



**RÚBEN FILIPE
XAVIER CAMILO**

**PROJETO E MODELAÇÃO
DE LINHAS ELÉTRICAS DE
MÉDIA E ALTA TENSÃO
ATÉ 60kV**

Relatório de Dissertação realizada no âmbito do mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores – Ramo de Energias Renováveis e Sistemas de Potência

Orientadores

Professor Doutor, Paulo Jorge da Costa Santos, ESTSetúbal/IPS

Professor Doutor, Armando José Pinheiro Marques Pires, ESTSetúbal/IPS

Júri

Presidente: Doutor José Henrique Querido Maia, ESTSetúbal/IPS

Orientador: Doutor Paulo Jorge da Costa Santos – ESTSetúbal/IPS

Vogal: Doutora Dulce Helena Carvalho Coelho – ISEC/IPC

Fevereiro 2021

Agradecimentos

Por detrás das nossas realizações pessoais, além de um considerável esforço próprio, esconde-se normalmente um número grande de contribuições, apoios, sugestões, comentários ou críticas vindas de muitas pessoas. A sua importância assume no caso presente uma valia tão preciosa que, sem elas, com toda a certeza, teria sido muito difícil chegar a qualquer resultado digno de menção.

Quero agradecer à minha família e amigos que me apoiaram neste percurso académico. Quero agradecer aos meus professores orientadores, Paulo Santos e Armando Pires, pela sua disponibilidade para me guiarem ao longo do desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

O meu reconhecimento também é dirigido à entidade onde exerço a minha atividade de formação, a Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, pelas suas condições que oferece a quem lá estuda.

Resumo

A presente dissertação de mestrado tem como principal objetivo, o desenvolvimento de um projeto de uma linha aérea de alta tensão 60 kV, efetuando-se o estudo das metodologias, cálculos e dimensionamentos de acordo com as diretrizes da EDP-Distribuição, do regulamento de segurança de linhas elétricas de alta tensão (RSLEAT) e utilizando critérios de projetista.

Foi ainda desenvolvida uma aplicação implementada em ambiente de simulação *Matlab*, com o intuito de sistematizar o cálculo e projetos futuros. Esta aplicação permite também efetuar o estudo do comportamento das flechas das catenárias em função da variação da temperatura ambiente e do respetivo comprimento de vão. Estes modelos foram sustentados com base num projeto real, o qual consiste numa linha aérea de transporte de energia elétrica com um comprimento de 16.1 km, uma potência de transporte de 38 MVA e com uma tensão de transporte de 60 kV. Este projeto foi estabelecido tendo por base no regulamento de segurança de linhas elétricas de alta tensão, cumprindo todos os requisitos técnicos relativamente às localizações dos apoios, distâncias mínimas exigidas para as estruturas e para o meio envolvente.

Palavras-Chave: Projeto de uma linha aérea de alta tensão; Aplicação para cálculo elétrico e mecânico; Comportamento das flechas; Variação da temperatura; Comprimento do vão.

Abstract

The main objective of this master's thesis is the development of a high-voltage 60 kV overhead power line project, carrying out its study of methodologies, calculations and performing dimensioning according to EDP-Distribuição guidelines, high-voltage power line safety regulation (RSLEAT) and using designer criteria.

An application was also developed and implemented in *Matlab* simulation environment, with the purpose of systematizing the calculation and future projects. This application allows the study of the behaviour of overhead catenaries sags, according to the variation of the ambient temperature and the respective span length.

These models were supported based on a real project, which consists of an overhead power line with a length of 16.1 km, a transport power of 38 MVA and a transport voltage of 60 kV, this project was established based on the safety regulations for high voltage power lines, fulfilling all the technical requirements regarding the locations of the supports, minimum distances required for the structures and the surrounding environment.

Keywords: High-voltage overhead power line project; Application for electrical and mechanical calculation; Sags behaviour; Temperature variation; Span length.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XI
ABREVIATURAS	XII
ACRÓNIMOS E SÍMBOLOS	XIII
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO.....	6
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	6
CAPÍTULO 2	8
2. LINHAS AÉREAS DE MÉDIA E ALTA TENSÃO	8
2.1. NÍVEIS NORMALIZADOS DE TENSÃO EM PORTUGAL.....	9
2.2. NÍVEIS DE TENSÕES NOMINAIS EM PORTUGAL.....	9
2.3. CONDUTORES UTILIZADOS EM LINHAS AÉREAS DE MÉDIA E ALTA TENSÃO.....	10
2.3.1. Condutor ACSR – Aluminium Cable Steel Reinforced.....	11
2.3.2. Condutor ACCC – Aluminium Conductor Composite Core.....	12
2.3.3. Cabo de Guarda.....	13
2.4. APOIOS DE MÉDIA E ALTA TENSÃO.....	14
2.4.1. Classificação dos apoios.....	15
2.4.1.1. Apoios de Alinhamento.....	15
2.4.1.2. Apoio de Ângulo.....	16
2.4.1.3. Apoio de Derivação.....	16
2.4.1.4. Apoio de Fim de Linha.....	16
2.4.1.5. Apoio de Reforço.....	17
2.4.2. Tipos de Apoios.....	17
2.4.2.1. Apoios e Pórticos de Madeira.....	18
2.4.2.2. Apoios de Betão.....	19
2.4.2.3. Apoios em Torres Metálicas Treliçadas.....	21
2.4.2.4. Apoios Compósitos.....	22
2.4.3. Tipos de Esforços Mecânicos.....	24
2.5. TIPOS DE ARMAÇÕES.....	24
2.6. ISOLADORES E INSTRUMENTOS DE FIXAÇÃO.....	26
2.6.1. Isoladores e Cadeiras de Isoladores.....	26
2.6.2. Instrumentos de Fixação.....	28
2.7. SISTEMA DE LIGAÇÃO À TERRA.....	30
2.8. SINALIZAÇÃO AVIFAUNA.....	31
2.9. IMPACTO AMBIENTAL.....	32
2.10. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO.....	32
2.11. PIQUETAGEM.....	32
CAPÍTULO 3	33
3. CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE LINHAS AÉREAS	33
3.1. CONTEXTO REGULAMENTAR.....	33

3.2. ENQUADRAMENTO AO PROJETO	34
3.3. CÁLCULO ELÉTRICO.....	34
3.3.1. Tensão Económica de Transporte	35
3.3.2. Potência Ativa de Transmissão.....	35
3.3.3. Intensidade de Corrente de Serviço	36
3.3.4. Determinação da Secção Económica	36
3.3.5. Densidade de Corrente	37
3.3.6. Determinação da Resistência Elétrica do Condutor	38
3.3.7. Perdas de Energia Elétrica	39
3.3.8. Rendimento	39
3.3.9. Cálculo da Corrente Máxima.....	40
3.3.10. Cálculo da Indutância e Reatância	41
3.3.11. Determinação da Queda de Tensão e Tensão de Emissão	42
3.3.12. Capacidade	43
3.3.13. Taxa de Crescimento de Potência	43
3.3.14. Cálculo Elétrico – Apresentação de Resultados	44
3.4. CÁLCULO MECÂNICO	46
3.4.1. Estados Atmosféricos	47
3.4.2. Cálculo da Força devido à Ação do Vento.....	48
3.4.3. Força do Vento - Estado de Inverno	50
3.4.4. Força do Vento - Estado de Primavera.....	50
3.4.5. Força do Vento - Estado de Verão.....	50
3.4.6. Coeficiente de Sobrecarga.....	50
3.4.7. Coeficiente de Sobrecarga – Estado de Inverno	51
3.4.8. Coeficiente de Sobrecarga – Estado de Primavera.....	51
3.4.9. Coeficiente de Sobrecarga – Estado de Verão.....	52
3.4.10. Equação de Estados	52
3.4.11. Vão Crítico.....	54
3.4.12. Tensão Máxima de Serviço.....	55
3.4.13. Tensão de Montagem	56
3.4.14. Flecha Máxima	56
3.4.15. Cálculo Mecânico – Apresentação de Resultados	57
3.5. DISTÂNCIAS DE SEGURANÇA	59
3.5.1. Distância ao Solo	60
3.5.2. Distância dos Condutores às Árvores.....	60
3.5.3. Distância dos Condutores aos Edifícios	60
3.5.4. Distância dos Condutores a Obstáculos Diversos.....	61
3.5.5. Distância entre Condutores.....	61
3.5.6. Distância entre os Condutores e os Cabos de Guarda	62
3.5.7. Distância entre os Condutores e os Apoios.....	62
3.5.8. Distâncias Mínimas Regulamentares – Apresentação de Resultados	63
3.5.9. Cadeia de Isoladores	63
3.5.10. Estabilidade dos Apoios.....	65
3.6. CÁLCULO DE ENGENHARIA CIVIL	70
CAPÍTULO 4	74
4. MODELAÇÃO E SIMULAÇÃO	74
4.1. APLICAÇÃO EM MATLAB	75
4.2. MODELO MATLAB – CÁLCULO ELÉTRICO	76
4.3. MODELO MATLAB – CÁLCULO MECÂNICO.....	79
4.3.1. Modelo Matlab – Cálculo Mecânico (Cabo Condutor)	80
4.3.2. Modelo Matlab – Cálculo Mecânico (Cabo de Guarda)	81

4.3.3. Modelo Matlab – Comportamento da Flecha em Função do Vão	82
4.3.3.1. Modelo Matlab – Comportamento da Flecha em Função do Vão em Patamar.....	84
4.3.3.2. Modelo Matlab – Comportamento da Flecha em Função do Vão em Desnível	85
CAPÍTULO 5	87
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....	87
CAPÍTULO 6	89
6. PERSPETIVAS DE TRABALHO FUTURO.....	89
7. ANEXOS	90
ANEXO A. DESIGN DA LINHA AÉREA (TRAÇADO E PERFIL).....	91
ANEXO B. APOIO DE BETÃO AM04 – (APOIO DE ALINHAMENTO EM SUSPENSÃO).....	110
ANEXO C. APOIO DE BETÃO AM08 – (APOIO DE REFORÇO)	111
ANEXO D. APOIO DE BETÃO K06 – (APOIO DE REFORÇO)	112
ANEXO E. FICHA TÉCNICA – CABO CONDUTOR (ACSR - CROW).....	113
ANEXO F. FICHA TÉCNICA – CABO DE GUARDA (ACSR - GUINEA)	114
ANEXO G. PRF (TRAVESSA DE PÓRTICO DE REFORÇO OU FIM DE LINHA)	115
ANEXO H. EVDAL (ARMAÇÃO EM ESTEIRA VERTICAL DUPLA PARA APOIO DE ALINHAMENTO)	116
ANEXO I. EVDAN (ARMAÇÃO EM ESTEIRA VERTICAL DUPLA PARA APOIO DE ÂNGULO).....	117
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118

Lista de Figuras

Figura 1 - Rede de distribuição de Alta Tensão em Portugal 1	2
Figura 2 - Esquema de conversão ca/cc e cc/ca 2	2
Figura 3 - Linha aérea 5	4
Figura 4 - Condutores 9	10
Figura 5 - Condutor ACSR 10	11
Figura 6 - Cabo ACCC 11	12
Figura 7 - Componentes de uma linha aérea 6	13
Figura 8 - Cabo OPGW 13	14
Figura 9 - Apoio em Alinhamento 14	15
Figura 10 - Apoio de Ângulo 14	16
Figura 11 - Apoio de Derivação 14	16
Figura 12 - Apoio Fim de Linha 14	16
Figura 13 - Apoio de Reforço 14	17
Figura 14 - Portal de madeira numa linha de 38kV utilizado na Irlanda 15	18
Figura 15 - Apoio de betão em amarração 17	20
Figura 16 - Torre metálica treliçada em ângulo 18	21
Figura 17 - Apoio em material compósito 20	23
Figura 18 – Armação EVDAL 21	24
Figura 19 - Armação EVDAN 21	25
Figura 20 - Armação GAL 21	25
Figura 21 - Armação GAN 21	26
Figura 22 - Cadeia de Isoladores em Suspensão 23	27
Figura 23 - Cadeia de Isoladores em Amarração 23	27
Figura 24 - Isolador em cerâmica 24	28
Figura 25 - Isolador polimérico 24	28
Figura 26 - Isolador em Vidro 25	28
Figura 27 - Pinça de Amarração 26	28
Figura 28 - Pinça de Suspensão 26	28
Figura 29 - Fiadores em cadeias de amarração 5	29
Figura 30 - Ligação aos eléctrodos de terra, apoio betão 27	30
Figura 31 - Ligação aos eléctrodos de terra, apoio metálico 27	30
Figura 32 - Espiral de Sinalização Simples 28	31
Figura 33 - Espiral de Sinalização Dupla 28	31
Figura 34 - Dispositivo Anti-Nidificação 26	31
Figura 35 – Estação Total Levantamento Topográfico 29	32
Figura 36 - Forças exercidas sobre o cabo	48
Figura 37 - Árvore de Decisão	53
Figura 38 - Perfil e Percurso da linha para vão 7 e 8	57
Figura 39 - Posição do apoio, perpendicular em relação aos condutores	69
Figura 40 - Posição do apoio, transversal em relação aos condutores	69
Figura 41 - Matlab App Designer 32	74
Figura 42 - Aplicação Desenvolvida em Matlab	75
Figura 43 - Aplicação Matlab (Cálculo Elétrico)	76
Figura 44 - Aplicação Matlab exemplo de cálculo elétrico	78
Figura 45- Aplicação Matlab (Cálculo Mecânico Cabo Condutor)	81
Figura 46 - Aplicação matlab (Cálculo Mecânico Cabo de Guarda)	82
Figura 47 - Modelo do comportamento da flecha em função do vão)	84
Figura 48 - Aplicação matlab (Comportamento da flecha em função do vão em patamar) ..	85
Figura 49 - Aplicação matlab (Comportamento da flecha em função do vão em desnível) ..	86

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Níveis de Tensões Normalizadas em Portugal 7	9
Tabela 2 - Caraterização dos Níveis de Tensão 8.....	9
Tabela 3 - Dimensões principais dos apoios normalizados 16.....	19
Tabela 4 - Densidade de Corrente Económica	37
Tabela 5 - Resistividade e Coeficiente de Variação da Resistência com a Temperatura	38
Tabela 6 - Constante Material Condutor (k1).....	40
Tabela 7 - Coeficiente de Temperatura (k2)	40
Tabela 8 - Caraterísticas Técnicas do cabo condutor	44
Tabela 9 - Caraterísticas Técnicas do Cabo de Guarda.....	44
Tabela 10 – Resultados do Cálculo Elétrico	45
Tabela 11 - Variação da Temperatura em função dos Estados Atmosféricos	47
Tabela 12 - Coeficiente de forma (c).....	49
Tabela 13 - Pressão dinâmica do vento (q)	49
Tabela 14 - Resultados Cálculo Mecânico Cabo Condutor	58
Tabela 15 - Resultados Cálculo Mecânico Cabo de Guarda.....	59
Tabela 16 - Apresentação dos Resultados das Distâncias de Segurança	63
Tabela 17 -Exemplo de Caraterísticas de uma Cadeia de Isoladores 3FL2 - Siemens	64
Tabela 18 - Identificação dos sinalizadores	79

Abreviaturas

- IPS – Instituto Politécnico de Setúbal
- ESTSetúbal – Escola Superior de Tecnologia de Setúbal
- EDP - Energias de Portugal
- RSLEAT - Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão
- ACCC - *Aluminum Conductor Composite Core*
- ACSR - *Aluminum Conductor Steel Reinforced*
- BT – Baixa Tensão
- MT – Média Tensão
- AT – Alta Tensão
- MAT – Muito Alta Tensão
- NP – Normas Portuguesas
- EN – Normas Europeias
- IEC – *International Electrotechnical Commission*
- CC – Corrente Continua
- CA – Corrente Alternada
- EVDAL – Esteira Vertical Dupla de Alinhamento
- EVDAN – Esteira Vertical Dupla de Ângulo
- GAL – Galhardete em função de Alinhamento
- GAN – Galhardete em função de Ângulo
- TAL – Triângulo em função de Alinhamento
- TAN – Triângulo em função de Ângulo

Acrónimos e Símbolos

- U_c – Tensão composta V
- L – Comprimento do vão m
- P_n – Potência a transmitir W
- S – Potência aparente VA
- F.P – Fator de potência
- I_s – Intensidade de corrente de serviço A
- δ – Densidade de corrente A/mm²
- R – Resistência elétrica do condutor Ω
- $R_{20^\circ\text{C}}$ – Resistência elétrica do condutor a 20°C Ω
- Θ_{local} – Temperatura local °C
- α – Coeficiente de variação da resistência com a temperatura °C⁻¹
- n – Número de condutores
- P_{perdas} – Perdas por efeito de joule W
- η – Rendimento %
- $I_{\text{máx}}$ – Valor máximo da corrente de curto-circuito A
- t – Duração do curto-circuito s
- S – Secção dos condutores mm²
- K_1 – Constante do material condutor mm²/kA
- K_2 – Coeficiente de temperatura mm²/kA.s^{1/2}
- L – Indutância H
- D – Distância entre condutores m
- R – Raio do condutor m
- μ_0 – Permeabilidade do meio H/m
- X_L – Reatância indutiva Ω
- F – Frequência da rede Hz
- C – Capacidade F
- U – Tensão nominal V
- I – Corrente nominal A
- $\overline{p_c}$ – Peso do próprio condutor N
- $\overline{p_g}$ – Peso de uma possível manga de gelo N
- $\overrightarrow{F_x}$ – Força do vento N
- $\overrightarrow{F_r}$ – Força resultante N
- d – Diâmetro do cabo m

- e – Espessura de uma possível manga de gelo m
- \vec{F} – Força proveniente da ação do vento N
- α – Coeficiente de redução
- c – Coeficiente de forma
- q – Pressão dinâmica do vento Pa
- s – Área da superfície batida pelo vento m^2
- d_{cond} – Diâmetro do condutor mm
- d_{gelo} – Diâmetro da manga de gelo mm
- m – Coeficiente de sobrecarga
- W_c – Peso específico do condutor por unidade de comprimento kg/km
- W_g – Peso específico de uma manga de gelo por unidade de comprimento kg/km
- m_1 – Coeficiente de sobrecarga no estado de Inverno
- m_2 – Coeficiente de sobrecarga no estado de Primavera
- θ_i e θ_k – Temperatura no estado i e k $^{\circ}C$
- t_i e t_k – Tensão mecânica no estado i e k daN/mm²
- m_i e m_k – Coeficientes de sobrecarga nos estados i e k
- α – Coeficiente de dilatação térmica do cabo $^{\circ}C^{-1}$
- E – Módulo de elasticidade daN/mm²
- σ – Secção mínima do condutor mm²
- $\overrightarrow{T_m}$ – tensão máxima de tração daN
- $\overrightarrow{T_{ruptura}}$ – Tensão de rutura do condutor daN
- α – Coeficiente de dilatação térmica do cabo (liga de alumínio) $^{\circ}C^{-1}$
- L_{cr} – Vão crítico m
- D – Distância mínima entre condutores e o solo m
- F – Flecha m
- K – Coeficiente que depende da natureza dos condutores
- λ – Comprimento da cadeia de isoladores m
- S_1 e S_2 – Vãos adjacentes ao apoio m
- P – Peso do próprio condutor daN
- P_v – Força exercida pelo o vento no condutor daN
- Q – Peso da própria cadeia de isoladores e seus acessórios daN
- Q_v – Força exercida pelo o vento na cadeia de isoladores e seus acessórios daN
- $\overrightarrow{T_{cdx}}$ – Tração do cabo condutor sobre a linha daN
- $\overrightarrow{T_{cgx}}$ – Tração do cabo de guarda sobre a linha daN

- $\overrightarrow{F_{vcd}}$ – Força do vento daN
- $\overrightarrow{F_{visol}}$ – Força do vento sobre a cadeia de isoladores daN
- $\overrightarrow{F_{vcd}}$ – Força do vento sobre o condutor daN
- Pisol – Peso da cadeia de isoladores daN
- P_g – Peso do cabo de guarda daN
- $\overrightarrow{F_{vcdsp}}$ – Força do vento sobre um condutor à saída do pórtico daN
- $\overrightarrow{T_{cdysp}}$ – Tração de um condutor à saída de um pórtico daN
- $\overrightarrow{F_{vcg}}$ – Força do vento sobre um cabo de guarda na linha daN
- $\overrightarrow{F_{vcgsp}}$ – Força do vento sobre um cabo de guarda à saída do pórtico daN
- $\overrightarrow{T_{cgsp}}$ – Tração do cabo de guarda à saída do pórtico daN
- M_d – momento derrubante daN.m
- \vec{F} – Resultante das forças daN
- h – Altura do apoio m
- h_0 – Profundidade do apoio m
- C_0 – Coeficiente de compressibilidade do terreno à profundidade de h_0 daN.m
- C_{2m} – Coeficiente de compressibilidade à profundidade de 2m daN.m
- M_{e1} – Momento estabilizante daN.m
- b – dimensão do maciço no eixo y m
- a – dimensão do maciço no eixo x m
- $tg\alpha$ – Ângulo máximo de rotação da fundação
- $\overrightarrow{P_a}$ – Peso do apoio daN
- $\overrightarrow{P_m}$ – Peso do maciço daN

Capítulo 1

1. Introdução

1.1. Introdução Geral

O paradigma das linhas de distribuição e transmissão não se alterou. Continuam a ser o modo de transporte da energia elétrica, desde as unidades de produção até ao consumidor final, podendo este ser um consumidor menos exigente (doméstico e pequenas empresas), ou um consumidor com uma maior necessidade e dependência energética (médias e grandes empresas). O nível de tensão mais adequado irá depender do tipo de instalação, tipologia e potência de carga.

Em Portugal, existem quatro principais classes de redes de energia elétrica:

- Baixa tensão (BT), com tensões inferiores a 1 kV;
- Média Tensão (MT), com tensões compreendidas entre 1 kV e 45 kV;
- Alta Tensão (AT), com tensões entre 45 kV e 100 kV;
- Muito Alta Tensão (MAT), com tensões superiores a 100 kV.

Dentro de cada classe, estão presentes vários níveis de tensão pré-estabelecidos, sendo estes definidos por:

- Linhas de BT de 0,4 kV;
- Linhas de MT de 6 kV, 10 kV, 15 kV e 30 kV;
- Linhas AT de 60 kV e 100 kV;
- Linhas MAT de 150 kV, 220 kV e 400 kV.

A rede nacional de distribuição de alta tensão (AT), é operada através de uma concessão exclusiva atribuída pelo Estado português. Esta concessão exclusiva do direito de operar a rede nacional de distribuição está atualmente atribuída à subsidiária do grupo EDP, EDP Distribuição [1].

- Anulação da interferência eletromagnética causada por outras linhas aéreas;
- Menores perdas dielétricas;
- Condutores com menores secções, devido à eliminação do efeito pelicular, conseqüentemente, apoios menos robustos e custo mais reduzido 2.

A transmissão em CA é amplamente utilizada e apresenta inúmeras vantagens na sua utilização, com destaque para as que estão relacionadas diretamente com a produção, transporte e distribuição. Todos os sistemas de energia elétrica (SEE), assentam neste tipo de transmissão, devido à facilidade que existe de conversão dos níveis de tensão para adequar às necessidades da rede e à necessidade dos equipamentos serem alimentados em corrente alternada. Uma das suas debilidades é o transporte a longa distância [3].

Por outro lado, tratando-se de circuitos de corrente alternada polifásica, consegue-se resultados com uma aproximação suficiente se for considerada a simetria entre fases, pelo que isso implica que no cálculo de uma fase apenas se considere as constantes de um condutor.

A utilização de linhas aéreas é sempre preferencial em relação à utilização de cabos subterrâneos, devido aos custos de instalação, custos de reparação e deteção de avarias, além de que os tempos de não operacionalidade, são inferiores. Sobretudo nos cabos de AT e MAT, que limitam o comprimento da ligação, fruto da diminuição do comprimento de onda face aos parâmetros equivalentes que limitam a transmissão [4].

A linha aérea é formada por condutores nus ou em torçada, dependente do nível de tensão, os quais são montados em apoios por intermédio de peças isoladas, que se designam por isoladores e sustentados em armações/travessas.

Existem diversas constantes características quando se aborda uma linha aérea, as quais, podem ser divididas em constantes físicas e constantes elétricas, proporcionais ao comprimento da linha.



Figura 3 - Linha aérea [5]

Para elaborar um projeto de uma linha aérea de média ou alta tensão, é necessário considerar a legislação e regulamentos em vigor. Em Portugal, as linhas aéreas devem ser projetadas e construídas de acordo com o regulamento de segurança das linhas elétricas de alta tensão. As características dos materiais devem estar de acordo com as normas NP,EN, e IEC, seguindo as especificações e procedimentos do concessionário da rede [6].

O projeto deve sempre respeitar e garantir as premissas do cálculo elétrico, mecânico e civil, minimizando os impactos ambientais e procurando a otimização, com intuito de não comprometer a sua viabilidade económica.

A primeira fase de um projeto de uma linha aérea de média ou alta tensão consiste em definir o melhor traçado possível para a mesma. Por norma, são realizados um ou vários traçados preliminares sendo o traçado escolhido posteriormente desenhado em detalhe.

Para efetuar os traçados preliminares é necessário uma carta topográfica, que irá incluir as elevações do terreno e possíveis obstáculos naturais, como cursos de água e vegetação. É também necessário um mapa com a rede elétrica para detetar possíveis conflitos e cruzamentos entre linhas, e por vezes um mapa da rede de telecomunicações.

As travessias e cruzamentos em Portugal devem obedecer ao artigo 85º do RSLEAT, sendo que existem outros fatores que poderão afetar e condicionar o traçado da linha, como por exemplo, os seguintes:

- Altimetria do plano;
- Zonas protegidas;
- Vegetação;

- Cursos de água;
- Urbanizações.

O traçado deverá ser o mais retilíneo possível, sem desvios acentuados na linha, para evitar esforços desnecessários nos apoios, diminuindo assim a necessidade de possuir apoios mais robustos para fazer face aos esforços exercidos pelos condutores, travessas, cadeias de isoladores e todos os acessórios associados, garantido deste modo uma instalação tecnicamente e economicamente viável.

Após ser definido o melhor corredor possível para a linha aérea, ou seja, um corredor que não comprometa os aspetos ambientais e de segurança, é necessário negociar, com os proprietários dos terrenos privados, a colocação dos apoios nos terrenos e possivelmente o corte de árvores e vegetação, o que poderá dar origem a compensações monetárias. Por vezes não é possível negociar com todos os proprietários e é necessário deslocar apoios, o que poderá originar alterações no traçado previsto inicialmente.

Após existir um acordo para o percurso da linha, dá-se início à fase de projeto. Para desenvolver um projeto que satisfaça os aspetos ambientais e de segurança, conseguindo ao mesmo tempo garantir uma boa viabilidade económica, existem inúmeros fatores que devem ser considerados, de modo a que seja realizada uma boa gestão a nível de custo/qualidade e segurança da instalação. Para isso é necessário ter em atenção diversos fatores, tais como:

- Baixa resistividade: as perdas de energia elétrica por efeito de Joule/térmico e as quedas de tensão ao longo da linha devem ser as menores possíveis, garantindo assim uma boa eficiência da transmissão de energia elétrica;
- Elevada resistência mecânica: os condutores das linhas aéreas têm de estar preparados para suportar os esforços mecânicos;
- Elevada resistência à corrosão atmosférica: o custo inicial de uma linha aérea é elevado, por isso deve-se garantir uma vida longa para os apoios, condutores, cadeias de isoladores e respetivos acessórios;
- Fatores ambientais e inserção paisagística da linha, tanto quanto possível.

1.2. Objetivos da Dissertação

Os principais objetivos a serem alcançados com o desenvolvimento desta dissertação são os seguintes:

- Aprofundamento e consolidação de todos os conhecimentos inerentes à execução de um projeto de uma linha aérea de MT e AT;
- Análise de documentação técnica e regulamentar relacionada com o projeto de linhas aéreas;
- Estudo do cálculo elétrico e mecânico necessário para a execução de um projeto de linhas aéreas;
- Desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo, utilizando o *Matlab App Designer*, que auxilie e sistematize o cálculo elétrico em linhas elétricas aéreas até 60 kV;
- Desenvolvimento de um modelo de simulação em Matlab, que relacione o comportamento das flechas em função da variação da temperatura e do comprimento do vão.

1.3. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é constituída por oito capítulos principais, apresentando-se no início, um resumo do tema. O conteúdo dos capítulos é o seguinte:

- Capítulo 1 – “Introdução”, onde é analisada a importância do estudo de projetos de linhas aéreas, bem como os objetivos da presente dissertação, para além da sua estrutura;
- Capítulo 2 – “Linhas Elétricas Aéreas de Média e Alta Tensão”, onde são apresentados os conceitos gerais sobre linhas aéreas e as diferentes fases de um projeto desta envergadura, além dos elementos constituintes de uma linha aérea. É neste capítulo que se encontra todo o desenvolvimento teórico, que servirá de base ao cálculo manual e posteriormente, cálculo automático e a respetiva simulação e modelação;
- Capítulo 3 – “Cálculos dos Parâmetros das Linhas Aéreas”, onde se salienta a importância dos cálculos e dos dimensionamentos elétricos, mecânicos e civis, de modo a garantir um projeto tecnicamente e economicamente viável. Neste capítulo também é demonstrado o

resultado da aplicação das fórmulas do cálculo elétrico e mecânico e as considerações assumidas durante a execução do projeto;

- Capítulo 4 – “Modelação e Simulação”, onde é apresentada a aplicação em *Matlab*, que permite efetuar o cálculo elétrico e mecânico automático, consoante os parâmetros introduzidos pelo utilizador, e também os respetivos modelos matemáticos, que visam demonstrar o comportamento das flechas em função das condições mecânicas, atmosféricas e respetivo comprimento do vão;
- Capítulo 5 – “Considerações Finais e Conclusões”, onde são apresentadas as considerações finais e principais conclusões da presente dissertação;
- Capítulo 6 – “Perspetivas de Trabalho Futuro”, onde são apresentados os possíveis melhoramentos a serem realizados na presente dissertação e possíveis trabalhos futuros.

Os capítulos 7 e 8 dizem respeito aos anexos e às referências bibliográficas.

Capítulo 2

2. Linhas Aéreas de Média e Alta Tensão

Uma linha elétrica é por definição do regulamento de segurança de linhas elétricas de alta tensão, artigo 4º, o conjunto de condutores, isolantes, acessórios e suportes destinados ao transporte e distribuição de energia elétrica entre dois pontos distintos.

As linhas aéreas de média e alta tensão são constituídas pelos seguintes elementos principais:

- Condutores – elementos responsáveis pelo transporte e distribuição de energia elétrica;
- Cabos de guarda – possuem a finalidade de proteger os condutores de uma possível descarga atmosférica;
- Apoios – têm o objetivo de suportar os condutores, os cabos de guarda, isoladores e acessórios, podendo estes ser de diversos tipos de materiais, tais como, betão, metálicos, compósitos ou madeira;
- Armações/Travessas – elemento onde os condutores são fixados, através das cadeias de isoladores e respetivos instrumentos de fixação;
- Sistema de ligação à terra, composto pelos eléctrodos de terra, cabos de cobre e respetivos ligadores.
- Acessórios de fixação – pinças de suspensão e amarração;
- Conjuntos sinaléticos;
- Balizagem;
- Dispositivos de proteção à avifauna.

2.1. Níveis Normalizados de Tensão em Portugal

A classificação dos níveis de tensão está regulamentada pela CE. Em Portugal, os valores de tensões normalizados, são fixados de acordo com a norma IEC 60038, que correspondem aos valores máximos de tensão suportados pelos equipamentos. Na tabela 1 são apresentados os níveis de tensões normalizadas em Portugal.

Tabela 1 - Níveis de Tensões Normalizadas em Portugal [7]

Nível de Tensão	Tensão Mais Elevada kV ef	Tensões Suportáveis Mínimas	
		50Hz, 1m kV ef	Ao choque atmosférico kV pico
BT	≤ 1 (CA) $\leq 1,5$ (CC)	≤ 2	≤ 12
MT	3,6	10	40
	7,2	20	60
	12	28	75
	17,5	38	95
	24	50	125
	36	70	170
	52	95	250
AT	72,5	140	325
	123	280	550
MAT	170	325	750
	245	395	950
	300	460	1050
	420	630	1425
	550	740	1675

2.2. Níveis de Tensões Nominais em Portugal

A caracterização dos níveis de tensões nominais em Portugal é possível ser visualizada na tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização dos Níveis de Tensão [8]

Caraterização	Nível de Tensão Nominal	Potência Nominal
Baixa Tensão Normal (BTN)	≤ 1 kV	$P \leq 41,4$ kVA
Baixa Tensão Especial (BTE)		$P > 41,4$ kVA
Média Tensão (MT)	$1\text{kV} < \text{MT} \leq 45$ kV	$P \leq 10$ MVA
Alta Tensão (AT)	45 kV < AT ≤ 100 kV	$P > 10$ MVA
Muito Alta Tensão (MAT)	100 kV < MAT ≤ 400 kV	

2.3. Condutores utilizados em Linhas Aéreas de Média e Alta Tensão

Os condutores a empregar nas linhas aéreas, segundo o RSLEAT, poderão ser nus multifilares ou cabos isolados, sendo que estes podem ser de cobre, alumínio, e de suas ligas, ou materiais que possuam características elétricas e mecânicas adequadas e resistência às ações da intempérie.

Os condutores de uma linha aérea devem ser escolhidos em conformidade com a corrente de transporte e tensões mecânicas a que estarão sujeitos. Devido às vantagens económicas e técnicas do alumínio e suas ligas, esta é, atualmente, a solução preferencial, face a materiais como o cobre.

Em ambientes desfavoráveis, os condutores podem ser protegidos contra a corrosão, através da aplicação de uma massa neutra protetora.

Na figura 4, é possível identificar alguns destes tipos de condutores mencionados.



Figura 4 - Condutores [9]

2.3.1. Condutor ACSR – *Aluminium Cable Steel Reinforced*

Os cabos de alumínio, com alma de aço, são condutores cableados concêntricos, compostos de uma ou várias camadas de fios de alumínio, e um núcleo (alma) de aço galvanizado de alta resistência, normalmente conhecidos por ACSR (*Aluminium Cable Steel Reinforced*).

Estes condutores apresentam resistência e perdas similares aos condutores típicos de cobre, ainda que a sua utilização se deva devido ao facto de apresentarem as seguintes vantagens e características:

- Possuem um maior diâmetro, o que permite a redução do *efeito de coroa*;
- Possuem uma maior resistência mecânica, devido à utilização da alma do condutor em aço, o que permite aumentar o comprimento dos vãos, logo reduzindo significativamente o número de apoios necessários;
- São mais leves comparativamente aos condutores de cobre, devido à utilização do alumínio, o que permite reduzir as flechas, e consequentemente, reduzir a altura dos apoios, sem comprometer as distâncias mínimas regulamentares das linhas aéreas em relação ao solo.

Na figura 5, é possível identificar a composição de um condutor ACSR.

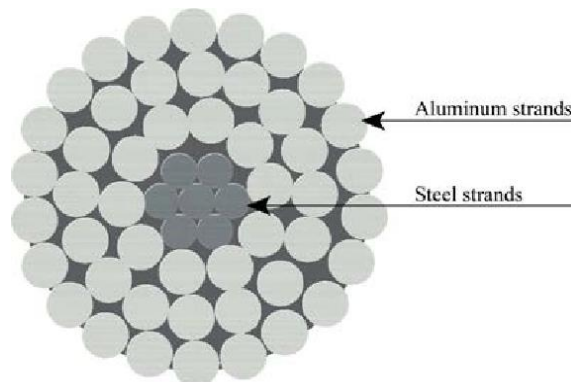


Figura 5 - Condutor ACSR [10]

2.3.2. Condutor ACCC – Aluminium Conductor Composite Core

O cabo de tecnologia ACCC é composto por um núcleo (alma) à base de fibras de carbono e fibras de vidro, o que proporciona o funcionamento numa larga gama de temperaturas, promovendo assim o tempo de vida útil do condutor. O seu revestimento é em alumínio e em forma trapezoidal, permitindo assim uma maior circulação da corrente elétrica, diminuindo a resistência elétrica e as perdas por efeito térmico [11].

Os cabos de alta temperatura suportam temperaturas mais elevadas do que os cabos convencionais, devido ao seu carácter construtivo. Permitem assim, para a mesma secção de cabo, transportar mais corrente elétrica.

A temperatura de operação, nos condutores, influencia a flecha e, conseqüentemente, com o aumento da temperatura, em certos casos, poderão ser comprometidas as distâncias mínimas regulamentares, além de que os cabos tendencialmente têm maior probabilidade de ceder ou partir.

Os cabos de alta temperatura, suportam temperaturas de funcionamento na ordem dos 180 °C em regime permanente, enquanto que os cabos convencionais suportam entre os 50 °C e os 90 °C [11].

Economicamente, o cabo ACCC é mais dispendioso face às soluções atuais no mercado (ACSR), no entanto, este cabo apresenta inúmeras vantagens em relação ao tradicional, tais como:

- Peso inferior;
- Maiores vãos e, conseqüentemente, menor número de apoios;
- Menores flechas;
- Maior resistência mecânica.

Na figura 6, é possível verificar a composição de um cabo do tipo ACCC.



Figura 6 - Cabo ACCC [11]

2.3.3. Cabo de Guarda

Os circuitos elétricos estão suscetíveis a serem danificados por descargas atmosféricas. Para que isso não aconteça é necessário dotá-los de dispositivos e equipamentos que assegurem a sua proteção e possam garantir a continuidade de serviço.

A principal função dos cabos de guarda, numa linha aérea de alta tensão é proteger os cabos condutores de uma possível descarga atmosférica. Esta pode induzir contornamentos e conseqüentemente defeitos fase-fase, havendo a possibilidade da ocorrência de uma interrupção no fornecimento de energia elétrica.

O cabo de guarda, cabo nu, é colocado, por norma, por cima dos condutores da linha aérea e ligado à terra nos apoios. O cabo de guarda utilizado para as linhas de média e alta tensão é habitualmente o ACSR.

Na figura 7, é possível visualizar os componentes de uma linha aérea, incluindo o cabo de guarda.

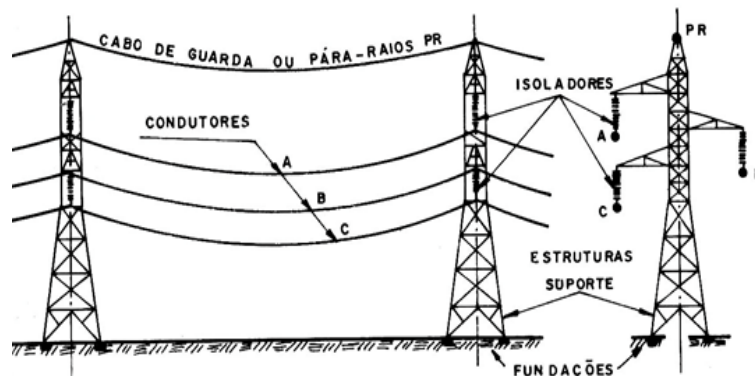


Figura 7 - Componentes de uma linha aérea [6]

Em linhas de transmissão é necessário, por vezes, estabelecer uma linha de telecomunicações. Para isso ser possível é comum utilizar-se o OPGW (*Optical Power Ground Wire*). Trata de um cabo constituído por um núcleo dielétrico com fibras óticas inseridas, um tubo para protegê-las mecanicamente e uma armação formada por fios condutores [12].

Com a inexistência destes cabos, a corrente elétrica seria obrigada a escoar pelos apoios adjacentes ao vão atingido, existindo apenas dois caminhos para circular essa corrente. Isto provocaria um grave contornamento aos isoladores,

o que daria origem a sobretensões elevadas nos condutores e danificações nos materiais e acessórios da linha [13].

Na figura 8, é possível identificar um cabo do tipo OPGW.



Figura 8 - Cabo OPGW [13]

2.4. Apoios de Média e Alta Tensão

O apoio é o elemento de uma linha aérea destinado a suportar os condutores, os cabos de guarda, os isoladores, as armações e todos os acessórios associados.

O apoio para uma linha aérea é constituído essencialmente pelo poste e respetiva fundação, cuja construção depende do tipo de terreno onde este é inserido, e pelos elementos que suportam os condutores, ou seja, as armações (travessas), os isoladores ou cadeias de isoladores e os respetivos instrumentos de fixação.

Nas linhas aéreas de média e alta tensão até 60kV, em Portugal, podem ser utilizados dois tipos de apoios:

- Betão armado;
- Metálicos.

Preferencialmente os apoios são de betão armado, devido ao custo ser inferior aos metálicos e requererem menores dimensões e, conseqüentemente, uma menor área de implantação.

A escolha dos apoios deve-se reger principalmente pelas seguintes condições:

- Altura do apoio;
- Esforços mecânicos;

- Resistência à corrosão;
- Custo;
- Local de implementação do apoio.

2.4.1. Classificação dos apoios

Os apoios, classificados conforme o que se encontra no artigo 4.º do RSLEAT, podem ser do seguinte tipo:

- Apoio em alinhamento;
- Apoio de ângulo;
- Apoio de derivação em alinhamento;
- Apoio de derivação em ângulo;
- Apoio em fim de linha;
- Apoio de reforço em alinhamento;
- Apoio de reforço em ângulo;
- Apoio de reforço em derivação em alinhamento;
- Apoio de reforço em derivação em ângulo.

2.4.1.1. Apoios de Alinhamento

Apoio situado num troço retilíneo da linha.

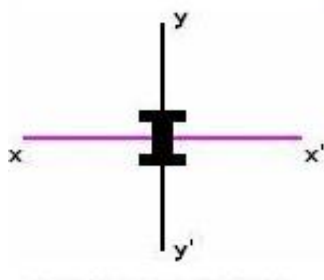


Figura 9 - Apoio em Alinhamento [14]

2.4.1.2. Apoio de Ângulo

Apoio situado num ângulo da linha.

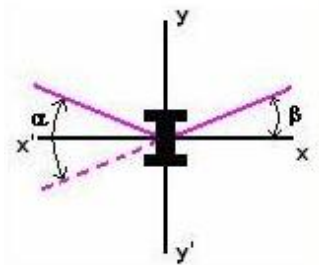


Figura 10 - Apoio de Ângulo [14]

2.4.1.3. Apoio de Derivação

Apoio onde se estabelece uma ou mais derivações.

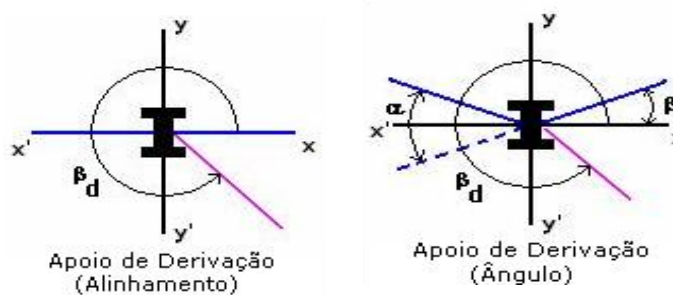


Figura 11 - Apoio de Derivação [14]

2.4.1.4. Apoio de Fim de Linha

Apoio que é capaz de suportar a totalidade dos esforços que os condutores e os cabos de guarda lhe transmitem de um só lado da linha.

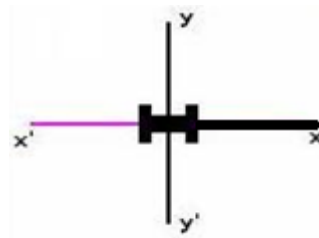


Figura 12 - Apoio Fim de Linha [14]

2.4.1.5. Apoio de Reforço

Apoio destinado a suportar esforços longitudinais para reduzir as consequências resultantes da rotura de condutores ou de cabos de guarda.

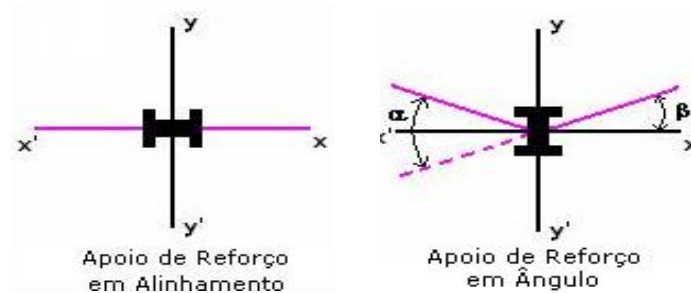


Figura 13 - Apoio de Reforço [14]

2.4.2. Tipos de Apoios

Os apoios são uma das infraestruturas mais importantes num projeto de linha aérea de média ou alta tensão. São eles que irão suportar os condutores, os cabos de guarda, os isoladores e todos os acessórios associados.

As estruturas que servem de apoio às linhas de transporte e distribuição de energia elétrica podem ter diferentes formas, dimensões e serem constituídas por diversos tipos de materiais. A escolha do tipo de material do apoio deverá ter em conta várias considerações, tais como:

- Tempo de vida útil;
- Resistência à corrosão;
- Custo inicial e a longo prazo (manutenção do próprio apoio);
- Resistência mecânica aos esforços mecânicos que irá sofrer.

Os apoios utilizados nas linhas aéreas, em Portugal, geralmente são de betão e de estrutura metálica. Noutros países, nomeadamente no norte da Europa, os apoios são de madeira e de estrutura metálica.

Existe uma tecnologia inovadora, que apesar de ser mais dispendiosa, tem um tempo de vida útil bastante superior aos restantes tipos de apoios mencionados. Estes apoios são fabricados à base de fibra de vidro e são conhecidos como postes em compósito.

Os apoios devem ser dimensionados de acordo com os esforços que têm que suportar. Por isso, o cálculo mecânico é de extrema importância, para garantir a estabilidade dos apoios e a segurança da instalação.

2.4.2.1. Apoios e Pórticos de Madeira

Em Portugal, os apoios de madeira apenas são utilizados, atualmente, para telecomunicações. No entanto, existem outros países, nomeadamente a República da Irlanda, o Reino Unido, Suécia, entre outros, onde os apoios e pórticos são de madeira, e constituem grande parte da sua rede elétrica de média e alta tensão. Na figura 14, é possível identificar um portal de madeira utilizado na rede de 38kV na República da Irlanda.

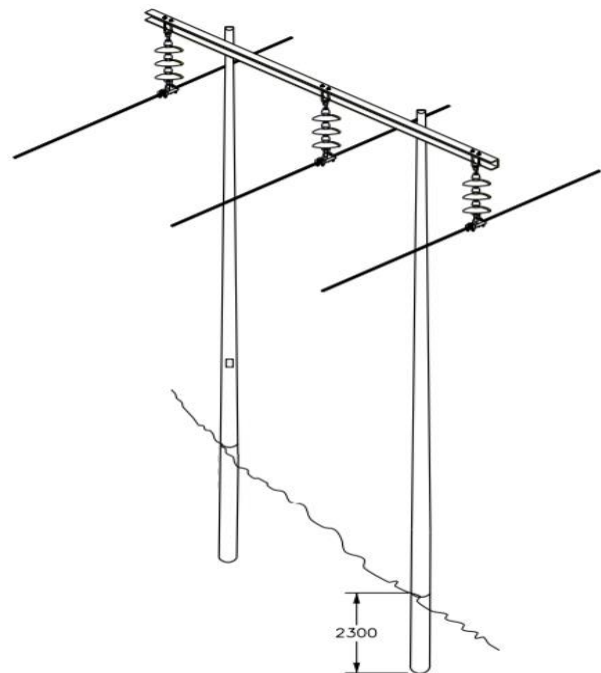


Figura 14 - Portal de madeira numa linha de 38kV utilizado na Irlanda [15]

Os apoios e pórticos de madeira apresentam como principais características:

- Tempo de vida útil médio de 40 anos, quando são submetidos a processos de preservação com base em creosoto e tratamentos térmicos para retardação de fogo. Em locais pantanosos, chuvosos e húmidos, a base do apoio tem tendência a apodrecer, colocando em causa o seu tempo de vida útil;

- Estrutura leve face a outros tipos de apoios (cinco vezes mais leve que o betão);
- Baixo custo, face a outros tipos de apoios;
- Menor tempo de instalação, quando comparado a outras soluções. Por norma é utilizado um “*pole planter*” para a instalação;
- Suportam esforços mecânicos iguais em qualquer sentido do apoio;
- Processo de fabrico é rápido e simples;
- Recicláveis e renováveis;
- Custo de manutenção é baixo;
- Bastante afetados pela agressividade de insetos, aves e fungos;
- Maior integração paisagística comparativamente a outras soluções;
- Bom dielétrico, mas perdem propriedades dielétricas quando sujeitos à chuva/humidade;
- Não suscetíveis à corrosão;
- Condutividade térmica moderada.

2.4.2.2. Apoios de Betão

Em Portugal, a rede elétrica aérea de baixa tensão é constituída por apoios de aço ou betão armado com secções em H ou U. Na média e alta tensão, estes apoios também são comuns, mas com uma expressão inferior à BT. A montagem dos apoios de betão é efetuada através do auxílio de guas, o que permite assegurar a verticalidade do assentamento dos apoios. As dimensões principais dos apoios normalizados, deverão ser conforme a tabela 3.

Tabela 3 - Dimensões principais dos apoios normalizados [16]

Solicitação principal, F (daN)	Altura total, H (m)										Código de dimensões do topo
	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	
400	x	x	x								P00
600		x	x	x	x						
800	x	x	x	x	x						P01
1000		x	x	x	x						P02
1200	x	x	x	x	x	x	x	x			
1400		x			x	x	x	x	x	x	P03
1600	x	x	x		x	x	x	x	x	x	P04
2250	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	M04
2750	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	M06
4000	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	M08
5000	x	x	x		x	x	x				M10
7500		x	x	x	x	x	x				G10 (=M10)
9000		x	x	x	x	x	x				G12

Os apoios de betão apresentam como principais características:

- Tempo de vida útil de 10 a 25 anos, dependente das condições atmosféricas;
- Consideravelmente mais pesados, face a outras soluções;
- Custo elevado de transporte;
- Tempo de instalação moderado;
- Processo de uniformização, pelo facto de existir maior disponibilidade da tecnologia que facilita o transporte e manuseamento destes apoios 16;
- Não suportam esforços mecânicos iguais em qualquer sentido do apoio;
- Suscetíveis à corrosão;
- Não são afetados pela agressividade de insetos, aves e fungos;
- Não são recicláveis;
- Causam algum impacto visual, sobretudo em ambientes naturais;
- Baixa condutividade térmica;
- Sensíveis e pouco resistentes à abrasão de areia;
- Processo de fabrico consideravelmente demorado face a outros tipos de apoios.

Na figura 15, é possível identificar um apoio de betão em amarração.



Figura 15 - Apoio de betão em amarração [17]

2.4.2.3. Apoios em Torres Metálicas Trelaçadas

As torres metálicas trelaçadas são uma opção comum e viável para linhas de transmissão, mas também são utilizadas em linhas de média e alta tensão, com destaque para os 60kV.

Apesar de necessitarem de uma maior área de implantação, devido às suas dimensões e o facto de causarem um maior impacto visual, face a outras soluções no mercado, as torres metálicas trelaçadas são uma solução bastante competitiva. Existem diversas configurações estruturais para estas torres, consoante o número de linhas (linhas simples ou dupla), altura necessária e a zona de construção.

Na figura 16, é possível visualizar um apoio de ângulo em torre metálica trelaçada.



Figura 16 - Torre metálica trelaçada em ângulo [18]

As torres metálicas trelaçadas apresentam como principais características:

- Tempo de vida útil elevado, quando garantida a proteção contra a corrosão;
- Fácil adaptação, podendo as alturas ir até cerca de 40 metros;

- Apresentam grandes dimensões, o que necessita de uma maior área de implantação;
- Transporte facilitado devido à divisão por secções;
- Processo de construção com um tempo moderado;
- Consideravelmente com maior peso, face a outras soluções;
- Tempo de instalação menor face a outras soluções, devido a ser uma solução modular e composta por secções;
- Suscetíveis à corrosão;
- Não são afetadas pela agressividade de insetos e fungos;
- Necessitam de soluções dissuasoras de nidificação e poiso de cegonhas;
- Causam algum impacto visual, sobretudo em ambientes naturais, mas podem ser pintadas de modo a mitigar este impacto;
- Apresentam condutividade elétrica, devido ao tipo de material (metálico);
- Processo de fabrico consideravelmente demorado face a outros tipos de apoios.

2.4.2.4. Apoios Compósitos

Os materiais compósitos, consistem num sistema em que são utilizados dois ou mais tipos de materiais distintos, com efeitos sinérgicos, podendo ser divididos em uma matriz polimérica, metálica ou cerâmica [19].

No caso dos apoios compósitos utilizados para a distribuição e transporte de energia, eles são considerados polímeros e são fabricados à base de fibra de vidro, FRP (*Fiberglass reinforced polymer*). Por essa razão são um autêntico dielétrico e, conseqüentemente, a sua condutividade elétrica é baixa, tornando-se um ótimo isolador.

Apesar dos apoios compósitos serem uma tecnologia recente face às outras que se encontram no mercado, têm vindo a ganhar bastante destaque na área das utilidades e iluminação pública.

Estes apoios apresentam características bastante favoráveis à sua utilização em ambientes agressivos e possuem um tempo de vida útil interessante, comparativamente a outras soluções no mercado. O atual e maior obstáculo à utilização destes apoios, deve-se ao facto de ser uma tecnologia que

necessita de ganhar maturidade no mercado e o seu preço necessita de ser mais competitivo.

Na figura 17, é possível visualizar um apoio de compósito em suspensão.



Figura 17 - Apoio em material compósito [20]

Os apoios compósitos apresentam como principais características:

- Tempo de vida útil de 50 a 80 anos;
- Solução mais leve (60% face à madeira);
- Custo mínimo de transporte, sendo possível transportar maior número de apoios por camião/contentor;
- Tempo de instalação moderado, uma vez que por norma são montados em soluções modulares, necessitando de grua para auxiliar a montagem, conforme a altura do apoio;
- Suportam esforços mecânicos iguais em qualquer sentido do apoio;
- Necessitam de tratamento especial para proteção contra os raios ultravioletas, conhecido como “gel coat”;
- Custo elevado comparativamente a outras soluções;
- Muito resistentes a ambientes agressivos;
- Não são suscetíveis à corrosão;
- Não são afetados pela agressividade de insetos, aves e fungos;
- Não são recicláveis;
- Causam algum impacto visual, sobretudo em ambientes naturais, devido à sua cor acinzentada;
- Baixa condutividade térmica;

- Processo de fabrico consideravelmente demorado face a outro tipo de soluções e atualmente não há grandes centros de fabrico na Europa;
- São um dielétrico.

2.4.3. Tipos de Esforços Mecânicos

Os apoios estão sujeitos a diversos esforços mecânicos, sendo estes:

- Esforços verticais (essencialmente devido ao peso dos condutores e a possíveis mangas de gelo);
- Esforços transversais (resultam quer da ação do vento sobre os apoios quer das trações dos condutores quando formam ângulos);
- Esforços longitudinais (quando os esforços mecânicos dos apoios de cada um dos vãos adjacentes são diferentes ou se o apoio apenas suporta condutores de um dos lados do vão, como acontece nos apoios fim de linha).

2.5. Tipos de Armações

Os condutores das linhas aéreas são fixados a armações ou travessas, através de isoladores rígidos ou cadeias de isoladores e respetivos instrumentos de fixação, as pinças de suspensão e amarração.

As armações mais utilizadas são as que possibilitam a disposição dos condutores em esteira horizontal, esteira vertical, triângulo ou em galhardete. A armação deve ser utilizada conforme a função do apoio. Para os apoios de alinhamento, ângulo e reforço, a EDP Distribuição recomenda o uso das seguintes armações:

- EVDAL (Esteira vertical dupla para função de alinhamento);

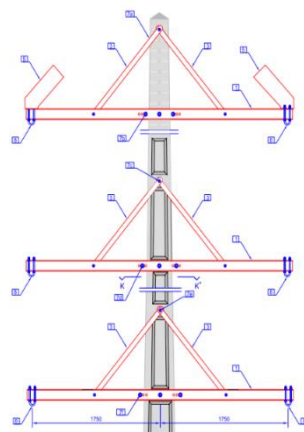


Figura 18 – Armação EVDAL [21]

A esteira vertical dupla para função de alinhamento (figura 18), que é utilizada para apoios de reforço, onde os condutores se encontram fixados em amarração, existindo outras armações que também são utilizadas para esta função, como a armação HRFSC.

- EVDAN (Esteira vertical dupla para função de ângulo);

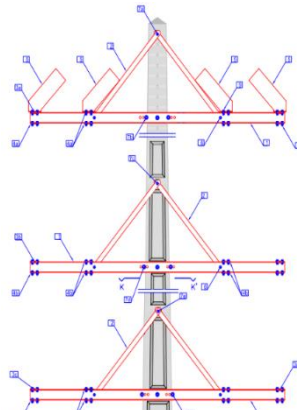


Figura 19 - Armação EVDAN [21]

A esteira vertical dupla para função de ângulo (figura 19), que é utilizada para apoios em ângulo, onde os condutores se encontram fixados em amarração, existindo outras armações que também são utilizadas para esta função, como a armação GAN e a HRFSC.

- GAL (Galhardete para função de alinhamento);

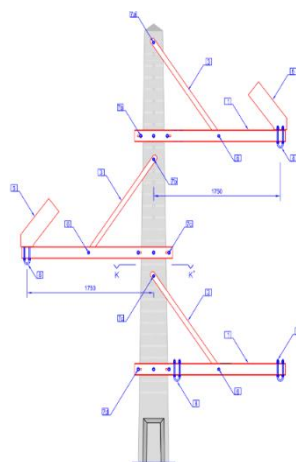


Figura 20 - Armação GAL [21]

A EDP Distribuição recomenda o uso das armações do tipo galhardete em função de alinhamento em suspensão (figura 20), devido ao facto de estas permitirem vãos maiores.

- GAN (Galhardete para função de ângulo);

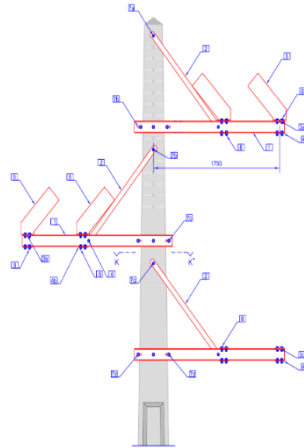


Figura 21 - Armação GAN [21]

A armação em galhardete em ângulo (figura 21), onde os condutores se encontram fixados em amarração, sendo que existem outras armações que também são utilizadas para esta função, como a armação HRFSC.

Outras armações passíveis de serem utilizadas:

- TAL (Triângulo para função de alinhamento);
- TAN (Triângulo para função de ângulo);
- VAL (Esteira vertical para função de alinhamento).

2.6. Isoladores e Instrumentos de Fixação

2.6.1. Isoladores e Cadeiras de Isoladores

A função dos isoladores ou das cadeias de isoladores é evitar a passagem de corrente do condutor ao apoio ou suporte. Os isoladores devem fixar os condutores às estruturas do respetivo apoio [22].

Existem dois tipos de isoladores: os rígidos (de eixo vertical ou eixo horizontal) e os isoladores em cadeia.

Os isoladores têm integrados na sua estrutura o sistema anti-arco (hastes de descarga). Estas hastes servem, essencialmente, para uniformizar o campo elétrico ao longo da cadeia de isoladores e conferem uma proteção contra os efeitos do próprio arco.

As cadeias de isoladores, que são utilizadas nas linhas aéreas de alta tensão, são dois tipos: as cadeias de suspensão e as cadeias de amarração. A escolha depende da função do apoio escolhido (suspensão ou amarração).

Nas figuras 22 e 23, é possível verificar uma cadeia de isoladores em suspensão e uma cadeia de isoladores em amarração.



Figura 22 - Cadeia de Isoladores em Suspensão [23]



Figura 23 - Cadeia de Isoladores em Amarração [23]

A posição dos isoladores é crucial sendo para isso necessário colocá-los de acordo com o apoio escolhido. Numa cadeia de suspensão os isoladores encontram-se emparelhados verticalmente, paralelos ao apoio. Nas cadeias de amarração estes encontram-se dispostos na horizontal e perpendiculares ao apoio.

A escolha dos isoladores é feita com base no nível de poluição e local onde a linha aérea é projetada. O número de isoladores numa cadeia depende, essencialmente, do nível de tensão e do comprimento da linha de fuga (distância entre as duas extremidades metálicas do isolador).

Existem isoladores de diversos materiais, tais como cerâmica, polimérico ou vidro, conforme é possível verificar nas figuras 24,25 e 26.



Figura 24 - Isolador em cerâmica [24]



Figura 25 - Isolador polimérico [24]



Figura 26 - Isolador em Vidro [25]

2.6.2. Instrumentos de Fixação

Os instrumentos de fixação consistem essencialmente, nas pinças de amarração e suspensão. Estas são o elemento responsável pela fixação dos condutores às cadeias de isoladores. O tipo de pinça a utilizar depende essencialmente do tipo de cadeia de isoladores (suspensão ou amarração).

Nas seguintes figuras 27 e 28, é ilustrada uma pinça de amarração e uma pinça de suspensão.



Figura 27 - Pinça de Amarração [26]



Figura 28 - Pinça de Suspensão [26]

Nas pinças de suspensão os condutores são inseridos no suporte. Este fica suspenso sem existir a necessidade de cortar o condutor.

Nas pinças de amarração os condutores são cortados para assegurar a continuidade elétrica, sendo necessário recorrer a um troço de cabo designado por fiador, conforme é possível visualizar na figura 29.

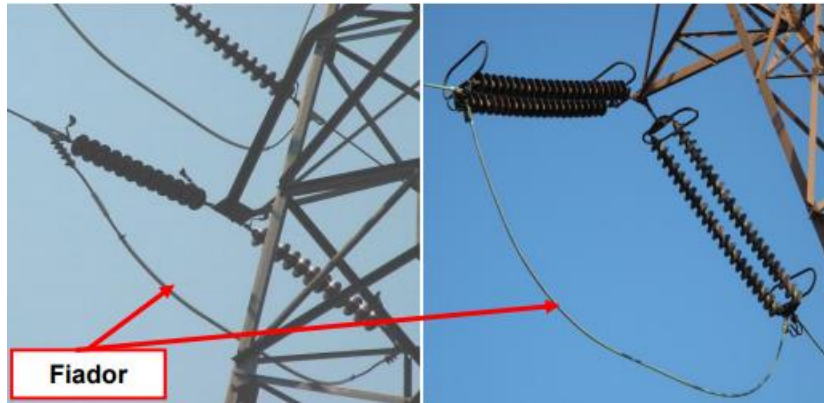


Figura 29 - Fiadores em cadeias de amarração [5]

2.7. Sistema de Ligação à Terra

Em linhas aéreas de MT e AT toda a aparelhagem metálica necessária ao suporte dos condutores, e ao seccionamento e proteção das linhas, encontra-se normalmente com ausência de tensão elétrica, devendo ser ligada à terra [27].

Os sistemas de ligação à terra são constituídos pelos elétrodos de terra e seus condutores, os quais garantem equipotencialidade com o solo. O objetivo de um sistema de terras é “escoar” as correntes de defeito para o solo, seja na situação de um curto-circuito ou de uma descarga atmosférica.

Os apoios de betão devem ser ligados à terra, interligando o terminal de terra existente na parte inferior do apoio, com o elétrodo de terra, através de um cabo de cobre [26].

Os apoios metálicos devem ser ligados à terra, interligando os terminais de terra existentes em cada um dos montantes com os elétrodos de terra, e interligando-os entre si, conforme é possível visualizar nas seguintes figuras 30 e 31 [27].

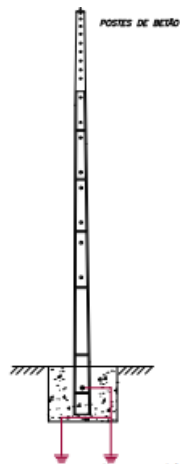


Figura 30 - Ligação aos elétrodos de terra, apoio betão [27]

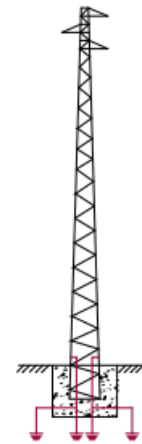


Figura 31 - Ligação aos elétrodos de terra, apoio metálico [27]

2.8. Sinalização Avifauna

Devido à crescente expansão elétrica aérea, as aves estão expostas a um risco de mortalidade direto, em virtude da colisão com as infraestruturas. De modo a minimizar as colisões, o poiso e a nidificação é necessário a implementação de algumas soluções.

A eletrocussão nas aves acontece quando existe contacto com dois elementos condutores, com potenciais diferentes.

As espirais de sinalização, simples ou dupla, utilizadas em linhas aéreas de média e alta tensão e aplicadas nos condutores de fase, nus ou cobertos, e nos cabos de guarda, têm por função proteger a avifauna contra as colisões, conforme ilustrado nas figuras 32 e 33 [28].



Figura 32 - Espiral de Sinalização Simples [28]

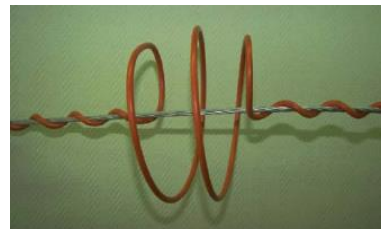


Figura 33 - Espiral de Sinalização Dupla [28]

O dispositivo anti nidificação, designado de “Turbina”, é aplicado em apoios de linhas aéreas de média ou alta tensão, e destina-se à proteção contra eletrocussões, dificultando/impedindo o poiso e a nidificação, conforme ilustrado na figura 34.



Figura 34 - Dispositivo Anti Nidificação [26]

2.9. Impacto Ambiental

No desenvolvimento de um projeto de MT e AT deverá ter-se sempre em consideração os impactos ambientais e a inserção paisagística, de modo a não comprometer a fauna e a flora já existentes no local de inserção da linha aérea. Sempre que se verifique a necessidade, deverá ser realizado um estudo para determinar o impacto ambiental que esta nova infraestrutura possa causar.

2.10. Levantamento Topográfico

Uma das fases mais importantes no projeto e execução de uma linha aérea de média e alta tensão é o levantamento topográfico. Este permite definir o perfil do terreno, validar o traçado da linha e detetar possíveis conflitos com outras redes existentes e urbanizações, o que posteriormente poderá levar a alterações no traçado, caso não sejam garantidas as distâncias mínimas regulamentares. Na figura 35, é possível identificar uma estação total utilizada para o levantamento topográfico.



Figura 35 – Estação Total Levantamento Topográfico [29]

2.11. Piquetagem

A piquetagem é uma das fases finais do projeto. É nesta fase que é sinalizado no terreno, por meio de estacas ou marcas, os pontos de implantação dos apoios. Para isso é necessário ter-se chegado a um acordo com os proprietários dos terrenos privados e garantir as premissas dos cálculos elétrico, mecânico e civil, além de garantir as distâncias mínimas de segurança regulamentares.

Capítulo 3

3. Cálculo dos Parâmetros de Linhas Aéreas

Um dos objetivos primários de um projeto de linhas aéreas é garantir a qualidade, segurança e fiabilidade das instalações elétricas disponibilizadas. Este tipo de fiabilidade só é alcançado através de um bom dimensionamento, avaliação e conceção das instalações. Para isso os cálculos dos parâmetros elétricos, mecânicos e civis, assumem um papel de extrema importância.

3.1. Contexto Regulamentar

Para garantir que existe qualidade, segurança e fiabilidade das instalações é necessário que todo o processo de dimensionamento a seguir descrito, siga de forma diligente os regulamentos específicos para projetos de instalações elétricas. Além disso, devem sempre ser respeitadas e cumpridas todas as normas em vigor, além das indicações da própria Entidade Requerente. Estas normas são as seguintes:

- Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão;
- Guia de boas práticas para integração paisagística de infraestruturas elétricas;
- Normas nacionais (NP);
- Normas europeias (EN);
- Recomendações da EDP para Média e Alta Tensão.

3.2. Enquadramento ao Projeto

A presente dissertação baseou-se num projeto realizado previamente pelo autor, uma vez que utilizando dados reais é possível efetuar uma modelação e simulação mais precisa e autêntica. Este projeto desenvolve uma linha aérea de transporte com um comprimento de 16.1 km e uma capacidade de transporte de 38 MVA, sendo a tensão de transporte de 60 kV.

Esta linha aérea é proveniente de uma subestação redutora de 220 kV para 60 kV. O objetivo desta linha dupla é a alimentação de uma subestação, onde estarão dois transformadores de potência. Estes transformadores servirão para a alimentação de uma fábrica de cimento e para alimentação de uma rede pública (urbanização).

3.3. Cálculo Elétrico

Os métodos utilizados para o cálculo dos parâmetros elétricos, seguem as recomendações e normas presentes no regulamento de segurança de linhas elétricas de alta tensão (RSLEAT). Este decreto regulamentar define as condições mínimas e obrigatórias que têm de ser respeitadas ao projetar linhas com tensão nominal superior a 1 kV.

O procedimento do cálculo elétrico foca-se essencialmente na determinação de parâmetros elétricos, tais como: a intensidade de corrente de serviço, a queda de tensão e as perdas elétricas associadas à linha aérea, de modo a ser possível a escolha dos cabos e secções adequadas.

Antes de proceder ao cálculo elétrico é necessário, por vezes, calcular alguns dos parâmetros mecânicos que se encontram contidos no capítulo do cálculo mecânico, visto que este cálculo influencia o tipo de apoios a serem utilizados.

Os parâmetros elétricos que deverão ser calculados são os seguintes:

- Tensão económica de transporte;
- Intensidade da corrente de serviço;
- Secção económica;
- Densidade de corrente;
- Perdas elétricas na linha;
- Corrente máxima de curto-circuito;

- Quedas de tensão;
- Resistência elétrica, indutância, reatância, capacidade.

3.3.1. Tensão Económica de Transporte

O aspeto económico é tido em conta quando se projeta uma linha de média ou alta tensão. Para isso é preciso determinar qual a tensão de transporte que se traduz na solução mais económica.

Um dos métodos mais simples para a determinação dessa tensão é através da fórmula de *Alfred Still*:

$$U_c = 5.5 \times \sqrt{\left(\frac{L}{1.61}\right) + \frac{P_n}{100}} \quad (3.01)$$

Sendo que,

- U_c – Tensão composta kV;
- L – Comprimento da linha km;
- P_n – Potência a transmitir kW.

Devido ao facto da extensão da linha aérea ser de 16.1 km, e sendo este comprimento de linha inferior a 30 km, é sugerido a utilização da seguinte fórmula:

$$U_c = 0.25 \times \sqrt{P_n} \quad (3.02)$$

Sendo que,

- U_c – Tensão composta kV;
- P_n – Potência a transmitir kW.

A tensão composta a ser definida para o transporte, deverá ser imediatamente acima do valor calculado da tensão económica e que seja normalizado. A tensão de transporte considerada foi de 60 kV.

3.3.2. Potência Ativa de Transmissão

A potência de transporte da linha aérea é um dado fornecido pela empresa distribuidora de energia elétrica ou de acordo com as necessidades do cliente e respetivos transformadores de potência a serem instalados. Esta depende da função da linha e da potência de geração da central produtora. Através da

potência aparente e do fator de potência da carga, que por norma é admitido o valor de 0.9, é possível determinar a potência ativa de transmissão:

$$P_n = S \times \cos(\varphi) \quad (3.03)$$

Sendo que,

- P_n – Potência de transmissão W;
- S – Potência aparente da carga VA;
- $\cos(\varphi)$ – Fator de potência.

3.3.3. Intensidade de Corrente de Serviço

Para a determinação da secção adequada para os condutores, é necessário determinar, numa fase inicial, a corrente que irá percorrer esses condutores. Com a potência de transmissão previamente calculada, é possível determinar a corrente de serviço, através da seguinte expressão:

$$I_s = \frac{P_n}{\sqrt{3} \times U_c \times \cos\varphi} \quad (3.04)$$

Sendo que,

- P_n – Potência a transmitir W;
- U_c – Tensão composta V;
- $\cos\varphi$ – Fator de potência.

Através da intensidade da corrente de serviço, é possível imediatamente calcular a secção económica do cabo condutor.

3.3.4. Determinação da Secção Económica

A secção económica é calculada com base na corrente eléctrica que atravessa o condutor e com base na densidade de corrente económica, sendo que esta depende do tipo de condutor e da tensão composta.

A determinação da densidade de corrente económica é realizada com base na tabela 4, proveniente do RSLEAT:

Tabela 4 - Densidade de Corrente Económica

Tipo de linha aérea	U ≤ 30 kV	U = 60kV
Condutores nus de cobre (δ)	1.9	1.7
Condutores nus de alumínio – aço (δ)	0.9	0.8

Através desta densidade de corrente económica é possível determinar a secção económica do condutor conforme a seguinte expressão:

$$\text{Secção}_{\text{económica}} = \frac{I_s}{\delta_{\text{económica}}} \quad (3.05)$$

Sendo que,

- I_s – Corrente de serviço A;
- $\delta_{\text{económica}}$ - Densidade de corrente económica A/mm².

Determinando a secção económica é possível, através de catálogos de fornecedores, escolher um cabo condutor ACSR com uma secção imediatamente acima deste valor.

3.3.5. Densidade de Corrente

A densidade de corrente por fase é o quociente da intensidade de corrente de serviço pela secção do cabo condutor definido, e é calculada através da seguinte expressão:

$$\delta = \frac{I_n}{\text{Secção}} \quad (3.06)$$

Sendo que,

- δ - Densidade de corrente A/mm²;
- I_n – Corrente nominal A;
- Secção – Secção do condutor escolhido mm².

Trata-se da densidade de intensidade de corrente real por fase no condutor. Na situação de um aumento de potência, convém analisar e confirmar se o condutor tem a capacidade de suportar uma corrente de transporte superior.

O cálculo da densidade de corrente máxima é efetuado através da substituição da corrente nominal (I_n) pela corrente máxima admissível do cabo condutor (I_z).

3.3.6. Determinação da Resistência Elétrica do Condutor

A resistência elétrica do condutor, por unidade de comprimento, depende da resistividade elétrica do material, o qual está sujeito a diferenças de temperatura, e depende essencialmente da secção dos condutores.

O valor da resistividade elétrica, que depende da temperatura do condutor é um dado fornecido pelos fabricantes para uma temperatura de 20 °C. O valor do coeficiente de variação da resistência com a temperatura depende do tipo de material a ser utilizado no condutor. Este coeficiente irá influenciar a resistividade do condutor, tal como poderá ser visualizado na expressão 3.07.

Tabela 5 - Resistividade e Coeficiente de Variação da Resistência com a Temperatura

Material	Resistividade Ω/km a 20°C	α a 20°C $^{\circ}\text{C}^{-1}$
Cobre	32×10^{-7}	0.00393
Alumínio	17×10^{-7}	0.00403
Prata	16×10^{-7}	0.0040

Existindo uma variação de temperatura, face ao que é disponibilizado pelos fabricantes, é necessário determinar a resistência do condutor, de acordo com a respetiva variação.

A resistência elétrica linear, expressa em Ω/km , é dada pela seguinte equação:

$$R=R_{20^{\circ}\text{C}} \times [1+\alpha_{20^{\circ}\text{C}} \times (\theta_{\text{local}}-20)] \quad (3.07)$$

Sendo que,

- R – Resistência do condutor Ω/km ;
- $R_{20^{\circ}\text{C}}$ – Resistência do condutor a 20°C Ω/km ;
- $\alpha_{20^{\circ}\text{C}}$ - Coeficiente de variação da resistência com a temperatura $^{\circ}\text{C}^{-1}$;
- θ_{local} – Temperatura local $^{\circ}\text{C}$.

O cálculo da resistência total do cabo condutor é efetuado através do produto do comprimento da linha aérea pela resistência elétrica linear fornecida no catálogo do fornecedor.

3.3.7. Perdas de Energia Elétrica

Um dos parâmetros elétricos cruciais no cálculo elétrico de uma linha é a determinação de perdas elétricas. Para isso é necessário determinar as perdas por efeito térmico (Joule), de modo a verificar a viabilidade elétrica da linha.

As perdas elétricas são calculadas através da seguinte expressão:

$$P_{\text{perdas}} = n \times R \times I_s^2 \quad (3.08)$$

Sendo que,

- P_{perdas} – Perdas por efeito de joule W;
- n – Número de condutores fases;
- R – Resistência elétrica Ω ;
- I_s – Intensidade de corrente de serviço A.

Em termos percentuais, o valor de perdas pode ser determinado através de:

$$P_{\text{perdas}} (\%) = \frac{P_{\text{perdas}} \times 100}{P_n} \quad (3.09)$$

Sendo que,

- P_{perdas} – Perdas por efeito de joule W;
- P_n – Potência a ser transmitida W.

3.3.8. Rendimento

O rendimento é um indicador importante, porque traduz a eficiência da linha aérea. Quando se efetua o dimensionamento de uma linha de distribuição ou transporte, tem-se como objetivo primário a diminuição das perdas ao máximo, de modo a maximizar o rendimento da mesma.

O rendimento é calculado através da seguinte expressão:

$$\eta (\%) = \frac{P_n - P_{\text{perdas}}}{P_n} \times 100 \quad (3.10)$$

Sendo que,

- η - Rendimento %;
- P_n – Potência de transmissão W;
- P_{perdas} – Potência de perdas W.

3.3.9. Cálculo da Corrente Máxima

Para o cálculo da corrente máxima ou corrente de curto-circuito, é tido em conta que o curto-circuito acontece num ponto que se encontra afastado das fontes geradoras. Considera-se também que este é de baixa duração temporal.

É necessário analisar a constante de material (k_1), que relaciona a secção do condutor com a corrente, e também o coeficiente de temperatura (k_2), sendo que ambos dependem do tipo de material do condutor. A tabela 6, ilustra os valores da constante k_1 , associada aos materiais de condutores que são mais comuns em linhas MT e AT.

Tabela 6 - Constante Material Condutor (k_1)

Material do condutor	k_1 (mm ² /kA)
Cobre	4.419
Alumínio - Aço	6.902
Ligas de alumínio	6.902

Na tabela 7, é apresentado o coeficiente de temperatura (k_2), consoante o tipo de material do condutor:

Tabela 7 - Coeficiente de Temperatura (k_2)

Material do condutor	Temperatura final (°C)	k_2 (mm ² /kA.s ^{1/2})
Cobre	170	1.685
Alumínio - aço	160	1.732
Ligas de alumínio	160	1.809

Assim, é possível efetuar o cálculo da corrente máxima de curto-circuito, através da seguinte expressão:

$$I_{\text{máx}} = \frac{1}{k_1 \times k_2} \times \frac{S}{\sqrt{t}} \quad (3.11)$$

Sendo que,

- $I_{\text{máx}}$ – Valor máximo da corrente de curto-circuito kA;
- K_1 – Constante do material condutor mm²/kA;
- K_2 – Coeficiente de temperatura mm²/kA.s^{1/2};

- t – Duração do curto-circuito s;
- S – Secção dos condutores mm².

3.3.10. Cálculo da Indutância e Reatância

Para ser possível determinar a reatância da linha aérea, é necessário determinar a indutância da mesma. Esta depende do tipo de armação, devido à existência de diversos comprimentos de armações, o que faz variar a distância entre condutores.

A expressão para o cálculo da indutância em linhas elétricas trifásicas é dada por:

$$L = \frac{\mu_0}{2 \times \pi} \times \left[\frac{1}{4 \times n} + \ln \left(\frac{D}{r} \right) \right] \quad (3.12)$$

Sendo que,

- L – Indutância H/km;
- D – Distância entre condutores km;
- R – Raio do condutor km;
- μ_0 – Permeabilidade do meio H/m;
- n – Número de condutores por fase.

Numa situação em que se considera uma linha simples, ou seja, um condutor por fase, e caso a permeabilidade do meio seja a do vazio, ou seja, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, em relação à expressão matemática apresentada em 3.12, é possível fazer a seguinte simplificação:

$$L = \left[0.5 + 2 \ln \left(\frac{D}{r} \right) \right] \times 10^{-4} \quad (3.13)$$

Sendo que,

- L – Indutância H/km;
- D – Distância entre condutores km;
- R – Raio do condutor km.

Através da indutância é possível determinar a reatância indutiva, utilizando a seguinte expressão:

$$Xl = W \times L = 2 \times \pi \times f \times L \quad (3.14)$$

Sendo que,

- X_l – Reatância Ω ;
- L – Indutância H;
- f – Frequência da rede Hz.

3.3.11. Determinação da Queda de Tensão e Tensão de Emissão

Para o cálculo da queda de tensão são consideradas algumas aproximações, tais como considerar que a tensão na emissão é igual à tensão nominal, e admite-se que a queda de tensão resulta apenas da soma vetorial da queda de tensão provocada pela resistência do condutor, através da componente ativa da corrente elétrica, e com a queda de tensão provocada na reatância indutiva do condutor, devido à componente reativa da corrente elétrica.

Através da seguinte expressão, é possível a determinação dessa queda de tensão:

$$\Delta U = U_1 - U_0 = \sqrt{3} \times I \times (R \times \cos \varphi + X \times \sin \varphi) \quad (3.15)$$

Sendo que,

- R – Resistência do condutor Ω ;
- X – Reatância do condutor Ω ;
- $\cos \varphi = 0.9$;
- $\sin \varphi = \sin(\arcsin(0.9))$.

Em termos percentuais, a queda de tensão pode ser calculada da seguinte forma:

$$\Delta U(\%) = \Delta U \times \frac{100}{U} \quad (3.16)$$

Sendo que,

- U – Tensão composta V;
- ΔU – Queda de tensão V.

A queda de tensão recomendada deverá ser inferior a 8% da tensão nominal para uma linha AT de 60 kV.

Para o cálculo da tensão de emissão é utilizada a seguinte fórmula:

$$U_{\text{emissão}} = U + (R + X) \times I_s \quad (3.17)$$

Sendo que,

- $U_{\text{emissão}}$ – Tensão de emissão kV;
- U – Tensão de receção kV;
- R – Resistência elétrica do condutor Ω ;
- X – Reatância do condutor Ω ;
- I_s – Corrente de serviço A.

3.3.12. Capacidade

A capacidade linear de um condutor é a relação entre a sua carga eletrostática, por unidade de comprimento, e a diferença de potencial entre o condutor e o seu invólucro (terra), isto quando os condutores estão sujeitos a um sistema polifásico simétrico de diferenças de potencial em relação a esse invólucro [30].

Num sistema elétrico trifásico, a capacidade é dada pela seguinte expressão:

$$C = \frac{24.2}{\log\left(\frac{D}{r}\right)} \times 10^{-9} \quad (3.18)$$

Sendo que,

- C – Capacidade F/km;
- D – Distância entre condutores km;
- r – Raio do condutor km.

3.3.13. Taxa de Crescimento de Potência

A taxa de crescimento de potência, demonstra a evolução da potência ativa ao longo dos anos.

A potência de crescimento é dada pela seguinte expressão:

$$P_{\text{crescimento}} = P_n \times (1 + \text{taxa}_{\text{crescimento}})^n \quad (3.19)$$

Sendo que,

- $P_{\text{crescimento}}$ – Potência de crescimento ao fim de n anos;
- P_n – Potência de transmissão W;
- $\text{Taxa}_{\text{crescimento}}$ – Valor da taxa de crescimento 0 a 1;
- n – Vida útil anos.

3.3.14. Cálculo Elétrico – Apresentação de Resultados

Para poder proceder ao cálculo elétrico, além das expressões e considerações apresentadas ao longo deste capítulo, são necessárias as características técnicas do cabo condutor e do cabo de guarda. O cabo condutor foi definido com recurso ao cálculo da secção económica.

O cabo condutor definido é o seguinte: **362-AL1/47ST1A “Crow”**, com a secção de 408.49 mm² e com as seguintes características técnicas de acordo com a tabela 8:

Tabela 8 - Características Técnicas do cabo condutor

Descrição	Unidades	Caraterísticas
Área total do cabo	mm ²	408.49
Peso total do cabo	Kg/Km	1367
Resistência elétrica máx. a 20°C	Ω	0,0799
Módulo de elasticidade final	N/mm ²	68000
Coef.Dilatação linear	1/°C	19.3x10-6
Carga de rotura nominal	kN	114.9
Corrente nominal	A	832

O cabo de guarda definido é o seguinte: **80-AL1/47-ST1A "Guinea 130"**, com a secção de 127,4mm² e possui as seguintes características técnicas:

Tabela 9 - Características Técnicas do Cabo de Guarda

Descrição	Unidades	Caraterísticas
Área total do cabo	mm ²	127.4
Peso total do cabo	Kg/Km	588.3
Módulo de elasticidade final	N/mm ²	104000
Coef.Dilatação linear	1/°C	15,3*10-6
Carga de rotura nominal	kN	66.49

Através da tensão económica apresentada na tabela 10, foi possível determinar que a tensão de transporte, normalizada e imediatamente acima é de 60 kV. Por fim, de acordo com as expressões apresentadas no cálculo elétrico, foi possível chegar aos resultados apresentados na tabela 10.

Tabela 10 – Resultados do Cálculo Elétrico

Expressão	Parâmetro	Resultado
3.01	Tensão Económica kV	46.23
3.03	Potência Elétrica kW	34200
3.04	Corrente Elétrica A	365.655
3.05	Secção Económica mm ²	406.283
3.06	Densidade de corrente A/mm ²	2.036
3.06	Densidade de corrente máxima A/mm ²	0.895
3.07	Resistência Elétrica Total Ω	1.286
3.08	Perdas Elétricas kW	515
3.09	Perdas Elétricas %	1.5
3.10	Rendimento Elétrico %	98.5
3.13	Indutância H/km	0.0011
3.14	Reatância Indutiva Ω	5.56
3.15	Queda de tensão V	2267.93
3.16	Queda de tensão %	3.779
3.17	Tensão de Emissão kV	62.5
3.18	Capacidade F	1.74E-07

3.4. Cálculo Mecânico

Para garantir a segurança e estabilidade de uma infraestrutura desta natureza, é crucial efetuar o cálculo mecânico, o qual, incide no cálculo mecânico dos cabos e estabilidade de apoios.

Os parâmetros mecânicos estão relacionados com as forças mecânicas resultantes da ação dos diversos agentes atmosféricos, como a temperatura, o vento e o gelo, que incidem nos elementos constituintes da linha aérea, além do peso de cada um destes. Através destas forças resultantes é possível calcular e determinar as tensões mecânicas de montagem dos condutores, às quais estes devem ser submetidos durante o ato de montagem da linha aérea, de acordo com as condições atmosféricas.

Através do cálculo elétrico foi possível determinar parâmetros, tal como a secção dos cabos, o que permite prosseguir para o cálculo mecânico. No cálculo mecânico deverão ser calculados os seguintes parâmetros:

- Tensão mecânica exercida pelos condutores;
- Tensão de montagem;
- Vão equivalente e vão crítico;
- Determinação dos desníveis;
- Dimensionamento e escolha dos apoios (verificação da estabilidade, cálculo dos esforços e alturas dos apoios, de modo a garantir a segurança e estabilidade dos mesmos);
- Cálculo das flechas máximas;
- Verificação do cumprimento das distâncias mínimas de segurança entre os condutores e os elementos presentes no meio envolvente;
- Cálculo das fundações e dimensionamento dos maciços.

3.4.1. Estados Atmosféricos

Uma linha aérea está sujeita às influências dos agentes atmosféricos, tais como o vento e a temperatura, existindo possibilidade de aparecimento de mangas de gelo. Serão considerados os três estados atmosféricos (inverno, primavera e verão).

O estado de inverno caracteriza-se por ser o estado mais desfavorável, particularmente a nível de temperatura, com temperaturas entre os -5°C ou -10°C e com a possibilidade de eventuais mangas de gelo e com vento reduzido.

O estado de primavera caracteriza-se por ser um estado onde a temperatura é considerada média e vento máximo.

O estado de verão é caracterizado pela temperatura máxima (65°C), e pela ausência de vento.

A ação da variação da temperatura com os estados atmosféricos, de acordo com o RSLEAT, é dada pela tabela 11:

Tabela 11 - Variação da Temperatura em função dos Estados Atmosféricos

Estado atmosférico	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	
	Sem gelo	Com gelo
Inverno	-5	-10
Primavera	+15	Sem gelo
Verão	+65	Sem gelo

3.4.2. Cálculo da Força devido à Ação do Vento

Os cabos condutores e os cabos de guarda, numa linha aérea, são submetidos a diversas forças provocadas por diversas influências, como o vento, a temperatura, o próprio peso do cabo e, possivelmente, o peso de uma manga de gelo. Para isso é necessário determinar estas forças, conforme a figura 36.

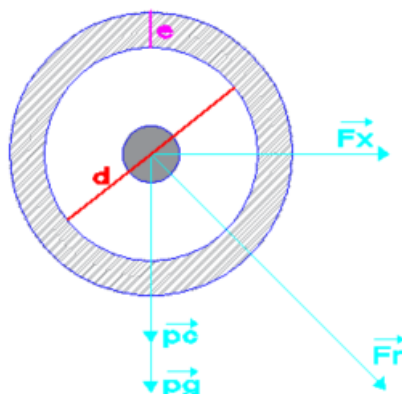


Figura 36 - Forças exercidas sobre o cabo

Relativamente à figura 36,

- \vec{p}_c – Peso do próprio condutor;
- \vec{p}_g – Peso de uma possível manga de gelo;
- \vec{F}_x – Força do vento;
- \vec{F}_r – Força resultante;
- d – Diâmetro do cabo;
- e – Espessura de uma possível manga de gelo.

Os cabos estão sempre sujeitos à influência da força do vento. Para isso é necessário, em conformidade com o RSLEAT, calcular a influência da força do vento nos condutores, através da seguinte expressão:

$$\vec{F} = \alpha \times c \times q \times s \quad (3.20)$$

Sendo que,

- \vec{F} – Força proveniente da ação do vento N;
- α – Coeficiente de redução;
- c – Coeficiente de forma;
- q – Pressão dinâmica do vento Pa;

- s – Área da superfície batida pelo o vento m^2 .

Os valores do coeficiente de forma, para os cabos condutores, cabos de guarda e isoladores, segundo o artigo 15º do RSLEAT, são os seguintes:

Tabela 12 - Coeficiente de forma (c)

Tipo	Diâmetro mm	Coeficiente de forma - c
Condutores nus e cabos de guarda	≤ 12.5	1.2
	$12.5 < d \leq 15.8$	1.1
	> 15.8	1.0
Cabos isolados em feixe (torçada)	-----	1.3
Cabos auto-suportados e cabos tipo 8	-----	1.8
Isoladores	-----	1.0

Em conformidade com o artigo 13º do RSLEAT, é possível definir o valor da pressão dinâmica, em função da altura acima do solo a que se encontra o elemento da linha, sobre o qual se pretende calcular a ação do vento, como é possível verificar na tabela 13:

Tabela 13 - Pressão dinâmica do vento (q)

Altura acima do solo m	Pressão dinâmica - q (Pa)	
	Vento máximo	Vento reduzido
≤ 30	750	300
$30 \leq h \leq 50$	900	360
> 50	1050	420

É necessário efetuar um estudo especial para o cálculo da ação do vento, em situações com alturas superiores a 100 metros.

3.4.3. Força do Vento - Estado de Inverno

O estado atmosférico de inverno caracteriza-se pela menor temperatura e pela existência de vento reduzido. A área da superfície dependerá do diâmetro do cabo e do diâmetro da manga de gelo. Esta não foi considerada devido ao local de implantação da linha aérea não ser propício à formação de mangas de gelo.

Logo para o cálculo da superfície, utiliza-se a seguinte expressão:

$$s = d_{\text{cond}} + (2 \times d_{\text{gelo}}) \quad (3.21)$$

Sendo que,

- s – Superfície batida pelo vento mm^2 ;
- d_{cond} – Diâmetro do condutor mm ;
- d_{gelo} – Diâmetro da manga de gelo mm .

3.4.4. Força do Vento - Estado de Primavera

O estado atmosférico de primavera, caracteriza-se pela temperatura média e pela existência de ventos fortes. A altura acima do solo considerada foi de 30 m, tendo esta influência na pressão dinâmica do vento. A área da superfície dependerá apenas do diâmetro do cabo, sendo o cálculo conforme a expressão 3.21.

3.4.5. Força do Vento - Estado de Verão

No estado atmosférico de Verão não é considerada a força do vento.

3.4.6. Coeficiente de Sobrecarga

O coeficiente de sobrecarga (m) traduz a ação do vento e do gelo, pelo agravamento do próprio peso dos condutores, relativamente a um dado estado atmosférico. Este coeficiente é obtido através da seguinte equação:

$$m = \frac{\bar{F}_r}{W_c} = \frac{\sqrt{(W_c + W_g)^2 + \bar{F}_v^2}}{W_c} \quad (3.22)$$

Sendo que,

- m – Coeficiente de sobrecarga;
- \vec{F}_r – Força resultante N;
- \vec{F}_v – Força do vento N;
- W_c – Peso específico do condutor por unidade de comprimento kg/km;
- W_g – Peso específico de uma manga de gelo por unidade de comprimento kg/km.

A parcela da manga de gelo (W_g) apresentada na expressão 3.22, não foi considerada devido ao local de construção desta linha aérea não ser propício à formação de eventuais mangas de gelo. Caso esta fosse considerada, seria necessário calculá-la com base no diâmetro do condutor, espessura da manga de gelo e através do peso específico volumétrico do gelo, que é igual a $900 \frac{\text{daN}}{\text{m}^3}$.

3.4.7. Coeficiente de Sobrecarga – Estado de Inverno

Dependendo do local de construção da linha aérea e da temperatura, determina-se a possibilidade da existência de formação de mangas de gelo nos cabos. A fórmula adaptada, que permite o cálculo do coeficiente de sobrecarga e que despreza uma eventual manga de gelo, é a seguinte:

$$m_1 = \frac{\vec{F}_r}{W_c} = \frac{\sqrt{W_c^2 + F_v^2}}{W_c} \quad (3.23)$$

Sendo que,

- m_1 – Coeficiente de sobrecarga no estado de inverno;
- \vec{F}_r – Força resultante N;
- \vec{F}_v – Força do vento N;
- W_c – Peso específico do condutor por unidade de comprimento kg/km.

3.4.8. Coeficiente de Sobrecarga – Estado de Primavera

Para o estado de primavera, a expressão apenas contabiliza a força do vento e o peso do próprio condutor. A fórmula adaptada será a seguinte:

$$m_2 = \frac{\vec{F}_r}{W_c} = \frac{\sqrt{W_c^2 + F_v^2}}{W_c} \quad (3.24)$$

Sendo que,

- m_2 – Coeficiente de sobrecarga no estado de primavera;

- \vec{F}_r – Força resultante N;
- \vec{F}_v – Força do vento N;
- W_c – Peso específico do condutor por unidade de comprimento kg/km.

3.4.9. Coeficiente de Sobrecarga – Estado de Verão

No estado de verão, como não existe vento nem gelo, o coeficiente será unitário.

$$m_1 = \frac{\vec{F}_r}{W_c} = \frac{\sqrt{W_c^2 + 0}}{W_c} = 1$$

3.4.10. Equação de Estados

A equação de estados, também designada como equação de mudança de estado, permite calcular a variação na tração do condutor entre dois estados distintos, ou seja, para dois valores de sobrecarga e temperatura diferentes, escolhem-se os casos mais desfavoráveis.

Conhecidos os valores do comprimento equivalente (L) e do comprimento do vão crítico (L_{cr}), consegue-se, através da árvore de decisão ilustrada na figura 37, identificar qual é o estado atmosférico mais desfavorável.

Na árvore de decisão apresentada, o m_1 representa o estado de inverno, enquanto que o m_2 o estado de primavera. Na condição de $m_1 = m_2$, é considerado vão crítico infinito. Na condição do m_1 ser superior ao m_2 é considerado vão crítico imaginário.

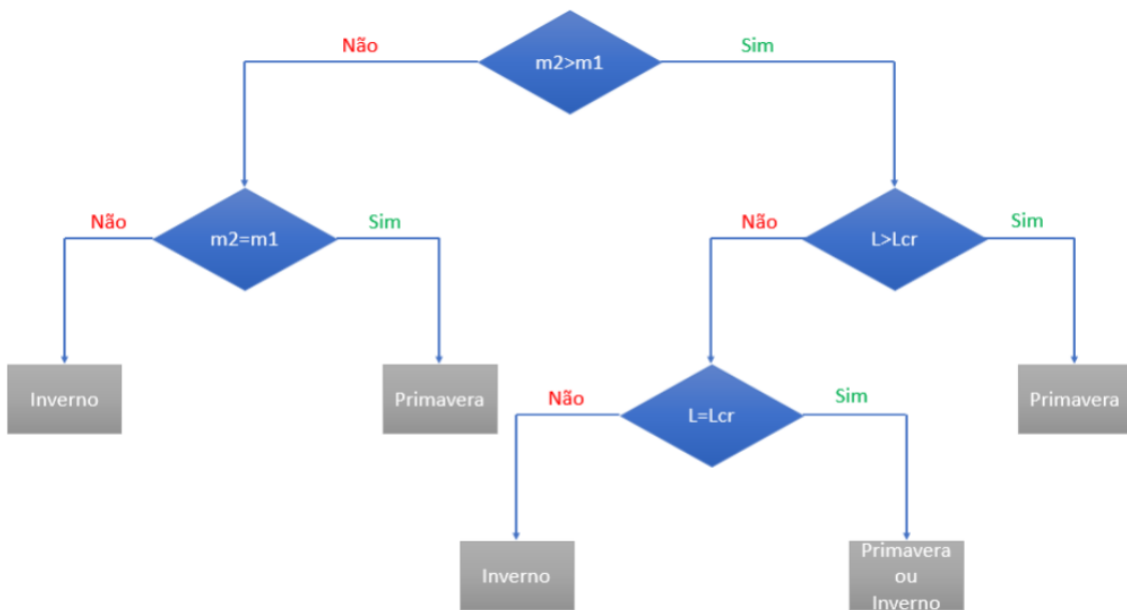


Figura 37 - Árvore de Decisão

A equação de estados é uma expressão de equilíbrio mecânico, que relaciona a tensão mecânica dos condutores, num estado atmosférico, com recurso à tensão mecânica existente nos condutores num estado atmosférico conhecido, sendo para isso necessário saber as características mecânicas dos condutores e o comprimento do vão [31].

Resumidamente, é uma equação que permite traduzir, em função da temperatura, a variação da tensão mecânica dos condutores.

Pelo facto de o estado de verão ser caracterizado pela existência de temperaturas elevadas e ausência de vento, este não poderá ser considerado um estado desfavorável.

É possível calcular a tensão mecânica do condutor no estado mais desfavorável, resolvendo em ordem a t_k , a seguinte seguinte equação:

$$\theta_i + \frac{t_i}{\alpha \times E} - \frac{m_i^2 \times Wc^2 \times L^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t_i^2} = \theta_k + \frac{t_k}{\alpha \times E} - \frac{m_k^2 \times Wc^2 \times L^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t_k^2} \quad (3.25)$$

Sendo que,

- θ_i e θ_k – Temperatura no estado i e k °C;
- t_i e t_k – Tensão mecânica no estado i e k daN/mm²;
- m_i e m_k – Coeficientes de sobrecarga nos estados i e k;

- L – Comprimento do vão m;
- α – Coeficiente de dilatação térmica do cabo $^{\circ}\text{C}^{-1}$;
- E – Módulo de elasticidade da N/mm²;
- σ - Secção mínima do condutor mm².

Através da análise da figura 37 – “Árvore de Decisão”, e com base nos cálculos apresentados dos coeficientes de sobrecarga no fim deste subcapítulo, é possível verificar que o caso mais desfavorável é o inverno, sendo assim a equação de estados foi resolvida para as temperaturas entre o inverno (-5°C) e verão (+65°C).

3.4.11. Vão Crítico

O vão crítico é o vão para o qual os condutores ficam sujeitos à tração máxima. Por este motivo, o estado de verão não poderá ser considerado o mais desfavorável, pelo facto de ser onde as temperaturas são mais elevadas e pela inexistência de vento.

A equação dos estados permite obter o vão crítico quando esta equação é aplicada para o estado de inverno e de primavera, em que se considera que ambos os estados estão à tração de serviço máxima, $t_m=t_k=t_{serv}$ e em que $L=L_{cr}$. Através destas igualdades, é possível, resolvendo a equação apresentada em 3.25, em ordem a L_{cr} , chegar à seguinte equação:

$$L_{cr} = \frac{\sigma \times t_{max}}{W_c} \times \frac{\sqrt{24 \times \alpha \times (\theta_2 - \theta_1)}}{m_2^2 - m_1^2} \quad (3.26)$$

Sendo que,

- θ_1 – Temperatura no estado de inverno $^{\circ}\text{C}$;
- θ_2 – Temperatura no estado de primavera $^{\circ}\text{C}$;
- m_1 – Coeficiente de sobrecarga no estado de inverno;
- m_2 – Coeficiente de sobrecarga no estado de primavera;
- α – Coeficiente de dilatação térmica do cabo (liga de alumínio) $^{\circ}\text{C}^{-1}$;
- σ - Secção mínima do condutor mm²;
- W_c – Peso específico do condutor por unidade de comprimento da N/m;

- t_{max} – Tensão mecânica máxima daN/mm².

3.4.12. Tensão Máxima de Serviço

As tensões máximas de serviço, são arbitradas através da sensibilidade do projetista. O recomendado para a tensão máxima de serviço de um cabo condutor é entre 7 a 12 daN/mm². Para o cabo de guarda, o recomendado é entre 10 a 17 daN/mm².

Em conformidade com o artigo 24º do RSLEAT, as tensões máximas de tração admissíveis para os condutores nus e para os tensores das linhas, não deverão, para a hipótese de cálculo mais desfavorável, ser superiores ao quociente das suas tensões de ruptura por 2.5, de acordo com a seguinte expressão:

$$\overrightarrow{t}_m = \frac{t_{ruptura}}{2.5} \quad (3.27)$$

Sendo que,

- \overrightarrow{T}_m – tensão máxima de tração daN;
- $\overrightarrow{T}_{ruptura}$ – Tensão de ruptura do condutor daN.

O que corresponde em (daN/mm²):

$$\overrightarrow{t}_m \left(\frac{daN}{mm^2} \right) = \frac{\overrightarrow{t}_m}{S} \quad (3.28)$$

$$\overrightarrow{t}_{serv} < \overrightarrow{t}_m \leftrightarrow$$

(caso se verique, então a condição é validada)

É necessário comprovar que a tensão de serviço é inferior à tensão máxima de tração. Caso isso aconteça a condição é validada, em conformidade com o RSLEAT.

3.4.13. Tensão de Montagem

O trabalho da montagem e regulação mecânica de uma linha aérea, necessita de algumas condições específicas no ato da sua execução. Para isso é necessário garantir que não existe presença de gelo e vento, de modo a garantir o sucesso do trabalho.

Assim, para o cálculo da tensão de montagem é admitido um coeficiente de sobrecarga unitário, ou seja, é considerado que o estado atmosférico é de verão no ato da montagem, e que o estado atmosférico desfavorável é o inverno.

A temperatura a ser considerada para o estado de verão será a lida no ato da montagem e para o estado de inverno $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, de acordo com o artigo 22º do RSLEAT, sendo possível determinar a tensão de montagem para diversos comprimentos de vão.

3.4.14. Flecha Máxima

No cálculo da flecha máxima, é considerado a temperatura máxima e ausência de vento, ou seja, o estado atmosférico de verão, que é quando a temperatura mais elevada faz dilatar o cabo e, conseqüentemente, aumenta o comprimento do arco da catenária e a tensão mecânica será a mínima.

Este cálculo da flecha máxima é de extrema importância, porque auxilia na verificação das distâncias mínimas regulamentares e na escolha da altura dos apoios, sendo possível o seu cálculo através da seguinte expressão:

$$\text{flecha}_{\text{máx}} = \frac{L \times L_1 \times W_v}{8 \times t_m} \quad (3.29)$$

Sendo que:

- L – Comprimento do vão m;
- L_1 – Comprimento devido ao desnível m;
- W_v – Peso do condutor daN/m;
- t_m – Tensão mecânica daN.

Para vão desnivelado, o comprimento L_1 é dado por:

$$L_1 = \sqrt{L^2 + h^2} \quad (3.30)$$

Sendo que:

- L_1 – Comprimento devido ao desnível m;

- L – Comprimento do vão m;
- h – Altura do desnível de um apoio para outro m.

3.4.15. Cálculo Mecânico – Apresentação de Resultados

Para o exemplo de cálculo foi utilizado o vão entre o apoio 7 e o apoio 8, tratando-se de um vão com um comprimento de 190 metros. Durante a execução do projeto, tentou-se ao máximo que os vãos adjacentes tivessem o mesmo comprimento, sendo que deste modo a resultante de forças na horizontal é nula.

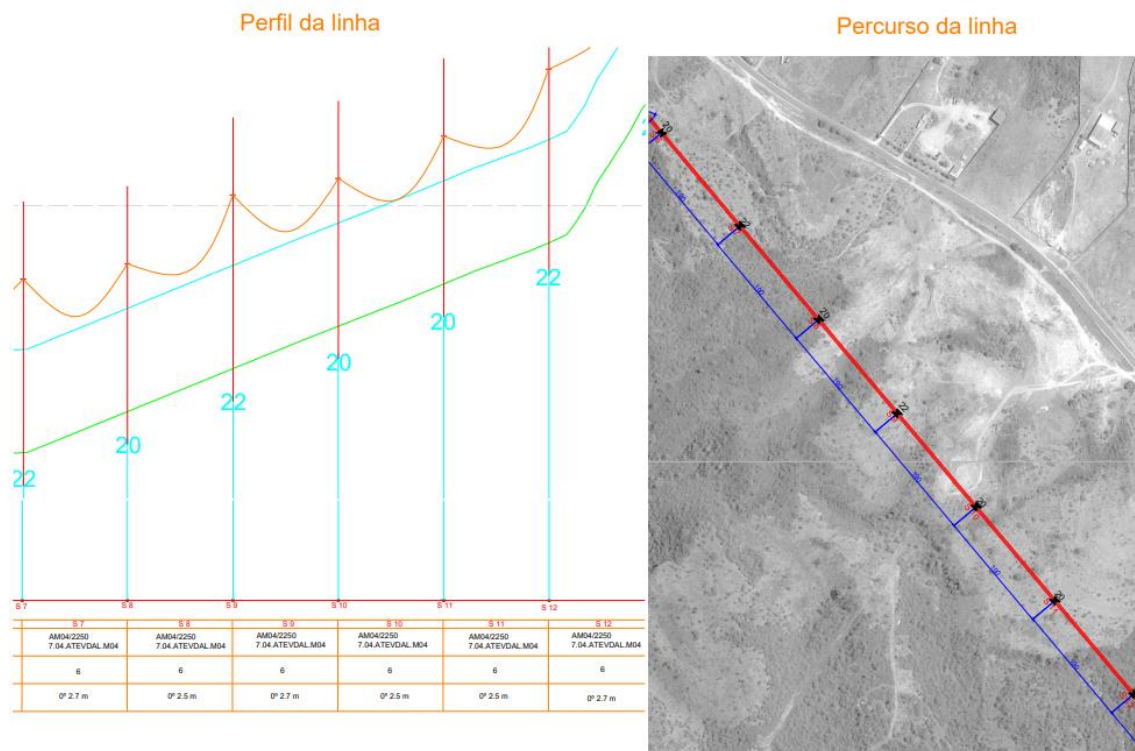


Figura 38 - Perfil e Percurso da linha para vão 7 e 8

O cálculo das características mecânicas do cabo condutor foi efetuado de acordo com as expressões, considerações e características mecânicas do cabo condutor apresentado na tabela 8 “Caraterísticas Técnicas do Cabo Condutor”.

Tabela 14 - Resultados Cálculo Mecânico Cabo Condutor

Expressão	Parâmetro	Cálculo Manual
3.20	Força no estado de inverno daN/m	0.473
Conversão de unidades	Força no estado de inverno kgf/m	0.482
3.20	Força no estado de primavera daN/m	1.1826
Conversão de unidades	Força no estado de primavera kgf/m	1.2062
3.21	Superfície mm ²	26.28
3.22	Coefficiente de sobrecarga m - Verão	1
3.23	Coefficiente de sobrecarga m1 - Inverno	1.06
3.24	Coefficiente de sobrecarga m2 - Primavera	1.33
3.25	Tensão Mecânica daN/mm ²	5.2
3.25 e secção do cabo condutor	Tração Mecânica daN	2124.15
3.26	Vão crítico m	393.6
3.27	Tensão Mecânica Máxima daN	4596
3.28	Tensão máxima de tração daN/mm ²	11.2512
3.29	Flecha Máxima m	2.87
3.30	Vão equivalente m	190.027

O cálculo das características mecânicas do cabo de guarda foi efetuado de acordo com as expressões, considerações e características mecânicas do cabo condutor apresentado na tabela 9 “Caraterísticas Técnicas do Cabo de Guarda”.

Tabela 15 - Resultados Cálculo Mecânico Cabo de Guarda

Expressão	Parâmetro	Cálculo Manual
3.20	Força no estado de inverno daN/m	0.289
Conversão de unidades	Força no estado de inverno kgf/m	0.295
3.20	Força no estado de primavera daN/m	0.727
Conversão de unidades	Força no estado de primavera kgf/m	0.741
3.21	Superfície mm ²	14.6
3.22	Coeficiente de sobrecarga m - Verão	1
3.23	Coeficiente de sobrecarga m1 - Inverno	1.11
3.24	Coeficiente de sobrecarga m2 - Primavera	1.593
3.25	Tensão Mecânica daN/mm ²	11.35
3.25 e secção do cabo condutor	Tensão Mecânica daN	1445.99
3.26	Vão crítico m	230.66
3.27	Tensão Mecânica Máxima daN	2658.4
3.28	Tensão máxima de tração daN/mm ²	20.867

3.5. Distâncias de Segurança

Os condutores devem possuir uma distância mínima de segurança, em relação ao meio envolvente. Para isso é necessário calcular essas distâncias, em conformidade com o RSLEAT. Estas distâncias de segurança condicionam a determinação da altura dos apoios.

3.5.1. Distância ao Solo

Em conformidade com o artigo 27º do RSLEAT, a distância mínima entre os condutores nus das linhas e o solo, nas condições de flecha máxima e desviados ou não pelo vento, não deve ser inferior ao valor dado pela seguinte expressão:

$$D=6+0.005\times U \quad (3.31)$$

Sendo que,

- D – Distância mínima entre condutores e o solo m;
- U – Tensão nominal kV.

3.5.2. Distância dos Condutores às Árvores

Em conformidade com o artigo 28º do RSLEAT, a distância mínima entre os condutores nus das linhas e as árvores, nas condições de flecha máxima e desviados ou não pelo vento, não deve ser inferior ao valor dado pela seguinte expressão:

$$D=2+0.0075\times U \quad (3.32)$$

Sendo que,

- D – Distância mínima entre os condutores e as árvores m;
- U – Tensão nominal kV.

O valor da distância **D**, não deverá ser inferior a **2.5 m**.

3.5.3. Distância dos Condutores aos Edifícios

Em conformidade com o artigo 29º do RSLEAT a distância mínima entre os condutores nus das linhas e os edifícios, nas condições de flecha máxima e desviados ou não pelo vento, não deve ser inferior ao valor dado pela seguinte expressão:

$$D=3+0.0075\times U \quad (3.33)$$

Sendo que,

- D – Distância mínima entre os condutores e os edifícios m;
- U – Tensão nominal em kV.

O valor da distância **D**, não deverá ser inferior a **4 m**.

3.5.4. Distância dos Condutores a Obstáculos Diversos

Em conformidade com o artigo 30º do RSLEAT, a distância mínima entre os condutores nus das linhas e os obstáculos diversos, nas condições de flecha máxima e desviados ou não pelo vento, não deve ser inferior ao valor dado pela seguinte expressão:

$$D=2+0.0075\times U \quad (3.34)$$

Sendo que,

- D – Distância mínima entre os condutores e os obstáculos m;
- U – Tensão nominal em kV.

O valor da distância **D**, não deverá ser inferior a **3 m**.

3.5.5. Distância entre Condutores

Em conformidade com o artigo 31º do RSLEAT, a distância mínima entre condutores nus, deve ter em conta a aproximação perigosa das oscilações provocadas pelo vento. Só assim é possível evitar um curto-circuito fase-fase, que pode provocar problemas graves na infraestrutura. Para uma linha de 3ª classe, a distância mínima é dada pela seguinte expressão:

$$D=k\times\sqrt{f+d}+\frac{U}{150} \quad (3.35)$$

Sendo que,

- D – Distância mínima entre condutores m;
- U – Tensão nominal em kV;

- f – Flecha m;
- k– Coeficiente que depende da natureza dos condutores;
- d – comprimento da cadeia de isoladores em suspensão m.

3.5.6. Distância entre os Condutores e os Cabos de Guarda

Em conformidade com o artigo 32º do RSLEAT, a distância entre os condutores nus e os cabos de guarda, próximo da fixação aos apoios, não deverá ser inferior à distância entre condutores, que deverá ser calculada de acordo com o artigo 31º do RSLEAT.

3.5.7. Distância entre os Condutores e os Apoios

Em conformidade com o artigo 33º do RSLEAT, a distância entre os condutores nus e os apoios deverá ser verificada nas seguintes hipóteses:

- Condutores em repouso, à temperatura mais desfavorável;
- Condutores desviados sob a ação do vento, referido na alínea b) do artigo 12º, à temperatura de 15 °C.

Esta distância, D, em metros, arredondada ao centímetro, não deverá ser inferior à dada por uma das seguintes expressões:

$$D=0.1+0.0065\times U \quad (3.36)$$

(Para condutores nus em repouso)

$$D=0.0065\times U \quad (3.37)$$

(Para condutores nus desviados pelo vento)

Sendo que,

- D – Distância mínima entre os condutores e os apoios m;
- U – Tensão nominal em kV.

O valor da distância **D** não deverá ser inferior a **0.15 m**.

3.5.8. Distâncias Mínimas Regulamentares – Apresentação de Resultados

Para o cálculo das distâncias mínimas de segurança foi considerado a tensão nominal, a flecha máxima, o comprimento das cadeias de isoladores em suspensão e o coeficiente da natureza do tipo de condutor (0.6 para alumínio-aço). Na tabela 16 é possível verificar as distâncias mínimas regulamentares a serem respeitadas.

Tabela 16 - Apresentação dos Resultados das Distâncias de Segurança

Expressão	Parâmetro	Distâncias Mínimas
3.31	Distância ao solo m	6.3
3.32	Distância dos condutores às árvores m	2.5
3.33	Distância aos condutores aos edifícios m	4
3.34	Distância dos condutores a obstáculos diversos m	3
3.35	Distância entre condutores m	1.55
3.37	Distância entre os condutores e os apoios m	0.39

3.5.9. Cadeia de Isoladores

A ação do vento sobre os cabos, provoca esforços horizontais nas cadeias de isoladores. Como consequência, estas ficam inclinadas, ou seja, deslocam-se da sua posição vertical.

Para isso é necessário perceber qual é a posição máxima de deslocamento, que as cadeias podem sofrer, sem pôr em causa as distâncias mínimas regulamentares.

Através do comprimento das cadeias de isoladores, é possível determinar o ângulo máximo de inclinação das mesmas, verificando-se assim a estabilidade das cadeias de suspensão.

Exemplo das características de uma cadeia de isoladores:

Tabela 17 -Exemplo de Características de uma Cadeia de Isoladores [3FL2 – Siemens]

Tensão máxima de serviço kV	72.5
Tensão nominal do sistema Un kV	60
Carga mecânica especificada, SML kN	70
Linha de fuga específica mm/kV	31
Distância de arco mm	664
Linha de fuga mm/kV	2315
Peso kg	3.55
Peso da própria cadeia – daN	34.81
Ação do vento sobre a cadeia daN	17
Comprimento total mm	782

O ângulo máximo das cadeias de isoladores é determinado através da seguinte expressão:

$$\cos(\varphi) = \frac{D}{\lambda} \quad (3.38)$$

Sendo que,

- D – distância mínima entre os condutores e o apoio m;
- λ – Comprimento da cadeia m.

O ângulo máximo de inclinação das cadeias é de 60°, sendo necessário efetuar uma verificação do ângulo de desvio das cadeias. Este deriva da força resultante, à qual a cadeia de isoladores está sujeita, e que depende de diversos fatores tais como: peso do condutor, peso da própria cadeia de isoladores, ação do vento sobre o condutor e ação do vento sobre a cadeia.

Peso do condutor:

$$P = w_c \times \left[\frac{S_1 + S_2}{2} \right] \quad (3.39)$$

Sendo que:

- w_c – Peso específico do condutor daN/m;
- S_1 e S_2 –Vãos adjacentes ao apoio m.

A força resultante da ação do vento sobre os condutores pode determinar-se através da seguinte expressão:

$$P_v = w \times \left[\frac{S_1 + S_2}{2} \right] \quad (3.40)$$

Sendo que,

- W – Força do vento sobre os condutores daN/m;
- S₁ e S₂ – Vãos adjacentes ao apoio m.

O peso da cadeia de isoladores e respectivos acessórios são dados fornecidos pelo fabricante, sendo assim possível determinar o ângulo do desvio transversal da cadeia de isoladores, através da seguinte expressão:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{P_v + \frac{Q_v}{2}}{P + \frac{Q}{2}} \quad (3.41)$$

Em que,

- P – Peso do condutor daN;
- P_v – Força exercida pelo vento no condutor daN;
- Q – Peso da cadeia de isoladores e seus acessórios daN;
- Q_v – Força exercida pelo vento na cadeia isoladores e seus acessórios daN.

O ângulo de desvio transversal das cadeias de isoladores deve ser no máximo 60°. Caso seja inferior, é confirmada a estabilidade da cadeia de isoladores.

3.5.10. Estabilidade dos Apoios

Para o dimensionamento de um apoio, é necessário contabilizar todas as forças que irão ser exercidas sobre o mesmo. Caso não haja um bom dimensionamento dos apoios, há sempre o risco do apoio não resistir aos esforços que nele incidem.

Para a verificação da estabilidade dos apoios, é necessário calcular os esforços provocados pela ação do vento, tensões do condutor e pesos do próprio condutor e das respetivas cadeias de isoladores.

Por norma, existem certos critérios e considerações, que são assumidos pelo projetista aquando da verificação da estabilidade dos apoios, tais como:

- A cada oito vãos de alinhamento, coloca-se um apoio de reforço, sendo este um apoio mais robusto, onde a linha aérea é “partida” e amarrada ao apoio;
- Apoios em ângulo são considerados como ângulo em reforço;
- Apoio imediatamente a seguir a um apoio em ângulo, deve ser um apoio de reforço e em amarração;
- Nos apoios em alinhamento de suspensão, são contabilizadas seis cadeias de isoladores em suspensão, devido ao facto de que os condutores apenas estão suspensos nestes apoios (situação linha dupla);
- Nos apoios em alinhamento de amarração são contabilizadas doze cadeias de isoladores em amarração, devido ao facto de os condutores estarem amarrados ao apoio (situação linha dupla).

Cálculo de forças nos Apoios

Sempre que possível, deve-se efetuar o cálculo das forças que incidem no apoio, nomeadamente, as resultantes no eixo longitudinal, transversal e vertical. Deste modo é possível um bom dimensionamento estrutural. Este deve ser efetuado de acordo com o RSLEAT, havendo ações normais e ações excecionais a ter em conta face a situações muito particulares. Será apresentado o cálculo num modo genérico e simplificado.

Eixo longitudinal (eixo - x):

A tração do cabo condutor e do cabo de guarda no eixo longitudinal, deverá ser calculada tendo em conta a tensão mecânica dos seus vãos adjacentes e o ângulo entre os mesmos, conforme a expressão 3.42.

$$\overrightarrow{Tcdx} = \left| \overrightarrow{tservesq} - \overrightarrow{tservdir} \right| \times \cos\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) \quad (3.42)$$

Sendo que,

- \overrightarrow{Tcdx} – Tração do cabo condutor sobre a linha daN;
- α – Ângulo entre os vãos adjacentes °;
- $\overrightarrow{tservesq}$ – Tensão mecânica à esquerda do apoio daN;

- $\overrightarrow{t_{servedir}}$ – Tensão mecânica à direita do apoio daN.

Força resultante em x:

A força resultante em X, depende do somatório da tração dos cabos condutores e do cabo de guarda.

$$\overrightarrow{F_x} = n \times \overrightarrow{T_{cdx}} + \overrightarrow{T_{cgx}} \quad (3.43)$$

Sendo que,

- $\overrightarrow{F_x}$ – Força resultante daN;
- N – Número de cabos condutor;
- $\overrightarrow{T_{cdx}}$ – Tração do cabo condutor sobre a linha daN;
- $\overrightarrow{T_{cgx}}$ – Tração do cabo de guarda sobre a linha daN.

Na situação de se tratar de um apoio de alinhamento, em que os vãos adjacentes têm o mesmo comprimento, é esperado que a resultante da força em x seja nula, podendo assim se optar por um apoio menos robusto.

Eixo transversal (eixo - y):

Tração do condutor sobre a linha

$$\overrightarrow{T_{cdy}} = (t_{servesq} + t_{servedir}) \times \sin\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) \quad (3.44)$$

Sendo que,

- $\overrightarrow{T_{cdy}}$ – Tração do cabo condutor sobre a linha daN;
- α – Ângulo entre os vãos adjacentes $^\circ$;
- $\overrightarrow{t_{servesq}}$ – Tensão mecânica à esquerda do apoio daN;
- $\overrightarrow{t_{servedir}}$ – Tensão mecânica à direita do apoio daN.

Força do vento sobre um cabo

$$\overrightarrow{F_{vcd}} = c \times q \times d \times \alpha \times \frac{v_{\text{vão1}} + v_{\text{vão2}}}{2} \times \sin(\beta)^2 \quad (3.45)$$

Sendo que,

- $\overrightarrow{F_{vcd}}$ – Força do vento daN;

- α – Coeficiente de redução;
- c – Coeficiente de forma;
- q – Pressão dinâmica do vento daPa;
- $v\tilde{a}o1$ – Vão à esquerda do apoio m;
- $v\tilde{a}o2$ – Vão à direita do apoio m.

Força resultante em y:

No cálculo da força resultante em y, deverá ser considerada a força exercida pelo vento sobre as cadeias de isoladores e sobre os cabos condutores e cabo de guarda, além das trações dos condutores sobre a linha no eixo transversal.

$$\vec{F}_y = n \times (\vec{F}_{visol} + \vec{F}_{vcd} + \vec{T}_{cdy}) + \vec{T}_{cgy} + \vec{F}_{vcg} \quad (3.46)$$

Sendo que,

- N – Número de condutores
- \vec{F}_{visol} – Força do vento sobre a cadeia de isoladores daN;
- \vec{F}_{vcd} – Força do vento sobre o condutor daN;
- \vec{T}_{cdy} – Tração do condutor sobre a linha daN;
- \vec{T}_{cgy} – Tração do cabo de guarda na linha daN;
- \vec{F}_{vcg} – Vento sobre o cabo de guarda daN.

Eixo vertical (eixo z)

No eixo vertical é necessário contabilizar o peso dos cabos (condutores e guarda) e as cadeias de isoladores que incidem no apoio.

O peso de um cabo é possível ser calculado através da seguinte expressão:

$$P_c = W_c \times \frac{v\tilde{a}o1 + v\tilde{a}o2}{2} \quad (3.47)$$

Sendo que,

- P_c – Peso de um cabo daN
- W_c – Peso específico do condutor por unidade de comprimento daN/m
- $V\tilde{a}o1$ – Vão à esquerda do apoio m
- $V\tilde{a}o2$ – Vão à direita do apoio m

Força resultante em Z

$$\vec{F}_Z = n \times (P_c + P_{isol}) + P_g \quad (3.48)$$

Sendo que,

- n – Número de condutores;
- P_c – Peso de um cabo daN;
- P_{isol} – Peso da cadeia de isoladores daN;
- P_g – Peso do cabo de guarda daN.

Posição dos Apoios de Betão

Para os apoios de betão, em que a força resultante em X é inferior à força resultante em Z, deve-se colocar o apoio na perpendicular em relação aos condutores, conforme a figura 39.

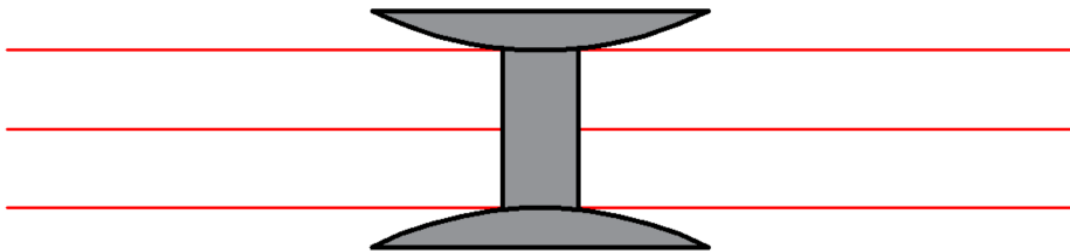


Figura 39 - Posição do apoio, perpendicular em relação aos condutores

Para os apoios de betão, em que a força resultante em X é superior à força resultante em Z, deve-se colocar o apoio na transversal em relação aos condutores, conforme a figura 40.

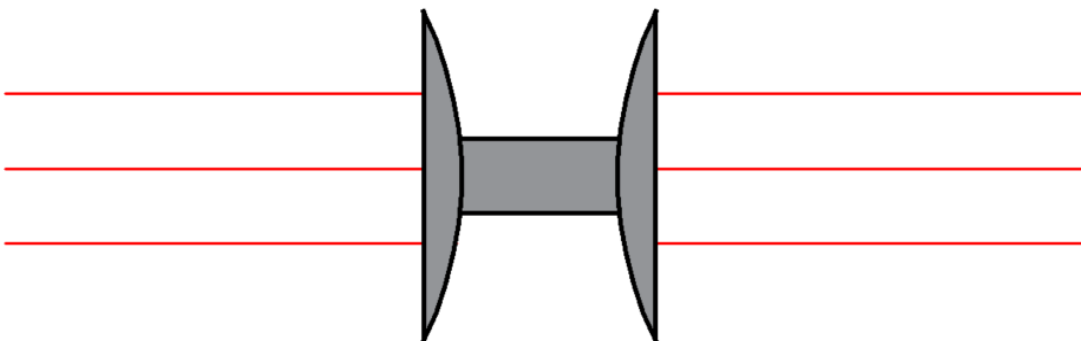


Figura 40 - Posição do apoio, transversal em relação aos condutores

É necessário sempre verificar as forças exercidas em cada apoio, para se determinar a posição do apoio. Variáveis como o comprimento dos vãos adjacentes, ângulo do apoio em relação aos condutores, e forças resultantes podem comprometer a estabilidade do apoio.

3.6. Cálculo de Engenharia Civil

Os maciços de fundação são essenciais para um projeto de linha aérea, devido à sua importância na estabilidade dos apoios.

O dimensionamento das fundações é influenciado principalmente pela natureza dos terrenos, e pelo tipo de esforços a serem aplicados no apoio em função da altura do apoio.

Os maciços têm como principal função transmitir ao solo os esforços resultantes do seu peso e de todas as forças aplicadas ao apoio e respectivo apoio.

Dimensionamento de Maciços de Fundação

Os cálculos dos maciços devem respeitar o artigo 74º do RSLEAT. O coeficiente de segurança ao derrubamento, para solicitações normais, é 1.5.

O dimensionamento dos maciços consiste no cálculo do momento derrubante da força \vec{F} e o momento resistente da cova (paredes e fundo), que é designado de momento estabilizante.

O momento derrubante da força \vec{F} , correspondente à situação de terrenos normais, é calculado através da seguinte expressão:

$$M_d = \vec{F} \times \left(h - 0.25 + \frac{2}{3} \times h_0 \right) \quad (3.49)$$

Sendo que,

- M_d – momento derrubante da N.m;
- \vec{F} – Resultante das forças da N;
- h – Altura do apoio m;
- h_0 – Profundidade do apoio m.

O coeficiente de compressibilidade do terreno é calculado através da seguinte expressão:

$$C_0 = \frac{C_{2m}}{2} \times h_0 \quad (3.50)$$

Sendo que,

- C_0 – Coeficiente de compressibilidade do terreno à profundidade de h_0 daN.m;
- C_{2m} – Coeficiente de compressibilidade à profundidade de 2m daN.m;
- H_0 – Profundidade do apoio m.

O peso total é calculado através da seguinte expressão:

$$\vec{P} = \vec{P}_a + \vec{P}_c + \vec{P}_g + \vec{P}_m + \vec{P}_{isol} \quad (3.51)$$

Sendo que,

- \vec{P} – Peso total daN;
- \vec{P}_a – Peso do apoio daN;
- \vec{P}_c – Peso dos cabos condutores daN;
- \vec{P}_g – Peso do cabo de guarda daN;
- \vec{P}_m – Peso do maciço daN;
- \vec{P}_{isol} – Peso dos isoladores daN.

Peso do maciço

O peso do maciço irá depender do peso específico, que depende do tipo de material. Para o betão é 2400 daN/m, sendo possível calcular através da seguinte expressão:

$$P_M = P_e \times (a \times b \times h_0) \quad (3.52)$$

Sendo que,

- \vec{P}_m – Peso do maciço daN;
- P_e – Peso específico daN/m
- a – Dimensão do maciço no eixo x m;
- b – Dimensão do maciço no eixo y m;
- H_0 – Profundidade do apoio m.

O momento estabilizante possui duas componentes (encastramento do maciço e a reação do terreno no fundo da cova). O encastramento do maciço no solo é calculado através da expressão:

$$M_{e1} = \frac{b \cdot h_0^3}{36} \times C_0 \times \operatorname{tg} \alpha \quad (3.53)$$

Sendo que,

- M_{e1} – Momento estabilizante da N.m;
- b – Dimensão do maciço no eixo y m;
- a – Dimensão do maciço no eixo x m;
- C_0 – Coeficiente de compressibilidade do terreno à profundidade de h_0 da N.m;
- $\operatorname{tg} \alpha$ – Tangente do ângulo máximo de rotação da fundação.

A outra componente é devida à reação do terreno no fundo da cova, provocada pelo peso do maciço de fundação, do apoio e dos condutores, e é dada pela expressão:

$$M_{e2} = \vec{P} \times \left(\frac{a}{2} - 0.47 \times \sqrt{\frac{P}{b \times C_0 \times \operatorname{tg} \alpha}} \right) \quad (3.54)$$

Sendo que,

- M_{e2} – Momento estabilizante da N.m
- \vec{P} – Peso total do apoio, condutores e do maciço da N
- a – Dimensão do maciço no eixo x m
- b – Dimensão do maciço no eixo y m
- C_0 – Coeficiente de compressibilidade do terreno à profundidade de h_0 da N.m

É possível efetuar a verificação do dimensionamento do maciço através da seguinte expressão:

$$\frac{M_{e1} + M_{e2}}{M_d} \geq 1 \quad (3.55)$$

Por norma, é aplicado um coeficiente de segurança ao derrubamento e então a expressão adotada é a seguinte:

$$\frac{M_{e1}+M_{e2}}{M_d} \geq 1.5 \quad (3.56)$$

Capítulo 4

4. Modelação e Simulação

Para garantir o sucesso de uma modelação e simulação é necessário recorrer a ferramentas matemáticas, que nos proporcionem condições para o desenvolvimento dos respetivos cálculos, simulações e modelos matemáticos de uma forma automatizada e eficiente. O *Matlab App Designer* (figura 41) alia os recursos do *Matlab*, com a possibilidade de desenvolver uma aplicação com um ambiente gráfico e interativo.

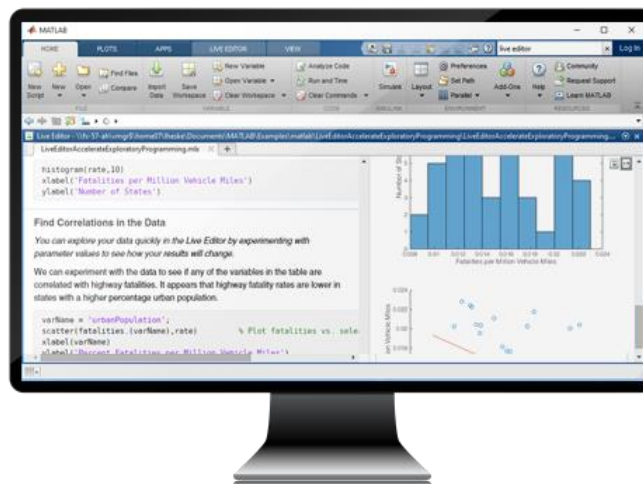


Figura 41 - Matlab App Designer [32]

4.1. Aplicação em Matlab

A aplicação para cálculo automático de linhas elétricas aéreas de média e alta tensão até 60 kV, desenvolvida com recurso ao software *Matlab App Designer*, permite que através da introdução de parâmetros elétricos e mecânicos se efetue os cálculos essenciais que condicionam um projeto de uma linha aérea elétrica (figura 42). O capítulo 3 (“Cálculo dos Parâmetros de Linhas Aéreas”), apresenta todas as fórmulas matemáticas que serviram de base e auxílio para o desenvolvimento da aplicação.

Esta aplicação encontra-se dividida em três partes, sendo elas, as seguintes:

- Cálculo Elétrico;
- Comportamento das flechas das catenárias;
- Cálculo Mecânico.

Linhas Elétricas Aéreas de Média e Alta Tensão até 60kV

Parâmetros Elétricos a introduzir (Inputs)

Potência Aparente (MVA)

Tensão Composta (kV)

Fator de Potência

Comprimento da linha (km)

Dados Condutor

Tipo de material do Cond. **Cobre**

Secção (mm²)

Resistência (ohm/km)

Reatância Indut.(ohm/km)

Corrente Máx. Adm. - I_z (A)

Resultados (Outputs)

Corrente Elétrica (A)

Densidade de corrente (A/mm²)

Densidade de corr. máx (A/mm²)

Secção Económica (mm²)

Tensão Económica (kV)

Potência Elétrica (kW)

Perdas Elétricas (kW)

Queda de Tensão (V)

Queda de Tensão em (%)

Rendimento (%)

Vão (m)

Altura Poste A (m)

Altura Poste B (m)

Fundação (m)

Distância Min.Seg.Solo (m)

Tensão Mec. Min. (daN)

Flecha Máxima (m)

Parâmetros Mecânicos (Inputs)

Temperatura (°C) - Estado Verão

Temperatura (°C) - Estado Inverno

Secção do próprio condutor (mm²)

Diâmetro do condutor (mm)

Peso do próprio condutor (kg/km)

Tensão de Serv. Cond. (daN/mm²)

Tensão de Ruptura do cond. (daN)

Módulo de Elasticidade (daN/mm²)

Coef. de Dilatação Térmica (°C⁻¹)

Resultados (Outputs)

Comprimento do vão (m)

Tensão máx. de Tração (daN/mm²)

Tensão Mecânica (daN)

Tensão Mecânica (daN/mm²)

Vão Crítico (m)

Força Result. Vento - Inverno (daNm)

Força Result. Vento - Primavera (daNm)

Coefficiente de Sobrecarga - Verão

Coefficiente de Sobrecarga m1 - Inverno

Coefficiente de Sobrecarga m2 - Primavera

Comportamento da Flecha em função do Vão

Altura (m) vs Comprimento do Vão (m)

Rúben Camilo (copyright)

Figura 42 - Aplicação Desenvolvida em Matlab

4.2. Modelo Matlab – Cálculo Elétrico

No cálculo elétrico, o utilizador tem a possibilidade de introduzir os parâmetros elétricos necessários para a execução de um projeto de linhas aéreas de MT ou AT, sendo os seguintes:

- A potência aparente em MVA, de acordo com necessidades do cliente e respetivos transformadores de potência;
- A tensão composta para o transporte da linha aérea em kV;
- O fator de potência da carga;
- O comprimento da linha aérea em km.

Além dos parâmetros elétricos, o utilizador deve introduzir, de acordo com o datasheet do fabricante do cabo condutor, os seguintes dados (figura 43):

- O tipo de material do condutor, cobre ou alumínio, através de um seletor;
- A secção transversal do condutor em mm²;
- A resistência linear do cabo condutor em Ω/km;
- A reactância indutiva do cabo condutor em Ω/km;
- A corrente máxima admissível do condutor em A.

The screenshot displays a software interface for electrical calculations, divided into two main sections: 'Parâmetros Elétricos a introduzir (Inputs)' and 'Resultados (Outputs)'. The 'Inputs' section includes fields for 'Potência Aparente (MVA)', 'Tensão Composta (kV)', 'Fator de Potência', and 'Comprimento da linha (km)', all set to 0. Below this is the 'Dados Condutor' section with a dropdown for 'Tipo de material do Cond.' (set to 'Cobre'), and fields for 'Secção (mm^2)', 'Resistência (ohm/km)', 'Reatância Indut. (ohm/km)', and 'Corrente Máx Adm. - Iz (A)', all set to 0. A blue 'Introduzir' button is located below the conductor data. The 'Outputs' section lists various results: 'Corrente Elétrica (A)', 'Densidade de corrente (A/mm^2)', 'Densidade de corr. máx (A/mm^2)', 'Secção Económica (mm^2)', 'Tensão Económica (kV)', 'Potência Elétrica (kW)', 'Perdas Elétricas (kW)', 'Queda de Tensão (V)', 'Queda de Tensão em (%)', and 'Rendimento (%)', all set to 0. On the right side, there are vertical labels 'Altura (m)' and 'Des' (likely 'Desperdício') and two green circular indicators at the bottom right.

Figura 43 - Aplicação Matlab (Cálculo Elétrico)

É possível extrair como resultados (*outputs*), os seguintes parâmetros (figura 43):

- A corrente elétrica nominal em A;
- A densidade de corrente nominal e densidade de corrente máxima em A/mm²;
- A secção transversal económica em mm², esta deve ser comparada com a secção do cabo condutor definido, de modo a confirmar se a secção escolhida é a mais economicamente viável;
- A tensão económica em kV, sendo possível comparar com a tensão composta arbitrada pelo projetista, na fase inicial do projeto;
- A potência elétrica em kW;
- As perdas elétricas ou perdas por efeito de joule em kW;
- A queda de tensão em V e em %;
- O rendimento elétrico em %.

Exemplo de Cálculo

Os parâmetros elétricos e dados do cabo condutor a serem introduzidos no exemplo de cálculo, são de acordo com o projeto desenvolvido, sendo estes, os mesmos que foram apresentados no capítulo 3 (“Cálculo dos Parâmetros de Linhas Aéreas”).

Os parâmetros elétricos do projeto introduzidos foram os seguintes:

- A potência aparente - 38 MVA;
- A tensão composta – 60 kV;
- O fator de potência – 0,9;
- O comprimento da linha – 16,1 km.

Em conformidade com o datasheet do cabo condutor “CROW”, foram introduzidos os seguintes dados:

- O tipo de material do condutor – Alumínio;
- A resistência elétrica – 0.0799 Ω /km;
- A reactância indutiva – 0.167 Ω /km;
- A corrente máxima admissível – 835 A.

Os resultados encontram-se expressos na figura 44.

Parâmetros Elétricos a introduzir (Inputs)		Va
Potência Aparente (MVA)	38	
Tensão Composta (kV)	60	Desr
Fator de Potência	0.9	
Comprimento da linha (km)	16.1	
Dados Condutor		
Tipo de material do Cond.	Aluminio	
Secção (mm ²)	408.5	
Resistência (ohm/km)	0.0799	
Reatância Indut.(ohm/km)	0.167	
Corrente Máx Adm. - Iz (A)	835	
Introduzir		
Resultados (Outputs)		
Corrente Elétrica (A)	365.7	30
Densidade de corrente (A/mm ²)	0.8951	20
Densidade de corr. máx (A/mm ²)	2.044	10
Secção Económica (mm ²)	406.3	0
Tensão Económica (kV)	46.23	
Potência Elétrica (kW)	3.42e+04	
Perdas Elétricas (kW)	516	
Queda de Tensão (V)	2266	
Queda de Tensão em (%)	3.776	●
Rendimento (%)	98.49	●

Figura 44 - Aplicação Matlab exemplo de cálculo elétrico

Existindo uma queda de tensão, em percentagem superior a 5 % e inferior a 8 8 %, o sinalizador, que se encontra a verde na figura 44, fica numa cor alaranjada, alertando e sinalizando para uma queda de tensão alta, mas que ainda assim se encontra dentro das recomendações para linhas aéreas de 60 kV. No caso de a queda de tensão ser superior a 8 %, o sinalizador fica numa cor avermelhada, alertando para um problema grave na queda de tensão.

Enquanto o rendimento for superior a 96 %, o sinalizador é de cor verde, caso o rendimento se encontre entre 92 % e 96 %, o sinalizador fica de uma cor alaranjada, sinalizando que o rendimento não é o desejável para uma linha de transporte de energia elétrica. Na situação do rendimento ser inferior a 92 %, o sinalizador fica de uma cor avermelhada, alertando para um grave problema no rendimento elétrico da linha aérea, consequentemente, indica que as perdas térmicas, ou seja, por efeito de Joule, são altas, conforme ilustrado na tabela 18.

Tabela 18 - Identificação dos sinalizadores

Queda de Tensão %	Rendimento %	Cor do Sinalizador	Recomendações
<5	≥96	Verde	Em conformidade
≥5 & <8	≥92 & <96	Alaranjado	Em conformidade
≥8	<92	Vermelho	Não conforme

4.3. Modelo Matlab – Cálculo Mecânico

No cálculo mecânico, o utilizador tem oportunidade de colocar os parâmetros mecânicos necessários para determinar a tensão máxima de tração, a tensão mecânica, o vão crítico, as forças resultantes do vento, e os coeficientes de sobrecarga para cada um dos estados atmosféricos.

Para isso o utilizador, deve colocar os seguintes dados:

- O comprimento do vão, em m, sendo este inserido no controlo deslizante, e situando-se entre 20 e 200 metros;
- A temperatura máxima no estado de verão, de acordo com o RSLEAT, ou a temperatura no ato da montagem da linha aérea;
- A temperatura mínima no estado de inverno, de acordo com o RSLEAT;
- Os dados do cabo condutor ou cabo de guarda, tais como a secção transversal mm², o diâmetro mm, o peso próprio do condutor kg/km, a tensão de rutura daN, o módulo de elasticidade daN/mm² e o respetivo coeficiente de dilatação térmica °C⁻¹. Todas estas variáveis estão nas unidades de medida que são habituais virem num datasheet de um cabo, consequentemente, na programação da aplicação, face às eventuais necessidades, existem diversas conversões destas unidades para o sistema internacional (SI);
- A tensão de serviço em daN/mm², considerada no projeto de acordo com critério de projetista para o cabo condutor e cabo de guarda.

Como resultados (*Outputs*):

- A tensão máxima de tração em daN/mm², o que permite testar a condição em que esta deve ser superior à tensão de serviço, definida pelo projetista;
- A tensão mecânica em daN e daN/mm²;
- O vão crítico para o cabo condutor ou cabo de guarda em m;
- As forças resultantes em daN/m para os estados atmosféricos de primavera e inverno, uma vez que no estado de verão não se considera a força do vento;
- Os coeficientes de sobrecarga (m) para os estados atmosféricos de verão, primavera e inverno, sendo utilizados conforme a árvore de decisão.

4.3.1. Modelo Matlab – Cálculo Mecânico (Cabo Condutor)

Os parâmetros mecânicos e dados do cabo condutor a serem introduzidos no exemplo de cálculo, são de acordo com o projeto da linha aérea desenvolvido, sendo estes os mesmos que foram apresentados no capítulo 3 (“Cálculo dos Parâmetros de Linhas Aéreas”).

Os parâmetros mecânicos introduzidos, foram os seguintes:

- O comprimento do vão – 190 m;
- A temperatura no estado de verão – 65 °C;
- A temperatura no estado de inverno – -5 °C;
- A secção transversal do cabo condutor – 408.5 mm²;
- O diâmetro do cabo condutor – 26.28 mm;
- O peso do cabo condutor – 1376 kg/km;
- A tensão de serviço do cabo condutor – 11 daN/mm²;
- A tensão de rutura do cabo condutor - 11490 daN;
- O módulo de elasticidade do condutor - 6800 daN/mm²;
- O coeficiente de dilatação térmica – 0.0000193 °C⁻¹.

Os resultados encontram-se expressos na figura 45.

Parâmetros Mecânicos (Inputs)	
Temperatura (°C) - Estado Verão	65
Temperatura (°C) - Estado Inverno	-5
Secção do próprio condutor (mm ²)	408.5
Diâmetro do condutor (mm)	26.28
Peso do próprio condutor (kg/km)	1376
Tensão de Serv. Cond. (daN/mm ²)	11
Tensão de Ruptura do cond. (daN)	1.149e+04
Módulo de Elasticidade (daN/mm ²)	6800
Coef. de Dilatação Térmica (°C ⁻¹)	1.93e-05
Introduzir	
Resultados (Outputs)	
Comprimento do vão (m)	190.2
Tensão máx. de Tração (daN/mm ²)	11.25
Tensão Mecânica (daN)	2125
Tensão Mecânica (daN/mm ²)	5.203
Vão Crítico (m)	393.6
Força Result. Vento - Inverno (daN/m)	0.473
Força Result. Vento - Primavera (daN/m)	1.183
Coeficiente de Sobrecarga - Verão	1
Coeficiente de Sobrecarga m1 - Inverno	1.06
Coeficiente de Sobrecarga m2 - Primavera	1.33

Figura 45- Aplicação Matlab (Cálculo Mecânico Cabo Condutor)

Na situação em que a tensão máxima de tração do cabo condutor não é superior à tensão mecânica de serviço, definida pelo projetista para o cabo condutor, em conformidade com o RSLEAT, o sinalizador fica de uma cor avermelhada, indicando assim um possível problema e colocando em causa a possível rutura do cabo condutor.

4.3.2. Modelo Matlab – Cálculo Mecânico (Cabo de Guarda)

Os parâmetros mecânicos e dados do cabo de guarda, a serem introduzidos no exemplo de cálculo, são de acordo com o projeto da linha aérea desenvolvido, sendo estes os mesmos que foram apresentados no capítulo 3 – “Cálculo Elétrico e Mecânico”.

Os parâmetros mecânicos introduzidos, foram os seguintes:

- O comprimento do vão, em m;
- A temperatura no estado de verão – 65 °C;
- A temperatura no estado de inverno – 5 °C;
- A secção transversal do cabo de guarda – 127.4 mm²;
- O diâmetro do cabo de guarda – 14.6 mm;

- O peso do cabo de guarda – 588.3 kg/km;
- A tensão de serviço do cabo de guarda – 14 daN/mm²;
- A tensão de rutura do cabo de guarda - 6646 daN;
- O módulo de elasticidade do cabo de guarda - 10400 daN/mm²;
- O coeficiente de dilatação térmica – 0.0000153 °C⁻¹.

Os resultados encontram-se expressos na figura 46.

Parâmetros Mecânicos (Inputs)	
Temperatura (°C) - Estado Verão	65
Temperatura (°C) - Estado Inverno	-5
Secção do próprio condutor (mm ²)	127.4
Diâmetro do condutor (mm)	14.6
Peso do próprio condutor (kg/km)	588.3
Tensão de Serv. Cond. (daN/mm ²)	14
Tensão de Ruptura do cond. (daN)	6646
Módulo de Elasticidade (daN/mm ²)	1.04e+04
Coef. de Dilatação Térmica (°C ⁻¹)	1.53e-05
Introduzir	
Resultados (Outputs)	
Comprimento do vão (m)	190.2
Tensão máx. de Tração (daN/mm ²)	20.87
Tensão Mecânica (daN)	1442
Tensão Mecânica (daN/mm ²)	11.32
Vão Crítico (m)	232.1
Força Result. Vento - Inverno (daN/m)	0.2891
Força Result. Vento - Primavera (daN/m)	0.7227
Coeficiente de Sobrecarga - Verão	1
Coeficiente de Sobrecarga m1 - Inverno	1.119
Coeficiente de Sobrecarga m2 - Primavera	1.603

Figura 46 - Aplicação matlab (Cálculo Mecânico Cabo de Guarda)

Na situação em que a tensão máxima de tração do cabo condutor não é superior à tensão mecânica de serviço, definida pelo projetista para o cabo de guarda, em conformidade com o RSLEAT, o sinalizador fica de uma cor avermelhada, indicando assim um possível problema e colocando em causa a possível rutura do cabo de guarda.

4.3.3. Modelo Matlab – Comportamento da Flecha em Função do Vão

No modelo do comportamento da flecha em função do vão, é possível, consoante os dados introduzidos nos parâmetros mecânicos (agentes atmosféricos e dados

do cabo condutor ou guarda), simular o típico comportamento da flecha da catenária no pior cenário, ou seja, considerando a flecha máxima.

O funcionamento deste modelo consiste em introduzir um determinado vão para o qual se deseja efetuar o estudo, a altura dos apoios adjacentes ao vão, a fundação dos próprios apoios, a distância mínima em relação ao solo a ser analisada e a altimetria do terreno, sendo que esta deverá ser carregada no código da aplicação com base no levantamento topográfico efetuado. Como resultado, este modelo devolve o comportamento da flecha.

O modelo permite ao utilizador modificar os seguintes parâmetros:

- Um controlo deslizante, que permite o utilizador variar o vão em metros, entre 20 e 200 metros. Este valor máximo foi considerado devido ao vão crítico, calculado manualmente e também através dos vãos máximos considerados no projeto e traçado da linha aérea;
- A altura dos apoios adjacentes ao vão em metros, e respetiva fundação;
- A distância mínima regulamentar ou calculada para a qual se irá efetuar o estudo. Deste modo é possível verificar se estas não são comprometidas, e permite também dimensionar e otimizar a altura dos apoios.

O modelo, como resultado (figura 47), permite identificar o seguinte:

- A flecha máxima em m;
- A tensão mecânica em daN, de acordo com os parâmetros introduzidos no cálculo mecânico da aplicação;
- Visualização do comportamento da flecha, permitindo assim a possibilidade de determinar se as distâncias mínimas regulamentares são respeitadas. Caso estas distâncias em relação ao solo não sejam garantidas, é possível aumentar a altura dos apoios.

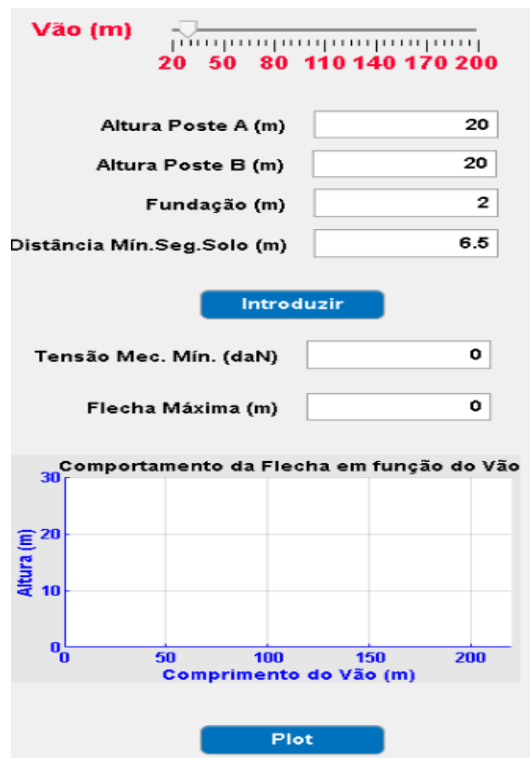


Figura 47 - Modelo do comportamento da flecha em função do vão)

4.3.3.1. Modelo Matlab – Comportamento da Flecha em Função do Vão em Patamar

No exemplo de simulação do modelo do comportamento da flecha em função do vão, ilustrado na figura 48, foi considerado um vão em patamar, ou seja, um vão em que os apoios adjacentes, não apresentam qualquer desnível entre eles.

O vão considerado foi de 190 metros. Os apoios A e B, possuem ambos uma altura de 18 metros, a sua fundação é de 2 metros e a distância mínima em relação ao solo a ser testada foi de 6.5 metros. Recorrendo aos parâmetros mecânicos para o cabo condutor em questão (CROW) e a temperatura mínima e máxima, foi possível extrair na aplicação o valor da flecha máxima e da tensão mecânica, além de visualizar o comportamento da flecha da catenária, permitindo assim garantir que as distâncias mínimas regulamentares são respeitadas.

Conforme é ilustrado na figura 48, é possível identificar que a distância mínima regulamentar de 6.5 metros é respeitada.

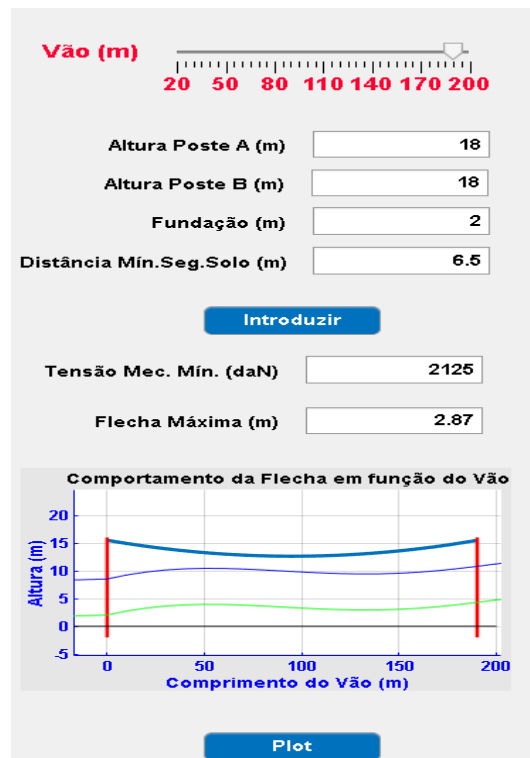


Figura 48 - Aplicação matlab (Comportamento da flecha em função do vão em patamar)

4.3.3.2. Modelo Matlab – Comportamento da Flecha em Função do Vão em Desnível

No exemplo de simulação do modelo do comportamento da flecha em função do vão ilustrado na figura 49, foi considerado um vão em desnível, ou seja, foi considerado um desnível entre os apoios adjacentes de 2 metros.

O vão considerado foi de 190 metros. O apoio A tem uma altura de 16 metros, enquanto o apoio B possui uma altura de 18 metros. Recorrendo aos parâmetros mecânicos para o cabo condutor em questão (*CROW*) e a temperatura mínima e máxima, foi possível extrair na aplicação o valor da flecha máxima e da tensão mecânica, além de visualizar o comportamento da flecha da catenária, permitindo assim garantir que as distâncias mínimas regulamentares são respeitadas. Conforme é ilustrado na figura 49, é possível identificar que a distância mínima regulamentar de 6.5 metros é respeitada.

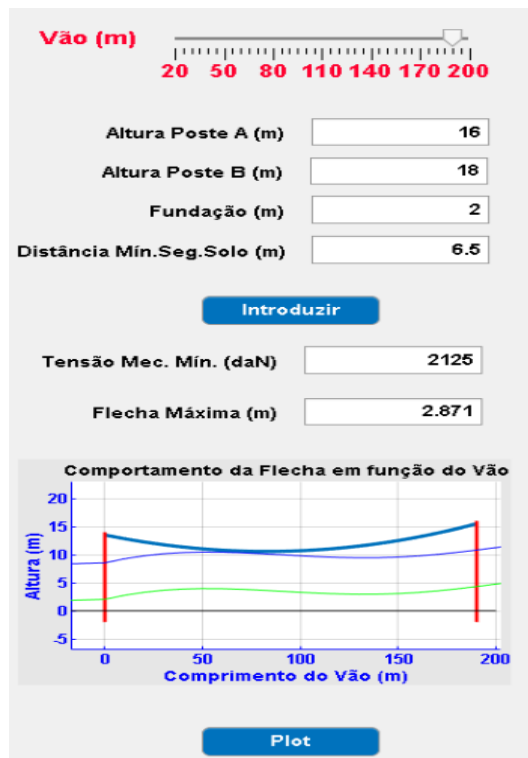


Figura 49 - Aplicação matlab (Comportamento da flecha em função do vão em desnível)

Capítulo 5

5. Considerações Finais e Conclusões

Nesta dissertação procura-se sistematizar o cálculo elétrico e mecânico de um projeto de uma linha AT com recurso ao software de simulação *matlab*, além de consolidar e aprofundar conhecimentos técnicos.

A construção e projeção de uma linha aérea de distribuição ou transmissão de energia, apesar de ser um processo sistemático e com inúmeras fases, é sem dúvida, um desafio para qualquer projetista, pois, depende de aspetos de diversas naturezas, tais como: mecânicos, elétricos, civis, económicos e até ambientais. Todos estes devem ser considerados minuciosamente, garantindo assim a fiabilidade e segurança esperada e exigida.

A topografia é um elemento crucial numa fase inicial e também no decorrer de um projeto de uma linha aérea, devido à sua influência na geometria da linha (vãos em patamar ou em desnível), no próprio percurso e nos tipos e alturas dos apoios. Um projeto desta envergadura depende da intempérie, e para isso é necessário ter em atenção o local onde este será implantado.

Os apoios compósitos apesar de serem uma tecnologia recente e necessitarem de ganhar maturidade no mercado e um preço competitivo, face às soluções atuais, têm vindo a ganhar bastante destaque na área de distribuição de energia elétrica e iluminação pública, pelas suas características bastante favoráveis à utilização em ambientes agressivos, além do seu tempo de vida útil ser interessante, quando comparado às soluções tradicionais.

Todos os cálculos necessários para o projeto foram desenvolvidos manualmente recorrendo apenas ao auxílio de uma folha de cálculo (Microsoft Office Excel), o que deu alguma sensibilidade ao autor, relativamente às grandezas elétricas e mecânicas que intervêm e devem ser consideradas durante o projeto e até na construção da linha aérea, nomeadamente no ato de montagem e regulação da mesma.

A aplicação desenvolvida no *Matlab App Designer*, veio automatizar e sistematizar o cálculo elétrico e mecânico, sendo possível de uma forma bastante intuitiva alterar diversos parâmetros elétricos, mecânicos e atmosféricos, consoante as adversidades que se vão encontrando ao longo do

desenvolvimento do projeto, além de poder auxiliar no momento da montagem da linha aérea, devido ao cálculo da tensão mecânica de montagem, sendo que esta depende das condições atmosféricas no ato de montagem.

O facto da aplicação permitir o estudo do comportamento das flechas das catenárias é uma mais-valia, visto que este é um elemento crucial que, por norma, carece de um estudo exaustivo nos projetos. Através desta aplicação é possível, independentemente do número de apoios, efetuar um estudo detalhado, com foco de “vão em vão”, sendo possível alterar e ajustar alturas dos apoios adjacentes ao vão a ser estudado, e prevendo assim possíveis conflitos e garantindo que as distâncias mínimas regulamentares em relação ao solo e possíveis obstáculos são garantidas. O facto de ser possível identificar possíveis conflitos durante a fase de projeto, tem como vantagem a diminuição de custos e constrangimentos na fase de construção.

O desenvolvimento desta aplicação veio reforçar e validar o cálculo manual efetuado pelo autor para a execução do projeto. Embora apresente ligeiras diferenças, estas são consideradas desprezáveis e devem-se a aproximações que são efetuados ao longo dos cálculos manuais.

Em virtude dos factos mencionados, esta dissertação assume-se de extrema importância na formação académica e profissional do autor.

Capítulo 6

6. Perspetivas de Trabalho Futuro

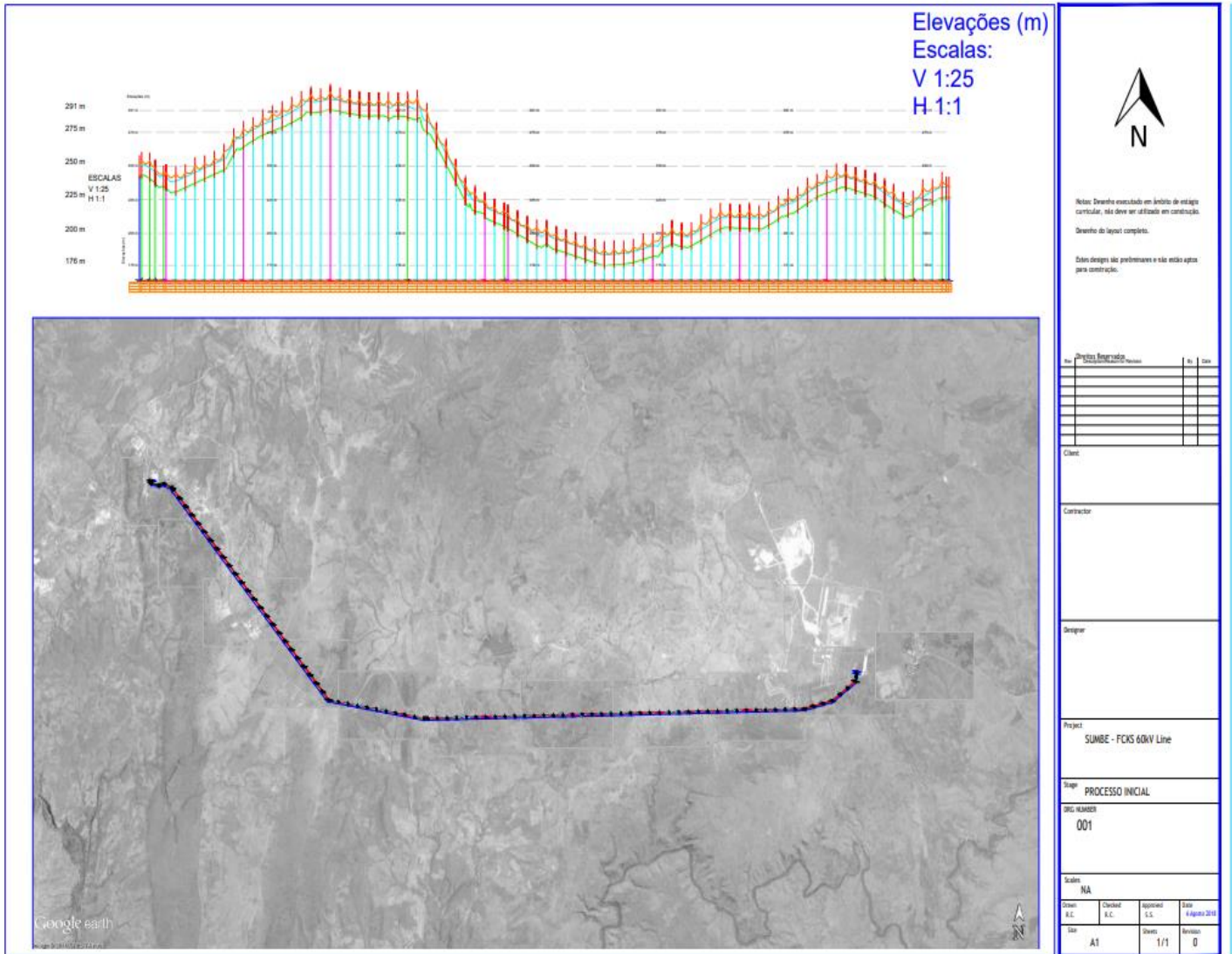
Como perspetiva de trabalho futuro, o mais indicado seria desenvolver esta mesma aplicação para um dispositivo móvel, valendo-se dos seus benefícios do cálculo elétrico e mecânico, e do auxílio no cálculo da tensão mecânica no ato de montagem da linha aérea.

Além do mais, esta aplicação poderia ser melhorada, introduzindo nela o cálculo civil e de estabilidade de apoios, automatizando assim o cálculo de esforços exercidos nos apoios, facilitando e otimizando a definição e dimensionamento dos mesmos.

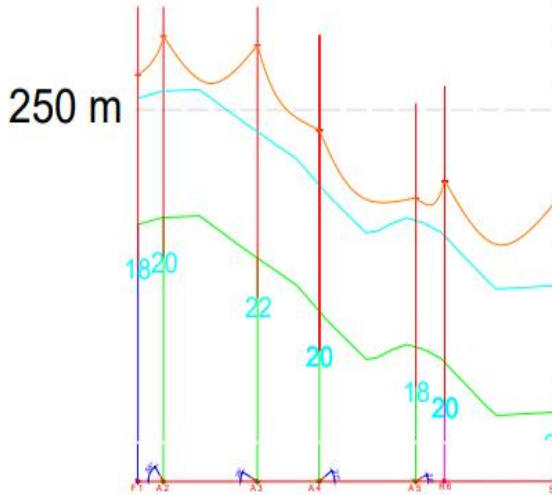
7. Anexos

É disponibilizado nos anexos da dissertação o traçado e perfil da linha aérea e respectivos catálogos de fabricantes.

Anexo A. Design da Linha Aérea (Traçado e Perfil)



Perfil da linha



Nome	F 1	A 2	A 3	A 4	A 5	R 6
Tipo de Apoio / Armadura		AK0540 D 7.03.ATEVDAL M08	AK0540 D 7.03.ATEVDAL M08	AK0540 D 7.03.ATEVDAL M08	AK0540 D 7.03.ATEVDAL M08	AK0540 D 7.04.ATEVDAL M04
Número de cabos	12	12	12	12	12	6
Ângulo de Apoio / Proteções	0° 23'	58° 25'	29° 25'	37° 25'	29° 23'	0° 25'

Percurso da linha



Nota: Direitos reservados em âmbito de estágio curricular, não deve ser utilizado em construção.

Desenho de 1º Apoio até ao 6º Apoio.

Estes desenhos são preliminares e não estão aptos para construção.

Direitos Reservados

No.	Descrição/Revisão	No.	Data

Client: _____

Contractor: _____

Designer: _____

Project: **SUMBE - FCKS 60kV Line**

Stage: **PROCESSO INICIAL**

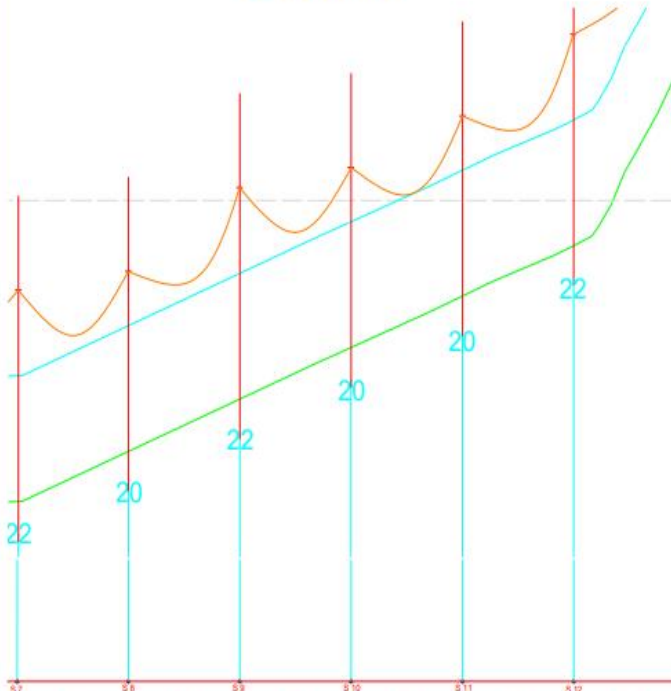
DWG NUMBER: **002**

Scales: **NA**

Drawn E.C.	Checked E.C.	Approved L.S.	Date 4-Agosto-2016

Size	Sheet	Revision
A1	1/1	0

Perfil da linha

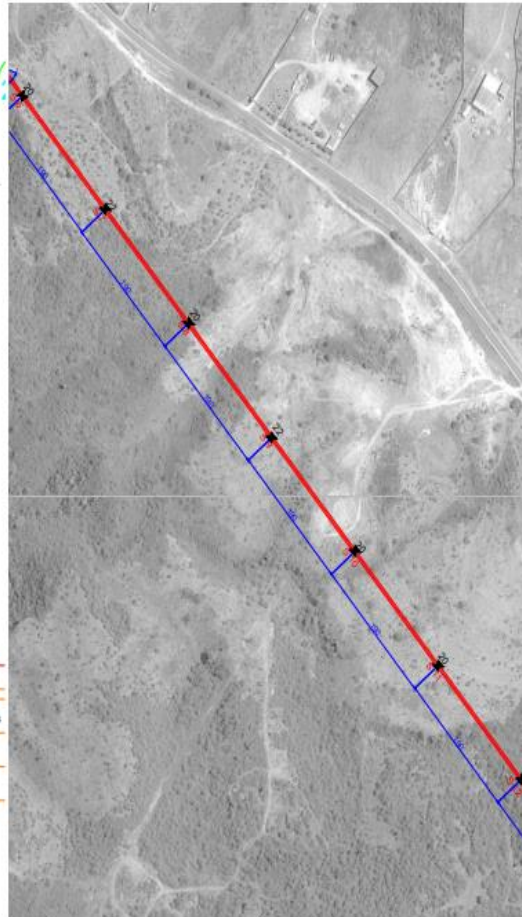


S.7	S.8	S.9	S.10	S.11	S.12
AM042250 7.04 ATEVDAL.M04	AM042250 7.04 ATEVDAL.M04	AM042250 7.04 ATEVDAL.M04	AM042250 7.04 ATEVDAL.M04	AM042250 7.04 ATEVDAL.M04	AM042250 7.04 ATEVDAL.M04
6	6	6	6	6	6
0° 2.7 m	0° 2.5 m	0° 2.7 m	0° 2.5 m	0° 2.5 m	0° 2.7 m

Legenda presentada conforme

Ícone	Descrição
	Perfil de Apoio / Ponto
	Perfil de Instalação
	Perfil de Apoio / Ponto

Percurso da linha



Nota: Desenho executado em âmbito de estágio curricular, não deve ser utilizado em construção.

Desenho do 7º Apoio até ao 12º Apoio.

Este desenho não preliminar e não está apto para construção.

Direitos Reservados

Rev.	Descrição/Revisão da Revisão	Fl.	De

Client:

Contractor:

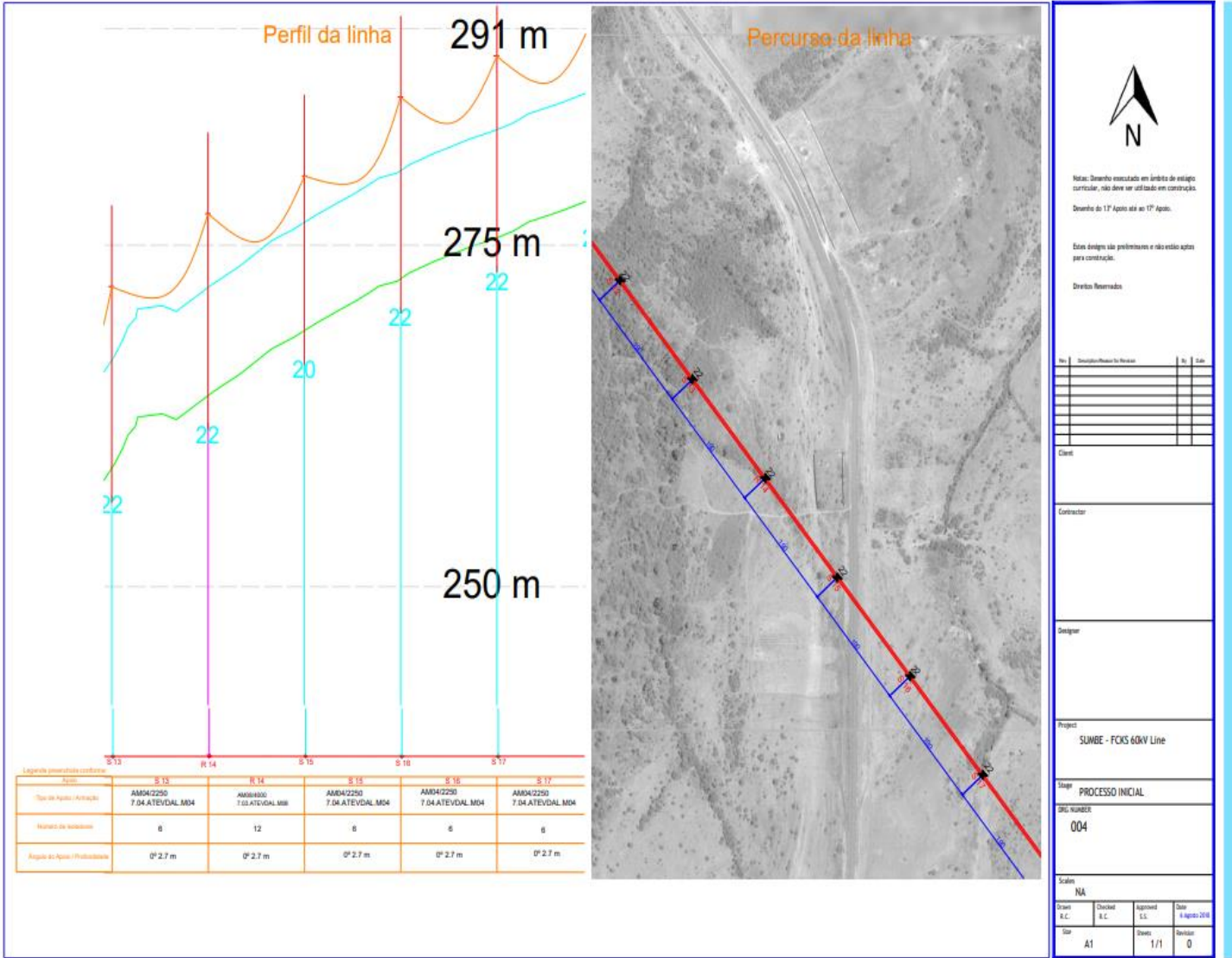
Designer:

Project:
SUNBE - FCKS 60kV Line

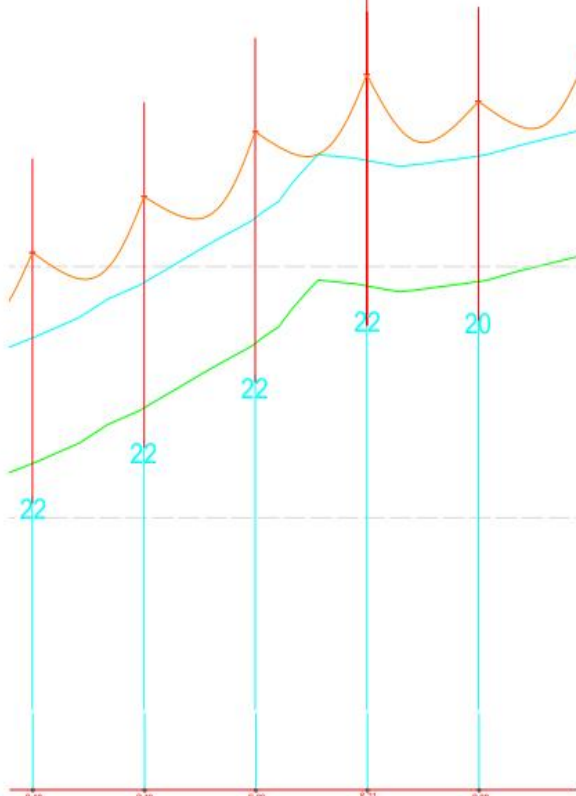
Stage:
PROCESSO INICIAL

DWG NUMBER:
003

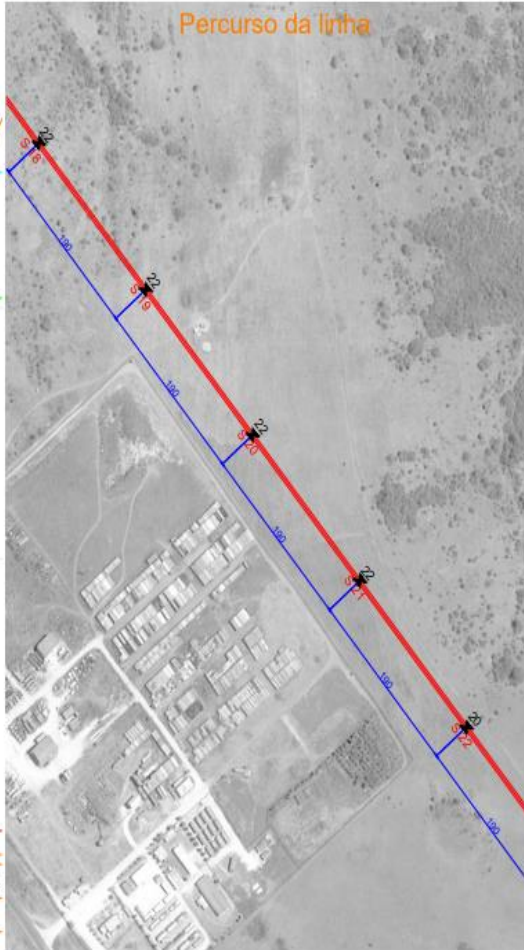
Scales			
Drawn	Checked	Approved	Date
S.C.	S.C.	S.S.	
A1		1/1	9 Abril 2016
			Revision 0



Perfil da linha



Percurso da linha



Legenda (em metros)	S 18	S 19	S 20	S 21	S 22
Tipo de Apoio / Estrutura	AMD42250 7.04.ATEVDAL.M04	AMD42250 7.04.ATEVDAL.M04	AMD42250 7.04.ATEVDAL.M04	AMD42250 7.04.ATEVDAL.M04	AMD42250 7.04.ATEVDAL.M04
Material de sustentação	6	6	6	6	6
Apogio do Apoio / Altura do Apoio	0*2.7 m	0*2.7 m	0*2.7 m	0*2.7 m	0*2.5 m



Notas: Desenho executado em âmbito de estudo preliminar, não deve ser utilizado em construção.
Desenho de 18º Apoio até ao 22º Apoio.
Estes desenhos são preliminares e não estão aptos para construção.

Direitos Reservados

Rev.	Descrição/Revisão do Desenho	Rev.	Data

Cliente:

Contractor:

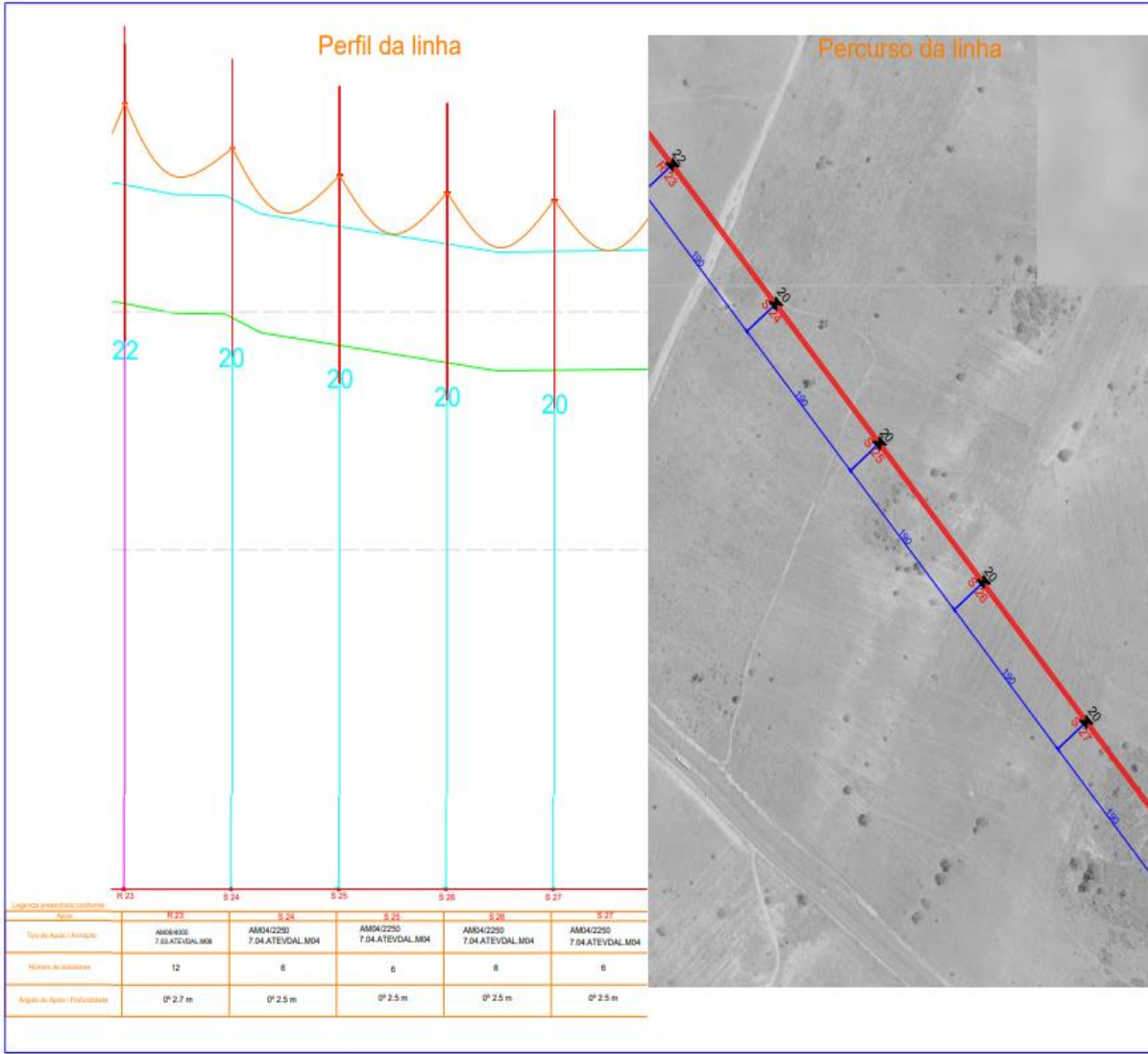
Designer:

Project:
SULBE - FCKS 60kV Line

Stage:
PROCESSO INICIAL

DWG NUMBER:
005

Scales			
Drawn	Checked	Approved	Date
S.C.	R.C.	S.S.	4 Agosto 2018
Size	Sheet	Revision	
A1	1/1	0	



N

Nota: Desenho executado em âmbito de estudo preliminar, não deve ser utilizado em construção.
 Desenho de 27 Agosto até ao 27 Agosto.
 Este desenho não pretende e não está apto para construção.

Directores Responsáveis

№	Designação/Responsável Técnico	№	Data

Client: _____

Contractor: _____

Designer: _____

Project: **SUBTE - FCKS 60KV Line**

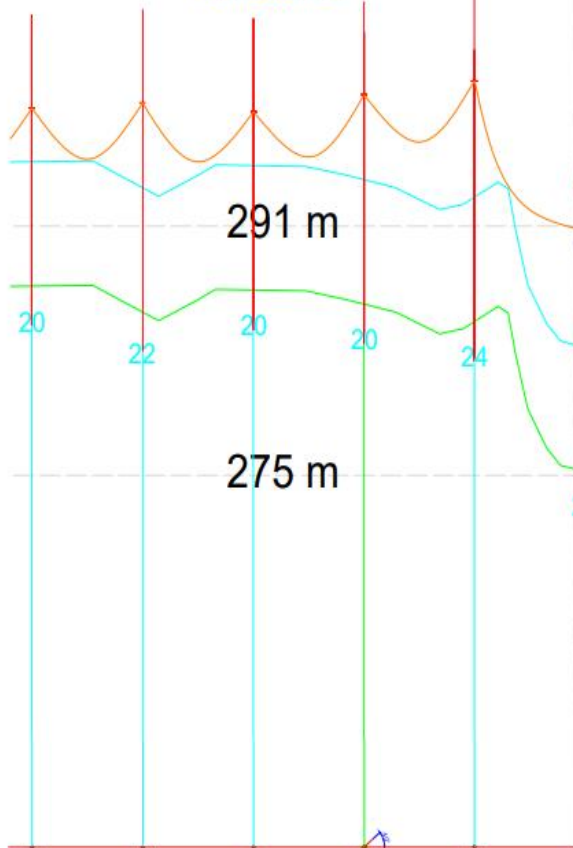
Stage: **PROCESSO INICIAL**

Sheet Number: **006**

Scale: **NA**

Drawn	Checked	Approved	Date
S.C.	S.C.	S.C.	4 Agosto 2018
Size: A1	Sheet: 1/1	Revisions: 0	

Perfil da linha



Percurso da linha



Nome	S 28	S 29	S 30	A 31	S 32
Tipos de Apoio / Anomalia	AM04/2250 7.04.ATEVDAL.M04	AM04/2250 7.04.ATEVDAL.M04	AM04/2250 7.04.ATEVDAL.M04	AM04/000 7.04.ATEVDAL.M04	AM04/2250 7.04.ATEVDAL.M04
Numero de cabos	6	6	6	12	6
Regulo de Apoio / Profundidade	0° 2.5 m	0° 2.7 m	0° 2.5 m	40° 2.5 m	0° 2.9 m



Notas: Desenho executado em âmbito de estudo preliminar, não deve ser utilizado em construção.
Desenho de 20° Apoio até ao 32° Apoio.
Este desenho não representa o estado final para construção.

Directos Reservados

Rev	Descrição/Alteração	El	Ed

Client

Contractor

Designer

Project

SUNBE - FCKS 60kV Line

Stage

PROCESSO INICIAL

DRG Number

007

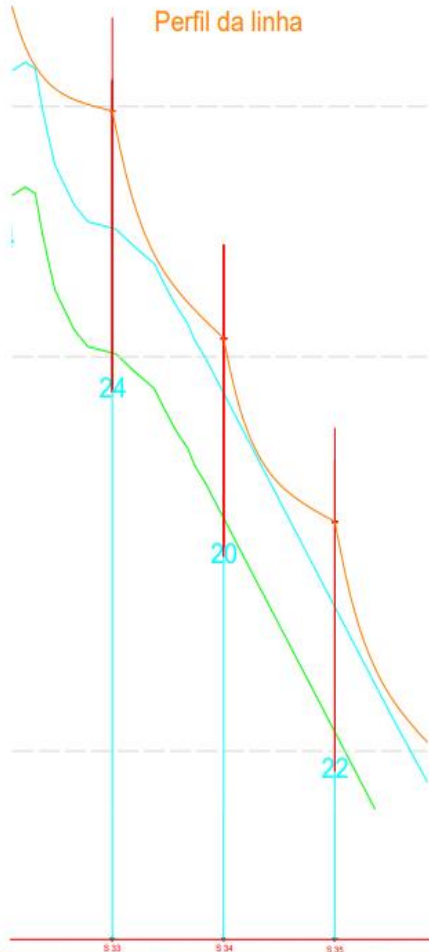
Scale

NA

Drawn	Checked	Approved	Date
E.C.	E.C.	E.S.	
			4 Agosto 2014

Size	Scale	Revisions
A1	1/1	0

Perfil da linha



Legenda simbólica construtora

Nome	S 33	S 33	S 34	S 35
Tipo de Apoio / Formação	AM04/2250 7.04.ATEVDAL.M04	AM04/2250 7.04.ATEVDAL.M04	AM04/2250 7.04.ATEVDAL.M04	AM04/2250 7.04.ATEVDAL.M04
Número de isoladores	6	6	6	6
Altura do Apoio / Profundidade	0 ^o 2.9 m	0 ^o 2.9 m	0 ^o 2.5 m	0 ^o 2.7 m

Percurso da linha



Nota: Desenho executado em âmbito de estudo preliminar, não deve ser utilizado em construção.
Desenho de 1^o Apoio até ao 1^o Apoio.
Este desenho não representa o projeto final e não está apto para construção.

Reservados

Rev.	Descrição/Modificação	Por	Data

Client

Contractor

Designer

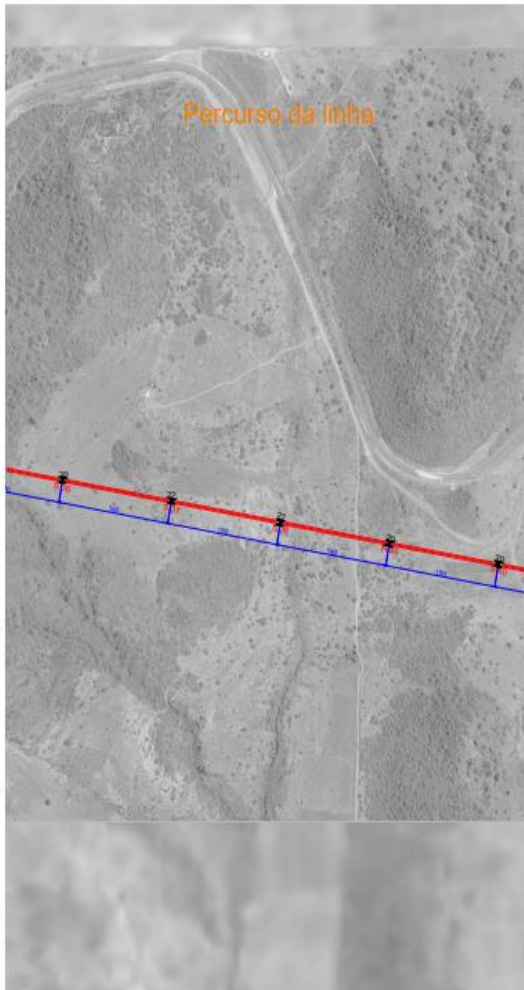
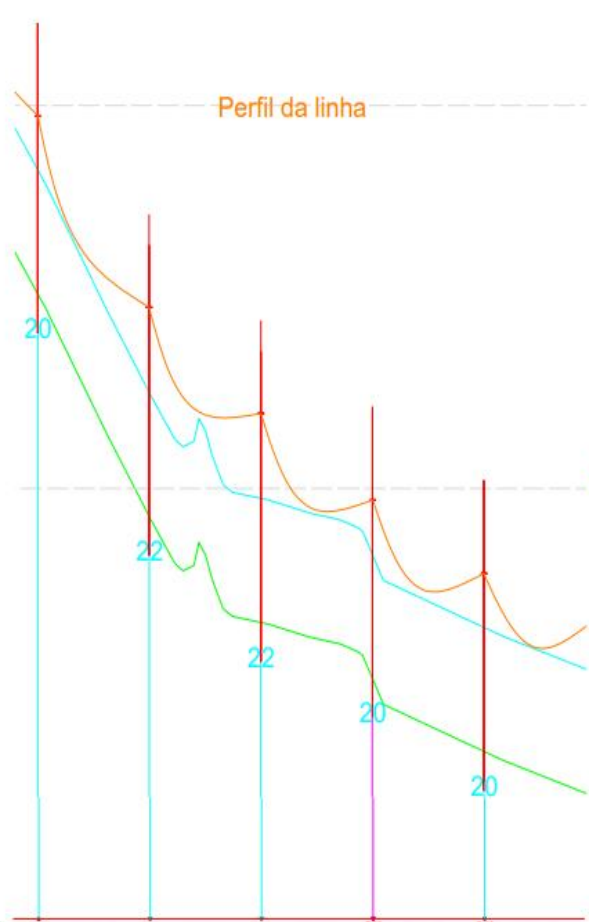
Project: SUNBE - FCKS 60KV Line

Stage: PROCESSO INICIAL

DWG NUMBER: 008

Scale: NA

Drawn E.C.	Checked E.C.	Approved E.C.	Date
			6 Agosto 2016
Size: A1	Scale: 1/1	Revision: 0	



segunda apresentada conforme:

Apóio	S 36	S 37	S 38	R 39	S 40
Tipo de Apóio / Armagem	AM042250 7.04 ATEVDAL.M04	AM042250 7.04 ATEVDAL.M04	AM042250 7.04 ATEVDAL.M04	AM040300 7.04 ATEVDAL.M08	AM042250 7.04 ATEVDAL.M04
Número de isoladores	6	6	6	12	6
Altura do Apóio / Profundidade	0 ^o 2.5 m	0 ^o 2.7 m	0 ^o 2.7 m	0 ^o 2.5 m	0 ^o 2.5 m



Notas: Desenho executado em âmbito de estágio curricular, não deve ser utilizado em construção.
 Desenho do 3^o Apoio até ao 4^o Apoio.
 Estes desenhos são preliminares e não estão aptos para construção.

Direitos Reservados

Rev. #	Descrição/Revisão de Revisão	Rev. #	Data

Client: _____

Contractor: _____

Designer: _____

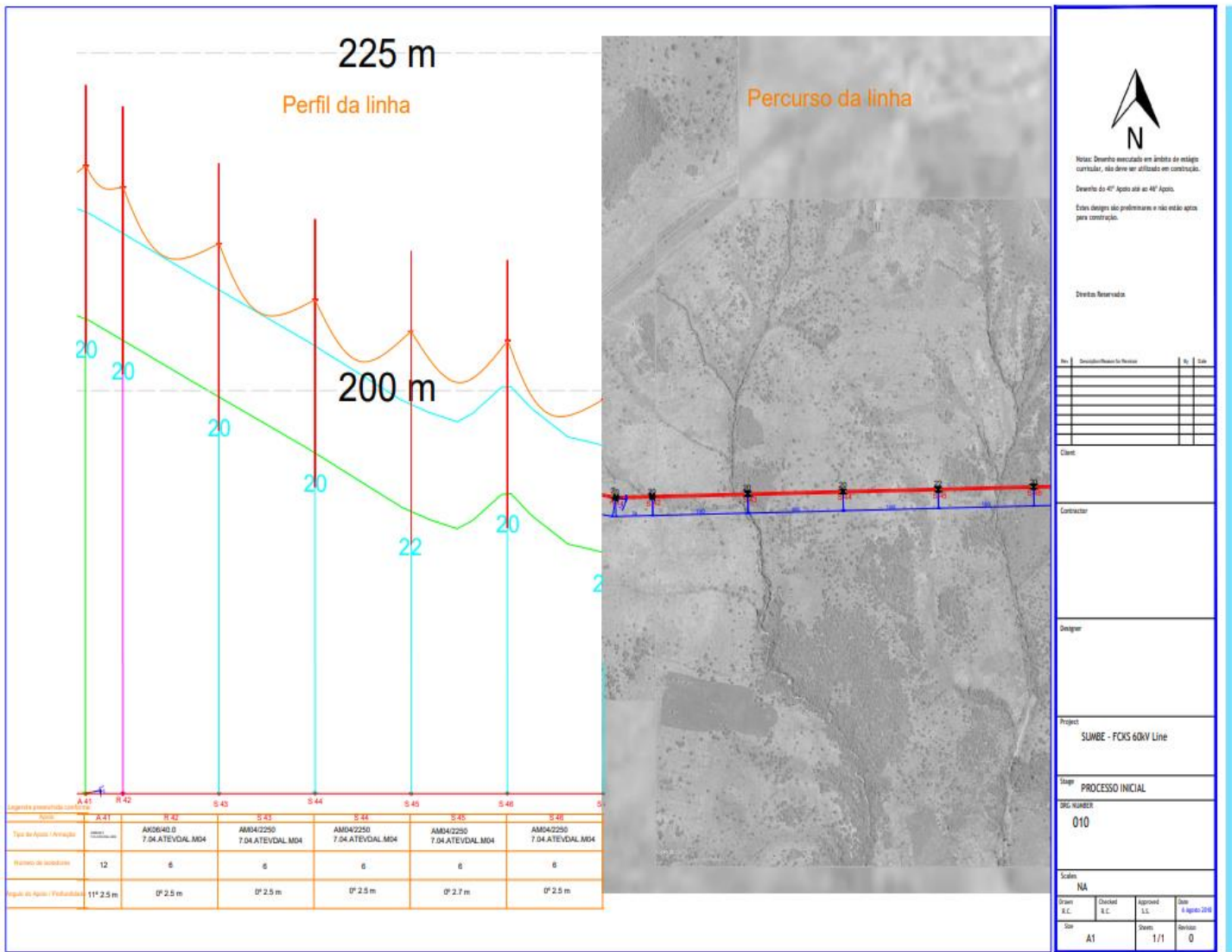
Project: **SUMBE - FCKS 60KV Line**

Stage: **PROCESSO INICIAL**

DWG NUMBER: **009**

Scales: **NA**

Drawn E.C.	Checked E.C.	Approved L.S.	Date
			4 Agosto 2018
Size A1	Sheet 1/1	Revised 0	



N

Notas: Desenho executado em âmbito de estudos
curatórios. Não deve ser utilizado em construção.

Desenho de 4^o Apoio até ao 4^o Apoio.

Outros desenhos não preliminares e não estão aptos
para construção.

Desenho Reservado

Rev.	Descrição/Revisão	Fl.	Total

Client: _____

Contractor: _____

Designer: _____

Project: **SUMBE - FCKS 60KV Line**

Stage: **PROCESSO INICIAL**

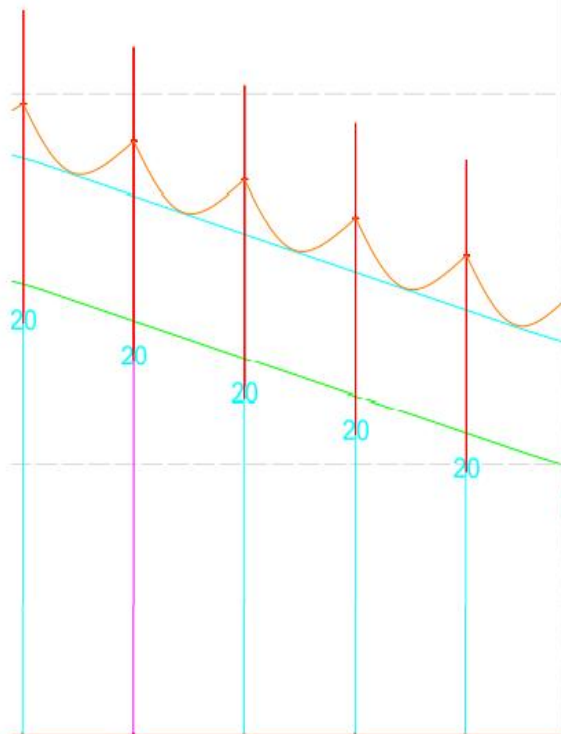
DWG NUMBER: **010**

Scale: **NA**

Draw S.C.	Checked S.C.	Approved S.S.	Date
			6 Agosto 2016

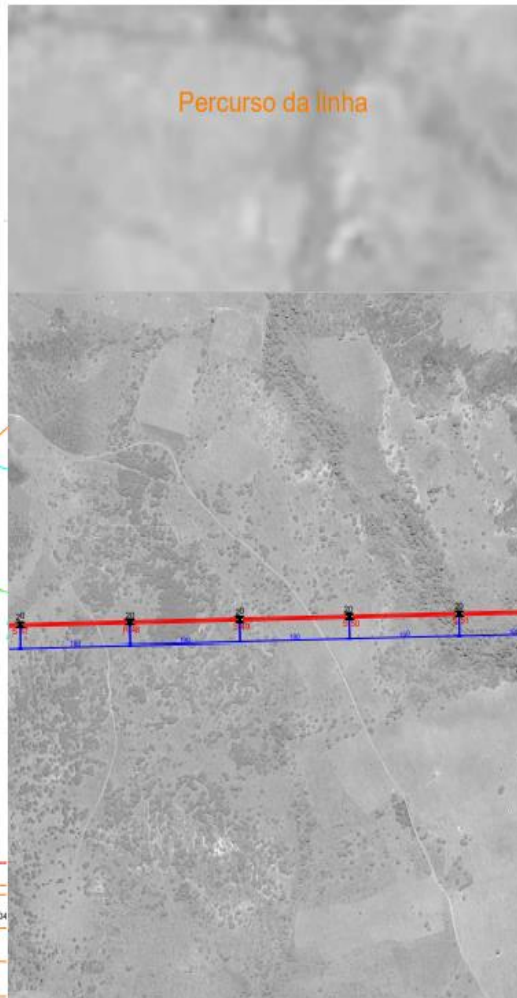
Size	Scale	Revisions
A1	1/1	0

Perfil da linha



Legenda pontos de curva	S 47	R 48	S 49	S 50	S 51
Apelo	S 47	R 48	S 49	S 50	S 51
Tipos de Apoio / Torção	AM04/2250 7.04.ATEVDAL.M04	AM08/6000 7.01.ATEVDAL.M08	AM04/2250 7.04.ATEVDAL.M04	AM04/2250 7.04.ATEVDAL.M04	AM04/2250 7.04.ATEVDAL.M04
Número de cabos	6	12	6	6	6
Angulo de Apoio / Profundidade	0° 2.0 m	0° 2.0 m	0° 2.0 m	0° 3.6 m	0° 2.0 m

Percurso da linha



Nota: Desenho executado em âmbito de estágio curricular. Não deve ser utilizado em construção.
Desenho de 4º Apoio até ao 5º Apoio.

Este desenho não preliminar e não está apto para construção.

Divisão Revisões

Rev.	Descrição/Revisão	Por	Data

Class.

Contractor

Designer

Project
SUNBE - FCKS 60KV Line

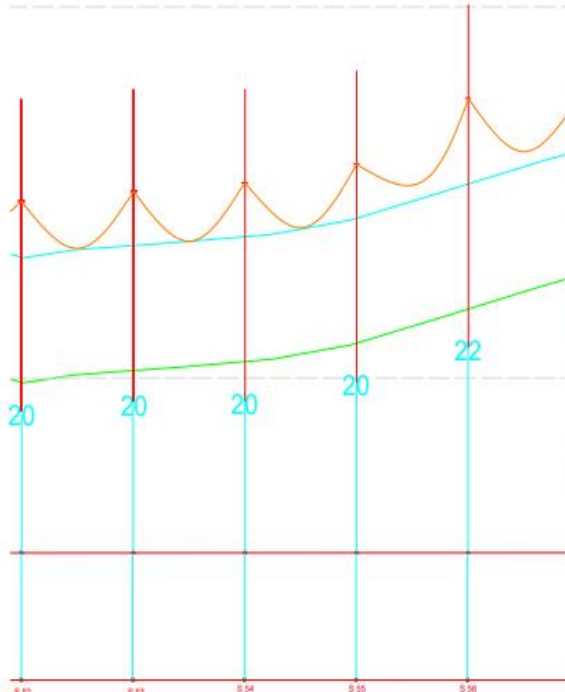
Stage
PROJECÇÃO INICIAL

DWG NUMBER
011

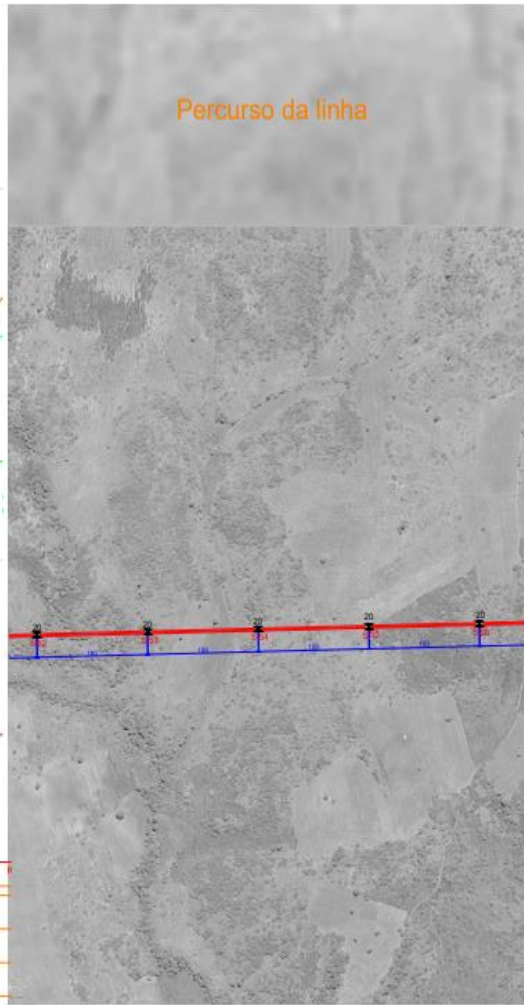
Scales
NA

Drawn S.C.	Checked S.C.	Approved S.L.	Date
A1		1/1	0

Perfil da linha



Percurso da linha



Legenda apresentada conforme	S 52	S 53	S 54	S 55	S 56
Nome	S 52	S 53	S 54	S 55	S 56
Nome Apoio / Atrelado	AMD42250 7.04.ATEVDAL.M04	AMD42250 7.04.ATEVDAL.M04	AMD42250 7.04.ATEVDAL.M04	AMD42250 7.04.ATEVDAL.M04	AMD42250 7.04.ATEVDAL.M04
Número de trilhoes	6	6	6	6	6
Altura do Apoio / Profundidade	0'2.5 m	0'2.5 m	0'2.5 m	0'2.5 m	0'2.5 m



Nota: Desenho executado em âmbito de estágio curricular, não deve ser utilizado em construção.
Desenho de 5º Ano até ao 5º Ano.

Estes desenhos são preliminares e não estão aptos para construção.

Direitos Reservados

Rev.	Descrição/Revisão de Projeto	Nº	Data

Classe

Contractor

Designer

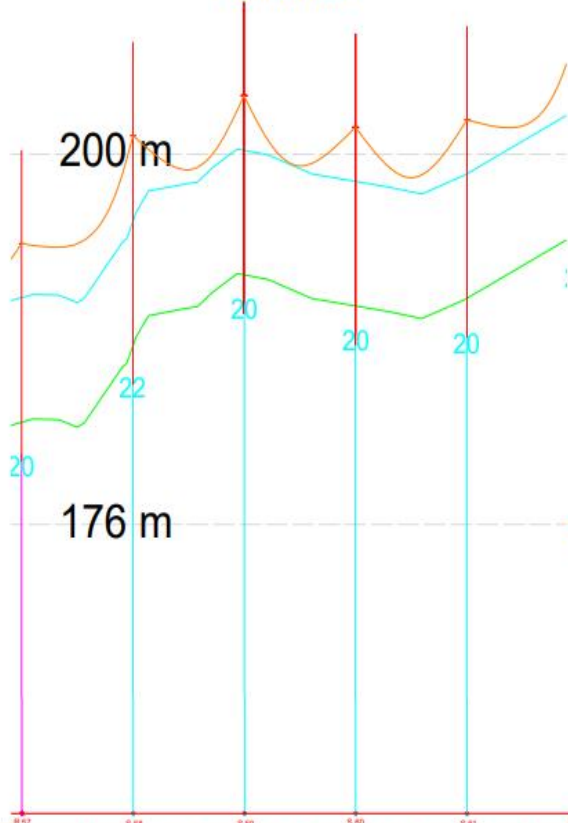
Project
SUNBE - FCXS 60KV Line

Stage
PROCESSO INICIAL

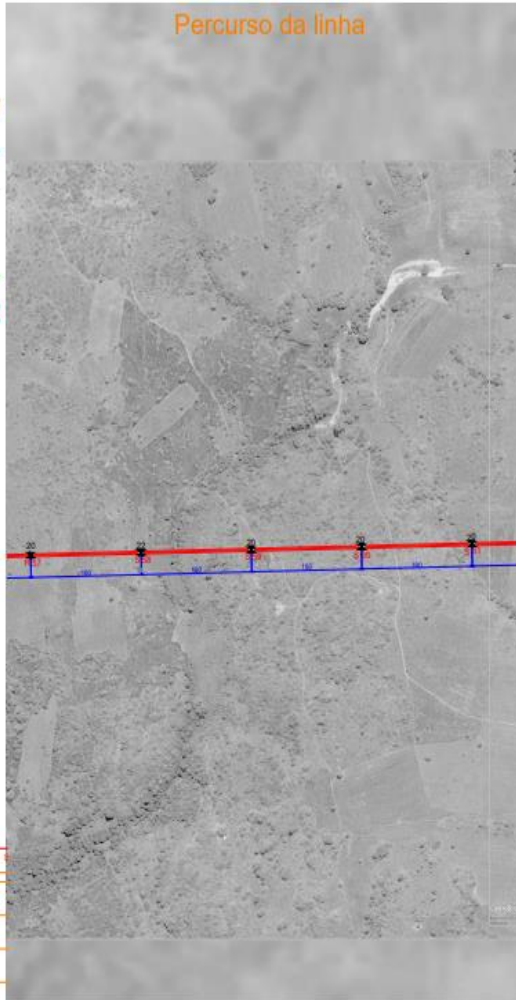
DRG NUMBER
012

Scale			
Drawn	Checked	Approved	Date
N.C.	N.C.	S.S.	6 Agosto 2018
Size		Drawn	Revision
A1		1/1	0

Perfil da linha



Percurso da linha



Estação	S 57	S 58	S 59	S 60	S 61
Nome	R 57	S 58	S 59	S 60	S 61
Nome do Apoio / Armazenagem	AMD42250 7.04.ATEVDAL.M04	AMD42250 7.04.ATEVDAL.M04	AMD42250 7.04.ATEVDAL.M04	AMD42250 7.04.ATEVDAL.M04	AMD42250 7.04.ATEVDAL.M04
Numero de unidades	12	6	6	6	6
Altura do Apoio / Profundidade	0 ^m 2.5 m	0 ^m 2.7 m	0 ^m 2.5 m	0 ^m 2.5 m	0 ^m 2.5 m



Nota: Desenho executado em âmbito de estágio curricular, não deve ser utilizado em construção.
Desenho de 5^a Apoio até ao 5^o Apoio.

Estes desenhos são preliminares e não estão aptos para construção.

Direitos Reservados

No.	Descrição/Revisão/Revisão	No.	Data

Classe

Contractor

Designar

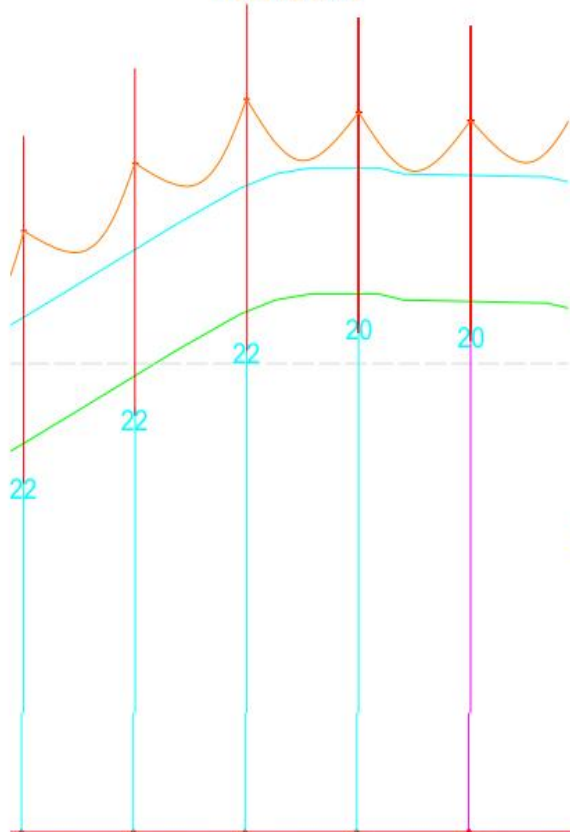
Project
SUMBE - FCKS 60KV Line

Stage
PROCESSO INICIAL

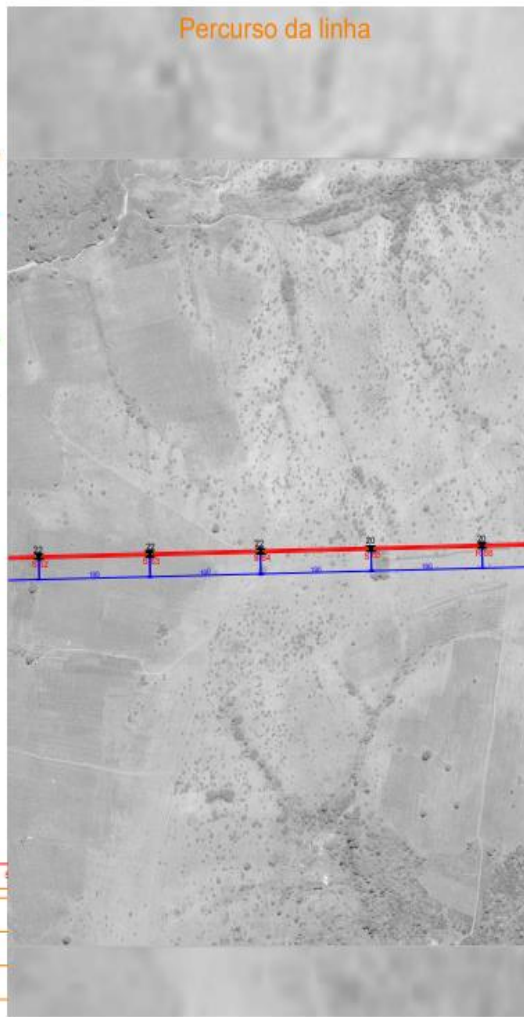
DES. NÚMERO
013

Nome	Checked	Approved	Date
A.C.	E.C.	E.S.	4 agosto 2018
A1		1/1	0

Perfil da linha



Percurso da linha



Legenda para esta planilha	S 62	S 63	S 64	S 65	R 66
Nome	S 62	S 63	S 64	S 65	R 66
Tipo de Apoio / Atuação	AM042250 7.04 ATEVDAL M04	AM042250 7.04 ATEVDAL M04	AM042250 7.04 ATEVDAL M04	AM042250 7.04 ATEVDAL M04	AM04006 7.04 ATEVDAL M08
Numero de unidades	6	6	6	6	12
Apogio do Apoio / Profundidade	0° 2.7 m	0° 2.7 m	0° 2.7 m	0° 2.5 m	0° 2.5 m



Nota: Desenho executado em âmbito de estágio curricular, não deve ser utilizado em construção.
 Desenho de 02° Apoio até ao 05° Apoio.
 Estes desenhos são preliminares e não estão aptos para construção.

Desenhos Revisados

Rev.	Descrição/Revisão do Projeto	Rev.	Data

Classe

Contractor

Designer

Project
SUMBE - FCKS 60KV Line

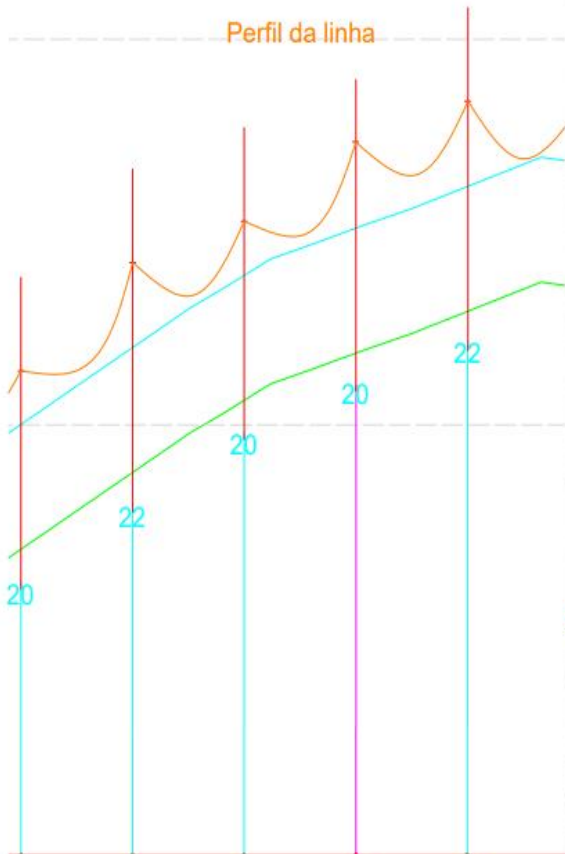
Stage
PROCESSO INICIAL
DWG NUMBER
014

Scales
NA

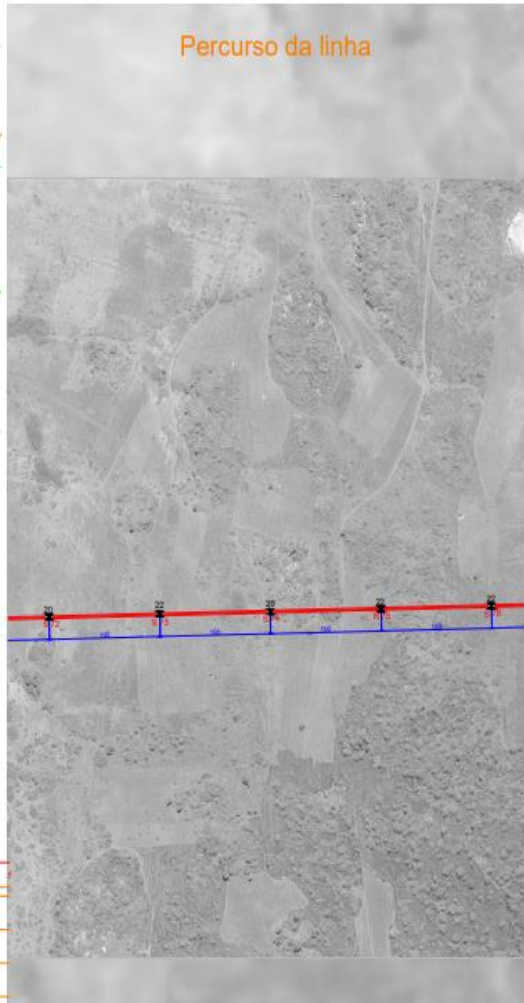
Drawn E.C.	Checked E.C.	Approved S.L.	Date 6 Agosto 2018

Size
A1
Sheets
1/1
Revisions
0

Perfil da linha



Percurso da linha



Legenda geometria contornos	S 72	S 73	S 74	R 75	S 76
Station	S 72	S 73	S 74	R 75	S 76
Tipos de Apoio / Armado	AM042250 7.04.ATEVDAL.M04	AM042250 7.04.ATEVDAL.M04	AM042250 7.04.ATEVDAL.M04	AM044026 7.04.ATEVDAL.M08	AM042250 7.04.ATEVDAL.M04
Numero de cabos/condutores	6	6	6	12	6
Ángulo de Apoio / Proximidade	0° 2.5 m	0° 2.7 m	0° 2.5 m	0° 2.7 m	0° 2.5 m



Nota: Desenho executado em âmbito de estudo preliminar, não deve ser utilizado em construção.
 Desenho do 7º Apoio até ao 10º Apoio.
 Estes desenhos são preliminares e não estão aptos para construção.

Reservados

No.	Descrição/Revisão de Projeto	No.	Data

Client

Contractor

Designer

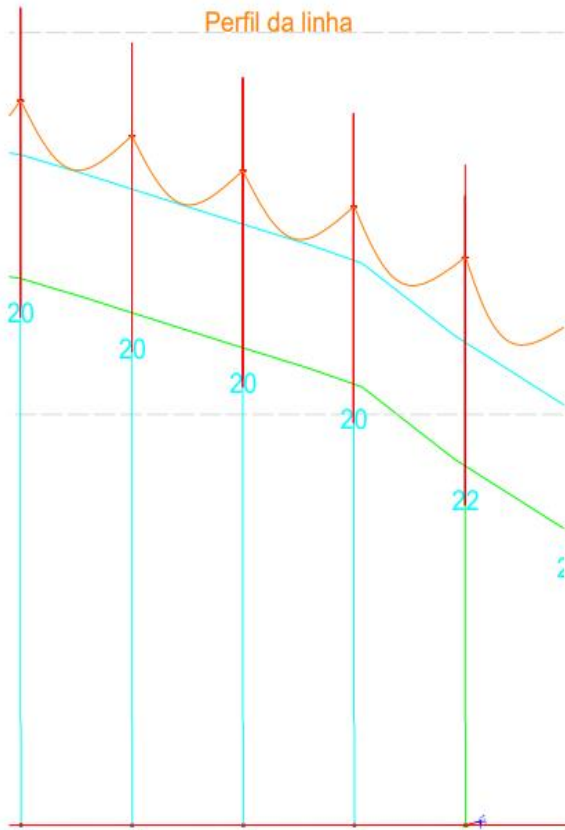
Project
SUNBE - FCKS 60kV Line

Stage
PROCESSO INICIAL

Sheet NUMBER
016

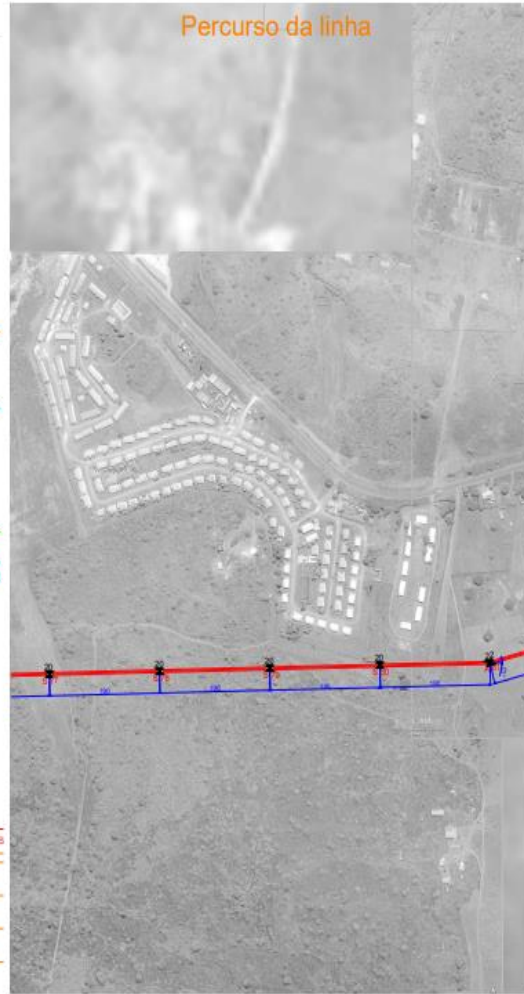
Scales			
Drawn	Checked	Approved	Date
F.C.	R.C.	S.S.	4 Agosto 2016
A1	1/1	0	

Perfil da linha



Legenda apresentada conforme	S 77	S 78	S 79	S 80	A 81
Nome	S 77	S 78	S 79	S 80	A 81
Tipo de Apoio / Fundação	AM04/2250 7.04 ATEVDAL.M04	AM04/2250 7.04 ATEVDAL.M04	AM04/2250 7.04 ATEVDAL.M04	AM04/2250 7.04 ATEVDAL.M04	AM06/2008 7.04 ATEVDAL.M08
Numero de cabos	6	6	6	6	12
Regulo de Apoio / Potenciaisidade	0' 2.5 m	0' 2.5 m	0' 2.5 m	0' 2.5 m	13' 2.7 m

Percurso da linha



Nota: Desenho executado em âmbito de estágio curricular, não deve ser utilizado em construção.
Desenho do 7º Agosto até ao 8º Agosto.

Estes desenhos são preliminares e não estão aptos para construção.

Desenho Reservado

No.	Descrição/Revisão/Revisão	Ar.	Data

Client: _____

Contractor: _____

Designer: _____

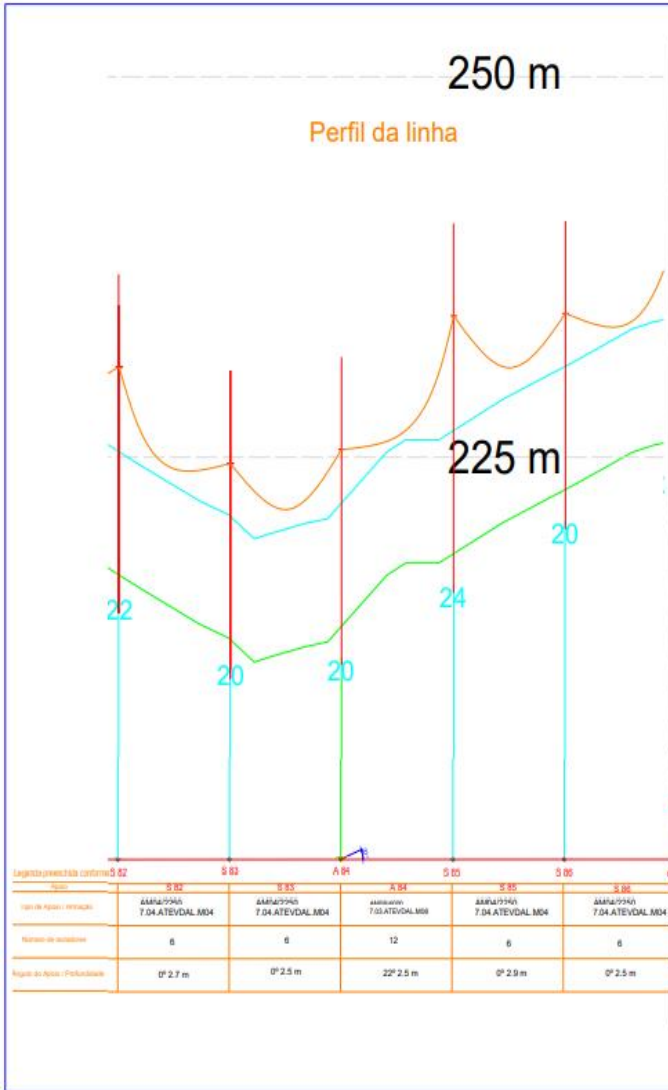
Project: **SUMBE - FCKS 60KV Line**

Stage: **PROCESSO INICIAL**

DWG NUMBER: **017**

Scale: **NA**

Drawn	Checked	Approved	Date
R.C.	R.C.	S.S.	8 Agosto 2018
A1	1/1	0	



Notas: Desenho executado em âmbito de estágio curricular, não deve ser utilizado em construção.
 Desenho do 82º Apoio até ao 86º Apoio.
 Estes desenhos são preliminares e não estão aptos para construção.

Direitos Reservados

No.	Designação/Descrição da Tarefa	Id.	Car.

Client: _____
 Contractor: _____
 Designer: _____

Project: **SUMBE - FCKS 60kV Line**

Stage: **PROCESSO INICIAL**

DFC NUMBER: **018**

Scale: **NA**

Drawn	Checked	Approved	Date
E.C.	E.C.	E.S.	
			4 Agosto 2018

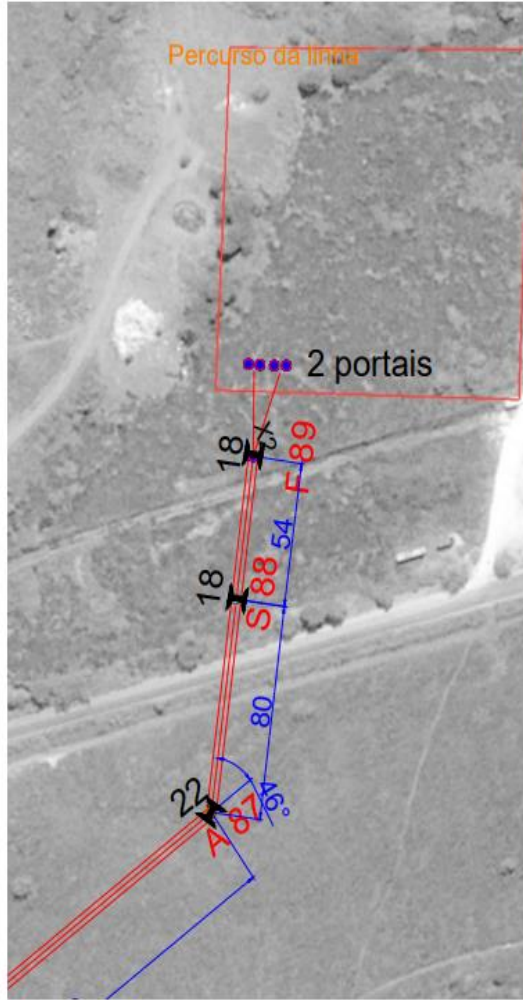
Sheet	Total	Revised
A1	1/1	0

Perfil da linha



Legenda geometria condutores	A 07	S 08	F 09
Tipo de Apoio / Armada	LMD4		
Número de condutores	12	6	12
Ángulo de Apoio / Profundidade	40° 2.7 m	0° 2.3 m	0° 2.3 m

Percurso da linha



Nota: Desenho executado em âmbito de estudo preliminar, não deve ser utilizado em construção.
Desenho de 8ª Edição até a 8ª Edição.

Este desenho não preliminar e não está apto para construção.

Direitos Reservados

Rev.	Descrição/Revisão	Por.	Data

Client

Contractor

Designer

Project
SMBE - FCKS 60KV Line

Stage
PROCESSO INICIAL

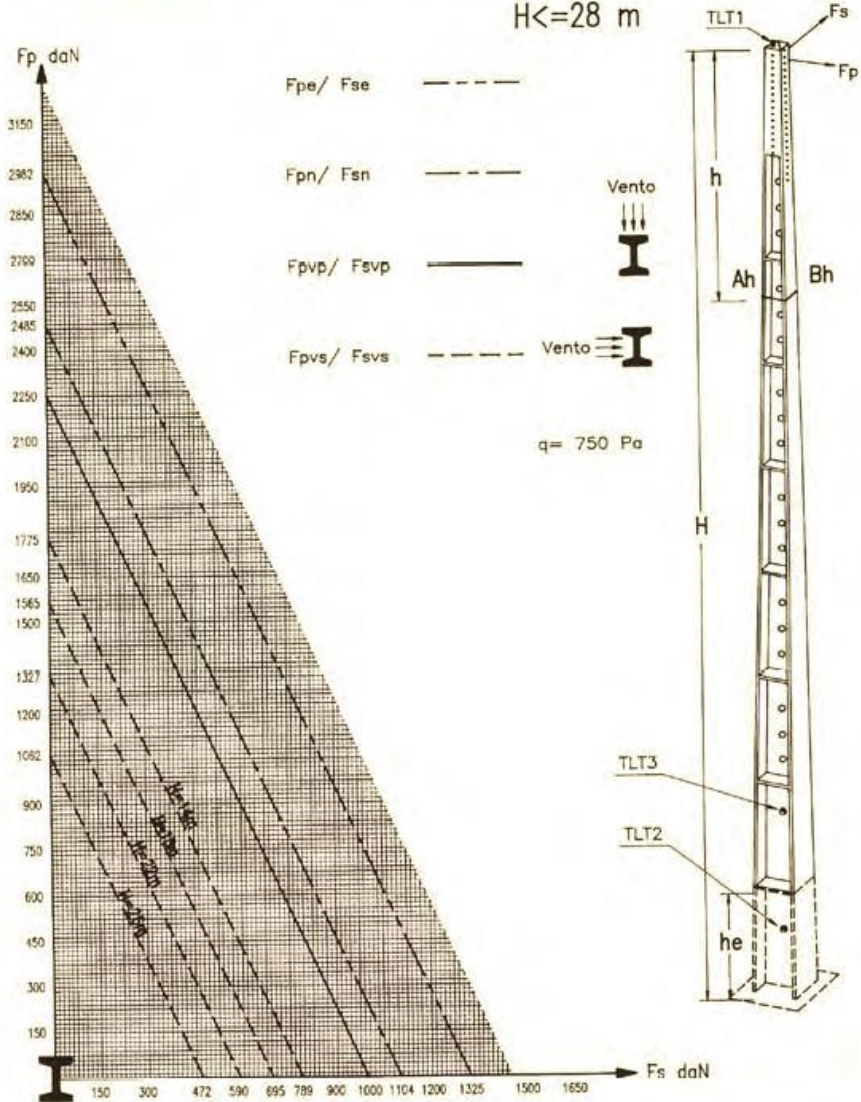
DWG NUMBER
019

Scale			
Scale	Checked S.C.	Approved S.S.	Date
N/A			4 April 2018
Size	Sheet	Revisions	
A1	1/1	0	

Anexo B. Apoio de Betão AM04 – (Apoio de Alinhamento em Suspensão)



MM04/2250
AM04/2250
H ≤ 28 m



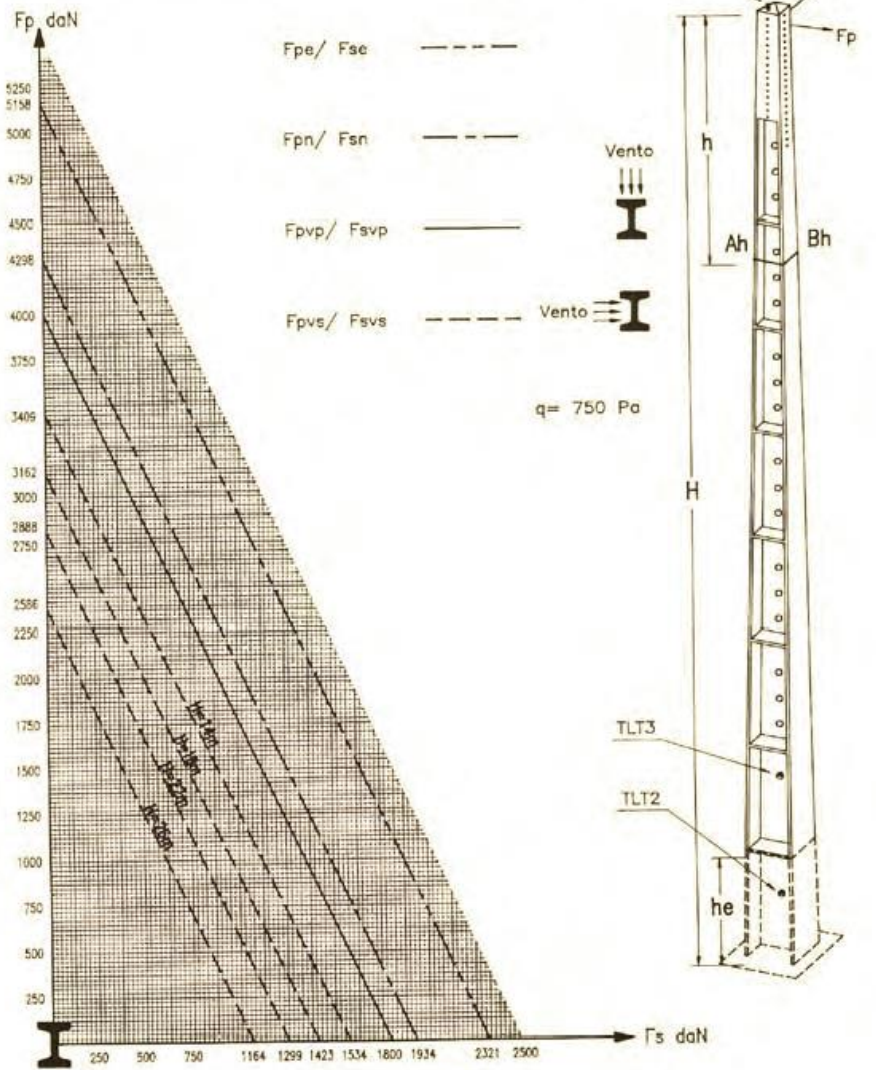
Data	97/10/01	Des.	<i>[Signature]</i>	Visto	<i>[Signature]</i>	Serie : Diagramas	Nº 2 de 8
------	----------	------	--------------------	-------	--------------------	-------------------	-----------

Anexo C. Apoio de Betão AM08 – (Apoio de Reforço)



AM08/4000

H<=28 m

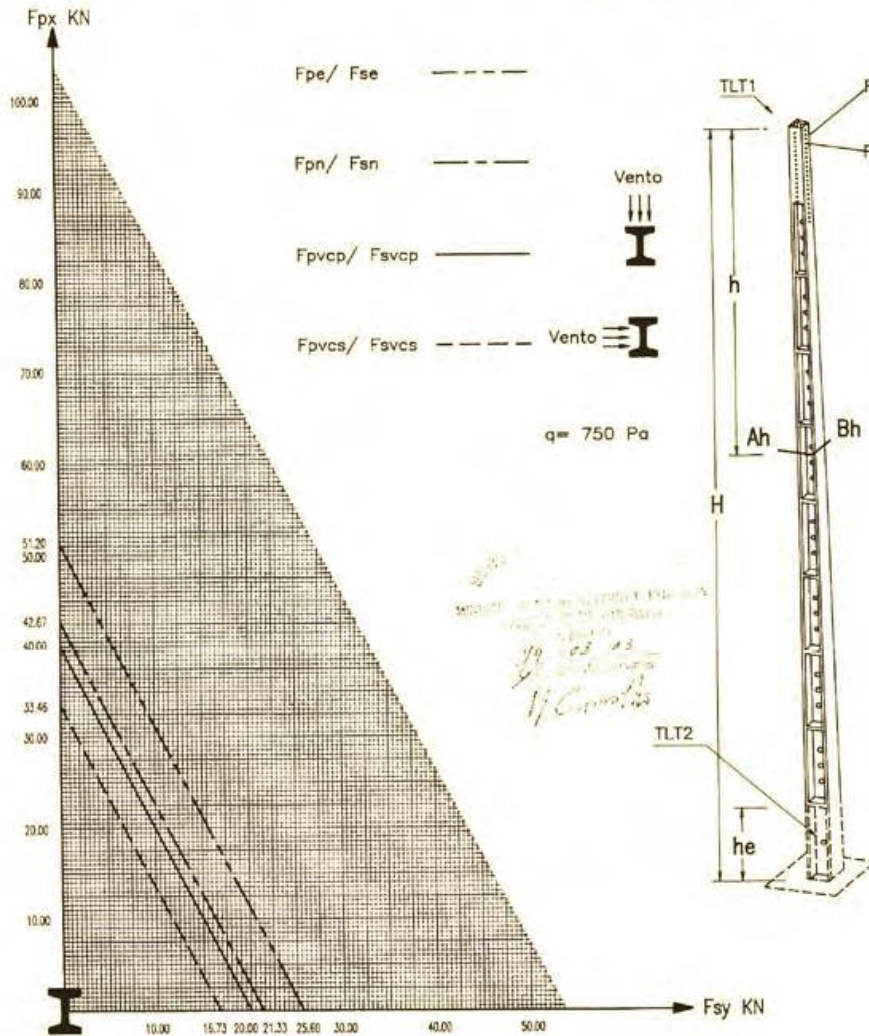


Data	97/10/01	Des.	<i>Almeida</i>	Visto	<i>CA</i>	Serie : Diagramas	Nº 244
------	----------	------	----------------	-------	-----------	-------------------	--------

Anexo D. Apoio de Betão K06 – (Apoio de Reforço)


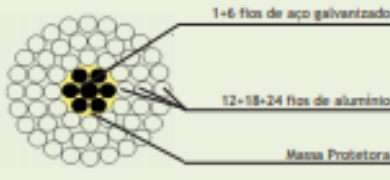


POSTE K06/40.00/20.00
H<=32 m




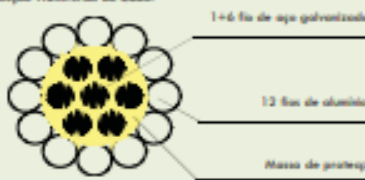
Data	93/12/23	Des.	Olinda	Visto	OR	Serie : Diagramas	Nº	173
------	----------	------	--------	-------	----	-------------------	----	-----

Anexo E. Ficha Técnica – Cabo Condutor (ACSR - Crow)

		FICHA TÉCNICA		FT-CAA/342/EN/00-3
				página 1/3
Tipo	Designação	Designação	Norma	
Cabo de Al. Aço tipo ACSR	362-AL1/47ST1A Crow	54/7	EN 50182 opt.	
Descrição		Unidades	Características	
1. Fios de Aço (ST1A)				
Número de fios	-	-	7	
Diâmetro dos fios	mm	-	2,92	
Área dos fios	mm ²	-	6,70	
Tensão de Ruptura mínima a 1% de alongamento	Mpa	-	1.140	
Tensão de Ruptura mínima dos fios	Mpa	-	1.350	
Alongamento mínimo dos fios (em 250 mm)	%	-	3,5	
Peso mínimo de zinco (classe I)	g/m ²	-	230	
2. Fios de Alumínio				
Número de fios	-	-	54	
Diâmetro dos fios	mm	-	2,92	
Área dos fios	mm ²	-	6,70	
Tensão de Ruptura mínima dos fios	Mpa	-	170	
Resistividade máxima dos fios	Ohm.mm ² /m	-	0,028264	
3. Cabo Completo				
Área total do Cabo	mm ²	-	408,49	
Diâmetro total do Cabo	mm	-	26,28	
Peso do Aço	Kg/Km	-	367	
Peso do Alumínio	Kg/Km	-	1.000	
Peso total do Cabo	Kg/Km	-	1.367	
Peso total do Cabo lubrificado	Kg/Km	-	1.376	
Resistência eléctrica máx. a 20 °C	Ohm/Km	-	0,0799	
Modulo de elasticidade final	N/mm ²	-	68.000	
Coefficiente de dilatação linear	1/°C	-	19,3x10 ⁻⁶	
Carga de ruptura nominal	KN	-	114,9	
Relação de cabecamento				
Camada Interior - 6 fios de aço (sentido S)	xD	-	16 a 26	
Camadas interiores - 12 e 18 fios de alumínio	xD	-	10 a 16	
Camada exterior -24 fios de alumínio (sentido Z)	xD	-	10 a 14	
<p>Obs: Utilização de aço ST1A, de acordo com a norma EN 50189.</p> <p>Utilização de alumínio AL1 de acordo com a norma EN 60889.</p> <p>O cabo será protegido com massa lubrificante com um ponto de gota mínimo de 100°C, de acordo com a EN 50182 (caso 1). O peso de massa protectora estará compreendido entre 7,4 e 11,2g/m.</p>		<p>Seção Transversal do Cabo</p>  <p>1-6 fios de aço galvanizado</p> <p>12-18-24 fios de alumínio</p> <p>Massa Protetora</p>		
		Serviço Tecnologia		
DATA		28-Nov-12		
SUBSCRIÇÃO		Data Início		

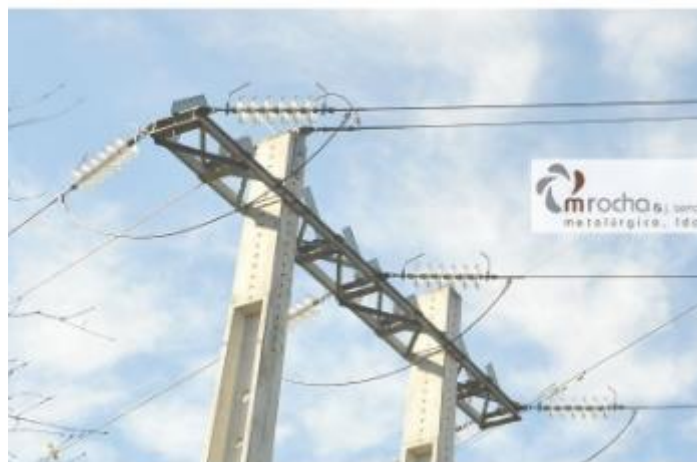
TC-001.1

Anexo F. Ficha Técnica – Cabo de Guarda (ACSR - Guineia)

		FICHA TÉCNICA		Ref.: FT-CAA/004/EN/01-6
				pág. 1/3
Tipo: Cabo de Al. Apo tipo ACSR	Designação: 80-AL1/47-ST1A "Guineia 130"	Composição: 12/7	Norma: EN 50182	
Descrição	Unidades	Características		
1. Fios de Aço (ST1A)				
Número de fios	-	7		
Diâmetro dos fios	mm	2,92		
Área dos fios	mm ²	6,70		
Tensão de Ruptura mínima a 1% de alongamento	Mpa	1.140		
Tensão de Ruptura mínima dos fios	Mpa	1.310		
Alongamento mínimo dos fios (em 250 mm)	%	3,5		
Peso mínimo de zinco (classe A)	g/m ²	230		
2. Fios de Alumínio				
Número de fios	-	12		
Diâmetro dos fios	mm	2,92		
Área dos fios	mm ²	6,70		
Tensão de Ruptura mínima dos fios	Mpa	170		
Resistividade máxima dos fios	Ohm.mm ² /m	0,028264		
3. Cabo Completo				
Área total do Cabo	mm ²	127,24		
Diâmetro total do Cabo	mm	14,60		
Peso do Aço	Kg/Km	366,4		
Peso do Alumínio	Kg/Km	221,9		
Peso total do Cabo	Kg/Km	588,3		
Peso total do Cabo lubrificado	Kg/Km	597,6		
Resistência eléctrica máx. a 20 °C	Ohm/Km	0,3594		
Modulo de elasticidade final	N/mm ²	104.000		
Coefficiente de dilatação linear	1/°C	15,3x10 ⁻⁶		
Carga de ruptura nominal	KN	66,46		
Relação de cableamento				
Camada interior - 6 fios de aço (sentido S)	xD	16 a 26		
Camada exterior -12 fios de alumínio (sentido Z)	xD	10 a 14		
Obs: Utilização de aço ST1A, de acordo com a norma EN 50189. Utilização de alumínio AL1 de acordo com a norma EN 60889. O cabo será protegido com massa lubrificante com um ponto de gota mínimo de 100°C, de acordo com a EN 50182 (parte 1). O peso de massa protetora estará compreendido entre 7,4 e 11,2g/m.		Secção Transversal do Cabo: 		
		1+6 fio de aço galvanizado		
		12 fios de alumínio		
		Massa de proteção		
		Aprovação:		
DATA:		21-Nov-12		
RUBRICA:		Alde Sousa		

SEC 001-1

Anexo G. PRF (Travessa de Pórtico de reforço ou Fim de linha)



Referência	Tipo	Utilização	Peso da Armação (kg)	Esforço do Poste (daN)
7.08.ATPRF.M04	Pórtico	Reforço / Fim de Linha	378	2250
7.08.ATPRF.M06	Pórtico	Reforço / Fim de Linha	378	2750
7.08.ATPRF.M08	Pórtico	Reforço / Fim de Linha	378	4000
7.08.ATPRF.M10	Pórtico	Reforço / Fim de Linha	378	5000
7.08.ATPRF.G08	Pórtico	Reforço / Fim de Linha	378	6000
7.08.ATPRF.G10	Pórtico	Reforço / Fim de Linha	378	7500
7.08.ATPRF.G12	Pórtico	Reforço / Fim de Linha	378	9000
7.08.ATPRF.G14	Pórtico	Reforço / Fim de Linha	378	11000

Anexo H. EVDAL (Armação em Esteira Vertical Dupla para Apoio de Alinhamento)



Referência	Tipo	Utilização	Peso da Armação (kg)	Esforço do Poste (daN)
7.04.ATEVDAL.P02	Esteira Vertical Dupla	Alinhamento	232	1200
7.04.ATEVDAL.P03	Esteira Vertical Dupla	Alinhamento	232	1400
7.04.ATEVDAL.P04	Esteira Vertical Dupla	Alinhamento	232	1600
7.04.ATEVDAL.M04	Esteira Vertical Dupla	Alinhamento	232	2250
7.04.ATEVDAL.M06	Esteira Vertical Dupla	Alinhamento	232	2750
7.04.ATEVDAL.M08	Esteira Vertical Dupla	Alinhamento	232	4000
7.04.ATEVDAL.M10	Esteira Vertical Dupla	Alinhamento	232	5000
7.04.ATEVDAL.G08	Esteira Vertical Dupla	Alinhamento	232	6000

Anexo I. EVDAN (Armação em Esteira Vertical Dupla para Apoio de Ângulo)



Referência	Tipo	Utilização	Peso da Armação (kg)	Esforço do Poste (daN)
7.03.ATEVDAN.M04	Esteira Vertical Dupla	Ângulo	559	2250
7.03.ATEVDAN.M06	Esteira Vertical Dupla	Ângulo	559	2750
7.03.ATEVDAN.M08	Esteira Vertical Dupla	Ângulo	559	4000
7.03.ATEVDAN.M10	Esteira Vertical Dupla	Ângulo	559	5000
7.03.ATEVDAN.G08	Esteira Vertical Dupla	Ângulo	559	6000
7.03.ATEVDAN.G10	Esteira Vertical Dupla	Ângulo	559	7500
7.03.ATEVDAN.G12	Esteira Vertical Dupla	Ângulo	559	9000
7.03.ATEVDAN.G14	Esteira Vertical Dupla	Ângulo	559	11000
7.03.ATEVDAN.G16	Esteira Vertical Dupla	Ângulo	559	12500
7.03.ATEVDAN.G18	Esteira Vertical Dupla	Ângulo	559	14500
7.03.ATEVDAN.G20	Esteira Vertical Dupla	Ângulo	559	16500

8. Referências Bibliográficas

- [1] EDP Distribuição, Rede de distribuição de Alta Tensão em Portugal, 2014
- [2] Transporte de energia eléctrica em corrente contínua – Voltimum.pt, Manuel Bolotinha, Outubro 2017
- [3] Disponível em <https://www.electronica-pt.com/corrente-alternada>
- [4] Redes aéreas de média tensão em cabo torçada, DRP-C11-603/N - EDP Distribuição, Julho 2019
- [5] Solidal – Catálogo de produtos, disponível em <https://www.solidal.pt/>
- [6] Conceitos Básicos de Linhas Aéreas de Alta e Muito Alta Tensão (Corrente Alternada) – Manuel Bolotinha, Maio 2018 (Livro)
- [7] Distribuição de Energia Elétrica em Média e Baixa Tensão – Manual, Manuel Bolotinha 2º Edição da engebook (Livro)
- [8] Manual de Ligações à rede eléctrica de Serviço Público, Guia Técnico e Logístico de boas práticas – Outubro 2018, 9ª Edição – EDP Distribuição, Disponível em www.edpdistribuicao.pt
- [9] Catálogo de Energia – Cabelte, disponível em <http://svrweb.cabelte.pt/pt-pt/>
- [10] Effects of Dynamic Line Rating on the Durability and Mechanical Strength of Aluminum Cable Steel Reinforced (ACSR) Conductors. Naim, Wadih & Morozovska, Kateryna & Hilber, Patrik, 2019.
- [11] Utilização de Cabos de Alta Temperatura em Linhas Aéreas em Média Tensão, Tiago Silva, 2015
- [12] Projeto de uma Linha Aérea de Alta Tensão. Viabilidade Técnica e Económica na Aplicação da Tecnologia Cross-Bonding numa Linha Subterrânea, Daniel Teixeira, Julho 2017
- [13] Projeto de Linha Aérea de Alta Tensão - Estudo sobre a utilização de Cabo de Guarda, Luís Rocha, Junho 2014
- [14] Projecto e Licenciamento de Linhas MT – Apoios, FEUP, imagem disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~ee99047/LNMT-Apoios.html>
- [15] Desenho da ESB Internacional - PG567-D020-250-009-005
- [16] Apoios para linhas aéreas – EDP Distribuição, DMA-C67-220/N, Dezembro 2000
- [17] Imagem disponível em: <https://transmissao108196393.com/2019/11/08/caracteristicas-fisicas-das-linhas-de-transmissao-cabos-condutores/>

- [18] Projeto de Torres Metálicas de Suporte de Cabos de Energia Elétrica – Ana Rodrigues, 2015
- [19] Apoios Estruturais em Sistemas Compósitos Comparação de tecnologias, José Ferreira, Dezembro de 2009
- [20] RSPoles – Catálogo de produtos, disponível em <https://www.rspoles.com/>
- [21] Desenhos Técnicos Normativos, Armações de Aço para Apoios de Betão de AT, EDP Distribuição – DMA-C67-605
- [22] Sistemas Elétricos de Energia I, Linhas de Transmissão FEUP, José Rui Ferreira 2004
- [23] Imagem disponível em: <https://www.electricaledition.com/2015/12/insulators-types-electrical-insulators-in-overhead-transmission-lines.html>
- [24] PPC Insulators – Catálogo de produtos, disponível em - isoladores te a passagem <https://www.ppcinsulators.com/products/transmission-and-distribution-insulators/>
- [25] Aluminium Alloy Conductors – Disponível em <http://www.aluminiumalloyconductors.com/>
- [26] M.rocha & J.Serra, Catálogo de Produtos, disponível em <https://www.mrjs.pt/>
- [27] Guia Técnico de terras 1ª parte – Ligações à terra - DRE-C11-040/N – EDP Distribuição, Disponível em www.edpdistribuicao.pt
- [28] Dispositivos para a proteção de avifauna – DFT-C11-310/N – EDP Distribuição, Disponível em www.edpdistribuicao.pt
- [29] Projecto de Linha de Alta Tensão e Estudo do Campo Electromagnético Produzido Pela linha, Idalina Ferreira 2007 – Disponível em <https://web.fe.up.pt/~ee02111/AO.html>
- [30] Projeto de Linha Aérea de Alta Tensão conforme a norma EN50341-1, Nuno Sequeira, Junho de 2009
- [31] Linhas de Transmissão de Energia Elétrica – FEUP, Távora, Francisco.
- [32] Imagem disponível em <https://opencadd.com.br/matlab-online/>