparar o custo por cantão, entre as duas soluções, e escolher sempre o cantão com o mínimo custo associado.

Sabemos que, a apoios de altura superior está associado um custo superior, portanto a hipótese da colocação de mais um apoio surge neste sentido, na tentativa de minimização do custo total da linha. Ao colocar um apoio extra, os vãos serão menores e portanto os esforços exigidos aos apoios também.

Na Figura 29, apresenta-se a solução A, onde é representado o custo de cantão da solução inicial gerada pelo programa, e a solução B que pretende simular o custo de cada cantão, adicionando mais um apoio.

Se hipoteticamente, as soluções coloridas na Figura 29 fossem as soluções de menor custo, teria que se construir uma nova linha com os apoios que constituíam cada cantão respetivo. O problema surge no apoio em ângulo que divide os cantões, pois ao escolher o apoio em ângulo associado ao cantão seguinte, as alturas dos apoios do cantão anterior ficariam comprometidas.

A solução passaria por trancar o apoio mais alto da solução que se mostrasse mais económica, na tentativa de evitar o aparecimento de violações, correr novamente o algoritmo e verificar que se cumpriam todas as situações regulamentares após efetuar a nova distribuição dos apoios. Por fim era novamente calculado o desvio transversal das cadeias de isoladores, e por fim verificada a estabilidade dos apoios, obtendo o custo final para a nova linha.

No entanto, esta implementação teria implicações a nível de fluidez do algoritmo, uma vez que teria de se percorrer inúmeras vezes o programa até validar novamente todos os apoios da linha, o que o tornaria mais lento. Além disso, foram testados vários perfis, em que se colocou mais um apoio por cada cantão e se determinou novamente o custo do projeto, no entanto conclui-se que a colocação de um apoio extra, em nenhuma das hipóteses testadas permitiu obter um custo mais baixo.

Podemos assim concluir, que esta implementação não era vantajosa, portanto não foi aplicada, uma vez que não acrescentava valor ao programa.

5.3.4. Apoios de Reforço

Os apoios de reforço têm essencialmente a função de suportar os esforços longitudinais, para reduzir as consequências resultantes da rotura de condutores ou de cabos de guarda¹⁹.

Sabe-se ainda que, o afastamento entre apoios de reforço consecutivos deve ser, em regra de quinze vãos. No entanto, o afastamento referido, depende de um grande número de fatores como, comprimento dos vãos, secção dos condutores, e também perfil do traçado²⁰.

No algoritmo desenvolvido, não foi incluída a colocação de apoios de reforço, no entanto esta limitação encontrada não impulsionou o desenvolvimento de melhoria ao nível de colocação deste tipo de apoios, pelos motivos explicados de seguida.

Existem determinados constrangimentos do terreno, como por exemplo a existência de caminhos-de-ferro, que obrigam à colocação deste tipo de apoios, no entanto, estes constrangimentos não se encontram detalhados no perfil topográfico do terreno, utilizado como *Input* do programa.

Além disso, o programa teria que proceder a determinadas verificações a nível do algoritmo, de modo a determinar a necessidade de colocação deste tipo de apoios na linha a considerar. A escolha do apoio de reforço, implicava efetuar um cálculo para as condições de reforço, apoio a apoio, validando a existência de um apoio deste tipo a cada quinze vãos. No caso de não existir o apoio de reforço no troço da linha analisado, teria que se proceder à colocação do mesmo, de modo a garantir que se cumpria a condição cima referida.

Adicionar esta funcionalidade ao algoritmo não se mostrou uma mais-valia, devido à existência de critérios específicos para a colocação deste tipo de apoios. Deste modo, conclui-se que o método mais eficaz, é deixar ao critério do projetista avaliar a necessidade de colocação deste tipo de apoios, conforme a análise que efetuar aos constrangimentos do perfil.

¹⁹ Segundo o Artigo 4º, da Secção 4, Capítulo V do R.S.L.E.A.T..

²⁰ Segundo o Artigo 63º, da Secção II, Capítulo V do R.S.L.E.A.T..

5.3.5. Nível de tensão

Existem três níveis de tensão, que assumem uma maior importância na construção de linhas elétricas, a média tensão e a alta tensão. Na média tensão, podemos considerar como tensões nominais mais comuns 15 e 30 kV, para caracterizar uma linha como alta tensão, o seu nível de tensão nominal não pode ser inferior a 60kV.

Para que o algoritmo em análise possa contemplar os três níveis de tensão, de modo a tornar o programa apto a efetuar o projeto para alta e média tensão, teria que se adaptar o mesmo de modo a que o utilizador introduzisse o nível de tensão pretendido. Além disso, ao implementar esta nova funcionalidade, a gama de apoios a selecionar da base de dados e o cálculo da distância mínima entre condutores seriam diferentes.

Considerando o estudo para criação de uma nova base de dados, no qual se realizou o levantamento dos apoios mais utilizados pela EDP-Distribuição, referido na secção 5.3.2, concluiu-se que a gama de apoios mais utilizados na construção de linhas aéreas elétricas de AT e MT [10], são os apresentados na Tabela 31:

	Linhas simples (3 Condutores)	Linhas duplas (6 Condutores)
AT	F20CA F45CA F65CA F95CA	F20CD F30CD F65CD F95CD F165CD
MT	F10CM F15CM F30CM F45CM	F20MD F45MD F65MD F95MD

Tabela 31 - Tabela representativa das gamas de apoios mais utilizada pela EDP-Distribuição.

A altura do apoio é definida consoante a topografia e constrangimentos existentes no terreno, sendo que para cada apoio referido na Tabela 31 a altura pode ser de 24m, 27m, 30m e 33m (sendo estas as alturas normalizadas). A base de dados criada para o algoritmo contemplou os apoios referidos, sendo que o algoritmo é capaz de escolher os apoios corretos mediante o nível de tensão escolhido.

Como já foi referido, o programa em análise foi estruturado para elaboração de uma linha simples de alta tensão, de 60kV. Sabe-se que os cálculos inerentes a projetos de linhas de alta tensão e média tensão são diferentes, dos quais se destacam, a fórmula para o cálculo da distância mínima entre condutores, o tipo de apoios a selecionar, a temperatura máxima considerada para equação dos estados, e o valor da pressão dinâmica do vento.

Em relação ao cálculo da distância mínima entre condutores, como foi exposto no projeto exemplificativo, para uma linha de alta tensão de 60kV, recorre-se à seguinte fórmula²¹,

$$D = k\sqrt{f + d} + \frac{U}{150} \text{ [m]} \quad (5.4)$$

Para uma linha de média tensão, nomeadamente para 15kV e 30kV, o cálculo da distância mínima entre condutores efetua-se do seguinte modo²²,

$$D = 0,75k\sqrt{f + d} + \frac{U}{200} \text{ [m]} \quad (5.5)$$

Em que, para ambas as fórmulas,

- f , representa a flecha máxima, em metros;
- d, representa o comprimento das cadeias de isoladores suscetíveis de oscilarem transversalmente à linha, em metros, só para os apoios em alinhamento;
- U, representa a tensão nominal da linha, em quilovolts;
- k, representa um coeficiente dependente da natureza dos condutores e cujo valor é:

0,6, para cobre, bronze e alumínio-aço;

0,7, para alumínio e ligas de alumínio.

O valor da distância mínima entre condutores não pode ser inferior aos valores obtidos através das equações anteriores, é ainda imposto pelo R.S.L.E.A.T.²³ que se mantenha superior a 0,45 m para linhas de média tensão e 0,50 m para linhas de alta tensão.

A principal alteração a nível do algoritmo, seria o modo de cálculo da distância mínima entre condutores, pois como foi demonstrado nas Equações 5.4 e 5.5, o método para o seu cálculo é diferente para os níveis de tensão referidos. Ao implementar a funcionalidade de o programa aceitar os vários níveis de tensão para linhas simples e duplas, seria necessário adaptar a base de dados de modo a incluir os apoios referidos na Tabela 31.

No algoritmo em análise, é assumido o valor 2,7 m, para a distância mínima entre condutores para linhas simples de alta tensão. Deste modo, foi elaborado um estudo às armações das gamas dos apoios a incluir no programa, com o objetivo de determinar qual o valor para a distância mínima entre condutores a utilizar, consoante os vários níveis de tensão e tipos de linha.

De seguida apresenta-se, o valor para a distância mínima entre condutores, considerando as armações referidas na Tabela 31, tanto para os apoios de linha simples, como para os de linha dupla, contemplando os diferentes níveis de tensão referidos.

²¹ Segundo a alínea b), do ponto 1, do Artigo 31º, da Secção IV, Capítulo III do R.S.L.E.A.T..

²² Segundo a alínea a), do ponto 1, do Artigo 31º, da Secção IV, Capítulo III do R.S.L.E.A.T..

²³ Segundo o ponto 3, do Artigo 31º, da Secção IV, Capítulo III do R.S.L.E.A.T..

Considerando as armações dos apoios de linha simples para a alta tensão, a distância mínima entre condutores é 2,7m, conforme a Figura 30.

Para o mesmo nível de tensão, mas considerando linhas duplas, a distância mínima entre condutores é 2,25m para os apoios F20CD, F30CD e F65CD, e 2,7m para os apoios F95CD, e F165CD [10], conforme as Figura 31 e Figura 32.

Linhas simples:

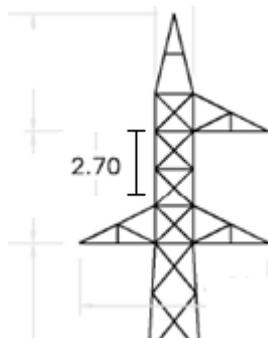


Figura 30 - Esquema exemplificativo das armações para os apoios, de linha simples, da gama CA.

Linhas duplas:

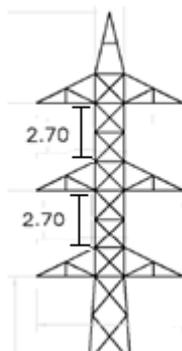


Figura 31 - Esquema exemplificativo das armações para os apoios F95CD e F165CD, de linha dupla da gama CD.

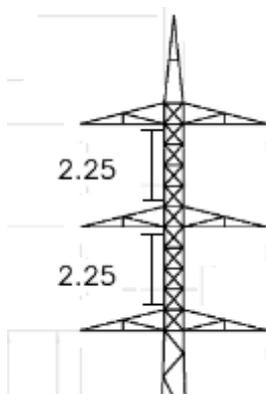


Figura 32 - Esquema exemplificativo das armações, para os apoios F20CD, F30CD e F65CD, para linhas duplas da gama CD.

Considerando as armações dos apoios da Tabela 31, para todos os apoios de linha simples para a média tensão, a distância mínima entre condutores é 1,8m, conforme Figura 33.

Para o mesmo nível de tensão, mas considerando linhas duplas, a distância mínima entre condutores é igualmente 1,8m [10], conforme Figura 34.

Linha simples:

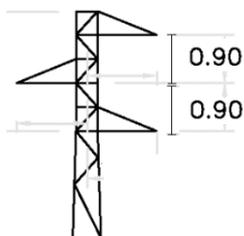


Figura 33 - Esquema exemplificativo das armações, para os apoios de linha simples, da gama CM.

Linhas duplas:

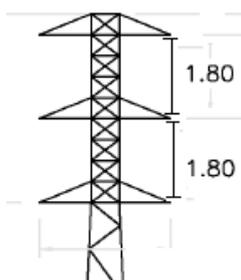


Figura 34 - Esquema exemplificativo das armações, para os apoios de linha dupla da gama MD.

Analisando a Figura 30, Figura 31, Figura 32, Figura 33 e Figura 34, resume-se na Tabela 32 os valores para a distância mínima entre condutores para as armações dos apoios a integrar posteriormente no programa.

	Linhas simples (3 Condutores)	Distância mínima entre condutores (m)	Linhas duplas (6 Condutores)	Distância mínima entre condutores (m)
AT	F20CA	2,7	F20CD	2,25
	F45CA	2,7	F30CD	2,25
	F65CA	2,7	F65CD	2,25
	F95CA	2,7	F95CD	2,7
				F165CD
MT	F10CM	1,8	F20MD	1,8
	F15CM	1,8	F45MD	1,8
	F30CM	1,8	F65MD	1,8
	F45CM	1,8	F95MD	1,8

Tabela 32 - Distância mínima entre condutores para todas as armações, dos apoios a incluir no programa.

Observando os valores referidos na Tabela 32, e considerando o estudo elaborado, definiram-se os seguintes valores para a distância mínima entre condutores: 2,7m para a alta tensão e 1,8m para a média tensão, de seguida iremos justificar a utilização destes dois valores no programa, em vez de incluir um valor diferente para cada armação.

Recordando as Equações 5.4 e 5.5, possível calcular a flecha máxima para todos os casos os casos:

- No caso da alta tensão, para os 60kV, e resolvendo a Equação 5.4 em ordem à flecha, podemos concluir que o valor para a flecha máxima é,

$$f_{max} = \left(\frac{D - \frac{U}{150}}{k} \right)^2 = \left(\frac{2,7 - \frac{60}{150}}{0,6} \right)^2 = 14,7[m] \quad (5.6)$$

- No caso da média tensão, para os 30kV, e resolvendo a Equação 5.5 em ordem à flecha, podemos concluir que o valor para a flecha máxima é,

$$f_{max} = \left(\frac{D - \frac{U}{200}}{0,75 * k} \right)^2 = \left(\frac{1,8 - \frac{30}{200}}{0,75 * 0,6} \right)^2 = 13,4[m] \quad (5.7)$$

- No caso da média tensão, para os 15kV, e resolvendo a Equação 5.5 em ordem à flecha, podemos concluir que o valor para a flecha máxima é,

$$f_{max} = \left(\frac{D - \frac{U}{200}}{0,75 * k} \right)^2 = \left(\frac{1,8 - \frac{15}{200}}{0,75 * 0,6} \right)^2 = 14,7[m] \quad (5.8)$$

O estudo elaborado pretende a partir da distância mínima entre condutores das armações da Tabela 32, determinar a flecha máxima para esse valor, o que permite calcular o vão máximo.

Sabendo que o R.S.L.E.A.T.²⁴, permite que a distância mínima entre planos horizontais dos condutores, seja diminuída de uma razão de $\frac{2}{3}$. Assim sendo, na realidade uma distância mínima entre condutores de 2,7 m, pode segundo o explicado, assumir um valor:

- $D = 2,7 * \frac{3}{2} = 4,05 \text{ m.}$

Este novo valor permite obter pela equação 5.4., uma flecha máxima de 37 m, o que corresponde a um vão de 575 m.

²⁴ Segundo o ponto 2, do Artigo 31º, da Secção IV, Capítulo III do R.S.L.E.A.T..

Para os cálculos elaborados foi considerada a utilização de um cabo ALACO160 [14], cujos parâmetros estão apresentados na Tabela 1, o vão máximo foi calculado a partir da Equação 4.11, substituindo os seguintes valores:

- $\sigma = 157,2 \text{ mm}^2$;
- $\omega = 0,545 \text{ daN/m}$;
- f – flecha calculada a partir da distância mínima entre condutores a considerar;
- t_{θ_i} – calculado a partir da equação de estados.

Na Tabela 33 resumem-se os valores obtidos, considerando as distâncias mínimas entre condutores da Tabela 32,

		Procedimento normal			Aplicando razão dos (2/3)		
		D _{min} condutores	Flecha máxima	Vão máximo	D _{min} condutores	Flecha máxima	Vão máximo
Alta Tensão	60kV (3CD)	2,7	14,7	362,1	4,05	37,0	574,6
	60kV (6CD)	2,25	9,5	291,2	3,4	24,6	468,3
Média Tensão	30kV (3/6 CD)	1,8	13,4	357,9	2,7	32,1	553,2
	15kV (3/6 CD)	1,8	14,7	374,2	2,7	34,0	569,4

Tabela 33 - Valores obtidos para o estudo efetuado.

Assim podemos concluir que se pode utilizar para a distância mínima entre condutores, o valor 2,7m para linhas de alta tensão e 1,8 para linhas de média tensão, sem comprometer o Artigo 31º, da Secção IV, do Capítulo III, do R.S.L.E.A.T..

Por último, como foi referido, alguns parâmetros para a resolução da equação de estados apresentam valores diferentes conforme o nível de tensão, nomeadamente a pressão dinâmica do vento e a temperatura máxima. Deste modo apresentam-se na Tabela 34 os valores a considerar²⁵.

	AT	MT
q [Pa] (Primavera/Inverno)	90/36	75/30
Temperatura máxima [°C]	80	50

Tabela 34 - Parâmetros a aplicar na equação dos estados

Conclui-se que para adaptar o algoritmo para este estar apto a elaborar projetos de diferentes níveis de tensão, foi fundamental definir um valor mínimo para a distância mínima entre condutores para a alta tensão e a média tensão. Este valor permite calcular a flecha máxima e o vão máximo correspondente ao nível de tensão introduzido pelo utilizador, e garantir que o R.S.L.E.A.T. é cumprido para qualquer escolha de apoios da base de dados.

²⁵ Segundo o Artigo 21º e Artigo 22º, da Secção III, do Capítulo III, do R.S.L.E.A.T..

5.3.6. Modo de alocação de memória, implementada no algoritmo

Na análise ao algoritmo foi detetado um erro, que se mostra determinante para o correto funcionamento do programa, relacionado com o modo como está a ser executada a gestão de memória das variáveis.

A alocação de memória representa um papel muito relevante a nível de linguagem de programação, visto que, num programa existe sempre a necessidade de armazenar dados e caso a memória alocada não seja suficiente para este fim, erros de segmentação de memória ocorrem e a informação é perdida ou o algoritmo deixa de ser viável. [13]

No algoritmo em análise, a libertação de memória após a utilização dos dados não era realizada de forma correta. A função que estava a ser utilizada, libertava menos de 1% da memória total alocada para as tabelas de dados.

O método para correção deste erro, está referido na secção 5.4.5, esta implementação trouxe robustez ao programa, e evitou erros a nível de cálculos no algoritmo.

5.3.7. Ficheiros de saída

O *software* “DM-SIT”, utilizado pela EDP-Distribuição para elaboração de projetos de linhas elétricas, utiliza os seus ficheiros de entrada formatados de forma específica.

Sendo que um dos principais objetivos proposto pela EDP era que o *output* do programa servisse como ficheiro de entrada para o “DM-SIT”, encontrou-se a necessidade de adaptar o programa de modo a que o *output* deste fosse utilizado no software em causa.

Como foi analisado na secção 5.2 o programa em análise exporta dois ficheiros de saída, o “relatório” e o “relatório_apoios”, estes ficheiros não contêm a informação devidamente organizada de modo a ser integrada pelo *software* referido.

Assim, foi necessário proceder a alterações a nível de algoritmo, que tornaram o programa capaz de gerar ficheiros com o formato necessário. Esses ficheiros são:

- “LN6”: apresenta os dados relativos aos parâmetros iniciais do projeto;
- “AP6”: apresenta as informações relevantes dos apoios constituintes das linhas.

Na secção 5.4.6, procede-se à explicação mais detalhada do método aplicado para implementação desta melhoria.

5.4. Novas funcionalidades implementadas

Nas secções seguintes, pretende-se dar a conhecer perante as limitações referidas anteriormente, as novas funcionalidades do programa, implementadas no sentido de o tornar mais robusto e corrigir as falhas detetadas.

As alterações ao algoritmo pretendem, acima de tudo, tornar o programa mais fácil de utilizar e mais genérico, de modo a que a base que o programa gera como resultado final represente a solução otimizada para a linha a construir. As principais alterações implementadas foram ao nível,

- Dos dados de entrada do programa: como foi exposto na secção 5.2, os dados de entrada eram introduzidos através de ficheiros de texto. No sentido de tornar o programa mais completo, implementou-se a funcionalidade do utilizador passar a definir os seguintes parâmetros:
 - Cabo a utilizar (secção 5.4.1);
 - Tensão em dN/mm^2 (secção 5.4.2);
 - Número de condutores (secção 5.4.3.);
 - Nível de tensão (secção 5.4.4).
- Do número de condutores: ao implementar a funcionalidade de o utilizador definir o número de condutores pretendido, o programa passou a elaborar projetos para linhas simples e duplas.
- Dos níveis de tensão: como foi exposto na secção 5.3.5. uma das limitações que o programa apresentava era apenas estar limitado a uma linha simples de 60kV. Assim, implementou-se a funcionalidade de o utilizador definir o nível de tensão pretendido, de modo a elaborar projetos para linhas aéreas de alta e média tensão.
- De otimização de memória: alocação dinâmica das tabelas e libertação das mesmas, quando se revelou necessário.
- Dos ficheiros de saída: a exportação dos ficheiros é executada com a extensão e formato necessários para integrar no sistema para elaboração de projetos de linhas aéreas utilizado pela EDP-Distribuição.

De seguida, será explicado detalhadamente, o modo de implementação de cada funcionalidade referida.

5.4.1. Melhoria implementada para correção das limitações, a nível da base de dados para a leitura do cabo

Em relação ao cabo a utilizar, como foi exposto na secção 5.2, este fazia parte do conjunto de dados de entrada e era inserido no programa através de um ficheiro de texto.

A este nível, visto existir uma base de dados utilizada pela EDP-Distribuição, onde constam os cabos utilizados e todas as suas características, surgiu a ideia de carregar a partir desta base de dados, o cabo seleccionado pelo utilizador para que os parâmetros pudessem ser utilizados pelo algoritmo.

Mostra-se de seguida uma parte do ficheiro CSV, que representa a base de dados referida:

30	ALACO50	49.48	9	0.171	7940	1.90E-05	1585	0	0.6
31	ALACO80	81.45	11.75	0.285	7750	1.90E-05	2260	0	0.6
32	ALACO90	87.9	12	0.306	8100	1.90E-05	2610	0.382	0.6
33	ALUW31	31.65	7.88	0.211	16170	1.30E-05	3910	0	0.6
34	ASTER 288	288.4	22.1	0.794	5700	2.30E-05	8506	0.115	0.7
35	ASTER 55	54.6	9.45	0.1489	6200	2.30E-05	1773	0.6042	1
36	ASTER 228	227.8	19.6	0.628	5700	2.30E-05	7404	0.146	0.7
37	CU120	116.2	14	1.062	10500	1.70E-05	4602	0.155	0.6
38	CU150	147.11	15.8	1.337	10500	1.70E-05	5898	0.124	0.6
39	CU153	153.72	16.1	1.397	10000	1.60E-05	5770	0	0.6
40	CU16	15.89	5.1	0.144	10500	1.70E-05	670	0	0.6
41	CU185	181.6	17.5	1.66	10500	1.70E-05	7192	0.099	0.6

Figura 35 - Exemplo do ficheiro para base de dados dos cabos.

O método para leitura do ficheiro “cabo.csv” revelou-se complexo, deste modo o método mais eficaz para seleção do cabo, foi inicialmente o utilizador inserir o nome do cabo a utilizar, esse nome ser comparado com o nome presente na primeira coluna do ficheiro, e quando se verificasse a igualdade entre ambos, carregar todos os parâmetros relativos a esse cabo.

No fluxograma seguinte, pretende explicar-se o método utilizado para implementação desta nova funcionalidade no algoritmo, uma vez que o cabo deixou de ser um dado pré-definido e passou a ser definido pelo próprio utilizador.

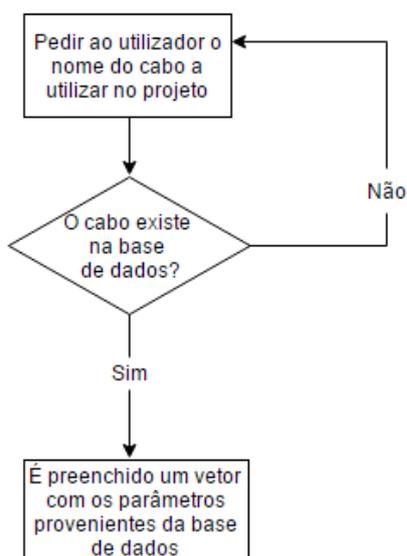


Figura 36 - Fluxograma representativo da leitura do cabo.

Após a leitura e validação dos parâmetros do cabo a utilizar, o algoritmo está pronto para utilizar estes parâmetros nos cálculos posteriores. Com a conclusão desta etapa, a base de dados que o programa desenvolvido utiliza é igual à utilizada pela EDP-Distribuição, o que o torna mais robusto e funcional.

5.4.2. Melhoria implementada para correção das limitações, para possibilitar a introdução do valor da tensão máxima

A tensão máxima é definida pelo projetista, tendo em conta o cabo a utilizar, e sabendo que não pode ser superior ao valor de segurança.

De modo a tornar mais perceptíveis as alterações efetuadas, vamos relembrar a fórmula para o cálculo da tensão de segurança.

$$t_{seg} = \frac{T_R}{2,5*\sigma} [daN/mm^2] \quad (5.6)$$

Em que,

- T_r , representa a tensão de rutura especificada nas características do cabo;
- σ , representa a secção especificada nas características do cabo.

Sabe-se que tensão máxima admissível (t_{max}), tem que ser menor do que a tensão de segurança calculada. No algoritmo em análise, o valor de t_{max} era pré-definido, a variável utilizada pelo programa tinha sempre um valor fixo.

A implementação efetuada pretende, que este valor seja agora introduzido pelo utilizador. O cálculo da tensão de segurança está dependente dos parâmetros do cabo carregados para o programa anteriormente, uma vez que é necessário saber o valor da tensão de rutura para calcular o valor de t_{seg} .

O fluxograma seguinte pretende explicar o método utilizado para implementação desta nova funcionalidade no algoritmo.

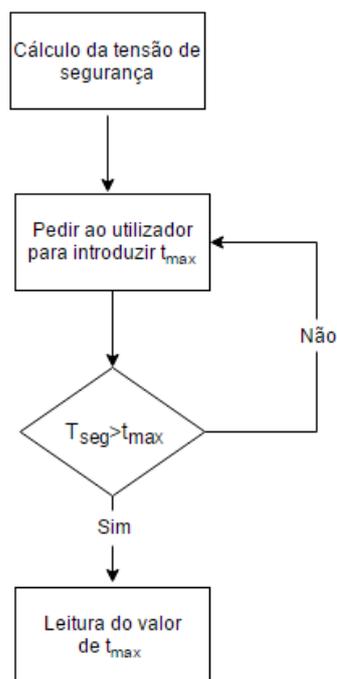


Figura 37 - Fluxograma representativo da leitura da tensão máxima.

Caso o valor para a t_{max} , não verifique a condição de segurança, o utilizador é alertado para o valor máximo admissível, facilitando assim a utilização do programa. Após cumprir a condição de validação, o valor de t_{max} é lido, e posteriormente usado no algoritmo nos cálculos em que se encontra implicado.

5.4.3. Melhoria implementada para dar a opção ao utilizador de escolher elaborar uma linha simples ou dupla

O algoritmo inicial apenas assumia uma linha simples de 60kV, como já foi referido. Visto que isto tornava o programa mais limitado, decidiu-se incluir a possibilidade de introduzir o número de condutores a utilizar no projeto. Ou seja, dar ao utilizador a possibilidade de escolher se a linha a construir é uma linha simples (3 condutores) ou uma linha dupla (6 condutores).

De modo a implementar esta nova funcionalidade, foi necessário tornar a base de dados que contém os apoios mais extensa. Portanto foram introduzidos os apoios das gamas referidas na Tabela 31, sendo estes os mais utilizados no projeto de linhas, pela EDP-Distribuição.

O número de condutores torna-se relevante para o cálculo de estabilidade dos apoios, visto que o esforço exigido ao apoio, no caso de uma linha simples é diferente de uma linha dupla, como se mostra na tabela seguinte.

	Esforços longitudinais	Esforços Transversais	Esforços verticais
Linha simples (3 condutores)	$F_{x_total} = 3 \times F_x$	$F_{y_total} = 3 \times F_y$	$F_{z_total} = 3 \times F_z$
Linha dupla (6 condutores)	$F_{x_total} = 6 \times F_x$	$F_{y_total} = 6 \times F_y$	$F_{z_total} = 6 \times F_z$

Tabela 35 - Cálculo dos esforços para linhas simples e duplas.

No fluxograma seguinte, pretende explicar-se o método utilizado para implementação desta nova funcionalidade no algoritmo. O número de condutores passa a ser introduzido pelo utilizador, em vez de estar pré-definido no algoritmo.

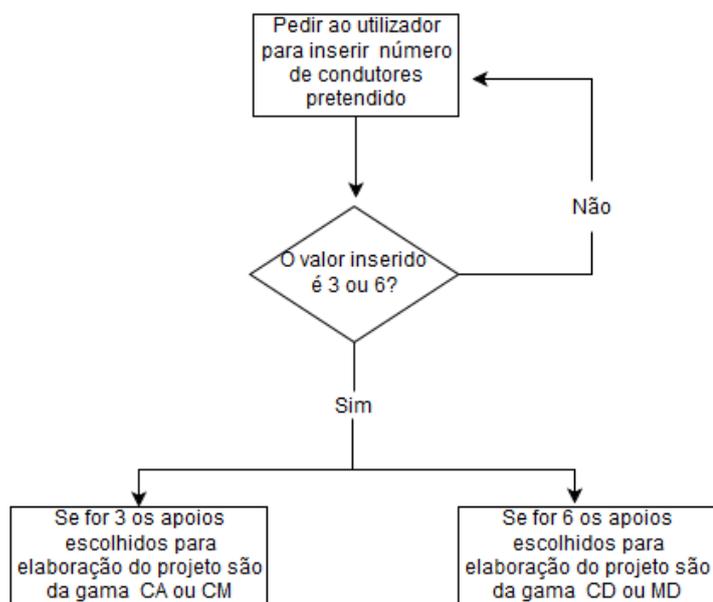


Figura 38 - Fluxograma representativo da introdução do número de condutores pretendido.

Após ser introduzido um número de condutores válido, será possível carregar para o programa a base de dados dos apoios correspondente a linhas simples ou linhas duplas, consoante o nível de tensão, procedendo posteriormente à distribuição e seleção dos apoios com base nesta base de dados.

No caso de o número de condutores pretendido ser três, ou seja linha simples, a base de dados a carregar corresponde aos apoios do tipo CA ou CM, caso o valor seja seis, linha dupla a base de dados a carregar corresponde aos apoios do tipo CD ou MD.

De modo a que a base de dados dos apoios fosse lida de uma forma direta e não fossem carregados para o programa dados desnecessários, decidiu adotar-se a abordagem de dividir o ficheiro de entrada correspondente à base de dados dos apoios em quatro ficheiros, nomeadamente para linhas simples e linhas duplas, de média e alta tensão.

Os apoios subdividem-se pelos quatro ficheiros segundo as gamas definidas na Tabela 31, ou seja:

- Alta tensão: linha simples;
- Alta tensão: linha dupla;
- Média tensão: linha simples;
- Média tensão linha dupla.

5.4.4. Melhoria implementada para dar a opção ao utilizador de escolher o nível de tensão

O programa estava preparado para elaborar apenas, projetos linhas simples de alta tensão. Com o objetivo de tornar este programa mais funcional, fizeram-se as alterações necessárias de modo a que fosse possível elaborar ainda projetos para linhas elétricas de média tensão.

Tal como foi exposto na secção 5.3.5, para integrar no programa a funcionalidade de elaborar o projeto base para a média tensão, era necessário proceder a alterações nos seguintes parâmetros,

- Distância mínima entre condutores;
- Pressão dinâmica do vento;
- Temperatura máxima para o cabo, que corresponde à flecha máxima;
- Ficheiros na base de dados.

Deste modo o programa consoante o nível de tensão escolhido, vai utilizar diferentes parâmetros no algoritmo, nomeadamente para o valor da flecha e da distância mínima entre condutores, consoante a linha pretendida seja de alta ou média tensão. Assim, podemos concluir:

- O valor para a distância mínima entre condutores é 2,7 m para linhas de alta tensão e 1,8 m para linhas de média tensão;
- A pressão dinâmica do vento assume 90 Pa para a alta tensão e 75 Pa para a média tensão, o que altera os cálculos na equação dos estados, e consequentemente o cálculo da estabilidade dos apoios;
- A temperatura máxima assume 80°C para a alta tensão e 50°C para a média tensão, o que influencia o cálculo da flecha máxima e consequentemente o parâmetro de curva da catenária;
- Altera-se a base de dados escolhida, o que afeta o cálculo da estabilidade dos apoios.

A funcionalidade implementada, vai permitir ao utilizador inserir um dos seguintes níveis de tensão: 15kV, 30kV e 60kV.

No fluxograma seguinte pretende demonstrar-se o funcionamento do programa assumindo todas as funcionalidades referidas.

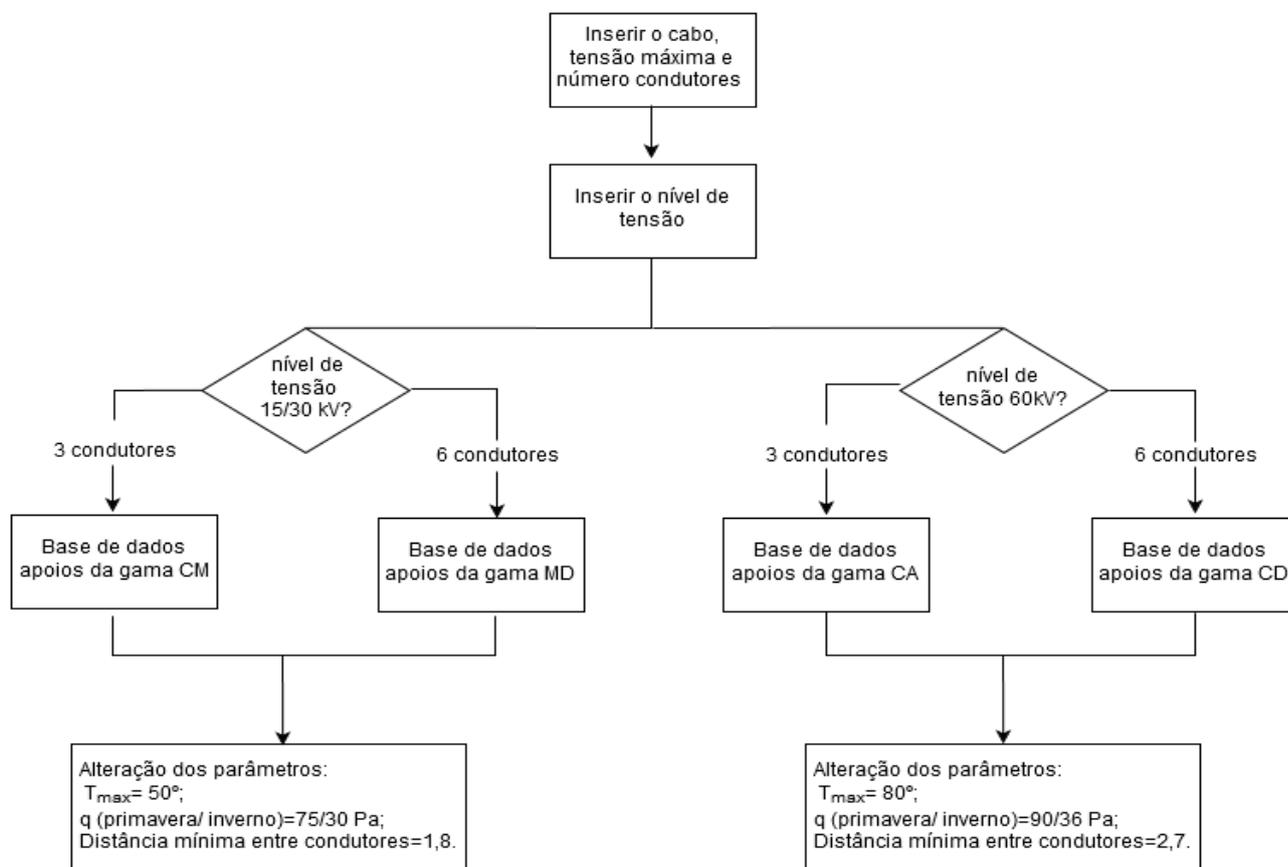


Figura 39 - Resumo das funcionalidades implementadas no programa.

Como se pode verificar a partir do fluxograma presente na Figura 39, o programa pede ao utilizador para inserir o cabo a utilizar, a tensão máxima e o número de condutores. De seguida vai pedir ao utilizador que insira o nível de tensão que pretende, e a partir da restrição do número de condutores e nível tensão, vai escolher a base de dados com os apoios da gama correspondente, e definir o vento máximo, temperatura e a distância mínima entre condutores.

Com esta implementação poder-se-á realizar projetos ao nível da média tensão, tornando o programa muito mais abrangente.

5.4.5. Melhorias implementadas no algoritmo a nível de otimização de memória

Na análise ao funcionamento do algoritmo, ao nível da alocação de memória foi identificado um erro no método de libertação de mesma, em que se concluiu que apenas cerca de 1% da memória total utilizada estava a ser corretamente libertada.

Como é sabido, a nível de programação a informação utilizada ao longo do programa é armazenada em tabelas. É uma boa prática de programação, no final do programa toda a memória utilizada para armazenamento de dados seja corretamente libertada, de modo a que as tabelas fiquem novamente vazias e evitando assim conflito de informação. [13]

No algoritmo em análise, esta libertação de memória não estava a ser efetuada de forma correta, uma vez que no fim do programa apenas era libertado um dos elementos da tabela. No fluxograma seguinte, pretende explicar-se o método utilizado para implementação do novo método de alocação de memória no algoritmo.

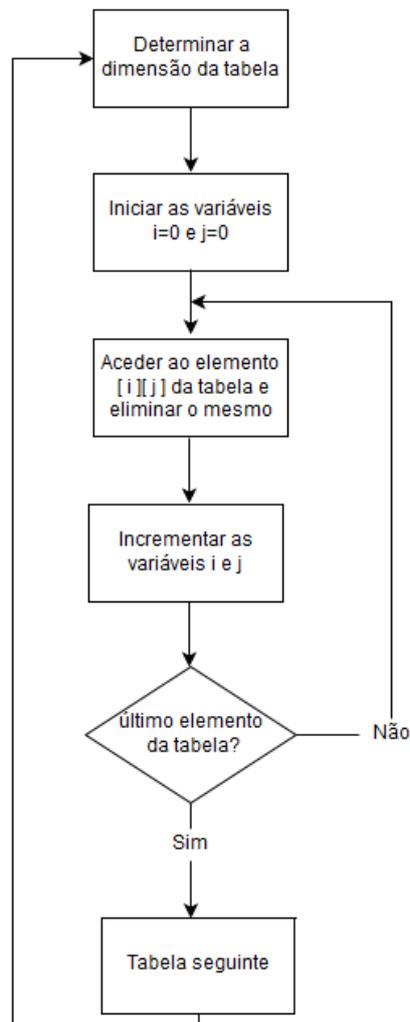


Figura 40 - Fluxograma exemplificativo da nova gestão de memória.

Analisando a função implementada no programa presente no fluxograma da Figura 40, percebe-se que todas as posições das tabelas são limpas, ou seja, é libertada corretamente a memória alocada.

5.4.6. Melhoria implementada a nível dos ficheiros de saída

Os ficheiros de saída que o algoritmo em análise exportava, resumiam algumas informações importantes relativamente aos apoios necessários para construção da linha. No entanto estes ficheiros apresentavam problemas como,

- A localização dos apoios era apresentada num relatório demasiado extenso, com todos os pontos do perfil topográfico;
- Os apoios utilizados para construção da linha, eram apresentados de forma desorganizada, sem numeração;
- Informações como distância à origem, altura dos apoios, armação, tipo de apoio, não eram apresentadas.

Um dos principais objetivos deste projeto, era que os *outputs* resultantes do programa criado pudessem ser utilizados como *inputs* do programa utilizado pela EDP-Distribuição, o que não era possível com os ficheiros que o algoritmo em análise gerava.

Sendo assim, analisando um ficheiro de entrada do programa “C-Linhas” utilizado pela EDP-Distribuição, procedeu-se à realização de um estudo, que tinha como objetivo perceber quais as modificações necessárias a implementar no programa em análise para que os ficheiros gerados por este, fossem iguais aos que o “C-LINHAS” necessitava como *input*.

Um dos grandes objetivos desta dissertação, passava por implementar melhorias ao programa em análise de modo a que este ficasse apto a fornecer o ponto de partida do projeto a desenvolver, e a integração do mesmo no sistema utilizado pela EDP-Distribuição.

Este objetivo foi cumprido, depois de realizar alterações no algoritmo, conseguiram-se obter os dois ficheiros que representam o ponto de partida de um projeto de linhas elétricas. Os ficheiros referidos são o “LN6”, onde contam os dados relativos aos parâmetros iniciais do projeto, Figura 41, e o “AP6”, onde constam as informações relevantes dos apoios constituintes das linhas, Figura 42.

```
Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda
N.º Apoio;Designação;Armação;D.Origem;Fixação;Ângulo;Cota Terreno;Orientação;Regime;Armação Adicional;
1;F65CA/24;F65CA;0;ARh;;;;Fim de Linha;;
2;F20CA/24;F20CA;314;SRh;;;;Normal;;
3;F20CA/24;F20CA;628;SRh;;;;Normal;;
4;F20CA/27;F20CA;942;SRh;;;;Normal;;
5;F20CA/27;F20CA;1256;SRh;;;;Normal;;
6;F20CA/27;F20CA;1570;SRh;;;;Normal;;
7;F20CA/30;F20CA;1884;SRh;;;;Normal;;
8;F65CA/24;F65CA;2199;ARh;45;;;Normal;;
9;F20CA/24;F20CA;2466;SRh;;;;Normal;;
10;F20CA/24;F20CA;2732;SRh;;;;Normal;;
11;F65CA/24;F65CA;2999;ARh;;;;Fim de Linha;;
```

Figura 41 - Ficheiro de saída AP6

```
Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda
Inicio;Fim;Condutor;Tmax(daN/mm2);Cabo de Guarda;Tmax(daN/mm2);Vento Max.(Pa);Temp. Maxima(°C);Esp. Gelo(mm);N.Cond.;
1;11;ALAC0160;8;;;900;80;;3;
```

Figura 42 - Ficheiro de saída LN6

Os ficheiros presentes nas Figura 41 e Figura 42, representam agora, os ficheiros de saída do programa. A utilidade dos mesmos revela-se crucial, para integração deste programa, no sistema de elaboração de projetos utilizado pela EDP-Distribuição.

O projetista, analisando estes ficheiros de saída, vai ter um prévio conhecimento dos constituintes da linha. Partindo desta solução base, todos os projetos serão elaborados a partir de um esboço da linha, que apresenta a solução minimizada em termos de custos.

O projetista procederá à análise da solução gerada pelo programa, os constrangimentos da linha, e realizar as alterações que se revelem necessárias para que o projeto possa passar à fase seguinte.

O facto de neste momento, o programa ser capaz de exportar os ficheiros de saída, que podem ser diretamente integrados no sistema de elaboração de projetos da EDP, representa um avanço de extrema importância, pois realiza a ponte entre o trabalho desenvolvido e a sua aplicação, à elaboração de projetos de linhas elétricas pela EDP-Distribuição.

5.5. Conclusão

No presente capítulo, numa fase inicial faz-se referência às conclusões retiradas da análise crítica efetuada ao algoritmo existente. A análise elaborada permitiu realizar o levantamento de falhas a corrigir ao nível do funcionamento do programa e identificar possíveis melhorias a implementar.

As melhorias implementadas no programa permitiram ao utilizador, passar a introduzir dados de entrada como, o nome do cabo a selecionar da base de dados, a tensão máxima de trabalho, o número de condutores e ainda o nível de tensão da linha a projetar. A nível de algoritmo, ainda foi possível melhorar a gestão de memória do programa, otimizando o processo de utilização da mesma.

De modo a adaptar o programa para utilizar os dados de entrada que o utilizador passou a ter a liberdade de introduzir, foi necessário modificar as bases de dados que o mesmo utilizava e adaptar o algoritmo de modo a permitir elaborar projetos para diferentes níveis de tensão e tipos de linha.

Por fim, as alterações ao algoritmo permitiram possibilitar a exportação dos ficheiros de saída necessários para incorporar no departamento de Projeto e Construção da EDP-Distribuição. As implementações efetuadas, permitiram tornar o programa mais funcional e robusto, melhorando assim o seu desempenho.

Capítulo 6

Demonstração de Resultados

6.1. Introdução

Neste capítulo, pretende demonstrar-se o funcionamento do programa, após terem sido implementadas as melhorias referidas no capítulo anterior.

Numa fase posterior, realizar-se-á a comparação entre os resultados obtidos ao nível financeiro, elaborando um projeto partindo da base gerada pelo algoritmo desenvolvido, ou começando o projeto de raiz, como elaborado no Capítulo 4.

De modo a avaliar o desempenho do algoritmo, testou-se no programa o perfil do projeto exemplificativo de modo a proceder à comparação entre as duas soluções, manual e do programa.

6.2. Demonstração do funcionamento do programa para linhas simples e duplas

De seguida, mostra-se o funcionamento do programa após terem sido implementadas as alterações ao algoritmo.

- Inicialmente o programa vai pedir ao utilizador para introduzir o nome do cabo,

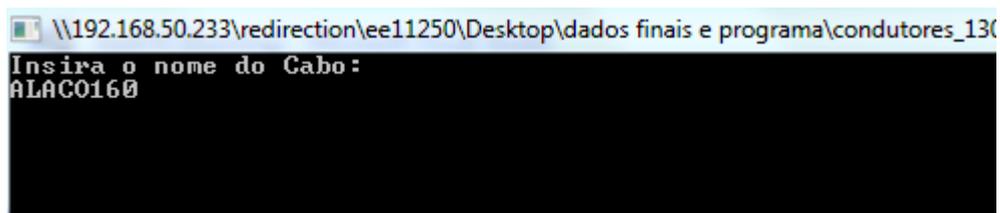
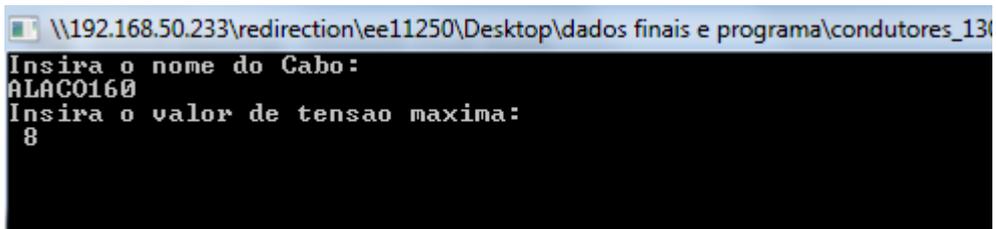


Figura 43 - Interface para introduzir o nome do cabo.

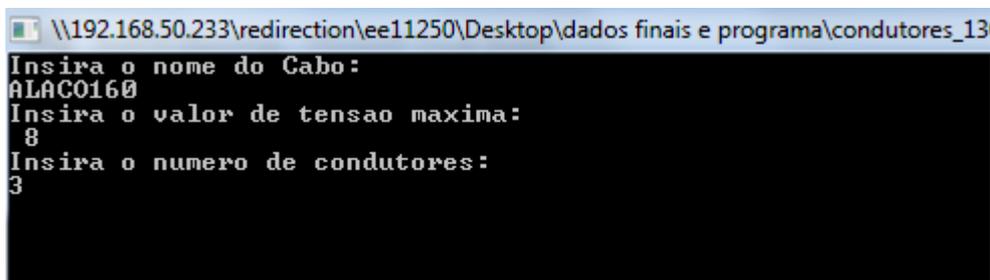
- Após inserir o nome do cabo, será solicitado ao utilizador que introduza o valor para a tensão máxima,



```
\\192.168.50.233\redirection\ee11250\Desktop\dados finais e programa\condutores_130
Insira o nome do Cabo:
ALACO160
Insira o valor de tensao maxima:
8
```

Figura 44 - Interface para introduzir a tensão máxima.

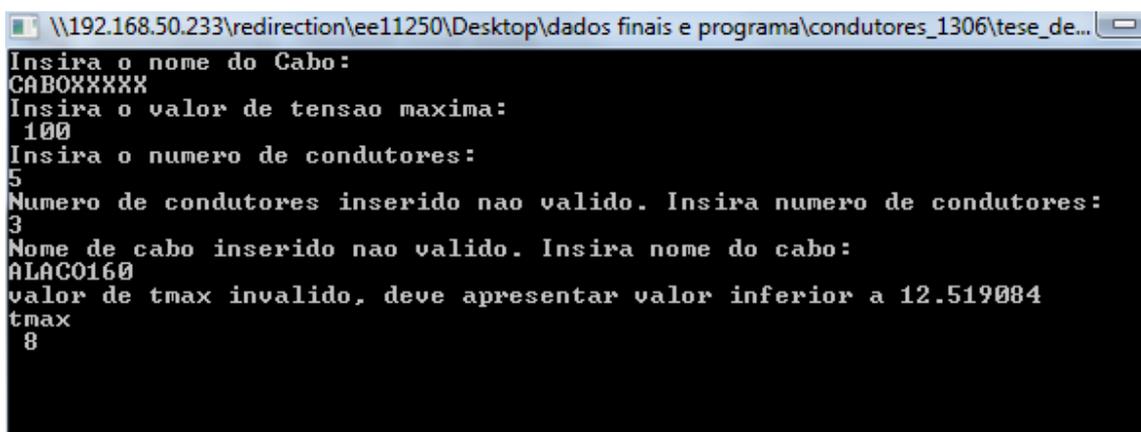
- Por último, será solicitado o numero de condutores, de modo a determinar o tipo de linha a construir, uma linha simples (3 condutores), ou uma linha dupla (6 condutores),



```
\\192.168.50.233\redirection\ee11250\Desktop\dados finais e programa\condutores_130
Insira o nome do Cabo:
ALACO160
Insira o valor de tensao maxima:
8
Insira o numero de condutores:
3
```

Figura 45 - Interface para introduzir o número de condutores.

- De modo a testar o algoritmo, foi elaborado um teste onde todos os valores são introduzidos de forma incorreta, o algoritmo está preparado para esta situação, e perante isto, volta a pedir ao utilizador os dados referidos,



```
\\192.168.50.233\redirection\ee11250\Desktop\dados finais e programa\condutores_1306\tese_de...
Insira o nome do Cabo:
CABOXXXXXX
Insira o valor de tensao maxima:
100
Insira o numero de condutores:
5
Numero de condutores inserido nao valido. Insira numero de condutores:
3
Nome de cabo inserido nao valido. Insira nome do cabo:
ALACO160
valor de tmax invalido, deve apresentar valor inferior a 12.519084
tmax
8
```

Figura 46 - Interface para correção dos dados de entrada.

- Como foi abordado na secção anterior, o programa ficou preparado para proceder à elaboração de um projeto para linhas duplas, de modo a testar essa implementação, introduziu-se no campo correspondente o número de condutores para linhas duplas,

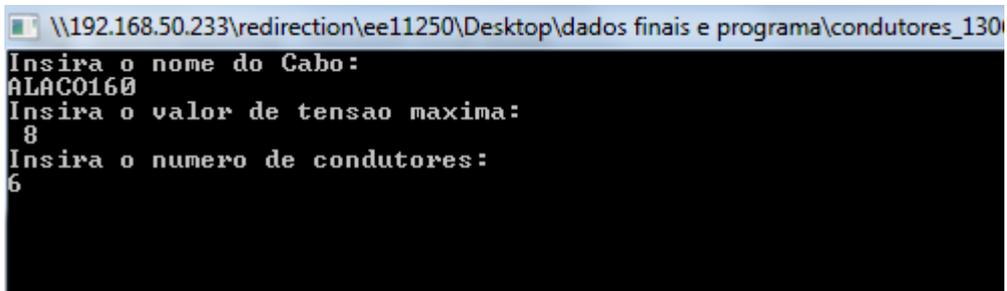


Figura 47 - Interface para introduzir o número de condutores para linhas duplas.

O ficheiro apresentado de seguida, surgiu no seguimento de introdução de um perfil a testar, para linhas duplas. Como podemos verificar a base de dados para seleção dos apoios, foi a base de dados correta onde constam os apoios da gama CD,

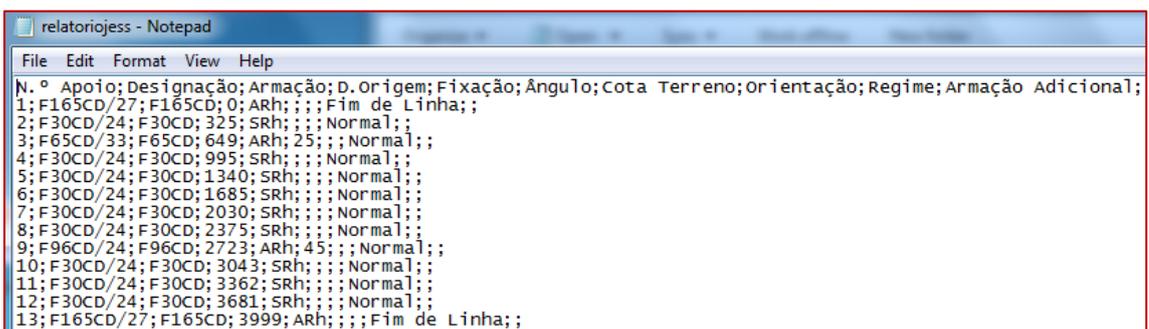


Figura 48 - Ficheiro de saída AP6 para linhas duplas.

Os testes efetuados ao programa, pretendem mostrar que o mesmo comparativamente ao programa inicial, se tornou mais dinâmico, flexível, e apresenta mais funcionalidades implementadas. Por último, mais uma vez se refere que a grande vantagem é este programa apresentar os dados de saída pretendidos, para integrar no sistema da EDP-Distribuição.

6.3. Demonstração do funcionamento do programa para a média tensão

De seguida, mostra-se o funcionamento do programa após terem sido implementadas as alterações ao algoritmo, que correspondem à introdução do nível de tensão que o utilizador pretende.

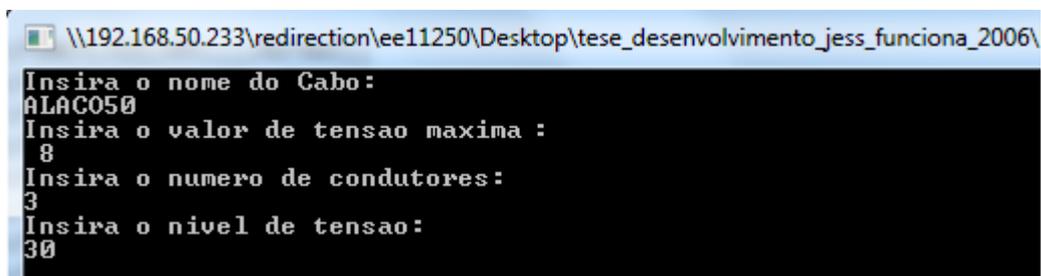
O cabo escolhido para a elaboração do projeto para a média tensão foi o ALACO50, que é um dos cabos normalizados pela EDP-Distribuição para a média tensão, cujas características se apresentam de seguida. [14]

Parâmetro	Valor	Unidades
Secção	49,48	mm ²
Diâmetro	9,00	Mm
R 20°C	0	Ω/Km
Módulo de Young	7940	daN/mm ²
Coef. Dilatação	0,000019	°C ⁻¹
Peso Próprio	0,171	daN/m
Tensão de rutura	1585	daN

Tabela 36 - Parâmetros do cabo ALACO50 utilizado no teste ao programa para linhas MT.

Ao inserir o nome do cabo ALACO50 no campo para o efeito, o programa irá carregar da base de dados dos cabos, todos os parâmetros apresentados na Tabela 36.

- Dados de entrada: nome do cabo, tensão máxima, número de condutores e nível de tensão,



```
\\192.168.50.233\redirection\ee11250\Desktop\tese_desenvolvimento_jess_funciona_2006\  
Insira o nome do Cabo:  
ALACO50  
Insira o valor de tensao maxima :  
8  
Insira o numero de condutores:  
3  
Insira o nivel de tensao:  
30
```

Figura 49 - Dados de entrada para elaborar um projeto de média tensão, para uma linha simples.

O objetivo nesta secção é elaborar um projeto base para uma linha simples de média tensão, após correr o programa inserindo os dados necessários, Figura 49, obteve-se *output* mostrado de seguida, Figura 50 e Figura 51.

- Ficheiros de saída: ficheiros LN6 e AP6, que correspondem ao output do programa para elaboração da linha simples de média tensão a construir, perante os dados de entrada inseridos.

```

relatoriojess - Notepad
File Edit Format View Help
N.º Apoio; Designação; Armação; D. Origem; Fixação; Ângulo; Cota Terreno; Orientação; Regime; Armação Adicional;
1; F15CM/24; F15CM; 0; ARh; ; ; ; Fim de Linha; ;
2; F10CM/24; F10CM; 216; SRh; ; ; ; Normal; ;
3; F10CM/24; F10CM; 432; SRh; ; ; ; Normal; ;
4; F10CM/24; F10CM; 649; ARh; 25; ; ; Normal; ;
5; F10CM/24; F10CM; 900; SRh; ; ; ; Normal; ;
6; F10CM/24; F10CM; 1150; SRh; ; ; ; Normal; ;
7; F10CM/24; F10CM; 1400; SRh; ; ; ; Normal; ;
8; F10CM/27; F10CM; 1650; SRh; ; ; ; Normal; ;
9; F10CM/24; F10CM; 1899; ARh; 28; ; ; Normal; ;
10; F10CM/24; F10CM; 2099; SRh; ; ; ; Normal; ;
11; F10CM/33; F10CM; 2298; SRh; ; ; ; Normal; ;
12; F10CM/24; F10CM; 2497; SRh; ; ; ; Normal; ;
13; F15CM/24; F15CM; 2697; ARh; ; ; ; Fim de Linha; ;

```

Figura 50 - Ficheiro de saída AP6.

```

relatoriojess - Notepad
File Edit Format View Help
Inicio; Fim; Condutor; Tmax(daN/mm2); Cabo de Guarda; Tmax(daN/mm2); Vento Max. (Pa); Temp. Maxima(°C); Esp. Gelo(mm); N. Cond. ;
1; 13; ACO35; 8; ; ; 750; 50; ; 3;

```

Figura 51 - Ficheiro de saída LN6.

Apresenta-se de seguida um resumo das novas funcionalidades implementadas no programa:

- Possibilidade de introduzir o nome do cabo, em que os seus parâmetros são carregados de uma base de dados integrada no programa;
- Possibilidade de introduzir a tensão máxima que o cabo suporta, que tem que ser inferior à tensão máxima de segurança;
- Possibilidade de escolher elaborar uma linha simples (3 condutores) ou dupla (6 condutores);
- Possibilidade de introduzir o nível de tensão da linha elétrica a construir, 15kV 30kV e 60kV;
- O output do programa passou a ser, o ficheiro AP6 e LN6, de modo a realizar a ponte entre o trabalho elaborado e o programa utilizado para elaboração de projetos de linhas elétricas, pela EDP-Distribuição.

6.4. Comparação da solução manual versus a solução do programa

No programa desenvolvido foram colocados os dados de entrada do projeto exemplificativo, nomeadamente o perfil topográfico e os parâmetros do projeto.

Após obter os ficheiros AP6 e LN6 exportados a partir do programa desenvolvido, e utilizá-los como dados de entrada do “C-linhas”, foi possível validar os parâmetros gerados pelo programa, posteriormente o esboço da linha foi apresentado no “DM-SIT”, o que possibilitou identificar alguns constrangimentos presentes no terreno e proceder à correção dos mesmos de modo a validar todos os parâmetros do projeto.

Na Figura 52²⁶, apresenta-se a linha construída no projeto exemplificativo, que contém treze apoios.

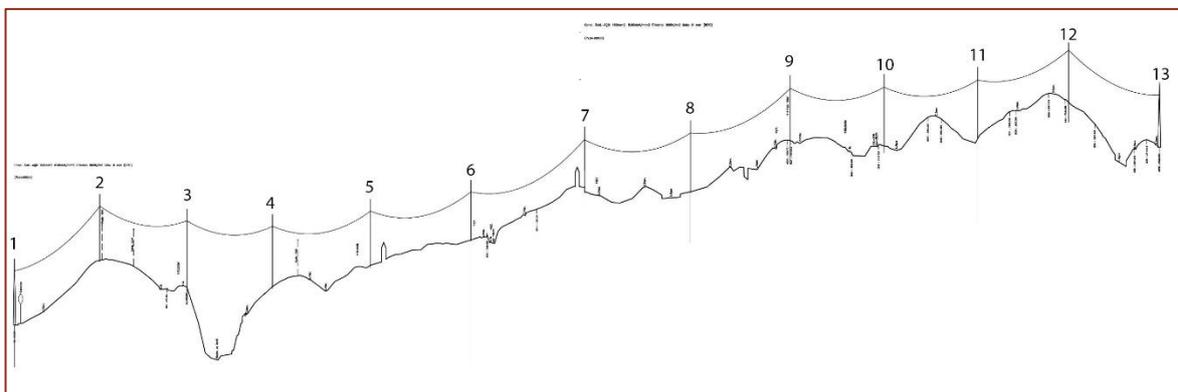


Figura 52 - Esboço da linha para o projeto exemplificativo.

Na Figura 53²⁷, mostra-se a solução construtiva da linha, após introduzir os dados exportados pelo programa e terem sido realizados os ajustes necessários perante os constrangimentos que foram identificados na sua análise.

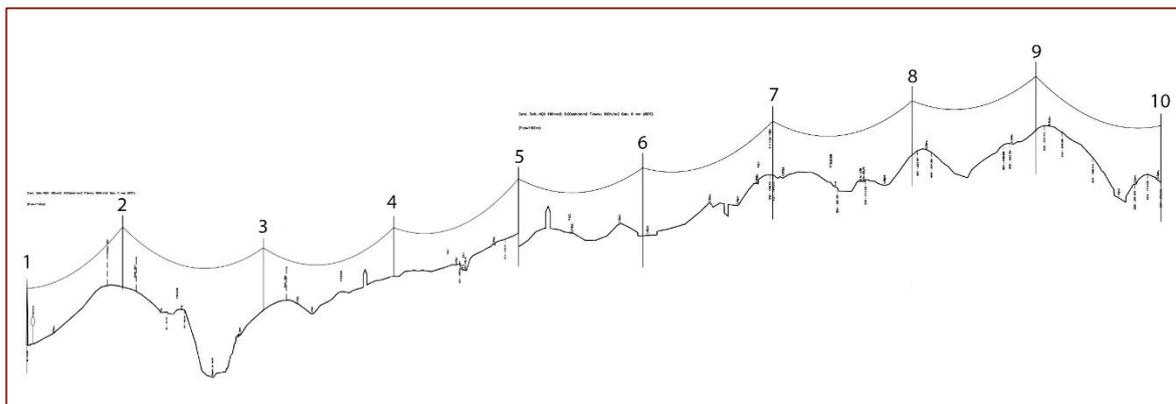


Figura 53 - Esboço da linha para a solução do programa ajustada.

²⁶ A linha apresentada encontra-se em mais pormenor no Anexo A e Anexo B.

²⁷ A linha apresentada encontra-se em mais pormenor no Anexo C e Anexo D.

No início desta dissertação foi elaborado um projeto exemplificativo, a sua realização estendeu-se a uma duração temporal de um mês. Em relação à realização do mesmo projeto, utilizando o programa, desde que se introduzem os parâmetros de entrada até obter os ficheiros AP6 e LN6, demorou apenas alguns segundos, sendo que os ajustes realizados para obter a solução final demoraram umas horas. Portanto podemos concluir que o tempo para execução do projeto diminuiu consideravelmente.

Os resultados em termos construtivos, foram também satisfatórios, enquanto que na realização do projeto exemplificativo verificou-se a necessidade de utilizar treze apoios para a construção da linha, após validar e ajustar a solução exportada a partir do programa, este número de apoios ficou reduzido a dez.

Os ajustes realizados, à solução exportada pelo programa, foram executados no “DM-SIT”, onde foi possível verificar a existência de situações não regulamentares. Devido a constrangimentos encontrados, foi necessário proceder à movimentação de alguns apoios e proceder ainda ao ajuste das suas alturas.

Os apoios aos quais foram introduzidas modificações, encontram-se assinalados na Figura 54, onde M representa movimentação e A ajuste de altura. Procedeu-se à movimentação do apoio nº 2, pois como se pode verificar na Figura 54, encontrou-se uma situação não regulamentar em relação à linha MT. A figura seguinte mostra, o esboço da linha, obtido através da análise dos ficheiros AP6 e LN6 pelo “DM-SIT”, na parte superior, e o esboço da linha ajustada, na parte inferior.

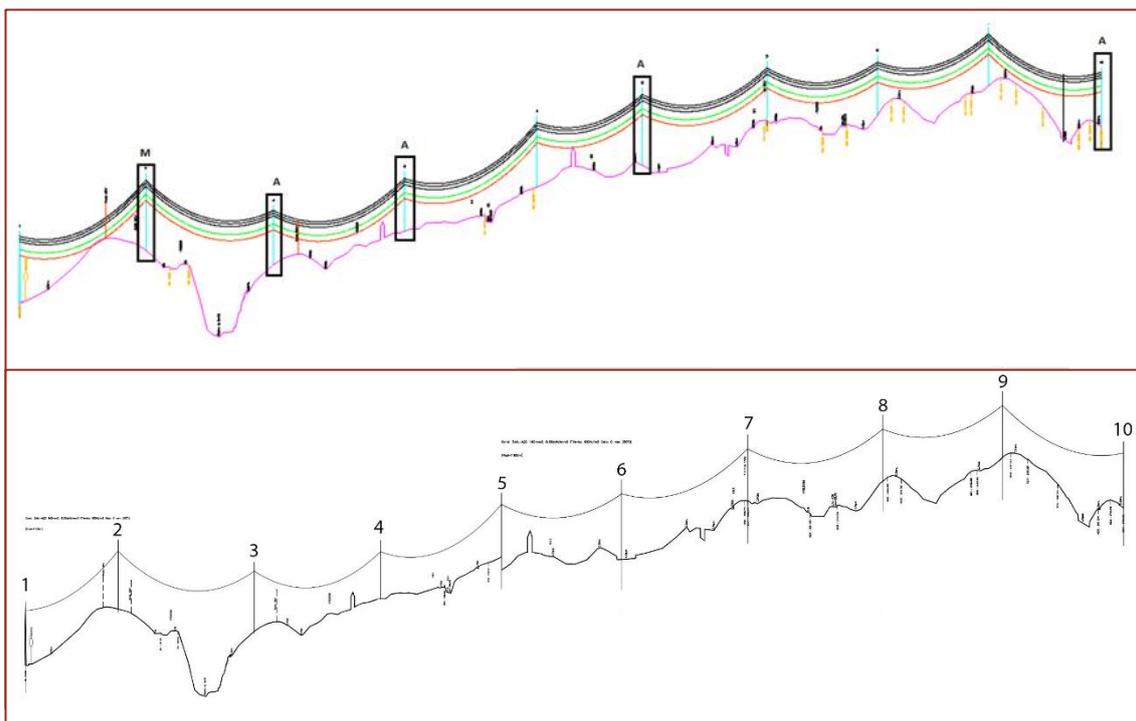


Figura 54 - Em cima o esboço da solução inicial do programa e em baixo o esboço da solução ajustada.

De modo a tornar estas alterações mais perceptíveis, foi elaborada a tabela seguinte onde se resumem os ajustes realizados.

Apoios solução programa	Apoios solução ajustada
F65CA/30	F65CA/30
F20CA/33	F20CA/33
F45CA/24	F45CA/33
F20CA/24	F20CA/27
F20CA/30	F20CA/30
F20CA/33	F20CA/30
F45CA/24	F45CA/24
F20CA/24	F20CA/24
F20CA/24	F20CA/24
F65CA/24	F45CA/24

Tabela 37 - Apoios da solução do programa na coluna1 e apoios da solução ajustada na coluna2.

Analisando os resultados, podemos concluir que a solução final é muito próxima da solução gerada pelo programa. Deste modo, se o projeto tivesse sido construído com a base gerada pelo programa, seria de execução mais célere e custo menor, devido à redução do número dos apoios.

As grandes vantagens da aplicação deste algoritmo são:

- Existência de uma base inicial para o projeto;
- Maior robustez nas soluções;
- Projetos executados de modo mais fácil e eficaz;
- Diminuição do tempo de execução do projeto;
- Poupança a nível económico;

6.5. Comparação do custo dos projetos

O objetivo do algoritmo é minimizar o custo dos projetos de linhas elétricas, assim era de esperar que partindo de uma solução gerada por este, o custo face à elaboração manual do projeto fosse reduzido.

De seguida, apresentamos a análise do custo de ambas as soluções, a manual, a solução obtida pelo programa e a solução ajustada, para a linha aérea elétrica simples de 60kV, para a qual e elaborou o projeto exemplificativo.

Considerando apenas o custo dos apoios para solução obtida para o projeto exemplificativo, obteve-se um custo total para linha de,

Nº Apoio	Tipo Apoio	Custo Apoio
1	F65CA/27	10.109,8 €
2	F20CA/27	5.745,7 €
3	F20CA/33	6.642,0 €
4	F45CA/30	8.165,9 €
5	F20CA/27	5.745,7 €
6	F20CA/24	5.090,1 €
7	F20CA/24	5.090,1 €
8	F20CA/27	5.745,7 €
9	F45CA/24	6.739,2 €
10	F20CA/27	5.745,7 €
11	F20CA/27	5.745,7 €
12	F20CA/24	5.090,1 €
13	F65CA/24	9.089,8 €
Custo Total		84.745,6 €

Tabela 38 - Custo do projeto exemplificativo.

Considerando apenas o custo dos apoios, para a solução gerada pelo programa obteve-se um custo total para linha de,

Nº Apoio	Tipo Apoio	Custo Apoio
1	F65CA/30	10.969 €
2	F20CA/33	6.642 €
3	F45CA/24	6.739 €
4	F20CA/24	5.090 €
5	F20CA/30	5.927 €
6	F20CA/33	6.642 €
7	F45CA/24	6.739 €
8	F20CA/24	5.090 €
9	F20CA/24	5.090 €
10	F65CA/24	9.090 €
Custo Total		68.019 €

Tabela 39 - Custo para a solução do programa.

Considerando apenas o custo dos apoios, para solução gerada pelo programa mas procedendo aos ajustes necessários, obteve-se um custo total para a linha de,

Nº Apoio	Tipo Apoio	Custo Apoio
1	F65CA/30	10.969 €
2	F20CA/33	6.642 €
3	F45CA/33	9.305 €
4	F20CA/27	5.746 €
5	F20CA/30	5.927 €
6	F20CA/30	5.927 €
7	F45CA/24	6.739 €
8	F20CA/24	5.090 €
9	F20CA/24	5.090 €
10	F45CA/24	6.739 €
Custo Total		68.175 €

Tabela 40 - Custo para a solução ajustada.

De modo a tornar esta análise mais intuitiva elaborou-se um gráfico onde se compararam as três soluções, apresentado de seguida,

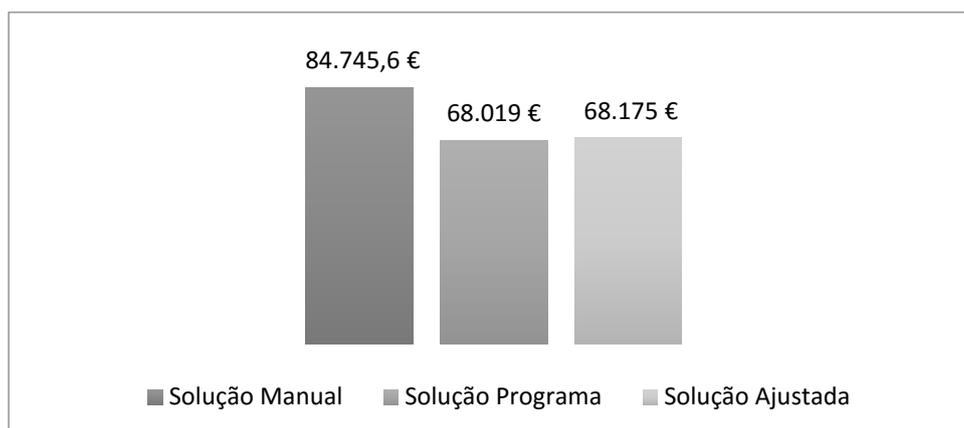


Figura 55 - Comparação dos custos das soluções analisadas

A partir dos dados obtidos, podemos constatar que, a diferença de custo entre a solução do programa e a solução ajustada se revela pouco significativa. Analisando o gráfico anterior, Figura 55, podemos concluir que, partindo de uma solução gerada pelo programa pode-se atingir uma poupança de cerca de 16.570€.

É de fácil perceção que realizar o projeto manualmente se mostra menos vantajoso, essencialmente pelo facto de o tempo de execução e do custo serem superiores.

6.6. Conclusão

Neste capítulo pretende dar-se a conhecer quais os resultados obtidos pelas implementações efetuadas, demonstrando o funcionamento atual do programa. Numa fase inicial, mostrou-se quais os dados de entrada que o programa pede ao utilizador para inserir, nomeadamente, cabo a utilizar, tensão máxima de trabalho e ainda o número de condutores, secção 6.2.

Posteriormente, demonstram-se os dados de entrada e respetivos ficheiros de saída, para a nova funcionalidade que permite elaborar projetos para linhas elétricas aéreas de média tensão, secção 6.3.

A realização deste capítulo pretende ainda mostrar, o desempenho da integração do algoritmo como base de um projeto, comparando as soluções obtidas com as do projeto elaborado no Capítulo 4.

Após comparar os resultados obtidos e comprar os custos associados conclui-se que, partir para o projeto de uma linha elétrica com uma base definida, torna o procedimento mais célere e permite obter um resultado mais económico.

Capítulo 7

Conclusões e trabalho futuro

7.1. Conclusões

A presente dissertação tinha como objetivo, o estudo de um algoritmo já desenvolvido em dissertações anteriores elaborado para otimizar a execução de projetos de linhas elétricas de alta tensão com base na minimização de custo. Após uma análise criteriosa e um estudo aprofundado do mesmo, foram implementadas algumas otimizações de modo a tornar o programa mais robusto.

No que diz respeito à minimização de custos o programa em análise já apresentava soluções bastante otimizadas, deste modo as implementações a efetuar nesta dissertação tinham como objetivo principal adicionar funcionalidades, que acrescentassem valor a esta ferramenta.

Numa primeira análise, foi possível identificar que a introdução dos dados de entrada, era um processo fixo e pré-definido à partida, o que tornava o programa limitado. Deste modo, foi implementada a funcionalidade de dar ao utilizador a possibilidade de introduzir alguns dados, nomeadamente, o cabo a utilizar no projeto, a tensão máxima de trabalho, o tipo de linha que se pretende construir, linha simples ou dupla, e ainda o nível de tensão a considerar na execução do projeto.

A implementação desta funcionalidade para a introdução de dados de entrada, potenciou a alteração da base de dados que o programa utilizava. O programa passou a seleccionar o cabo a partir de uma base de dados fornecida e utilizada por toda a EDP- Distribuição, e em relação à base de dados para os apoios, esta passou a estar dividida em apoios de linha simples e apoios de linha dupla, para alta tensão e média tensão, de modo a responder à imposição do utilizador, em relação ao tipo de linha que pretende.

Visto que o programa inicialmente só complementava a alta tensão, implementaram-se algumas funcionalidades no sentido de o tornar mais abrangente, procedendo-se a alterações ao nível do algoritmo, que possibilitam ao utilizador, introduzir um dos três níveis de tensão 15kV, 30kV ou 60kV. Deste modo, o programa encontra-se apto a elaborar a base para um projeto de linhas elétricas, para os três níveis referidos.

Perante a análise realizada, foi ainda possível identificar algumas melhorias a nível do código do programa, nomeadamente no método utilizado para gestão de memória utilizada pelo mesmo, otimizando o método para libertação da mesma.

Por fim, a última implementação, permitiu cumprir um dos objetivos principais propostos, o de exportar os dados de saída do programa num formato definido, permitindo que os mesmos fossem incorporados no sistema de elaboração de projetos da EDP-Distribuição. Neste momento, os ficheiros de saída do programa podem ser utilizados como ficheiros de entrada do “DM-SIT”.

As grandes vantagens conseguidas com a aplicação deste algoritmo são, a criação de um ponto de partida com uma solução base otimizada para distribuição e seleção dos apoios, a utilizar num projeto. Com a aplicação deste trabalho a um contexto profissional, é possível aumentar a uniformização dos projetos, robustez das soluções e diminuir do tempo de execução dos projetos, tornando o procedimento para elaboração de projetos de linhas elétricas mais célere e económico.

7.2. Trabalho futuro

Uma vez que a área de elaboração de projetos de linhas elétricas, envolve uma grande quantidade de recursos e investimentos, é de todo o interesse que se adotem estratégias que minimizem o custo a nível de execução de projetos.

Deste modo, é importante que este projeto continue a ser desenvolvido, com o objetivo de tornar este programa o mais abrangente para que este possa ser uma ferramenta útil na elaboração de projetos de linha elétricas, por parte da EDP-Distribuição.

Embora os resultados atingidos, com o desenvolvimento desta dissertação tenham correspondido a todos os pontos propostos à partida, existem alguns pontos a acrescentar ao programa, tornando-o uma ferramenta de maior valor, nomeadamente:

- Testes massivos ao algoritmo para validação do mesmo, e comparação dos resultados com situações e projetos reais construídos;
- Permitir ao utilizador definir cantões com diferentes tensões máximas de trabalho;
- Permitir a introdução de mais parâmetros de entrada por parte do utilizador, como valores para vento máximo e temperatura máxima.
- Considerar zonas de gelo e incluir utilização de cabos de guarda;
- Adaptação do programa de modo a incluir a utilização de apoios de betão;
- Inclusão no perfil topográfico de zonas do terreno, que mostrem estrangimentos como, habitações, linhas de ferro, vias de comunicação e outras linhas.

Referências

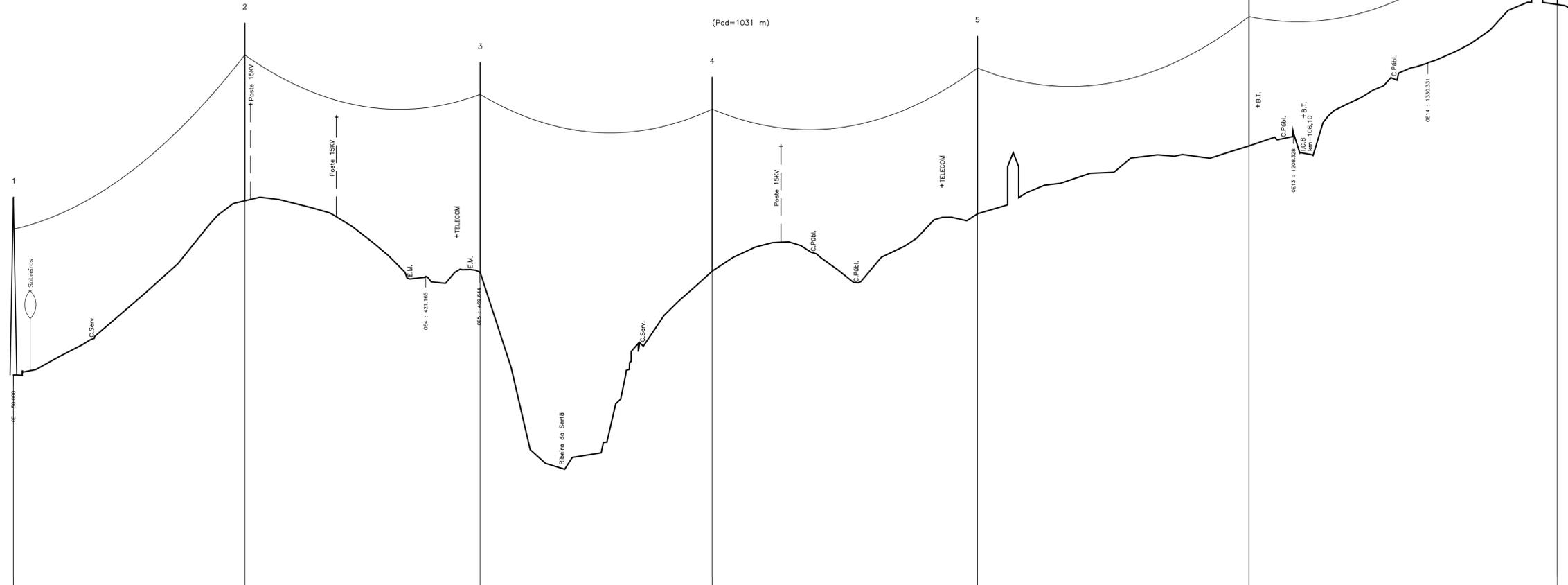
- [1] Filipe Matos, "Desenvolvimento de Algoritmo para Projeto de Linhas Baseado em Minimização de Custos", 2015.
- [2] V.M.Q. da Silva, "Automatização do Projeto de Linhas Elétricas: Criação de Modelo Matemático para Minimização de Custos", 2014.
- [3] Direcção de Serviços de Energia Eléctrica, "Edição DGE do Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão", 1993.
- [4] H. Leite, "Elaboração de projectos de linhas aéreas de distribuição de energia," tech. rep., Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [5] J. P. S. Paiva, "Redes de Energia Elétrica uma análise sistémica". IST Press, 2005.
- [6] REN, "Setor Elétrico", 2015. Disponível em https://www.ren.pt/o_que_fazemos/eletricidade/o_setor_eletrico/.
- [7] E. Distribuição, "Sistema elétrico nacional," 2009. Disponível em <http://www.edp.pt/pt/aedp/sectordeenergia/sistemaelectricoportugues/Pages/SistElectNacional.aspx>.
- [8] E. Distribuição, "Rede de Distribuição de Energia Elétrica", 2014. Disponível em https://www.edp.pt/pt/sustentabilidade/prevencaoese_seguranca2/seg_fornecedores/Pages/Rede.aspx
- [9] Labelec, Guia de Coordenação de Isolamentos – Fundamentos, 2008.
- [10] Metalgalva – Irmãos Silvas, S.A., Apoios Série F, 2003.
- [11] Luis M. Checa, "Linhas de Transporte de Energia", Edições CETOP, Saragoça, 1979.
- [12] CENELEC, "Overhead electrical lines exceeding AC 45kV, Part 1: General requirements - Common specifications", EN50341-1, Outubro 2001.
- [13] Luís Damas, "Linguagem C", FCA - EDITORA DE INFORMÁTICA LDA., 3ª Edição, Janeiro 1999.
- [14] SOLIDAL, "Condutores Elétricos". Disponível em <http://www.solidal.pt/?m=217&c=14>.
- [15] José Rui Ferreira, "Linhas de Transmissão.", Apontamentos de Sistemas Elétricos de Energia I (2004). Disponível em <http://paginas.fe.up.pt/~mam/Linhas-01.pdf>.
- [16] E. Distribuição, "ECT- Anexo XVII, Caderno de Encargos", 2007. Disponível em <https://www.edp.pt/pt/fornecedores/empreitadacontinua/cadernosdeencargos/Pages/EC-SET07ECT-CadernodeEncargos.aspx>.
- [17] Ernesto Pinto, "Projecto, Melhoria e Medição de Terras", Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~ee94056/Relatorio3parte1.pdf>.

Anexos

Anexo A - Planta projeto exemplificativo, parte A.

Cond. 3xAL-AÇO 160mm2: 8.00daN/mm2 F.Vento: 900N/m2 Gelo: 0 mm (80°C)

(Pcd=986m)

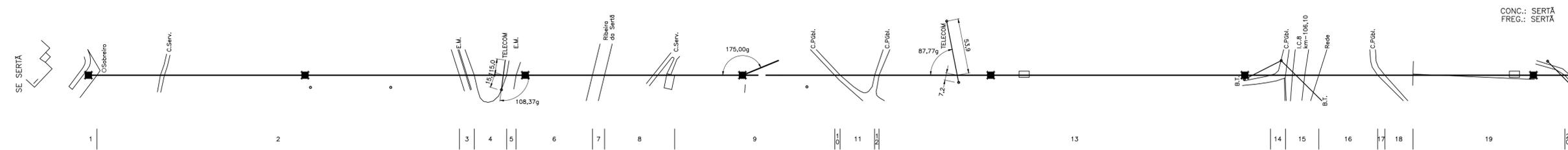


PLANO DE REFERÊNCIA: 200,00 m	241.90	273.86	260.62	260.92	271.45	283.91	309.86
COTA DO TERRENO	241.90	273.86	260.62	260.92	271.45	283.91	309.86
NÚMERO DO APOIO	1	2	3	4	5	6	7
TIPO DO APOIO	F65CA/27	F20CA/27	F20CA/33	F45CA/30	F20CA/27	F20CA/24	F20CA/24
ALTURA ÚTIL	26.75	26.75	32.75	29.75	26.75	23.75	23.75
ARMAÇÃO	F65CA	F20CA	F20CA	F45CA	F20CA	F20CA	F20CA
FIXAÇÃO DOS CONDUTORES	ARH	SRH	SRH	ARH	SRH	SRH	SRH
DISTÂNCIA ENTRE APOIOS		209.93	213.52	210.46	240.70	246.28	279.74
DISTÂNCIA À ORIGEM	0.00	209.93	423.45	633.91	874.61	1120.89	1400.63
CULTURAS	Subestação	Pinhal	Sobreiros	Sobreiros	Pinhal	Pinhal	Pinhal

- ANTI-POISO
- CAIXA DE FIBRA ÓPTICA
- PLATAFORMA DE NINHO
- SALVA-PÁSSARO
- SECCIONADOR
- SINALIZAÇÃO DIURNA NO APOIO
- SINALIZAÇÃO DIURNA NO VÃO
- SINALIZAÇÃO NOCTURNA NO APOIO
- SINALIZAÇÃO NOCTURNA NO VÃO

APOIOS

- ALINHAMENTO E ÂNGULO
- REFORÇO E FIM DE LINHA
- BETÃO
- METÁLICO ELÁSTICO
- METÁLICO RÍGIDO



CONC.: SERTÁ
FREG.: SERTÁ

ÍNDICE	DESCRIÇÃO	DATA	ALTERADO	APROVADO	PROJ.	LEV. TOP.	DES.	VERIF.	DATA	RUBRICA
					16.04.19	Jessica				
					16.04.19	EDP				
					16.04.19	Jessica				

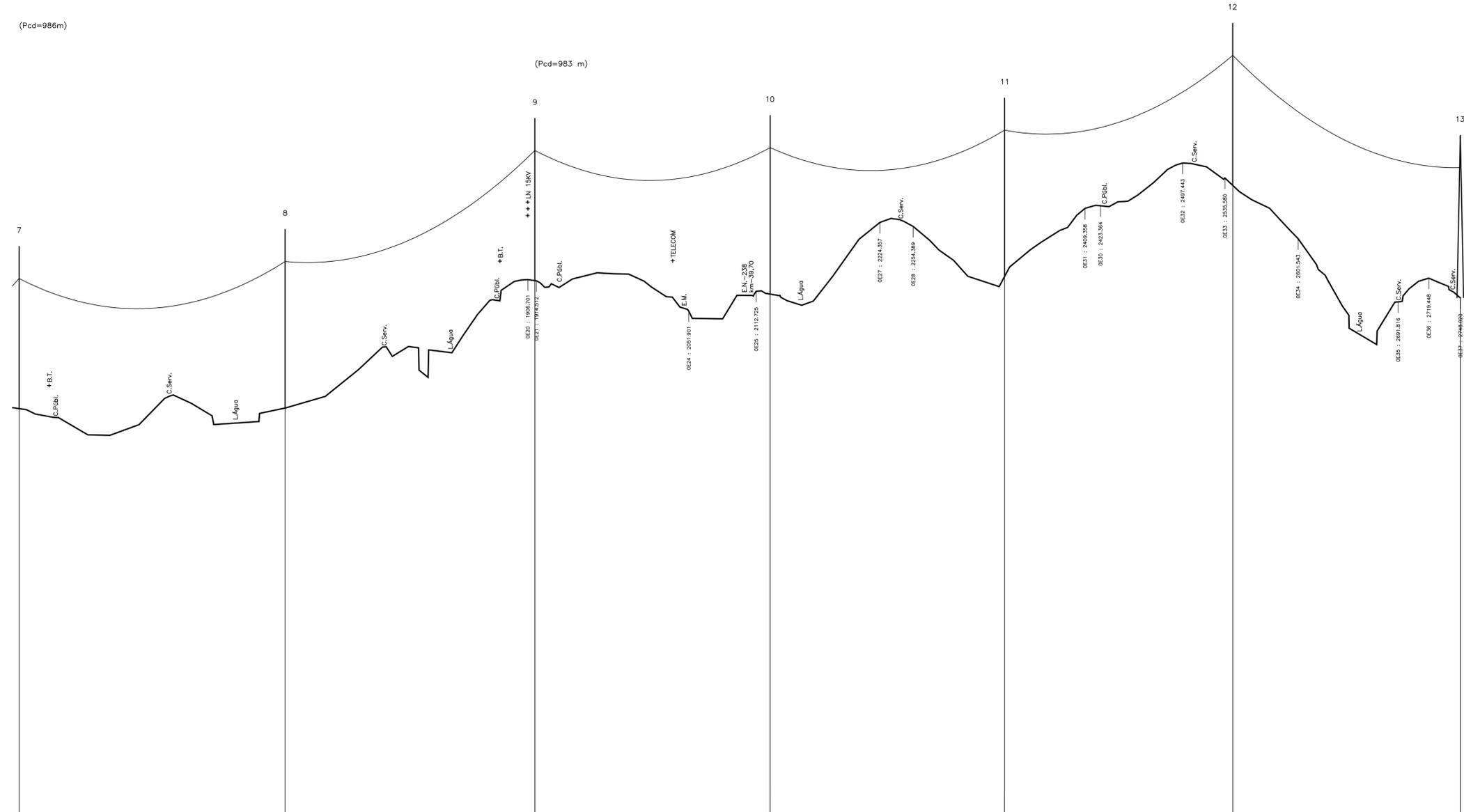
DPC	FORMATO	LINHA A 60KV			
	OUTPUT	LN60 1465 SERTÁ-PEDRÓGÃO			
ESCALA	PERFIL LONGITUDINAL E PLANTA PARCELAR				
	Freguesia: _____ Concelho: _____				
1:2500	SUBSTITUI	CÓDIGOS DE OBRA	Nº DESENHO	ÍNDICE	
1:500		DM 019234/2014	14-3299	050915146500-404 001	



Anexo B - Planta projeto exemplificativo, parte B.

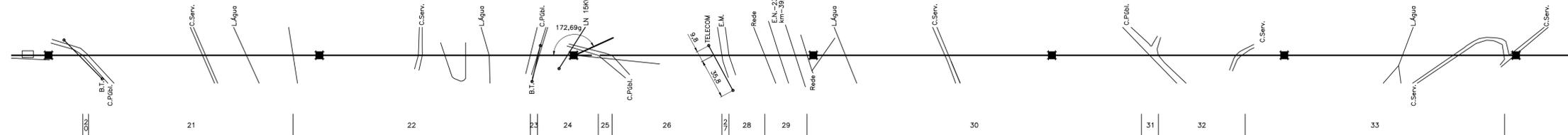
(Pcd=986m)

(Pcd=983 m)



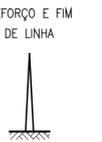
PLANO DE REFERÊNCIA: 250,00 m	309.86	309.98	333.25	330.77	333.96	350.62	330.12	
COTA DO TERRENO	309.86	309.98	333.25	330.77	333.96	350.62	330.12	
NÚMERO DO APOIO	7	8	9	10	11	12	13	
TIPO DO APOIO	F20CA/24	F20CA/27	F45CA/24	F20CA/27	F20CA/27	F20CA/24	F65CA/24	
ALTURA ÚTIL	23.75	26.75	23.75	26.75	26.75	23.75	23.75	
ARMAÇÃO	F20CA	F20CA	F45CA	F20CA	F20CA	F20CA	F65CA	
FIXAÇÃO DOS CONDUTORES	SRH	SRH	ARH	SRH	SRH	SRH	ARH	
DISTÂNCIA ENTRE APOIOS	240.01	225.26	212.33	211.37	205.91	205.29		
DISTÂNCIA À ORIGEM	1400.63	1640.64	1865.90	2078.23	2289.60	2495.51	2700.80	
CULTURAS		Pinhal	Oliveira	Pinhal	Monte	Pinhal e Eucalipto	Plantação de Pinhal	Eucalipto

CONC.: SERTÁ
FREG.: SERTÁ



- ANTI-POISO
- CAIXA DE FIBRA ÓPTICA
- PLATAFORMA DE NINHO
- SALVA-PÁSSARO
- SECCIONADOR
- SINALIZAÇÃO DIURNA NO APOIO
- SINALIZAÇÃO DIURNA NO VÃO
- SINALIZAÇÃO NOCTURNA NO APOIO
- SINALIZAÇÃO NOCTURNA NO VÃO

APOIOS



- BETÃO
- METÁLICO ELÁSTICO
- METÁLICO RÍGIDO

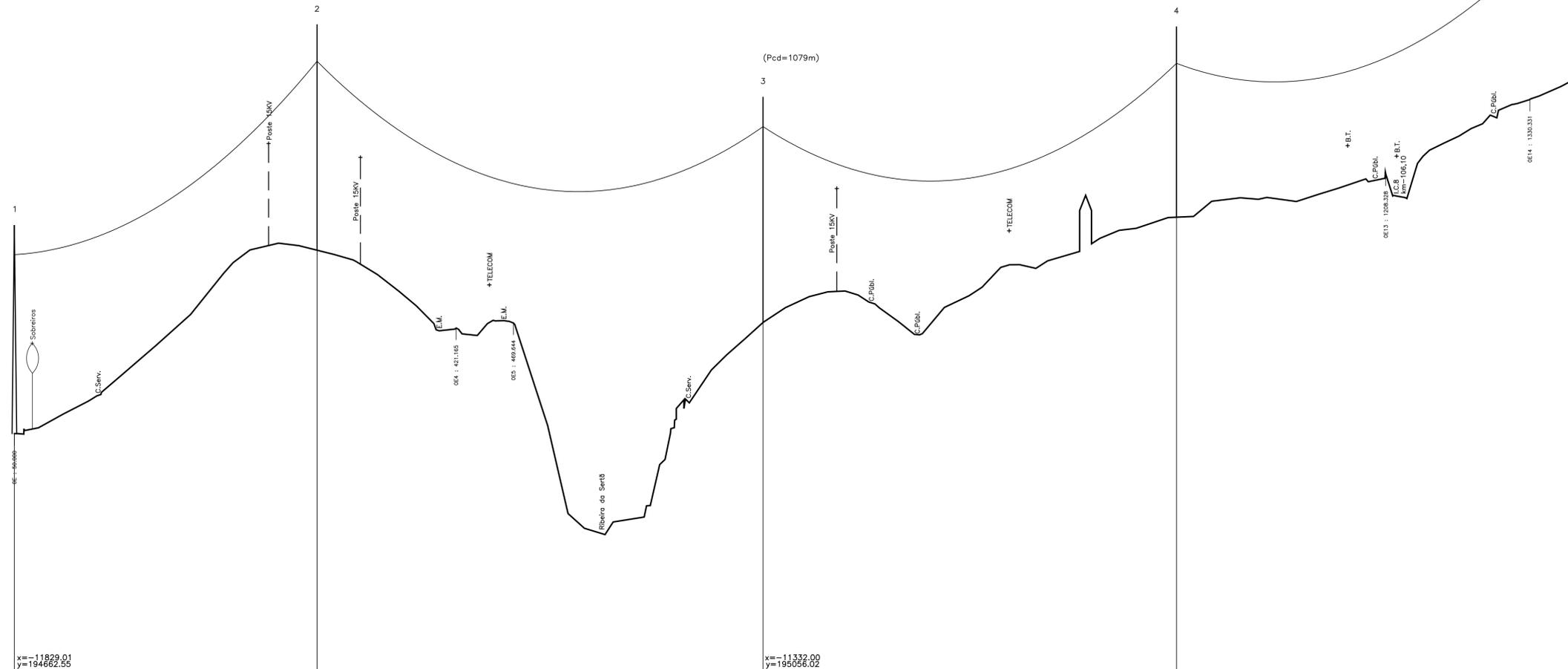
DPC	FORMATO	950x420	PROJ.	16.04.19	Jessica
	OUTPUT	1x1	LEV. TOP.	16.04.19	EDP
ESCALA	1:2500	Freguesia:	DES.	16.04.19	Jessica
	1:500		VERIF.	16.04.19	Jessica
		CÓDIGOS DE OBRA		Nº DESENHO	
		DM 019234/2014		14-3299	
		CONCELHO		050915146500-404 002	



Anexo C - Planta projeto elaborado a partir do programa, parte A.

Cond. 3xAL-AÇO 160mm2: 8.00daN/mm2 F.Vento: 900N/m2 Gelo: 0 mm (80°C)

(Pcd=1100m)

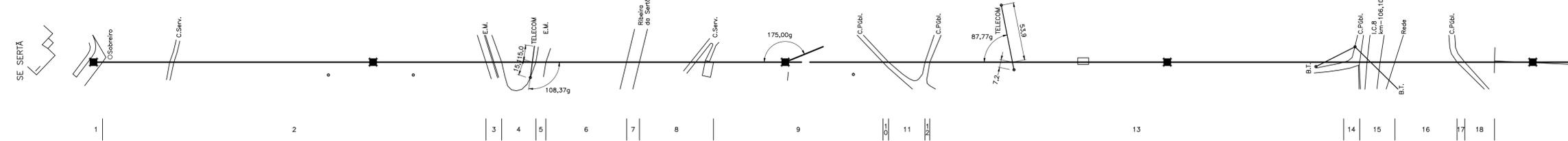


PLANO DE REFERÊNCIA: 200,00 m	x=-11829.01 y=194662.55	x=-11332.00 y=195056.02	x=-11332.00 y=195056.02	x=-11332.00 y=195056.02	x=-11332.00 y=195056.02	x=-11332.00 y=195056.02
COTA DO TERRENO	241.90	273.31	260.92	278.96	302.36	
NÚMERO DO APOIO	1	2	3	4	5	
TIPO DO APOIO	F65CA/30	F20CA/33	F45CA/33	F20CA/27	F20CA/30	
ALTURA ÚTIL	30.65	32.35	33.55	26.35	29.35	
ARMAÇÃO	F45CA	F20CA	F45CA	F20CA	F20CA	
FIXAÇÃO DOS CONDUTORES	ARh	SRh	ARh	SRh	SRh	
DISTÂNCIA ENTRE APOIOS		256.23	377.68	350.09	335.00	
DISTÂNCIA À ORIGEM	0.00	256.23	633.91	984.00	1319.00	
CULTURAS	Subestação	Pinhal	Sobreiros	Sobreiros	Pinhal	Pinhal

- ANTI-POISO ———— ∨
- CAIXA DE FIBRA ÓPTICA ———— □
- PLATAFORMA DE NINHO ———— T
- SALVA-PÁSSARO ———— X
- SECCIONADOR ———— ⚡
- SINALIZAÇÃO DIURNA NO APOIO ———— ●
- SINALIZAÇÃO DIURNA NO VÃO ———— ○
- SINALIZAÇÃO NOCTURNA NO APOIO ———— ⊙
- SINALIZAÇÃO NOCTURNA NO VÃO ———— ⊗

APOIOS

- ALINHAMENTO E ÂNGULO ———— |
- REFORÇO E FIM DE LINHA ———— |
- BETÃO ———— ●
- METÁLICO ELÁSTICO ———— ●
- METÁLICO RÍGIDO ———— ■



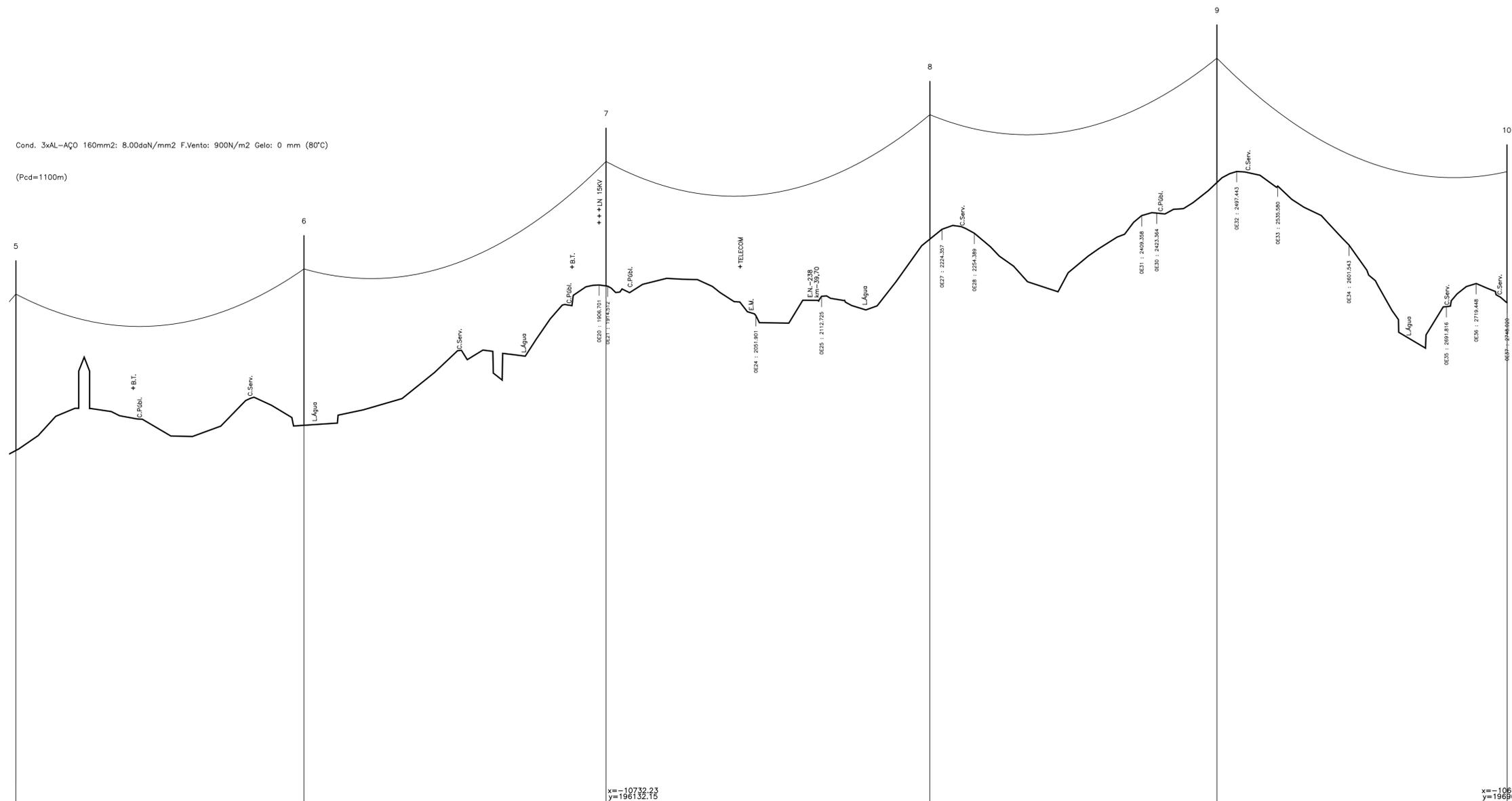
ÍNDICE	DESCRIÇÃO	DATA	ALTERADO	APROVADO	PROJ.	LEV. TOP.	DES.	VERIF.	DATA	RUBRICA
					PROJ.	16.04.19	Jessica			
					LEV. TOP.	16.04.19	EDP			
					DES.	16.04.19	Jessica			
					VERIF.	16.04.19	Jessica			

DPC	FORMATO	LINHA A 60KV			
	OUTPUT	LN60 1465 SERTÁ-PEDRÓGÃO			
1:2500 1:500	ESCALA	PERFIL LONGITUDINAL E PLANTA PARCELAR			
	Freguesia:	SUBSTITUI		CÓDIGOS DE OBRA	
		DM 019234/2014	14-3299	Nº DESENHO	
				0509L5146500-404 001	ÍNDICE

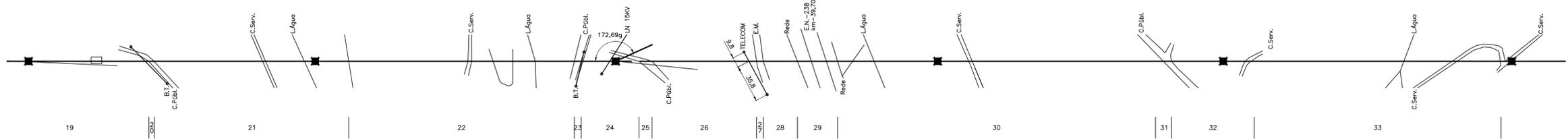


Anexo D - Planta projeto elaborado a partir do programa, parte B.

Cond. 3xAL-AÇO 160mm²: 8.00daN/mm² F.Vento: 900N/m² Gelo: 0 mm (80°C)
(Pcd=1100m)



PLANO DE REFERÊNCIA: 250,00 m	302.36	307.08	333.25	342.02	352.63	330.12
COTA DO TERRENO	302.36	307.08	333.25	342.02	352.63	330.12
NÚMERO DO APOIO	5	6	7	8	9	10
TIPO DO APOIO	F20CA/30	F20CA/30	F45CA/24	F20CA/24	F20CA/24	F45CA/24
ALTURA ÚTIL	29.35	29.35	23.35	23.35	23.35	24.55
ARMAÇÃO	F20CA	F20CA	F45CA	F20CA	F20CA	F45CA
FIXAÇÃO DOS CONDUTORES	SRh	SRh	SRh	SRh	SRh	ARh
DISTÂNCIA ENTRE APOIOS	267.00	279.90	300.10	266.00	268.80	
DISTÂNCIA À ORIGEM	1319.00	1586.00	1865.90	2166.00	2432.00	2700.80
CULTURAS	Pinhal	Pinhal	Oliveira	Pinhal	Mante	Pinhal e Eucaliptal



- ANTI-POISO ———— ∨
- CAIXA DE FIBRA ÓPTICA ———— □
- PLATAFORMA DE NINHO ———— T
- SALVA-PÁSSARO ———— X
- SECCIONADOR ———— ⚡
- SINALIZAÇÃO DIURNA NO APOIO ———— ⊖
- SINALIZAÇÃO DIURNA NO VÃO ———— ○
- SINALIZAÇÃO NOCTURNA NO APOIO ———— ⊕
- SINALIZAÇÃO NOCTURNA NO VÃO ———— ⊗

APOIOS

- ALINHAMENTO E ÂNGULO ———— T
- REFORÇO E FIM DE LINHA ———— T
- BETÃO ———— ●
- METÁLICO ELÁSTICO ———— ●
- METÁLICO RÍGIDO ———— ■

ÍNDICE	DESCRIÇÃO	DATA	ALTERADO	APROVADO	PROJ.	LEV. TOP.	DES.	VERIF.	DATA	RUBRICA
					PROJ. 16.04.19	LEV. TOP. 16.04.19	DES. 16.04.19	VERIF. 16.04.19		
					Jessica	EDP	Jessica			
EDP distribuição										
LINHA A 60KV										
LN60 1465 SERTÁ-PEDRÓGÃO										
PERFIL LONGITUDINAL E PLANTA PARCELAR										
Freguesia: _____ Concelho: _____										
SUBSTITUI		CÓDIGOS DE OBRA			Nº DESENHO			ÍNDICE		
		DM 019234/2014 14-3299			0509L5146500-404 002					