

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Dimensionamento Elétrico de Linhas de Média, Alta e Muito Alta Tensão

Pedro António Morgado Coelho



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: José Eduardo Roque Neves dos Santos

1 de outubro de 2024

Sumário

O dimensionamento elétrico é o processo de determinar a capacidade de uma linha elétrica para transportar uma determinada quantidade de energia elétrica com segurança e eficiência. O dimensionamento deve considerar uma série de fatores, incluindo os requisitos de segurança, os requisitos de desempenho, as características das linhas e as condições ambientais.

Para a realização desta dissertação foi impreterível efetuar um estudo sobre o dimensionamento elétrico para linhas de média, alta e muito alta tensão. O objetivo principal deste tema consiste em desenvolver uma folha de cálculo/*software* focalizada no cálculo elétrico de linhas aéreas de média, alta e muito alta tensão.

A presente dissertação, aborda os seguintes temas:

- Projeto de linhas elétricas;
- Sistemas elétricos de energia;
- Regimes estacionários do sistema elétrico de energia;
- Análise do regulamento de segurança de linhas elétricas de alta tensão;
- Análise das normas europeias (EN50341-17);
- Teoria do cálculo elétrico;
- Conhecimentos práticos sobre cálculos elétricos;
- Aplicação e demonstração de casos de estudo para dimensionamento de linhas aéreas.

As principais conclusões da dissertação são as seguintes:

- O dimensionamento elétrico de linhas de média, alta e muito alta tensão é uma tarefa complexa que requer conhecimentos especializados;
- O desenvolvimento de uma folha de cálculo/*software* focalizada no cálculo elétrico de linhas de média, alta e muito alta tensão é uma ferramenta valiosa que pode ajudar a agilizar e automatizar o processo de dimensionamento.

Palavras-chave: Dimensionamento elétrico, linhas elétricas, segurança, requisitos regulamentares, cálculos elétricos, *software*.

Abstract

Electrical sizing is the process of determining the capacity of a power line to carry a given amount of electrical energy safely and efficiently. Sizing must consider a number of factors, including safety requirements, performance requirements, line characteristics and environmental conditions.

In order to carry out this dissertation, it was essential to study electrical sizing for medium, high and very high voltage lines. The main objective of this topic is to develop a spreadsheet/software focused on the electrical calculation of medium, high and very high voltage overhead lines.

This dissertation covers the following topics:

- Power line design;
- Electrical power systems;
- Stationary regimes of the electrical power system;
- Analysis of safety regulations for high-voltage power lines;
- Analysis of European standards (EN50341-17);
- Electrical calculation theory;
- Practical knowledge of electrical calculations;
- Application and demonstration of case studies for sizing overhead lines.

The main conclusions of the dissertation are as follows:

- Electrical sizing of medium, high and very high voltage lines is a complex task that requires specialized knowledge;
- The development of a spreadsheet/software focused on the electrical calculation of medium, high and very high voltage lines is a valuable tool that can help speed up and automate the sizing process.

Keywords: Electrical sizing, electrical lines, safety, regulatory requirements, electrical calculations, *software*.

Agradecimentos

Quero agradecer à Value Element, empresa, que me acolheu durante o desenvolvimento da minha dissertação e disponibilizou os meios para concluir com sucesso esta dissertação. Como uma empresa é feita de pessoas, quero agradecer a todas as que nela trabalham, sem exceção, pois, com cada uma aprendi. Um agradecimento especial ao José Carlos e ao Nuno Silva, que me auxiliaram mais diretamente. Ainda, agradecer ao Marcelo Pereira pelos sábios conselhos.

Um especial agradecimento ao meu orientador e ilustre Professor da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, José Eduardo Roque Neves dos Santos. Sempre muito construtivo e prestável, permitindo-me, assim, concluir a dissertação.

Aos meus amigos, aos que me encorajaram a nunca desistir daquilo que quero e aos que me disseram aquilo que eu não queria ouvir, o meu obrigado.

À Carolina, quero agradecer por tornar o meu caminho mais fácil todos os dias. É a minha almofada e o meu despertador. Obrigado pelo carinho e paciência.

Quero agradecer e dedicar, à minha avó Lúcia e à minha Avó Dorvalina. Enquanto, puderam e podem semear a curiosidade de um dia ter um curso, mas mais que o curso, semearam o propósito de "ser alguém na vida" como elas diziam e dizem. Obrigado.

O maior e mais importante obrigado, perdoem-me os restantes, mas é reservado para os meus pais. Ao longo da minha jornada académica, felizmente, recheada de muitos obstáculos, o meu Pai e a minha Mãe, nunca me faltaram com nada e acreditaram sempre no meu valor. Muito obrigado.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Contextualização	1
1.3	Objetivo de desenvolvimento sustentável	2
1.4	Estrutura da Dissertação	2
2	Sistema de Energia Elétrica	4
2.1	Requisitos	4
2.2	Funcionamento e elementos da rede elétrica	6
2.2.1	Produção	6
2.2.2	Transporte	8
2.2.3	Distribuição	9
2.2.4	Comercialização e consumo	9
2.3	Linha elétrica	11
2.3.1	Linhas aéreas e subterrâneas	12
2.3.2	Componentes de uma linha elétrica	13
2.3.3	Fixadores para os condutores	26
2.4	Projeto de linhas aéreas	35
3	Teoria do Cálculo Elétrico	37
3.1	Objetivo	37
3.2	Caracterização da linha	37
3.2.1	Linha simples e linha dupla	37
3.2.2	Número de condutores por fase	37
3.2.3	Distância geométrica entre condutores	38
3.2.4	Características dos cabos condutores	41
3.3	Parâmetros meteorológicos	41
3.3.1	Método de Kuipers & Brown	41
3.4	Tensão de Transporte	42
3.5	Corrente Nominal	44
3.6	Resistência Elétrica	44
3.7	Indutância	47
3.8	Reactância	48
3.9	Capacidade	48
3.10	Susceptância	49
3.11	Condutância	49
3.12	Impedância	49
3.13	Admitância	50
3.14	Impedância característica	50

3.15	Perdas da linha	50
3.16	Queda de tensão	51
4	Software de Cálculo Desenvolvido	52
4.1	Apresentação do programa	52
4.2	Bases de dados desenvolvidas	54
4.3	Funcionalidades	58
4.3.1	Funcionalidades do cálculo elétrico	58
4.4	Manual de utilização	62
5	Verificações e Discussão de Resultados	73
5.1	Seleção do dimensionamento	73
5.1.1	Dimensionamento otimizado em regime permanente	73
5.2	Descrição da linha	74
5.3	Resumo do cálculo elétrico	77
5.4	Demonstração do Dimensionamento do cálculo elétrico	78
5.4.1	Cálculo da Distância Geométrica entre Fases para a Armação Dupla BWA	79
5.4.2	Cálculo do Raio Fictício para o Condutor Zebra485	81
5.4.3	Cálculo do Coeficiente de Auto-indução	82
5.4.4	Cálculo da Reactância da Linha de Transmissão	83
5.4.5	Cálculo da Reactância Total da Linha	84
5.4.6	Cálculo da Corrente Máxima da Linha de Transmissão	84
5.4.7	Cálculo da Resistência em Corrente Contínua	85
5.4.8	Cálculo da Resistência em Corrente Alternada	86
5.4.9	Cálculo da Resistência Total da Linha	88
5.4.10	Cálculo das Perdas de Energia da Linha	89
5.4.11	Cálculo da Queda de Tensão	90
5.5	Discussão dos resultados	92
6	Conclusão	96
6.1	Possíveis melhorias	97
	Referências	98

Lista de Figuras

2.1	Ilustração de uma linha aérea	5
2.2	Potência instalada em Portugal [20]	7
2.3	Energia de produção para cada tipo de energia e o saldo importador [20]	7
2.4	Repartição da produção de energia [20]	8
2.5	Evolução do consumo em 2023 [20]	10
2.6	Produção e consumo em Portugal [20]	11
2.7	Rede Radial, Rede Malhada e Rede Malhada com Exploração Radial	12
2.8	Condutor unipolar, monopolar ou monocondutor, com alma circular	14
2.9	Condutor unipolar, monopolar ou monocondutor, com alma setorial	15
2.10	Condutor multipolar, com alma circular	15
2.11	Condutor multipolar, com alma setorial	15
2.12	Ilustração de uma cadeia de amarração [23]	17
2.13	Ilustração de uma cadeia de suspensão [23]	18
2.14	Apoio com função de alinhamento [23]	19
2.15	Apoio com função de ângulo [23]	20
2.16	Apoio com função de reforço de alinhamento [23]	21
2.17	Apoio com função de reforço de derivação em alinhamento[23]	21
2.18	Apoio com função de derivação em alinhamento [23]	22
2.19	Apoio com função de fim de linha [23]	23
2.20	Amortecedor <i>Stockbridge</i>	26
2.21	Balizagem aeronáutica diurna [23]	28
2.22	Ilustração de um <i>Firefly Bird Flappers</i> [23]	31
2.23	Ilustração de um <i>Bird Flight Diverters</i> [23]	31
2.24	Ilustração de um guarda-chuva de anti-nidificação[23]	32
2.25	Ilustração de uma seta assimétrica de anti-nidificação[23]	33
2.26	Ilustração de uma plataforma de nidificação[23]	33
3.1	Espaçador para dois condutores da mesma fase [4].	38
3.2	Esboço de uma silhueta de um apoio com armação simples em galhardete.	39
3.3	Esboço de uma silhueta de um apoio com armação dupla.	40
4.1	Esquema da arquitetura do InLinhas	53
4.2	Armação em esteira vertical dupla para poste de alinhamento, para linhas de AT [10]	54
4.3	Exemplo retirado da base de dados para o cálculo da distância geométrica entre condutores para um apoio metálico para linha simples	55
4.4	Exemplo retirado da base de dados para o cálculo da distância geométrica entre condutores para um apoio de betão para linha simples	55
4.5	Exemplo retirado da base de dados para o cálculo da distância geométrica entre condutores para um apoio de betão para linha dupla	56

4.6	Exemplo retirado da base de dados para o cálculo da distância geométrica entre condutores para um apoio de metal para linha dupla	57
4.7	Menu inicial do programa InLinhas	62
4.8	Botão que regressa ao menu inicial do programa InLinhas	63
4.9	Botão que permite aceder ao menu para adicionar um apoio à base de dados	63
4.10	Botão que permite aceder ao menu do cálculo elétrico	63
4.11	Botão que permite aceder ao menu para adicionar um cabo condutor à base de dados	63
4.12	Menu para adicionar um novo cabo	64
4.13	Menu para adicionar um novo apoio	64
4.14	Adicionar um novo apoio introduzindo a distância geométrica entre fases	65
4.15	Menu de seleção do tipo de apoio que quer calcular a distância geométrica entre fases	65
4.16	Menu interativo para introdução de coordenadas de cada condutor para um apoio simples	66
4.17	Menu interativo para introdução de coordenadas de cada condutor para um apoio duplo	66
4.18	Botão que permite introduzir uma possível localização de um condutor	67
4.19	Janela que permite introduzir a coordenada X do condutor	67
4.20	Janela que permite introduzir a coordenada Y do condutor	68
4.21	Modificação visual do grafismo de introdução de condutores de modo que o utilizador reconheça quantos condutores foram introduzidos	68
4.22	Menu de seleção do tipo de dimensionamento elétrico pretendido	69
4.23	Dimensionamento elétrico teórico segundo o RSLEAT	70
4.24	Dimensionamento elétrico em regime permanente	70
4.25	Dimensionamento elétrico em regime permanente otimizado	71
4.26	Menu onde se pode manipular os cabos retornados consoante os valores pretendidos da temperatura e queda de tensão	72
5.1	Catálogo da REN de um poste tipo BWA	76
5.2	Dados necessários para o cálculo da queda de tensão e perda de energia	77
5.3	Dados necessários para o cálculo da resistência da linha	77
5.4	Dados necessários para o cálculo da corrente máxima da linha	77
5.5	Dados necessários para o cálculo da reactância	78
5.6	Dados necessários para o cálculo do Coeficiente de auto-indução	78
5.7	Dados necessários para o cálculo do Raio fictício	78
5.8	Esboço auxiliar do apoio BWA	79
5.9	Introdução dos dados de entrada	92
5.10	Resultados dos cálculos para alguns cabos, inclusive o cabo de estudo	92
5.11	Resultados dos cálculos do modelo de Kuipers-Brown para alguns cabos, inclusive o cabo de estudo	93
5.12	Resultados dos cálculos para alguns cabos, inclusive o cabo de estudo	93
5.13	Menu de cabos final onde o utilizador pode manipular a temperatura máxima de 85°C e 5% queda de tensão	94

Lista de Tabelas

2.1	Classes das tensões nominais definidas pelo RSLEAT, para corrente alternada . . .	8
2.2	Características do Cobre e do Alumínio	16
2.3	Armações para apoios em betão para linhas de MT	24
2.4	Armações para apoios em betão para linhas de AT	24
2.5	Coeficientes de compressibilidade segundo o tipo de terreno [26]	25
2.6	Tipologias mais perigosas consoante a interação direta entre aves e as linhas aéreas	30
3.1	Tensão nominal e estipulada para cabos de MT, AT e MAT	43
3.2	Coeficientes do efeito de proximidade e efeito pelicular para condutores de cobre	46
3.3	Coeficientes do efeito de proximidade e efeito pelicular para condutores de alumínio	47
5.1	Características da linha necessárias para o dimensionamento otimizado do InLinhas	75
5.2	Características do cabo Zebra485	79

Lista de Equações

2.1	A profundidade mínima de enterramento de poste de betão	25
2.2	Tensão em elétrodos de terra, quando atingidos por uma descarga atmosférica . .	34
3.1	Distância geométrica entre condutores para linha simples	39
3.2	Distância geométrica entre condutores para linha dupla	40
3.3	Cálculo auxiliar para o cálculo da distância geométrica entre condutores para linha dupla	40
3.4	Cálculo auxiliar para o cálculo da distância geométrica entre condutores para linha dupla	40
3.5	Cálculo auxiliar para o cálculo da distância geométrica entre condutores para linha dupla	40
3.6	Equação de Kuipers-Brown	41
3.8	Equação da resistência em corrente contínua	44
3.9	Equação da resistência em corrente contínua	45
3.10	Equação da resistência em corrente contínua com o reajuste da temperatura . . .	45
3.11	Equação do fator de efeito pelicular	45
3.12	Equação auxiliar do fator de efeito pelicular	45
3.13	Equação do fator de efeito de proximidade	46
3.14	Equação auxiliar do fator de efeito pelicular	46
3.15	Equação da resistência para corrente alternada	47
3.16	Equação do coeficiente de autoindução	47
3.17	Equação do raio fictício	48
3.18	Equação do reactância	48
3.19	Equação do Capacidade	49
3.20	Equação do Susceptância	49
3.22	Equação da Impedância	49
3.23	Equação da Admitância	50
3.24	Equação da Impedância característica	50
3.25	Equação das perdas da linha	50
3.26	Equação da queda de tensão	51
3.27	Equação da queda de tensão percentual	51
5.1	Fórmula para o cálculo do raio fictício	81
5.2	Fórmula para o cálculo do coeficiente de auto-indução	82
5.3	Fórmula para o cálculo da Reactância por unidade de comprimento	83
5.4	Fórmula da Reactância total da linha	84
5.5	Fórmula da corrente máxima da linha de transmissão	84
5.6	Fórmula para calcular a resistência em corrente contínua	85
5.7	Fórmula para o cálculo do efeito pelicular	86
5.8	Fórmula auxiliar para o cálculo do efeito pelicular	86
5.9	Fórmula da resistência em corrente alternada	86

5.10	Fórmula para o cálculo da resistência por fase	87
5.11	Fórmula da resistência total da linha	88
5.12	Fórmula para calcular as perdas de energia da linha	89
5.13	Fórmula da queda de tensão	91
5.14	Fórmula da queda de tensão percentual	91

Abreviaturas e Símbolos

AAAC	All Aluminium Alloy Conductors
AAC	All Aluminium Conductors
ACSR	Aluminium Cable Steel Reinforced
AE	Autoestradas
AGS	Armour Grip Suspension
ANAC	Autoridade Nacional de Aviação Civil
AT	Alta Tensão
BFB	Bird Flight Diverters
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CIA	Circular de Informação Aeronáutica
ECT	Especificações e Condições Técnicas
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
FBF	Firefly Bird Flappers
GGS	Gestão Global do Sistema
IC	Itinerários Complementares
ICAO	International Civil Aviation
ICNF	Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas
IEC	Comissão Eletrónica Internacional
IP	Itinerários Principais
MAT	Muito Alta Tensão
MT	Média Tensão
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
OPGW	Optical Power Ground Wire
ORD	Operadores das Redes de Distribuição
ORT	Operador da Rede de Transporte
PVC	Cobertura de Policloreto de Vinila
RDN	Rede de Distribuição Nacional
REN	Rede Elétrica Nacional
RND	Rede Nacional de Distribuição
RNT	Rede Nacional de Transporte
RSLEAT	Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão
SEE	Sistema Elétrico de Energia

Capítulo 1

Introdução

O presente documento foi realizado no âmbito do mestrado de engenharia eletrotécnica e de computadores, com maior ação no ramo de energia. O objetivo principal é desenvolver uma ferramenta de cálculo automático para auxiliar no dimensionamento elétrico de linhas de Média Tensão (MT), Alta Tensão (AT) e Muito Alta Tensão (MAT), de acordo o Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão (RSLEAT) e as normas dos operadores de redes nacionais.

A ambição de proliferação do ramo energético é incontornável; por isso, é imprescindível otimizar o tempo na conceção de um projeto de linhas elétricas. Uma vez que, os cálculos repetem-se de projeto para projeto, a criação de ferramentas de cálculo automático tem um posicionamento chave. O presente trabalho contribui para o avanço na área de projetos de linhas elétricas, proporcionando uma solução eficaz para o dimensionamento elétrico de linhas elétricas.

1.1 Motivação

Apesar de ser uma das mais belas revolucionárias descobertas da humanidade, a energia elétrica é banalmente considerada um bem adquirido, para uma vasta maioria da população. Para que confortavelmente as pessoas considerarem a eletricidade um bem acessível à distância de um clique num interruptor, foi necessário um investimento num Sistema Elétrico de Energia (SEE). Existe, portanto, a necessidade de um dimensionamento adequado de linhas elétricas, garantindo a segurança do mesmo sistema.

1.2 Contextualização

O dimensionamento da linha elétrica é o processo de determinar as características elétricas e mecânicas necessárias para garantir o correto funcionamento de uma linha de transmissão de energia elétrica.

A dissertação deste tema envolve a aquisição de conhecimentos como, o desenvolvimento de projetos de redes elétricas, Sistemas Elétricos de Energia, teoria do cálculo elétrico e normas de equipamentos em linhas elétricas. Para cada equipamento, é requerido o conhecimento de análise

de catálogos para cada fabricante para cabos, apoios, armações, cadeias de isoladores e perceber todos os equipamentos. A criação de uma folha de cálculo especializada no cálculo elétrico, que devolva a melhor solução em termos de tipologia de linha e condutores, é um objetivo ambicioso e de grande pertinência.

1.3 Objetivo de desenvolvimento sustentável

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7 visa garantir o acesso universal a energia acessível, fiável, sustentável e moderna até 2030. No contexto das infraestruturas energéticas, o dimensionamento adequado das redes elétricas desempenha um papel central para atingir esse objetivo, nomeadamente em Portugal, onde grande parte das redes de transporte e distribuição atingiu o fim do seu ciclo de vida. A reestruturação das infraestruturas energéticas existentes é imperativa, não só para assegurar a fiabilidade do sistema elétrico, como também para reduzir perdas energéticas, garantindo uma maior eficiência na transmissão de energia.

A aplicação desenvolvida no âmbito desta dissertação, o InLinhas, surge como uma ferramenta essencial para o cálculo elétrico em projetos de substituição de condutores e otimização das redes. A capacidade de realizar um dimensionamento preciso das linhas de transmissão permite reduzir as perdas de energia, um fator crítico para o cumprimento da meta 7.3 do ODS, que estabelece o objetivo de duplicar a taxa global de melhoria da eficiência energética. Além disso, ao minimizar perdas na transmissão, o *software* contribui para um fornecimento de energia mais eficiente e fiável, tendo um impacto direto no aumento da percentagem da população com acesso à eletricidade, alinhando-se com a meta 7.1.1.

A utilização do InLinhas poderá ser, assim, um elemento-chave no processo de modernização das redes de transmissão de Portugal, promovendo uma infraestrutura energética mais robusta e sustentável. Em suma, o trabalho desenvolvido está alinhado com os princípios do ODS 7, contribuindo, assim, para uma energia acessível, sustentável e fiável para todos.

1.4 Estrutura da Dissertação

No capítulo 1, é dado o mote para a realização da dissertação, onde são especificados resumidamente os principais objetivos propostos e a estrutura da dissertação.

No capítulo 2, é feita uma análise cuidada do SEE, e do que ele representa e engloba. Abordam-se as linhas elétricas e as suas partes constituintes. Por último, é feita uma breve introdução às etapas de um projeto de linhas elétricas.

No capítulo 3, é realizado um estado de arte à teoria do cálculo elétrico.

No capítulo 4, aborda-se o programa de cálculo automático desenvolvido no âmbito desta dissertação, denominado InLinhas. Portanto, neste capítulo será realizada uma visita guiada do programa e da suas funcionalidades e capacidades.

No capítulo 5, é feita a demonstração e verificação de alguns resultados, para um determinado caso de estudo.

No capítulo 6, é feita as últimas conclusões e melhorias possíveis da dissertação, e fazem-se, ainda, algumas premeditações ao possível futuro da energia e do papel que a ferramenta desenvolvida pode desempenhar.

Para finalizar, são disponibilizadas as fontes bibliográficas utilizadas para o estudo e escrita desta dissertação.

Capítulo 2

Sistema de Energia Elétrica

Para o entendimento da importância do dimensionamento elétrico será necessário primeiro sabatinar sobre o funcionamento da rede de energia elétrica, abordando com maior cuidado o SEE português. Um sistema é um conjunto de elementos dependentes uns dos outros e o elétrico não escapa à norma. Debruçando a atenção na definição poderá parecer redutor, pois, está-se a abordar um dos feitos mais diligentes que foi instituído na história da humanidade.

2.1 Requisitos

O SEE funciona, praticamente, sem interrupções, desempenhando uma função essencial para a sobrevivência humana. Os requisitos para um bom funcionamento do SEE são:

- O impacto ambiental do sistema deve ser minimizado;
- A energia não é possível ser armazenada, por isso, a produção instantânea terá de conseguir ter abundância suficiente para todo o consumo e perdas associadas;
- A energia elétrica tem de ser fornecida sempre que seja solicitada para ser utilizada;
- Os custos da produção tem de ser dimensionados para não ocorrer prejuízos;
- A energia elétrica deve obedecer às normas e critérios impostos.

Para um melhor entendimento da dissertação, será apresentada um pequeno resumo de uma linha elétrica. As características principais são o nível de tensão, se é uma linha atravessada por Corrente Contínua (CC) ou Corrente Alternada (CA), e a frequência que ela opera, normalmente 50 ou 60Hz, dependendo do ponto de vista geográfico. As linhas são constituídas por:

- Apoios, podendo ser postes de betão e armações e postes metálicos, reticulados, em aço galvanizado;
- Cabos;
- Cadeias de isoladores, amortecedores e acessórios;

- Proteções contra possíveis descargas;
- Eléttodos de terra para os apoios;
- Avisos sinaléticos de segurança.

Embora o âmbito da dissertação se rege no cálculo elétrico, é deveras importante perceber alguns conceitos básicos, do ponto de vista mecânico, de linhas aéreas.

Na figura 2.1 é possível observar algumas características mecânicas. Como:

- Vão;
- Flecha;
- Esforço de tração exercido pelos condutores.

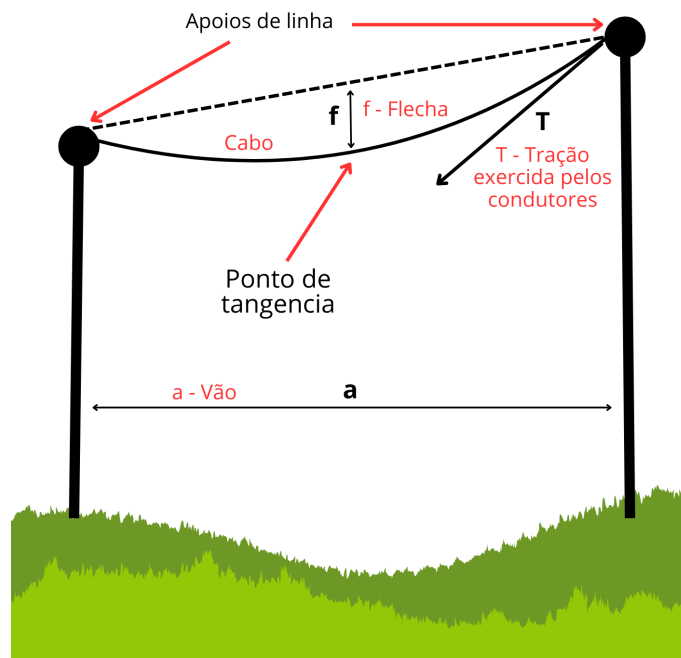


Figura 2.1: Ilustração de uma linha aérea

2.2 Funcionamento e elementos da rede elétrica

Para uma lâmpada acender à distância de um clique, é necessária uma estrutura capaz de produzir e transportar a energia elétrica instantaneamente até à casa do utilizador que pressiona o interruptor. A estrutura responsável é o SEE, este sistema pode ser sectorizado por Produção, Transporte, Distribuição e Consumo.

2.2.1 Produção

Para abordar a produção de energia será preciso, inicialmente, descrever o que é energia e as suas diferentes formas. Poderá ser uma tarefa árdua, uma vez que é algo que não é palpável e ainda, será complicado decifrar a que tipo ou forma se refere. Para conseguir englobar toda a matéria a que a Energia se pode referir, é descrita como a capacidade de realizar trabalho, seja de um corpo, substância ou sistema [1]. A produção de energia elétrica é um processo de transformação de energia. Neste processo existem dois tipos de energia, energia primária e energia final. A primária consiste em energia orgânica e que ainda não foi transformada em energia final. A título de exemplo, pode-se considerar a energia cinética da água que pode dar origem a energia elétrica [25].

A produção é o propulsor do SEE e é originária de diferentes energias primárias como a eólica, hídrica, nuclear, solar e térmica. A energia pode ser classificada como renovável ou não renovável. Entende-se por energia renovável aquela que consegue ser repostada durante o tempo médio de vida do Homem, é o caso da energia eólica, geotérmica, solar, biomassa, das ondas e das marés [25].

O valor total da potência de produção instalada, em 2023, em Portugal, era de 21362 MW. Na figura 2.2, pode-se observar com maior detalhe esta potência e ainda a comparação com o ano 2022.

Potência Instalada no Final do Ano (MW)	2023	2022
Total	21 362	20 685
Renovável	16 900	16 203
Hídrica	8 216	8 220
Eólica	5 374	5 374
Biomassa	700	700
<i>Cogeração</i>	<i>345</i>	<i>345</i>
Solar	2 611	1 909
Ondas	0,3	-
Não Renovável	4 462	4 482
Gás Natural	4 434	4 454
<i>Cogeração</i>	<i>604</i>	<i>625</i>
Outros	28	28
<i>Cogeração</i>	<i>28</i>	<i>28</i>
Bombagem	3 585	3 585
Centrais Despacháveis	11 611	11 616
Centrais não Despacháveis	9 751	9 060

Figura 2.2: Potência instalada em Portugal [20]

Na figura 2.3 pode-se ver a energia emitida por cada tipo de tecnologia de produção e o saldo importador, em Portugal, em 2023.

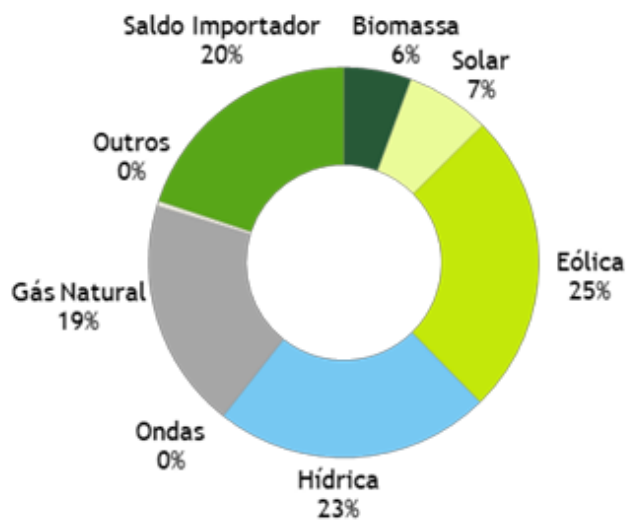


Figura 2.3: Energia de produção para cada tipo de energia e o saldo importador [20]

E na figura 2.4, pode-se ver a repartição da produção de energia renovável, não renovável e, ainda, quanta foi necessária ser importada.

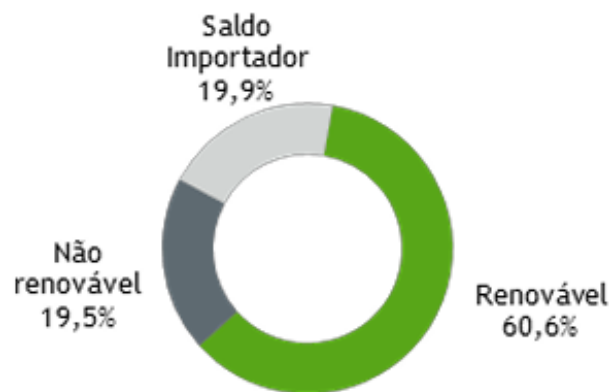


Figura 2.4: Repartição da produção de energia [20]

2.2.2 Transporte

Ao realizar uma viagem de automóvel, a distância por vezes pode ser elevada, e por isso, poderá ser justificável utilizar uma autoestrada. Recorrendo à analogia de uma viagem de automóvel, o automóvel representa a energia elétrica e as autoestradas são as linhas aéreas de MAT.

A energia elétrica é predominantemente produzida em centrais elétricas e estas centrais estão geralmente distantes dos pontos principais de consumo. As condicionantes para que assim seja, são a viabilidade de aproveitamento geográfico da energia primária e por razões de ordenamento do território para um menor impacto ambiental [25]. Dado ao afastamento do sector de produção e consumo, foi necessário subdividir a ligação entre estes sectores. Por isso, existe o transporte e distribuição, dois sectores que é importante distinguir. A energia elétrica após produzida deve ser encaminhada em linhas de elevada tensão até uma subestação, este processo é designado de transporte. Em seguida a energia é transformada em níveis de tensão inferiores, e encaminhada a outras subestações ou a postos de transformação aonde voltam a diminuir o nível de tensão até chegar ao consumidor final, e a isto chama-se distribuição. Para um total entendimento da diferenciação destes sectores, primeiramente, é necessário conhecer os diferentes níveis de tensão nominal da transmissão de energia elétrica. A tensão nominal é o valor de referência da tensão para que a linha foi idealizada. Esta tensão é importante ter valores diferentes para que quando ela for usada para consumo não existam, idealmente, problemas. Portanto, é possível classificar as redes elétricas em Baixa Tensão (BT), MT, AT e MAT. O tabela 2.1 categoriza cada uma das classes.

1ª Classe	Tensão[V] < 1000
2ª Classe	1000 < Tensão [V] < 40000
3ª Classe	Tensão[V] ≥ 40000

Tabela 2.1: Classes das tensões nominais definidas pelo RSLEAT, para corrente alternada

No âmbito desta dissertação são abordadas as redes de MT, AT e MAT, abordando somente as linhas aéreas. As redes MAT destinam-se para o transporte da energia desde as centrais produtoras até as subestações. Estas redes têm uma representatividade elevada tanto em comprimento de linhas como em volume energético transmitido. Em Portugal, até ao ano 2023, a Rede Nacional de Transporte (RNT) tem um comprimento de linhas de 9409km, conseguindo assim transportar energia para todo o país[20].

A eletricidade é dispendiosa de armazenar, portanto, a produção e consumo é gerida em tempo real, para que isto seja sustentável. Trata-se de um encargo de alta responsabilidade, portanto, existe uma Gestão Global do Sistema(GGS) munida de qualificada tecnologia. Esta gestão está ao cargo do Operador da Rede de Transporte (ORT), que coordena e supervisiona, em tempo real, toda a cadeia de produção ao consumo de energia, assegurando que as redes de transporte tenham capacidade suficiente para atender à demanda energética. O ORT em Portugal é a Rede Elétrica Nacional, S.A.(REN). Esta tem em mãos a tarefa de tomar decisões cruciais, como comandar a entrada ou a saída de produtores em horários específicos, garantindo um fluxo de energia contínuo e equilibrado[12].

2.2.3 Distribuição

A eletricidade transportada em grandes distâncias pela RNT, em MAT, é posteriormente entregue à rede de distribuição, onde é transformada em subestações para ser conduzida em distâncias menores, utilizando AT, MT e BT, até chegar às instalações dos utilizadores. A rede de distribuição também pode receber energia diretamente dos produtores quando eles são independentes, normalmente, usam como energia primária a energia renovável [25]. Tal como o transporte, na distribuição também existe uma Rede de Distribuição Nacional (RDN) e Operadores das Redes de Distribuição (ORD) que possibilitam a harmonia do fornecimento de energia. Os ORD tem funções como, a expansão de novos locais de abastecimento e realizam a manutenção das linhas, postos de transformação e instalações auxiliares, tudo isso para garantir a qualidade do serviço prestado seja exímio. Em Portugal, os ORD são vários. O principal, que atua em AT, MT e BT, é a E-REDES - Distribuição de Eletricidade, S.A.[11]. Existem outras identidades responsáveis exclusivamente para BT.

2.2.4 Comercialização e consumo

A comercialização é a etapa final da cadeia de fornecimento de eletricidade, sendo a mais próxima dos consumidores finais. Nesta fase, os consumidores têm o poder de escolha, podendo alterar de comercializador sempre que encontrarem ofertas mais vantajosas para o seu perfil de consumo[13]. Os comercializadores criam as suas ofertas de forma independente e competitiva. Eles compram eletricidade aos produtores no mercado livre e a revendem aos clientes, pagando as tarifas reguladas, pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE), de acesso às

redes aos operadores correspondentes[13]. Esta estrutura permite uma combinação de competitividade e segurança, assegurando que todos os consumidores, independentemente da localização ou condição, têm acesso a um fornecimento de energia confiável e adaptado às suas necessidades.

O consumo de 2023 em Portugal continental, tendo em conta o abastecimento por parte da Rede Elétrica de Serviço Público (RESP), totalizou 50,7 TWh. Este valor representa o agregado da produção líquida injetada na RESP pelos produtores, pelo balanço das trocas internacionais e retirando o consumo para bombagem hidroelétrica. O consumo, em 2023, apresentou um aumento de 0,6% face ao ano anterior [20].

Na figura 2.5 pode-se observar a evolução semanal, do ano 2022 e 2023, em Portugal, do abastecimento do consumo por tipo de energia primária utilizada.

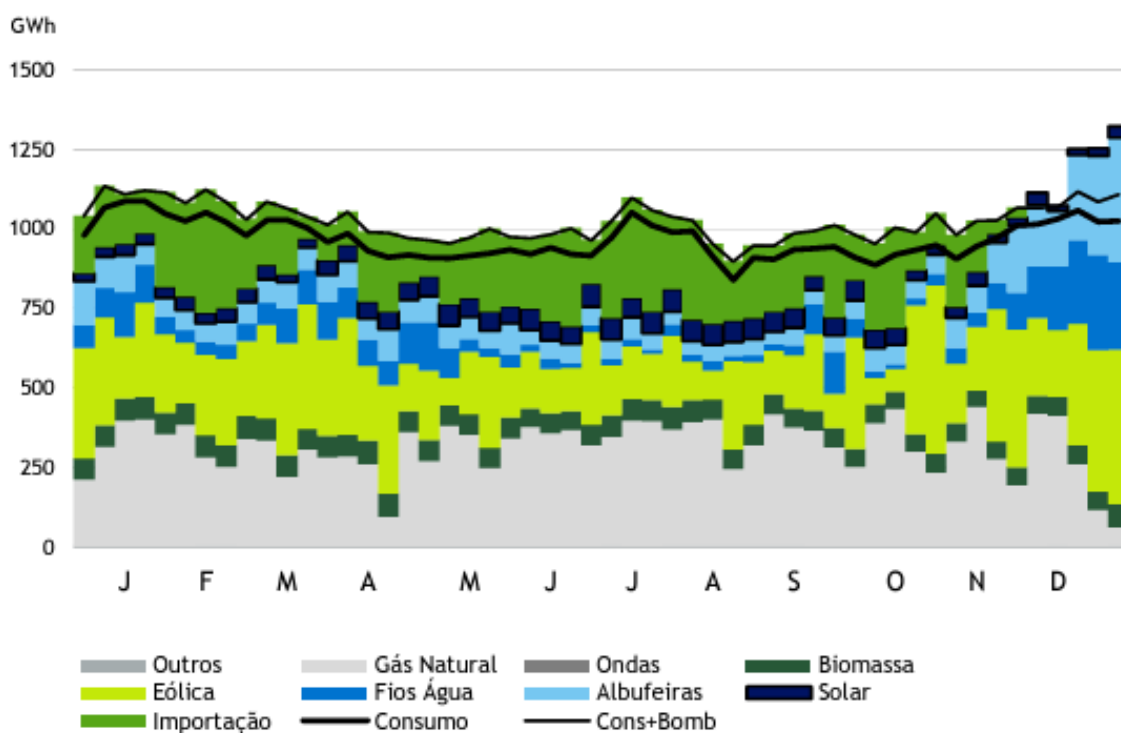


Figura 2.5: Evolução do consumo em 2023 [20]

Na figura 2.6, pode-se analisar os dados de produção e consumo do ano 2022 e 2023.

Consumo Referido à Produção Líquida (GWh)	2023	2022
Produção Total	44 129	44 016
Produção Renovável	31 218	25 154
Hídrica	11 772	6 354
Eólica	12 935	12 960
Biomassa	2 900	3 309
<i>Cogeração</i>	<i>1 166</i>	<i>1 466</i>
Solar	3 611	2 532
Ondas	0	-
Produção não Renovável	10 032	16 590
Gás Natural	9 850	16 397
<i>Cogeração</i>	<i>1 928</i>	<i>2 481</i>
Outros	182	193
<i>Cogeração</i>	<i>23</i>	<i>26</i>
Produção por bombagem	2 879	2 272
Consumo em bombagem	3 625	2 938
Saldo Importador	10 233	9 253
Importação (valor comercial)	13 547	12 170
Exportação (valor comercial)	3 329	2 914
Consumo Total	50 737	50 332
Produção Despachável	21 378	21 760
Produção não Despachável	22 751	22 256

Figura 2.6: Produção e consumo em Portugal [20]

A produção renovável abasteceu, em 2023, um valor aproximado de 61% do consumo. Existiu a necessidade de importar perto de 20%, representando um consumo de 10,2 TWh.

2.3 Linha elétrica

A energia é produzida, transportada, distribuída e, para ser consumida, é imprescindível uma sólida infraestrutura que faça a conexão da produção ao consumo. As linhas elétricas são as responsáveis de fazer essa conexão. As redes elétricas podem ser classificadas segundo a sua tensão nominal, a sua funcionalidade e a estrutura topológica. A tensão nominal representa a tensão a qual a instalação foi estabelecida para desempenhar o seu funcionamento, esta pode ser de MT, AT e MAT. A funcionalidade da rede é tipo de função onde o sistema foi concebido para executar, sendo ela uma rede de interligação, uma rede de transporte, uma rede distribuição. A topologia da rede pode ser radial, malhada, malhada com exploração radial. Esta classificação remete para o modo como as redes se conectam umas às outras, permitindo a rede ter mais ou menos fiabilidade de interrupção de energia. Quando as linhas têm mais ramificações que permitem ligações a outras linhas, podendo o consumidor obter energia de qualquer linha ligada a essa rede. Este tipo de topologia acrescenta maior confiabilidade, no entanto, são mais caras. A este tipo de rede é designada de rede malhada, sendo usadas obrigatoriamente pelas redes de transporte [25]. Se

às redes malhadas for acrescentado interruptores que fechem e abrem caminhos entre linhas consoante a necessidade, são designadas redes malhadas com exploração radial. Este tipo de rede é, usualmente, utilizado em redes de distribuição urbana com densidade de carga energética elevada [25]. Por último, é possível desenhar redes em que somente tem um ponto de geração e que se ramificam sem nunca se voltar a encontrar. Estas redes são denominadas por radiais e são as que apresentam menor confiança associado a um menor custo, sendo utilizadas na RND [25]. As diferentes tipologias de rede, estão ilustradas na seguinte figura:

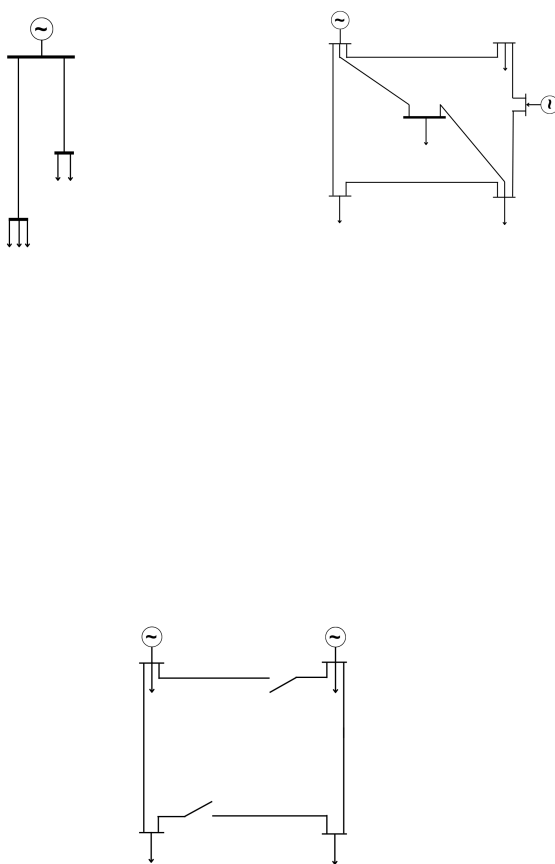


Figura 2.7: Rede Radial, Rede Malhada e Rede Malhada com Exploração Radial

2.3.1 Linhas aéreas e subterrâneas

As linhas elétricas são o meio que possibilita a passagem de energia até a casa dos consumidores. Tendo em conta o panorama português, considerando a RNT e a RND, estes mapas de linhas

são desenhados de modo que tenham menos impacto possível, quer seja ele ambiental ou económico, sem nunca descuidar a segurança. Assim sendo, foi necessário criar dois modos de passagem de energia, podendo as linhas ser aéreas e subterrâneas. Nesta dissertação será abordada apenas as linhas aéreas. As linhas aéreas apresentam certas desvantagens em relação as subterrâneas como[4]:

- Ocupam maior espaço no nosso campo de visão, e por isso, há uma poluição visual;
- Podem ser prejudiciais à saúde das pessoas dado ao campo elétrico;
- O campo magnético não pode ser regulado;
- Estão sujeitas a fenómenos atmosféricos, o que pode prejudicar a qualidade e continuidade da sua função;
- Tem maior perdas de energia;
- Tem maior risco de acidente por eletrocussão;
- Maior custo de manutenção.

Apesar, de estas desvantagens, o custo de construção de linhas aéreas é muito inferior e, portanto, existe uma predominância de linhas aéreas.

2.3.2 Componentes de uma linha elétrica

É vital selecionar cuidadosamente cada elemento que irá pertencer à infraestrutura da linha e possibilitar a difusão de energia de forma segura e ininterruptamente. Para tal acontecer fatores como a escolha minuciosa dos materiais, a localização da instalação e a manutenção regular são essenciais. Também, a compreensão da especificidade e funcionalidade de cada componentes da linha faz a diferença para minimizar riscos e acidentes. Portanto, nesta secção será exposta os componentes, pertencentes a uma linha elétrica, seguintes:

- Condutores;
- Cabos de guarda;
- Isoladores;
- Apoios;
- Armações;
- Fundações;
- Fixadores e amortecedores para os condutores;
- Balizagem aeronáutica;

- Conjuntos sinaléticos;
- Dispositivos de proteção à avifauna;
- Sistemas de ligação à terra.

2.3.2.1 Condutores

Existem materiais que impedem ou permitem o fluxo de corrente elétrica, dependendo das suas propriedades. Generalizando, isto deve-se à liberdade disponível que os eletrões têm para se movimentar. Materiais metálicos, por exemplo, têm eletrões fracamente ligados na camada externa dos seus átomos. Isso faz com que sejam excelentes na condução de eletricidade. Além dos condutores metálicos, existem também outros materiais que podem conduzir eletricidade. Por outro lado, materiais como plásticos ou borrachas têm eletrões fortemente ligados. Isso torna o fluxo de eletrões mais difícil, sendo denominados isoladores.

Um condutor é por definição um “elemento destinado à condução elétrica, podendo ser constituído por um fio, conjunto de fios devidamente reunidos, ou por perfis adequados” [8]. Como existem diferentes tipos de linhas com propósitos também eles diferentes, o mesmo acontece com os condutores e, portanto, são vários os fatores determinantes a ter em consideração. O material do condutor, o nível de tensão nominal intrinsecamente associado à temperatura máxima admissível, o custo, o comprimento, são alguns fatores relevantes. Cada condutor é constituído por uma alma condutora e uma camada isolante[24]. A alma condutora pode ser caracterizada segundo o metal homogéneo ou heterogéneo, pela secção nominal e pela sua composição, que irá ter impacto direto na sua flexibilidade mecânica e na sua resistência óhmica[24].

A energia elétrica é produzida, transportada e distribuída em sistemas elétricos trifásicos, executando em algumas distribuições em BT que pode ser monofásica. Linhas elétricas de MT e AT são normalmente constituídas por três condutores, desprezando o uso do neutro, pois, o retorno da corrente de cada fase é garantido pelas outras[25]. Assim, os condutores podem ser unipolar ou multipolar. Um condutor multipolar é constituído por um conjunto de condutores distintos eletricamente, mas mecanicamente solidários [24]. As seguintes imagens, podem oferecer um melhor entendimento dos tipos de condutores possíveis.

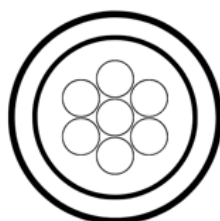


Figura 2.8: Condutor unipolar, monopolar ou monocondutor, com alma circular

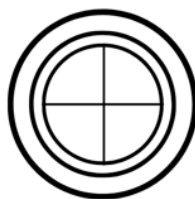


Figura 2.9: Condutor unipolar, monopolar ou monocondutor, com alma setorial

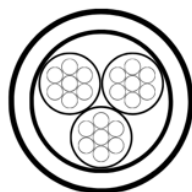


Figura 2.10: Condutor multipolar, com alma circular

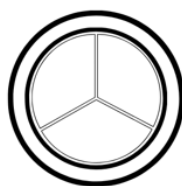


Figura 2.11: Condutor multipolar, com alma setorial

Os condutores podem ser munidos de um revestimento exterior. O revestimento é um conjunto de camadas, com propósito de auferir forma e segurança contra ações externas. O revestimento, em forma de um tubo, tem como nomenclatura bainha [24]. Segundo o Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão (RSLEAT), um cabo é um condutor isolado equipado com uma bainha ou um conjunto de condutores isolados e agrupados, equipados de bainha, trança ou outro envolvente comum [8]. Todavia, em Portugal, não são frequentemente utilizados condutores isolados para linhas aéreas, sendo apenas utilizados para linhas torçadas de BT. O seu revestimento não é praticável a temperaturas elevadas, podendo danificar a linha. Por isso, nas linhas aéreas o isolamento é feito pelo ar, assim, são utilizados cabos nus. Um cabo nu é um condutor multifilar, ou seja, a sua alma condutora é constituída por vários fios enrolados em hélice [8]. O custo de um condutor nu é muito menor e é mais uma vantagem do uso de linha aérea para grandes distâncias em detrimento de linhas subterrâneas.

Outro aspeto fulcral na escolha do condutor para uma linha elétrica será a natureza da alma condutora. Atualmente, em Portugal, os materiais de condutores usados para linhas aéreas são[4]:

- Alumínio - *All Aluminium Conductors* (AAC)

- Liga de Alumínio - *All Aluminium Alloy Conductors* (AAAC)
- Alumínio e aço - *Aluminium Cable Steel Reinforced* (ACSR)

Houve uma descontinuidade do uso de cobre para linhas aéreas, e existem vários motivos para que aconteça essa mudança. O fator despótico foi a depreensão que o alumínio, o seu maior substituto, é o metal mais abundante na litosfera, que oferece características muito convidativas [9]. Para comparar estes dois metais será preciso ter em consideração características físicas como a condutividade a uma temperatura de referência, a massa específica e o módulo de elasticidade.

Característica	Unidades	Cobre	Alumínio
Massa específica	kg/dm ³	8,89	2,703
Módulo da elasticidade	kg/mm ²	12700	7000
Condutividade a 20°C	I.A.C.S.	97,0	61,0

Tabela 2.2: Características do Cobre e do Alumínio

Outro fator decisivo é o ponto de vista económico, onde o alumínio mais uma vez tem vantagem, com um preço inferior ao do cobre.

2.3.2.2 Cabos de guarda

As linhas aéreas estão sujeitas a descargas atmosféricas, que podem originar quebras de isolamento e resultar em curto-circuito. Este tipo de erros pode levar a interrupções no fornecimento de energia, provocando prejuízos avultados. Portanto, para mitigar este tipo de problemas utilizam-se cabos de guarda, que, como sugere a sua nomenclatura, desempenham um papel determinante na proteção das linhas aéreas. Estes são condutores posicionados acima dos condutores que transportam a energia e estão conectados ao sistema de aterramento dos apoios e de subestações. Assim, eles são responsáveis por fazer a ligação das terras entre os apoios adjacentes ao vão, fazendo um escoamento de corrente de defeito mais eficaz para o solo, evitando sobretensões nos condutores de fase. Todavia, a corrente não é totalmente descarregada, uma vez que, as resistências da terra não são nulas, produzindo um contornamento dos isoladores e existe, apesar de desprezada, uma possibilidade de contacto com os condutores que transportam a energia [22]. Para se perceber a importância destes cabos, pode-se considerar a sua ausência na linha. Esta ausência hipotética, conduzia a que após a descarga a corrente ela apenas teria dois caminhos para ser despachada, que seriam os dois apoios situados entre o vão onde ocorreu o fenómeno. Esta possibilidade levaria ao deterioramento da linha e a sobretensões nos cabos condutores.

Além da função de segurança, os cabos de guarda, podem ser utilizados para comunicações de dados entre subestações. Sendo que, para este efeito é necessário que se utilize um cabo especial. Por isso, é usual constatar que puderam ser vistos dois cabos de guarda nas linhas aéreas. A escolha de cabos a serem utilizados depende da necessidade de proteção que cada linha possa precisar [22]. Então, por norma, são utilizados o *Optical Power Ground Wire* (OPGW) e o ACSR. O ACSR é a escolha convencional quando se pretende somente proteger as linhas contra as descargas. Por

outro lado, se se pretende ter proteção e trocas de dados é usual utilizar o OPGW. O OPGW possui uma estrutura tubular com uma ou mais fibras óticas no seu interior, rodeadas por camadas de aço e fios de alumínio [21].

2.3.2.3 Isoladores

Em linhas aéreas, usualmente, os cabos utilizam-se sem isolamento próprio, recorrendo apenas ao ar, que tem propriedades isolantes, especialmente quando seco. No entanto, há a necessidade de isolar os cabos em tensão dos apoios que suportam a linha. Posto isto, percebe-se que numa linha elétrica aérea é fulcral a presença de isoladores, cuja principal função é, precisamente, impossibilitar a condução de corrente elétrica entre os condutores e os seus apoios. Outra função dos isoladores é a de manter o suporte mecânico dos cabos.

A escolha dos isoladores é feita tendo em conta as suas funções de isolamento elétrico e de suporte mecânico. Existem requisitos mecânicos que os isoladores estão responsáveis como, por exemplo, o peso dos condutores e movimentos vibratórios causados por ventos fortes que podem até fazer diminuir distâncias de isolamento de segurança. Assim, com o propósito de auxílio ao suporte dos condutores, foi necessário construir cadeias de isoladores para linhas aéreas de MT, AT e MAT. Estas estruturas, fazendo uma analogia, são uma espécie de coluna vertebral humana em que cada vértebra é um isolador. Para as cadeias é usual utilizar isoladores de campânula de porcelana, de vidro ou de resina *epoxy*, acopláveis [4]. Estas podem ser classificadas como de suspensão e de amarração. As cadeias isoladoras de suspensão dispostas na vertical, ficando o cabo condutor suspenso na extremidade inferior enquanto a extremidade superior é conectada ao braço do apoio [6]. As cadeias de isoladores de amarração são dispostas na horizontal, colocadas em casos mais delicados, sendo também, mais caras a sua instalação porque são instaladas mais cadeias. São utilizados para apoios onde exista mudança de direção da linha, apoios de ângulo, apoios de reforço, fim de linha e para vãos de grande comprimento[6].

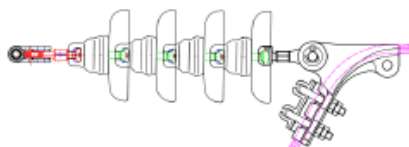


Figura 2.12: Ilustração de uma cadeia de amarração [23]

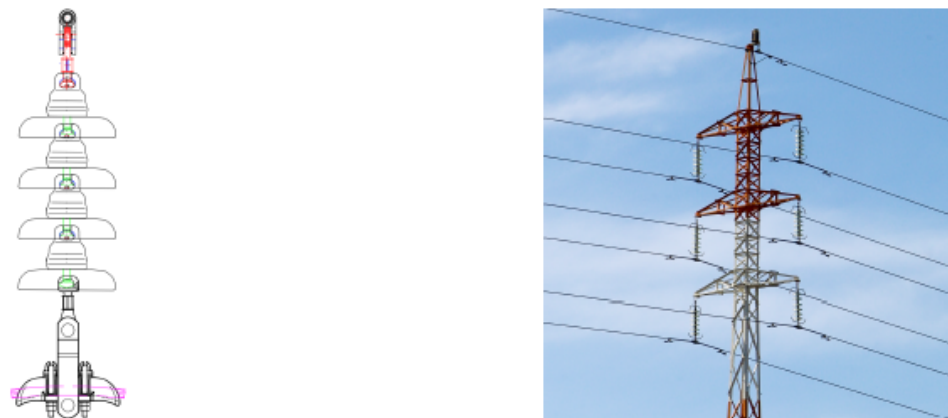


Figura 2.13: Ilustração de uma cadeia de suspensão [23]

Os isoladores podem ser fabricados em porcelana, em vidro, resina ou material compósito. Estes tipos de materiais, embora muito diferentes, possuem características pertinentes em comum como a elevada resistência mecânica e elétrica, alta permitividade elétrica, rigidez dielétrica. Um cuidado necessário a ter com o fabrico destes materiais é a sua porosidade, pureza e fissuras. Assim, idealmente, o isolador não deve ter fissuras, poros e impurezas. Após instalado, um fator que se revelou importante foi a limpeza. Pois, a sujidade acumulada nos isoladores provocam uma diminuição das propriedades elétricas enquanto isolador, provocando um maior risco de contornamento elétrico[14]. Assim, um fator imprescindível na colocação dos isoladores é quantidade de poluição local existente. Ao longo do tempo foi-se descontinuado o uso de alguns materiais, dando-se prioridade aos isoladores feitos em vidro. Um dos fatores que levou ao desuso de isoladores cerâmicos, para além do seu custo mais elevado, deve-se ao facto de ser difícil perceber onde há perfuração do isolador, enquanto nos de vidro eles explodem, sendo assim mais notório.

Para além dos isoladores em cadeia, existem os isoladores rígidos. No entanto, atualmente, são pouco utilizados devido às suas desvantagens face aos isoladores em cadeia. Estes são menos seguros, apresentam uma montagem mais árdua e, por conseguinte, uma manutenção mais custosa.

2.3.2.4 Apoios

O apoio de uma linha elétrica é necessário para suportar os cabos de tensão e de guarda, a cadeia de isoladores e os acessórios que possam estar-lhe agrupados [8]. Os apoios, também denominados, postes, podem ser feitos de aço, betão armado e madeira. Apoios de madeira são apenas utilizados para linhas de BT e telecomunicações. Os apoios de betão são utilizados para BT, MT e AT. A estrutura em aço é de todas a mais dispendiosa e a que ocupa um maior espaço, mas é escolhida sempre que o nível de tensão é obrigatório, ou seja, para linhas de MAT. Por vezes, a escolha em aço pode ser também inevitável, dado ao facto que o transporte para a colocação é mais descomplicado comparativamente ao betão, que tem de ser transportado como uma peça única, ao contrário do apoio em aço que pode ir desmontado. Outro fator, que leva a escolha dos apoios em aço é por requisitos regulamentares como as distâncias de segurança e os esforços

mecânicos necessários. Dada a configuração do trajeto da linha há a necessidade da existência de diferentes tipos de apoios.

- Apoio de Alinhamento - localizado em trecho retilíneo da linha, servindo para suportar os condutores [4];



Figura 2.14: Apoio com função de alinhamento [23]

- Apoio de ângulo - é destinado a fazer alterações da direção do torço da linha, tornando-se num vértice do torço[4];



Figura 2.15: Apoio com função de ângulo [23]

- Apoio de reforço de alinhamento ou ângulo - utilizado para sustentar esforços longitudinais extraordinários[4];



Figura 2.16: Apoio com função de reforço de alinhamento [23]



Figura 2.17: Apoio com função de reforço de derivação em alinhamento[23]

- Apoio de derivação - quando há a necessidade de derivar a linha, portanto tem a responsabilidade de esforços longitudinais, esforços longitudinais devido à tração exercida pela linha derivada[4];

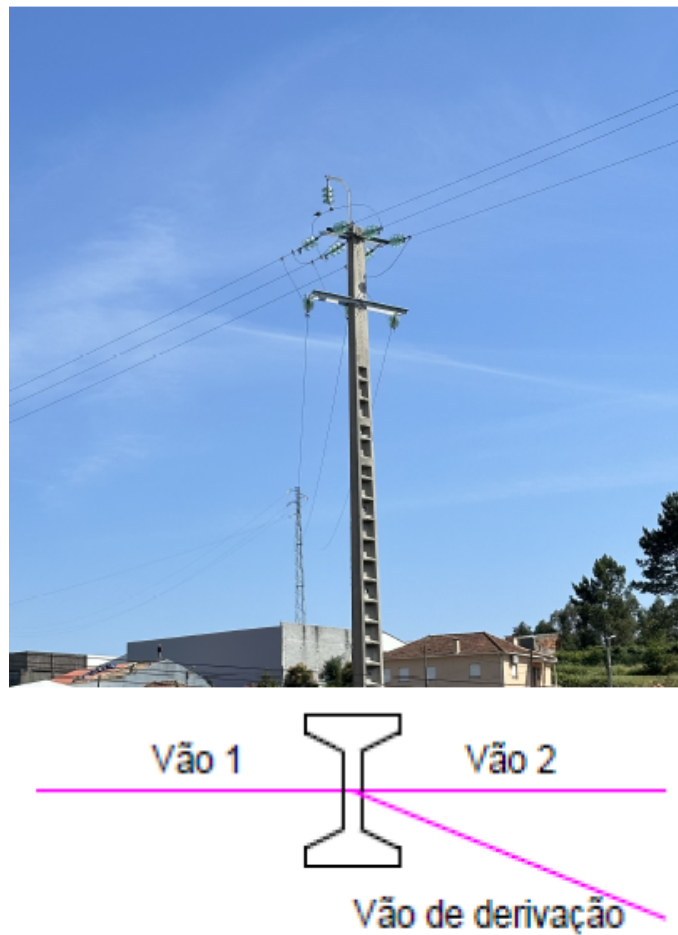


Figura 2.18: Apoio com função de derivação em alinhamento [23]

- Apoio de fim de linha - no término da linha existe a necessidade do poste suportar os cabos de apenas um lado. Estes podem ser a ligação aos pórticos da subestação ou de um posto de transformação e podem ser a transição de uma linha aérea para um cabo subterrâneo.[4];

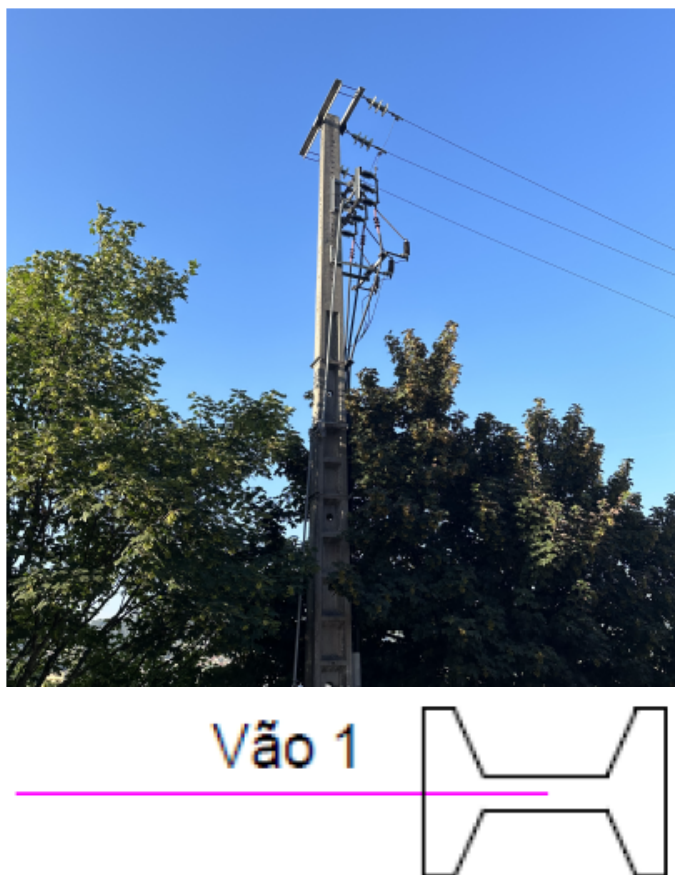


Figura 2.19: Apoio com função de fim de linha [23]

Os apoios são estruturas que têm de tolerar forças horizontais (longitudinais e transversais) e verticais. Quando é realizado o dimensionamento dos apoios é necessário fazer o diagrama de forças aplicadas ao mesmo. Esforços verticais são provocados pelo peso dos cabos, isoladores, armações, possíveis acessórios acoplados ao poste e possíveis precipitações de gelo que possa ficar agarrado à linha[22]. O esforço vertical é algo que não contabilizado no dimensionamento mecânico para apoios em betão [23]. Forças horizontais, nomeadamente as longitudinais, são originárias da força exercida pelos vãos a montante e jusante do apoio [23]. As forças horizontais transversais provém da ação do vento e consequente movimento dos componentes da linha.

2.3.2.5 Armações

As armações são as estruturas metálicas acopladas à parte superior do apoio que estão responsáveis por suportar esforços mecânicos e por dar a disposição aos condutores e cabos de guarda. As armações diferem segundo o material e função do apoio. Apoios de betão podem ser acopladas certas armações, enquanto, os postes de aço, o próprio *design* da estrutura determina a geometria dos condutores e cabos de guarda.

A distância entre cada cabo é vital para a segurança da linha e condiciona o comprimento dos vãos, face às oscilações dos cabos devido às forças exercidas pelo vento [19]. Quanto maior for

o vão, menor terá de ser a distância entre cabos. Existe uma distância de segurança que deve ser calculada para um dimensionamento seguro da linha. Assim, a distância mínima que é necessária, estabelecer é 0,45m para linhas de 2.^a classe e 1cm/kV, com um mínimo de 0,5, para linhas de 3.^a classe [8]. É importante referir que esta distância, também, influencia o dimensionamento elétrico da linha. As armações podem ser vistas, usualmente, segundo as seguintes disposições:

- Esteira vertical;
- Esteira horizontal;
- Galhardete;
- Triângulo;
- Pórtico.

Nas tabelas 2.3 e 2.4 pode-se observar algumas informações sobre as armações utilizadas pela E-Redes para apoios em betão.

Nome	Tipo de apoio requerido	Disposição
HRFSC	Alinhamento; Ângulo; Derivação; Reforço; Fim de linha	Esteira horizontal
TAL	Alinhamento em suspensão	Triângulo
TAN	Ângulo; Reforço; Fim de linha	Triângulo
GAL	Alinhamento em suspensão	Galhardete
GAN	Ângulo	Galhardete
VAL	Alinhamento em suspensão	Esteira vertical
VAN	Ângulo; Reforço; Fim de linha	Esteira vertical
PAL	Alinhamento	Pórtico
PAN	Ângulo; Reforço; Fim de linha	Pórtico

Tabela 2.3: Armações para apoios em betão para linhas de MT

Nome	Tipo de apoio requerido	Disposição
GAL	Alinhamento	Galhardete
GAN	Ângulo; Alinhamento	Galhardete
EVDAL	Alinhamento	Esteira vertical dupla
EVDAN	Ângulo; Alinhamento	Esteira vertical dupla
EVFR	Reforço; Fim de linha	Esteira vertical
EVFAN	Ângulo;	Esteira vertical
PALAN	Ângulo; Alinhamento	Pórtico
PRF	Reforço; Fim de linha	Pórtico

Tabela 2.4: Armações para apoios em betão para linhas de AT

2.3.2.6 Fundações

As fundações são um ponto essencial para a segurança das linhas, porque são a base da estrutura que suporta os esforços e tensões necessárias. As fundações são os alicerces que seguram os postes. Os fundação do poste pode ser feita por um, dois e quatro maciços independentes[26]. Os maciços são constituídos de betão ciclópico, ou seja, é introduzido pedras de diferentes dimensões compreendidas entre 10 cm a 40 cm [5]. A escolha do tipo de fundação, tem de ser adaptada segundo a altura do apoio, esforços aplicados no apoio, tipo de apoio e o coeficiente de compressibilidade do terreno, este último determina a diminuição do volume do terreno sob a ação de cargas aplicadas [23].

Na tabela 2.5 pode-se observar os valores do coeficiente de compressibilidade a 2 m de profundidade.

Terreno	Coeficiente de compressibilidade a 2 m de profundidade [daN/cm ³]
Lodo, turfa e terreno pantanoso em geral	0
Areia fina e média, em 1 mm de tamanho de grão	6 a 8
Areia grossa até 3 mm de tamanho de grão e areia com pelo menos 1/3 do volume de calhau rolado com 70 mm de diâmetro	8 a 10
Terreno Coerente (barro, argila) muito mole	0
Terreno Coerente (barro, argila) mole facilmente amassável	2 a 4
Terreno Coerente (barro, argila) consistente dificilmente amassável	5 a 7
Terreno Coerente (barro, argila) médio	8
Terreno Coerente (barro, argila) rijo	9

Tabela 2.5: Coeficientes de compressibilidade segundo o tipo de terreno [26]

Para fundações em que são utilizados postes de betão armado, é imperativo o cálculo da profundidade mínima de enterro dos postes, que segundo o RSLEAT, artigo 73.º, é dada por:

$$h_e = 0,1 \cdot h + 0,5[m] \quad (2.1)$$

Existe uma exceção à regra para postes com altura superior a 15 metros, a profundidade mínima necessária é 2 metros, todavia, caso não se verifique estabilidade do apoio será preciso fazer ajustes[24].

2.3.3 Fixadores para os condutores

Em linhas aéreas, dispositivos de fixação para condutores desempenham um papel crucial na integridade da linha. São por norma utilizados pinças de amarração e de suspensão para o efeito de fixação. As pinças são desenhadas para garantir uma fixação confiável dos condutores às cadeias de isoladores, adaptando-se para cada tipo de cadeia de isoladores escolhida para aquela linha.

As pinças de suspensão, permitem uma inserção fácil e sem cortes dos cabos condutores e cabos de guarda, facilitando, assim, a sua fixação às cadeias de isoladores de suspensão. Para cadeias de suspensão destacam-se, as pinças *Armour Grip Suspension* (AGS) [22]. Estas tem capacidade de proteger contra vibrações dos cabos.

Por outro lado, as pinças de amarração, é necessário cortar o condutor e exigem a adição de fiadores para manter a continuidade elétrica, e, ao mesmo tempo, fixando nas cadeias de isoladores de amarração. Os cabos de guarda dispensam as pinças de amarração, pelo motivo de não possuírem cadeias de isoladores de amarração [23].

2.3.3.1 Amortecedores para os condutores

Em linhas aéreas, os cabos estão submetidos a vibrações eólicas, que causam desgaste nos cabos. Portanto, existem estruturas que reduzem as oscilações e consequentemente a deterioração dos cabos. Portanto, para mitigar os efeitos nocivos provocados pelas vibrações dos cabos são utilizados amortecedores. O amortecedor de vibração mais reconhecido é o *Stockbridge*. Este, é instalado nos cabos para absorver as vibrações provocadas pelo vento. O *Stockbridge* é especialmente valorizado pela eficácia, baixo custo, simplicidade de construção, ausência de necessidade de manutenção e resistência às variações climáticas e de temperatura. Ele consiste numa cordoalha de fios de alumínio e fios de aço revestido a alumínio, conhecida como cabo tensor, com duas massas simétricas fixadas nas extremidades, sendo preso ao cabo por meio de uma presilha central.

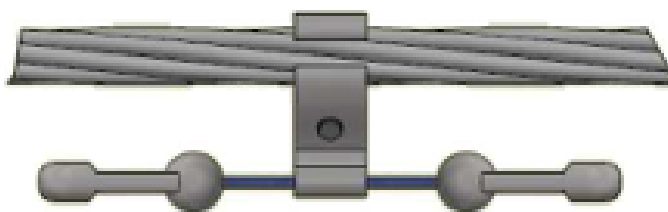


Figura 2.20: Amortecedor *Stockbridge*

A eficiência do amortecedor *Stockbridge* reside na dissipação de energia através do amortecimento histerico do cabo, resultante da fricção entre os fios do cabo e as massas do amortecedor. Para garantir uma correta eficácia, é primordial decidir e calcular onde fará sentido a sua aplicação ao longo do cabo. É por isso necessário um estudo da onda de vibração em condições de ressonância[26]. Por vezes, pode ser necessário mais que um amortecedor por vão. Um dimensionamento rigoroso dos amortecedores, aumenta o tempo de vida aos cabos.

2.3.3.2 Balizagem aeronáutica

As linhas aéreas podem cruzar rotas aéreas de aviação, quer sejam elas comerciais ou militares. Assim, existe obrigatoriedade de sinalizações das linhas, por isso, existem instituições destinadas ao controlo e legislação aeronáutico. Em Portugal as identidades responsáveis são a Autoridade Nacional de Aviação Civil (ANAC) e pela *International Civil Aviation Organization* (ICAO).

Uma condicionante para o reconhecimento das linhas aéreas é a luminosidade, assim, foi necessário instaurar medidas que assinalem as linhas tanto durante o dia como durante a noite.

A sinalização diurna é realizada pela colocação de esferas de sinalização ao longo dos condutores, cumprindo rigorosamente as normas de cor, dimensão e espaçamento. A balizagem das linhas é indispensável para as operações de voo, proporcionando aos pilotos uma identificação clara dos condutores e os seus apoios. Esta sinalização é crítica em diversas situações, como descolagens, aterragens, operações de salvamento ou emergência e combates a incêndios.

A sinalização diurna tem de ser feita nos cabos e nos apoios. Assim, a sinalização diurna tem de ser feita em linhas com as seguintes condições [3] :

- Vãos com comprimento superior a 500 metros;
- Vãos sobre cursos ou bacias de água com largura superior a 80 metros.
- Vãos atravessando autoestradas (AE), itinerários principais (IP) e itinerários complementares (IC);
- Áreas próximas a aeroportos, aeródromos e heliportos, conforme especificações de Circular de Informação Aeronáutica 10/03 (CIA 10/03).

A sinalização diurna nos apoios é exigida nas seguintes condições[3]:

- Apoios em vãos que atravessam AE, IP e IC, estabelecidos em zonas *non aedificandi* (faixas de 200 metros de cada lado da estrada e círculos de 1300 metros de diâmetro centrados nos nós de ligação);
- Apoios de linhas paralelas, em extensão contínua superior a 900m, a AE, IP e IC, colocados em zonas *non aedificandi*;
- Áreas próximas a aeroportos, aeródromos e heliportos, conforme especificações da CIA 10/03.

A sinalização diurna dos apoios é feita por via de pintura com faixas alternadas de cor branca e laranja internacional, com largura de um $\frac{1}{7}$ da altura do apoio, desde o topo até 6m abaixo do condutor mais baixo. As esferas colocadas nos condutores, também conhecidas como balizas, devem ser de um cor sólida — branca, vermelha ou laranja — escolhida para oferecer o maior contraste consoante o ambiente. Estas esferas são feitas de fibra de vidro ou resina poliéster. Caso seja necessário a colocação de mais de quatro balizas, estas devem alternar entre duas cores; caso contrário auferem todas a mesma cor. O espaçamento entre esferas ou o apoio mais próximo varia conforme o seu diâmetro. Assim, não deverão ser ultrapassadas as seguintes distâncias[3]:

- 30 metros para balizas de 60 cm de diâmetro;
- 35 metros para balizas de 80 cm de diâmetro;
- 40 metros para balizas de 130 cm de diâmetro;
- 12 metros para balizas sob canais de aproximação/descolagem.

Normalmente, as balizas são colocadas no condutor mais elevado. Em situações em que as balizas ou a carga do vento inviabilize isso, as balizas podem ser distribuídas entre o primeiro e segundo condutor mais elevado, colocadas no segundo condutor mais elevado, ou se distribuídas pelos cabos externos se houver múltiplos cabos a um mesmo segundo nível de altura.

Na figura 2.21 podemos ver um exemplo de sinalização diurna.



Figura 2.21: Balizagem aeronáutica diurna [23]

A sinalização noturna envolve a instalação de dispositivos luminosos no topo dos apoios e condutores, para garantir a visibilidade adequada conforme as condições de luminosidade apresentadas. Por isso, estes dispositivos devem funcionar segundo as seguintes regras [3]:

- Ligar 30 minutos antes do pôr do sol;
- Desligar 30 minutos depois do nascer do sol;
- Permanecer ligados sempre que a visibilidade seja inferior a 1000 metros de distância.

Notar que os indicadores de obstáculos e as medidas de sinalização, expostos em 2.3.3.2, estão brevemente resumidos e para obter todos os dados seria oportuno consultar o CIA 10/03.

2.3.3.3 Conjuntos sinaléticos

Nos apoios das linhas é necessário afixar em locais bem destacados e notificáveis, uma ou mais placas de sinalização de segurança. A sinalização deve alertar para os perigos de eletrocussão e identificação da empresa responsável pela linha aérea presente [8].

Sendo então obrigatório as seguintes informações sinalizadas:

- Placa Aviso de Perigo de Morte, esta deve ser colocada a 4 metros do solo, com a face voltada para caminhos ou estradas adjacentes ao apoio;
- Identidade responsável pela linha;
- Nome da linha;
- Contacto de emergência;
- Identificação do número da linha, este tem de ser feito na parte mais notória para os caminhos ou estradas.

No entanto, algumas medidas podem apresentar algumas *nuances* consoante o tipo de apoio. Nos apoios metálicos as sinalizações têm de cumprir as seguintes regras[4]:

- Para linhas simples, os conjuntos sinaléticos são colocados a 4 metros do solo, na face lateral à direita de quem observa a linha e no sentido da numeração crescente dos apoios. Podem ser montado à esquerda, caso exista uma via de acesso junto à face esquerda do apoio;
- Para linhas duplas, a sinalização é colocada para cada linha nas faces laterais onde se situa.

Nos apoios em betão armado, é feita uma pintura da identificação da linha e o número do apoio. Esta pintura é feita na face plana mais visível para os caminhos ou estradas mais próximos.

2.3.3.4 Dispositivos de proteção à avifauna

As linhas aéreas, podem ter variados impactos, um deles trata-se do impacto com as aves que podem comprometer a preservação da biodiversidade. Posto isto, foi necessário instaurar medidas que mitigassem a ameaça para determinadas espécies. Todavia, primeiramente, foi preciso categorizar o nível de ameaça de cada linha aérea e para isso foi feito um levantamento de certas ocorrências negativas segundo a localização geográfica[4]. Segundo, o Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF), as interações diretas entre as aves e as linhas elétricas podem ser por colisão, eletrocussão e disponibilização de suporte. As aves quando entram em colisão ou são eletrocutadas, por norma, resulta em morte ou ferimentos graves. A disponibilização de suporte, consiste na necessidade de algumas espécies precisarem de pousar nas linhas ou até de fazerem um ninho. Esta atividade leva a um aumento de avarias nas redes elétricas, e pode, ainda, levar também à eletrocussão e colisão das aves. Na tabela 2.6 pode ser vista algumas tipologias e características da linha que provocam situações mais ameaçadoras para as aves.

	Colisão	Eletrocussão	Disponibilização de suporte
Tipologias mais perigosas	Cabos de guarda de linhas AT e MAT; Linha dupla em esteira vertical para MAT; GAL em MT;	Selecionadores montados em plano horizontal; Armações TAL e HAL	Linhas aéreas de MT, AT e MAT

Tabela 2.6: Tipologias mais perigosas consoante a interação direta entre aves e as linhas aéreas

[15]

Interações indiretas são também uma realidade, como o efeito de exclusão, resultante na deslocação das aves do seu *habitat* que deixa de ser favorável devido à presença das infraestruturas.

Para reduzir o impacto das nas aves existem dispositivos de proteção de avifauna. Os mais utilizados são dispositivos espanta pássaros, dispositivos de anti nidificação e anti pousio, e ainda, plataformas para construção de ninhos.

Para prevenir a colisão são utilizados *Bird Flight Diversers* (BFD) e os *Firefly Bird Flappers* (FBF)[16]. Os BFD, são em forma de hélice e são de material plástico colorido, de modo a, sinalizar e aumentar a notoriedade do cabo. Os BFD podem ser simples ou duplos; os primeiros devem ser colocados em cabos condutores de fase com 15 metros de intervalo e alternadamente entre fases; os segundos são colocados da mesma forma que os simples com a diferença de serem necessários 60 metros de intervalo[18]. Os FBF, dispositivos mais modernos, são utilizados em cabos de fase ou de guarda, podendo eles serem rotativos ou de fitas com capacidade de emitir luz, o que é benéfico para a noite. Outra forma de minimizar colisões é pela diminuição de uso de tipologias que aumentem o perigo de colisão e sinalizar devidamente as que auferem maior perigo.



Figura 2.22: Ilustração de um *Firefly Bird Flappers*[23]

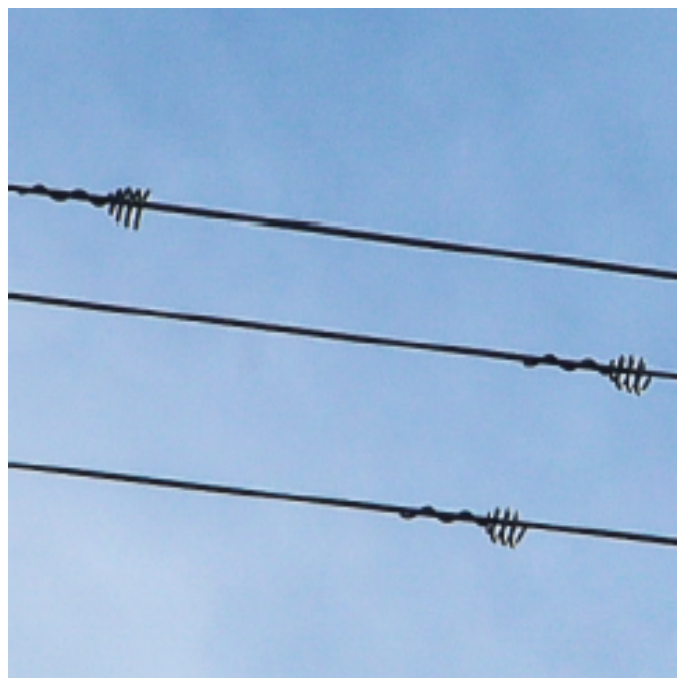


Figura 2.23: Ilustração de um *Bird Flight Diverters*[23]

Para evitar a eletrocussão, por pousio ou criação de ninhos, pode ser instauradas as seguintes medidas preventivas[2][18]:

- Chapas em apoios MT e AT;

- Cobertura de Policloreto de Vinila (PVC) nos cabos perto das armações em apoios de MT;
- Dispositivo dissuasor de nidificação para linhas em MT, também conhecido como guarda-chuva, este impede a criação de ninhos e uma possível consequente eletrocussão, por pousio;
- Dispositivo dissuasor de nidificação de uma ou três hastes tipo seta. Há outras variações de dissuasores com o mesmo propósito, como, dissuasor seta simétrica e dissuasor seta assimétrica;
- Filaças, que além de fixarem os condutores às cadeias isoladores, quer seja em gola ou reigada, também impedem a eletrocussão;
- Protetor de condutor;
- Protetor de pinça de amarração;
- Turbinas;
- Criação de plataformas de nidificação



Figura 2.24: Ilustração de um guarda-chuva de anti-nidificação[23]



Figura 2.25: Ilustração de uma seta assimétrica de anti-nidificação[23]



Figura 2.26: Ilustração de uma plataforma de nidificação[23]

2.3.3.5 Sistemas de ligação à terra

Considerando a existência de fenómenos qualificados como perturbadores das linhas aéreas, alguns têm o potencial de pôr em risco a segurança pública ou de infraestruturas, é o caso das

correntes de fuga. Quando estas correntes dissipam no solo e encontram um condutor, ocorre uma elevação de potencial entre o elemento condutor e o solo, origina, assim, uma tensão que pode ser hostil. Estas provêm de correntes de defeito por via de corrente de curto-circuito ou descargas elétricas.

Dado ao risco que certas tensões de defeito podem provocar, é mandatário o dimensionamento de sistemas de ligação à terra. Este sistema, orientado com a tese deste documento, tem o propósito de conduzir as correntes de defeito para o solo, da forma mais direta possível, através dos elétrodos de terra enterrados nesse mesmo solo. Estes elétrodos de terra estão conectados a um cabo terra, que está conectado ao apoio, que está conectado aos cabos de guarda[23]. Estas interligações resultam numa medida de segurança, para pessoas ou animais, que em situações de perigo, a tensão da terra, V_E , não ultrapasse a tensão de contacto na estrutura, V_F , ou seja, $V_E \leq V_F$ [17].

Este dimensionamento tem de considerar que as correntes de defeito, de origem de descargas atmosféricas, podem levar a V_E atingir valores elevados. Sendo assim, é indispensável realizar o cálculo da tensão atingida nos elétrodos da terra; considerando o valor de pico da corrente de descarga, I_p ; a indutância do elétrodo de terra e condutores de descarga, L ; a resistência de impulso do elétrodo de terra, R_p . Este cálculo pode ser dado por 2.2.

$$V_E \approx \sqrt{\left(L \cdot \frac{di_p}{dt}\right)^2 + (i_p \cdot R_p)^2} [17] \quad (2.2)$$

Para garantia as condições de segurança, o dimensionamento dos circuitos de terra dos apoios deve limitar a tensão de toque e tensão de passo; evitar ocorrência de contornamentos por arco de retorno; e minimizar o valor da resistência da terra. Na possibilidade de correntes de defeito, a tensão de toque não deve ultrapassar os 189V nas zonas públicas e 225V em zonas frequentadas, enquanto a tensão de passo não pode transgredir os valores de 262V e 355V, para zonas públicas e frequentadas, respetivamente [7].

O solo é, normalmente, um mau condutor elétrico, apesar disso, há fatores que influenciam o seu comportamento resistivo, como:

- Humidade;
- Concentração de sais;
- Temperatura;
- Estrutura geológica;
- Granularidade;
- Compactidade;

Para melhorar a resistividade do terreno, pode-se proceder à colocação de terra vegetal junto dos elétrodos de terra, de forma bem compactada[4]. Para resistência da terra o RSLEAT estipula como valor aceitável inferior a 20Ω .

A interligação ao solo é realizada de maneira diferente conforme o apoio utilizado. Para apoios em betão há pontos de ligação determinados para a conexão à terra, essa conexão é feita por um condutor de cobre no interior do poste [19]. Para postes metálicos a ligação é feita pelos terminais de terra existentes em cada um dos elétrodos de terra. Cada pé do apoio que serve de cabo de ligação dos elétrodos deve ficar coberto com 1 metro, sem ficar em contacto com a cantoneira da base. Este pormenor é muito importante, uma vez que, no sistema da terra, se existir algum elemento desconectado do propósito de escoamento de correntes, pode levar a que as correntes de defeito abram lacunas no betão. Por isso, é feita a conexão dos cabos de ligação a um parafuso e porca da base do poste, esta ligação também deve estar embebida em betão [4].

2.4 Projeto de linhas aéreas

Para anexar uma linha elétrica a uma RNT ou a uma RND, de modo que a idealização se concretizar da forma menos invasiva, é primordial colocar muitos fatores na balança. Independentemente do nível de tensão, é basilar um planeamento para a construção de uma linha elétrica. Pois, trata-se de um empreendimento muito complexo e dispendioso. Fatores que podem ter maior peso na balança, no planeamento, é a relação entre o proveito da linha e o custo que ela acarreta. Outro fator relevante é o impacto ambiental, pois a construção da linha carrega consigo um carácter ocupacional que poderá ser prevaricador.

Assim, o projeto de linhas aéreas para MT, AT ou MAT, pode ser tratado como um conjunto de etapas executadas, sequencial ou dinamicamente. De modo a atingir a potencialização máxima durante o projeto, é fulcral realizar análises a todas as condicionantes, a esta etapa chama-se o estudo prévio. A este segue-se a escolha do traçado, que deve ser delineado em escala apropriada no mapa, procurando manter uma linha o mais reta possível nas limitações impostas. Este traçado, deve ser projetado, preferencialmente, ao longo de vales, meias encostas e áreas de fácil acesso, considerando com cuidado o desnível do terreno.

Sendo a próxima etapa a definição do traçado, é preciso notar que são imensas as condicionantes do seu desenho. Desde da presença de cursos de água, a localização do terreno, a necessidade de travessias sobre habitações, caminhos férreos, linhas de transporte ou distribuição já existentes, zonas de património cultural e paisagístico, e ainda, a existência de linhas de telecomunicações, são tudo fatores que podem restringir a construção das linhas. Dada a quantidade abundante de limitações, pode ficar difícil adaptar o traçado para ficar o mais retilíneo possível. Portanto, o resultado, será sempre adaptado rigorosamente aos regulamentos abrangidos.

Após a escolha inicial do traçado, realiza-se um levantamento topográfico minucioso do terreno. Esta etapa é conduzida por um topógrafo, que valida o traçado proposto. O traçado pode não ser validado na primeira análise, podendo o responsável levantar objeções à realização do mesmo. Após a homologação do topógrafo, obtém-se o perfil longitudinal do terreno e a planta parcelar, que assinala todas as características pertinentes num raio de 20m, incluindo as propriedades atravessadas e os respetivos proprietários [5].

No perfil do terreno é de carácter capital definir as distâncias de segurança da linha, e depois dessas medidas estarem estabelecidas, distribuem-se os apoios ao longo do terreno, iniciando por de início, de ângulo e de fim de linha.

Depois do traçado estar definido, chega a parte de fazer o inventário dos elementos necessários para a linha. Inicia-se, então, pelo dimensionamento dos apoios que asseguram a estabilidade estrutural da linha. Este dimensionamento envolve o cálculo mecânico dos esforços a que os apoios estarão sujeitos, como, por exemplo, as trações mecânicas exercidas pelos cabos, que também necessitam de ser calculados. Este cálculo aufere as garantias para a linha resistir a forças que ponham em causa a sua integridade.

A seguir, já será possível realizar o dimensionamento elétrico, fundamental, para garantir que as quedas de tensão e as perdas de energia, encontrem-se conforme as autorizadas pelos regulamentos.

Após a elaboração do projeto, segue-se a parte do licenciamento do projeto e indemnizações dos proprietários lesados. A autorização de licenciamento depende de muitas identidades e varia consoante a linha em questão. As indemnizações terão de ser feitas aos proprietários cuja construção cause algum distúrbio ou prejuízo.

Quando a licença do projeto for dada é, agora, possível começar a etapa de construção. Esta fase final do projeto envolve os seguintes trabalhos, que devem ser realizados de forma eficiente e rentável [21]:

- Trabalhos topográficos como a marcação de apoios, covas, bissetrizes e alinhamentos;
- Instalação do estaleiro e parque de material, que servem de apoio à obra;
- Reconhecimento, sinalização e abertura dos acessos;
- Limpeza do terreno que vão ocupar a faixa de proteção da linha;
- Abertura de valas;
- Construção dos maciços de fundações;
- Colocação dos apoios;
- Instalação de cabos;
- Colocação dos dispositivos de sinalização das linhas;
- Colocação de dispositivos de proteção;
- Colocação de dispositivos de proteção avifauna;

Capítulo 3

Teoria do Cálculo Elétrico

3.1 Objetivo

O presente capítulo visa abordar a demonstração teórica do cálculo elétrico necessário para um dimensionamento eficiente e seguro de linhas aéreas de MT, AT e MAT.

Ao longo das subseqüentes secções, será abordado cada uma das grandezas necessárias, com a profundidade técnica exigida. Para cumprir o rigor necessário que o tema exige, é necessário a aplicação das normas nacionais e internacionais, tais como o RSLEAT, EN50341-17 e IEC-60287. Além da exposição teórica do cálculo, este capítulo também alude à otimização do dimensionamento dos condutores.

3.2 Caracterização da linha

3.2.1 Linha simples e linha dupla

As linhas aéreas podem ser caracterizadas por linhas simples ou linhas duplas. As primeiras apresentam um só circuito trifásico, enquanto as linhas duplas possuem dois circuitos trifásicos instaladas no mesmo apoio.

3.2.2 Número de condutores por fase

Caso necessário, cada circuito trifásico pode apresentar mais que um condutor por fase. Esta situação pode ser viável quando é necessário diminuir a secção dos condutores e consequentemente o seu peso [4]. É recorrente o uso com dois condutores por fase em linhas de MAT. Para a instalação destas tipologias é necessário o uso de espaçadores para separar e manter a distância entre os cabos da mesma fase sem comprometer os níveis de segurança.

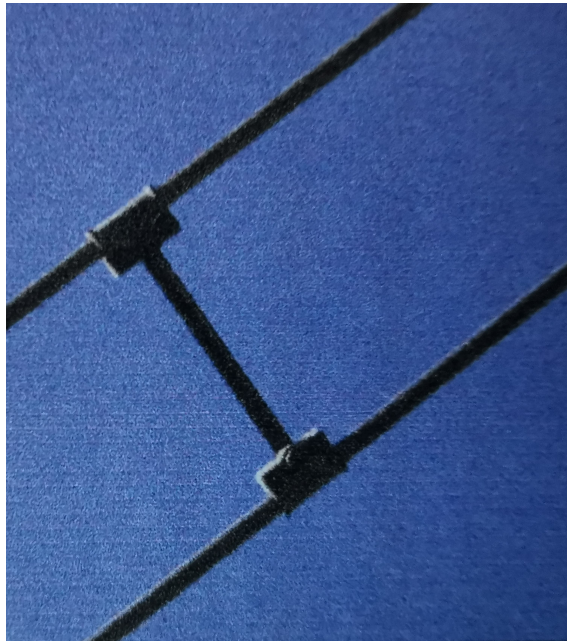


Figura 3.1: Espaçador para dois condutores da mesma fase [4].

3.2.3 Distância geométrica entre condutores

A disposição e geometria dos cabos ao longo do comprimento da linha afeta o cálculo elétrico. Portanto, é mandatário o conhecimento das distâncias entre cada condutor. Depois do estudo da distância entre cada condutor é possível o cálculo da distância geométrica entre condutores. Este cálculo é diferente caso a linha seja simples ou dupla, sendo, também, influenciado pelo tipo de armação ou apoio utilizado pela linha.

Para demonstração do cálculo para uma linha simples tem-se como base a figura 3.2.

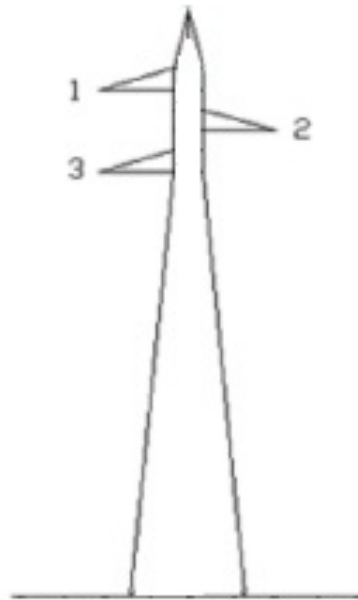


Figura 3.2: Esboço de uma silhueta de um apoio com armação simples em galhardete.

Para uma linha simples, a distância geométrica entre os condutores é descrita pela expressão 3.1.

$$D = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}} \quad [m] \quad (3.1)$$

Onde:

- D - Distância geométrica entre condutores [m];
- D_{12} - Distância entre a fase 1 e 2 [m];
- D_{13} - Distância entre a fase 1 e 3 [m];
- D_{23} - Distância entre a fase 2 e 3 [m].

Para demonstração do cálculo para uma linha dupla tem-se como base a figura 3.3.

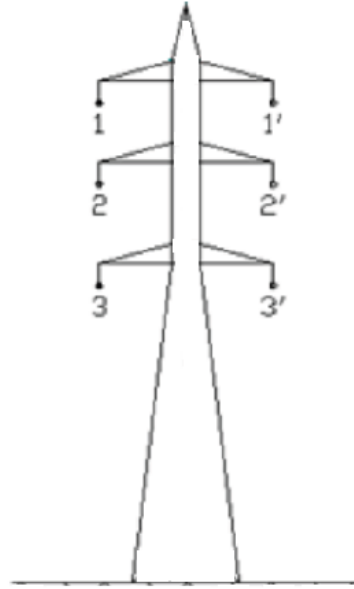


Figura 3.3: Esboço de uma silhueta de um apoio com armação dupla.

Para uma linha dupla, a distância geométrica entre os condutores é descrita pela expressão 3.2.

$$D = \sqrt[3]{D_1 \cdot D_2 \cdot D_3} \quad [m] \quad (3.2)$$

Em que:

$$D_1 = \frac{\sqrt{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{12'} \cdot D_{13'}}}{D_{11'}} \quad (3.3)$$

$$D_2 = \frac{\sqrt{D_{21} \cdot D_{23} \cdot D_{21'} \cdot D_{23'}}}{D_{22'}} \quad (3.4)$$

$$D_3 = \frac{\sqrt{D_{31} \cdot D_{32} \cdot D_{31'} \cdot D_{32'}}}{D_{33'}} \quad (3.5)$$

Onde:

- D - Distância geométrica entre condutores [m];
- D_{AB} - Distância entre a fase A e B [m];

3.2.4 Características dos cabos condutores

Para além dos apoios, outra componente que caracteriza a linha são os condutores que ela utiliza. O cabo escolhido por uma linha aérea será um fator preponderante para o seu dimensionamento, como já abordado no capítulo 2.3.2

3.3 Parâmetros meteorológicos

As condições meteorológicas também desempenham um fator no cálculo elétrico, como, por exemplo, a velocidade do vento e a temperatura ambiente.

3.3.1 Método de Kuipers & Brown

O modelo de *Kuipers-Brown* expõe uma forma de calcular a transferência de energética do sistema composto pelos condutores elétricos e o meio envolvente. Este modelo traduz o equilíbrio térmico, tendo em conta os parâmetros envolventes no sistema pela expressão 3.6.

$$I^2 \cdot R_{\text{cond}} + \alpha_s \cdot G \cdot d - 8.55 \cdot (T_{\text{cond}} - T_{\text{amb}}) \cdot (v \cdot d)^{0.448} - \pi \cdot E \cdot C \cdot d \cdot (T_{\text{cond}}^4 - T_{\text{amb}}^4) = 0 \quad (3.6)$$

Onde:

- I : Corrente elétrica máxima do condutor $[A]$;
- R_{cond} : Resistência elétrica do condutor $[\Omega/m]$;
- α_s : Coeficiente de absorção solar $[adimensional]$;
- G : Intensidade de radiação solar numa superfície $[W/m^2]$;
- d : Diâmetro do condutor $[m]$;
- T_{cond} : Temperatura do condutor $[K]$;
- T_{amb} : Temperatura ambiente $[K]$;
- v : Velocidade do vento $[m/s]$;
- E : Emissividade do condutor $[adimensional]$;
- C : Constante de Stefan-Boltzmann $[W/m^2/K^4]$.

Este modelo normaliza parâmetros tendo em conta o contexto geográfico. Em Portugal utilizam-se os seguintes valores:

- v : 0,6 $[m/s]$;
- G : 1000 $[W/m^2]$;

- T_{amb} :
 - Inverno: 0 a 15°C;
 - Primavera: 20 a 25°C;
 - Verão: 30 a 35°C;
 - Outono: 20 a 25°C.

3.4 Tensão de Transporte

A tensão nominal é a tensão estipulada para uma determinada rede ou instalação de modo que o desempenho seja o previsto[8]. Quando o projeto para uma determinada linha elétrica é concebido, o nível de tensão nominal é sempre dos primeiros fatores a ter em consideração. Pois, para futuros reajustes da linha é necessário sempre que o nível de tensão seja congruente ou caso não se verifique, terá de se optar por acréscimo de uma de estações transformadoras acarretando maiores custos. Outros custos também associados ao nível de tensão e são muito minuciosos, pois nem sempre pode ser fácil um equilíbrio da gestão de orçamento. Quanto maior for a tensão estipulada, menor será a secção dos condutores, menor será os esforços exercidos pela linha, e menor será o custo. No entanto, quanto maior for a tensão, mais custos terá na proteção e suporte da linha.

A tabela 3.1 expõe as tensões nominais de instalação para redes trifásicas mais comuns. Onde a tensão estipulada para o cabo é dada por três valores de tensão [24]:

- U_O - tensão entre um condutor e um potencial referencial;
- U - tensão entre dois condutores de fase;
- U_m - tensão máxima que pode aparecer entre fases da rede, em condições normais.

Tensão nominal composta da rede [kV]	Tensão estipulada U_0/U [kV]	Tensão estipulada U_m [kV]
3	1,8/3 e 3/3	3,6
6	3,6/6 e 6/6	7,2
10	6/10	12
15	8,7/15	17,5
20 - 22	12/20 ou 12,2/22	24
30 - 33	18/30 ou 19/33	36
45	26/45	52
63 - 66 - 69	36/60 ou 36/63	72,5
70	40,5/70	82,5
90	52/90	100
110 - 115	64/110 ou 66/115	123
132 - 138	76/132 ou 80/138	145
150	87/150	170
220 - 225 - 230	130/220 ou 130/225	245
400	230/400	420
500	290/500	525

Tabela 3.1: Tensão nominal e estipulada para cabos de MT, AT e MAT

[24]

3.5 Corrente Nominal

A corrente nominal é um parâmetro fundamental no dimensionamento elétrico e pode ser calculada utilizando a seguinte fórmula:

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi} \quad [A] \quad (3.7)$$

Onde:

- I_n - Corrente nominal [A];
- S - Potência transmitida [W];
- U - Tensão nominal da linha [V];
- $\cos \varphi$ - Fator de potência da linha.

Esta fórmula considera não apenas a potência e a tensão do sistema, mas também o fator de potência, que é um indicador da eficiência com que a energia elétrica é utilizada. O fator de potência ($\cos \varphi$) é a razão entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S) do sistema.

A inclusão do fator de potência na fórmula é crucial, pois:

- Reflete a relação entre potência ativa e reativa no sistema.
- Influencia diretamente na capacidade de transmissão de potência ativa da linha.
- Afeta as perdas e a eficiência global do sistema de transmissão.

3.6 Resistência Elétrica

A resistência elétrica é um dos fatores cruciais no projeto de linhas elétricas, influenciando diretamente as perdas de energia.

Os condutores apresentam diferentes níveis de resistência para corrente contínua e corrente alternada. Para corrente contínua, a resistência depende principalmente da natureza do material condutor, definida pela sua resistividade, e das dimensões do condutor. No âmbito desta dissertação a resistência em corrente contínua será calculada apenas para obter a resistência em corrente alternada. Em corrente contínua, a Resistência R é dada pela expressão 3.8.

$$R = \frac{4 \cdot \rho_{20^\circ\text{C}}}{n \cdot \pi \cdot d^2} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \quad [\Omega/\text{km}] \quad (3.8)$$

Onde:

- $\rho_{20^\circ\text{C}}$ - Resistividade do material da alma condutora a 20°C ;
- n - Número de fios na alma condutora;

- d - Diâmetro dos fios da alma condutora $[mm]$;
- K_1 - Fator de fabrico do tratamento da superfície dos fios;
- K_2 - Fator de fabrico do cabeamento para almas multifilares;
- K_3 - Fator de fabrico do passo de hélice para almas multifilares;

No entanto, o cálculo torna-se complexo uma vez que as almas condutoras são compactas e por isso usa-se a expressão 3.9.

$$R = \frac{\rho_{20^\circ\text{C}}}{S} \quad [\Omega/km] \quad (3.9)$$

Onde:

- $\rho_{20^\circ\text{C}}$ - Resistividade elétrica a 20°C do material condutor $[\Omega \cdot mm^2/km]$;
- S - Secção do condutor $[m^2]$

Outro fator importante quando é realizado o cálculo da resistência elétrica é a temperatura. A resistência varia consoante a temperatura e, portanto, é necessário corrigir o cálculo perante a variação da mesma. A fórmula que faz a correção da resistência, para corrente contínua, consoante a temperatura é a expressão 5.6.

$$R_{CC} = R_{20^\circ\text{C}} \cdot [1 + \alpha_{20^\circ\text{C}} \cdot (T_{\text{máx}} - 20)] \quad [\Omega/km] \quad (3.10)$$

Onde:

- $R_{20^\circ\text{C}}$ - Resistência em corrente contínua do condutor a 20°C $[\Omega \cdot km]$;
- $\alpha_{20^\circ\text{C}}$ - Coeficiente de temperatura a 20°C $[^\circ\text{C}^{-1}]$;
- $T_{\text{máx}}$ - Temperatura de operação máxima $[^\circ\text{C}]$.

O valor de $R_{20^\circ\text{C}}$ deve ser calculado com a fórmula 3.9.

O cálculo da resistência para corrente alternada é necessário ter em consideração, que a corrente não se distribui uniformemente pela secção do condutor, este fenómeno é designado de efeito pelicular. Este fenómeno resulta na propensão da corrente, no condutor, ter maior densidade quanto mais perto for a superfície ou a película, daí a nomenclatura, do condutor. Portanto, a distribuição não uniforme do fluxo magnético no interior do condutor, faz com que a secção efetiva do condutor seja inferior ao expectável, contribuindo assim para o aumento da resistência em corrente alternada. Existe, portanto, para corrente alternada a necessidade de ter em consideração o fator de efeito pelicular, Y_s , que pode ser obtido pela expressão 3.11.

$$Y_s = \frac{(X_s)^4}{192 + 0,8 \cdot (X_s)^4} \quad (3.11)$$

$$(X_s)^2 = \frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R_{CC}} \cdot 10^{-7} \cdot K_s, X_s < 2,8 \quad (3.12)$$

Onde:

- f - Frequência da rede [Hz];
- K_s - Valores tabelados pela norma da *International Electrotechnical Commission*.

Existe ainda outro fator que influencia o cálculo da resistência que é o efeito de proximidade. Dado a distribuição não uniforme do fluxo magnético no interior do condutor, e tendo em conta a indução magnética entre os condutores vizinhos da linha. A expressão 3.13 que traduz este efeito onde é obtido o fator de efeito de proximidade, Y_p .

$$Y_s = \frac{(X_p)^4}{192 + 0,8 \cdot (X_p)^4} \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \cdot \left[0,312 \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{(X_p)^4}{192 + 0,8 \cdot (X_p)^4}} + 0,27 \right] \quad (3.13)$$

$$(X_p)^2 = \frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R_{CC}} \cdot 10^{-7} \cdot K_p, \quad X_p < 2,8 \quad (3.14)$$

Onde:

- d_c - Diâmetro do condutor;
- s - Distância entre condutores;
- f - Frequência da rede [Hz];
- K_p - Valores tabelados pela norma da *International Electrotechnical Commission*.

Os valores dos coeficientes para o cálculo do efeito pelicular e efeito de proximidade para condutores de cobre são:

Tipo de condutor	K_s	K_p
Circular e multifilar	1	0,8
Circular e segmentado	0,435	0,37

Tabela 3.2: Coeficientes do efeito de proximidade e efeito pelicular para condutores de cobre

Os valores dos coeficientes para o cálculo do efeito pelicular e efeito de proximidade para condutores de alumínio são:

Tipo de condutor	K_s	K_p
Circular e multifilar	1	0,8
Circular e 4 segmentos	0,28	0,37
Circular e 5 segmentos	0,19	0,37
Circular e 6 segmentos	0,12	0,37

Tabela 3.3: Coeficientes do efeito de proximidade e efeito pelicular para condutores de alumínio

Para condutores de alumínio, dado à falta de dados experimentais, os valores de coeficiente de efeito de proximidade são utilizados os valores para condutores de cobre.

Após o cálculo da resistência em corrente contínua, o fator de efeito pelicular e o fator de efeito de proximidade, é possível determinar a resistência em corrente alternada pela expressão 3.15.

$$R_{CA} = R_{CC} \cdot (1 + Y_s + Y_p) \quad [\Omega/km] \quad (3.15)$$

Apesar de abordado, o efeito de proximidade é desconsiderado e desprezável para frequências de 50 ou 60Hz [25].

3.7 Indutância

Os campos magnéticos criados pela passagem de corrente elétrica, dão origem a um fluxo magnético. A grandeza que relaciona este fluxo e a corrente é a indutância. Esta grandeza é influenciada pelo distanciamento entre condutores e pelo diâmetro do cabo. O coeficiente de autoindução é dado pela expressão 3.16.

$$L_k = \left[\frac{\mu}{2 \cdot n} + 4,605 \cdot \log \left(\frac{D}{r'} \right) \right] \cdot 10^{-4} \quad [H/km] \quad (3.16)$$

Onde:

- μ - Permeabilidade relativa do condutor, em que:
 - $\mu = 1$;

- $\mu = 200$, caso o condutor seja de aço galvanizado.
- n - Número de condutores por fase;
- D - Distância geométrica entre condutores [mm];
- r' - Raio fictício do condutor [mm].

O raio fictício de um condutor pode ser calculado pela expressão 3.17

$$r' = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot R^{n-1}} \quad [mm] \quad (3.17)$$

Onde:

- r - Raio do condutor [mm];
- n - Número de condutores por fase;
- R - Raio da circunferência imaginária que passa pelos condutores da mesma fase, apenas é utilizada para linhas com mais que um condutor por fase [mm].

3.8 Reactância

A reactância é o parâmetro que influencia mais uma linha elétrica. Pois, este influencia diretamente a capacidade de transporte e queda de tensões na linha. Esta grandeza varia consoante a indutância e a frequência angular e dada pela expressão 5.3.

$$X_k = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_k \quad [\Omega/km] \quad (3.18)$$

Onde:

- f - Frequência [Hz];
- L_k - Indutância [H/km];

3.9 Capacidade

Os condutores das linhas aéreas de energia elétrica apresentam diferenças de tensão entre si, em relação ao cabo de guarda e ao solo. Essas diferenças de potencial indicam a presença de cargas elétricas distribuídas ao longo dos condutores e consequentemente os condutores absorvem da fonte as cargas elétricas necessárias para o seu carregamento, semelhante a um condensador. Este fluxo de cargas elétricas constitui uma corrente, denominada corrente de carga da linha, resultante da carga e descarga cíclica do circuito.

A corrente de carga das linhas é quase insignificante em linhas aéreas curtas, mas pode atingir valores elevados em linhas de grande comprimento. Para linhas aéreas trifásicas, a capacidade linear é dado pela expressão 3.19.

$$C_k = \frac{24,2}{\log\left(\frac{D}{r'}\right)} \cdot 10^{-9} \quad [F/km] \quad (3.19)$$

Onde:

- D - Distância geométrica entre condutores [mm];
- r' - Raio fictício do condutor [mm].

3.10 Susceptância

A susceptância resulta da multiplicação da capacidade linear pela velocidade angular, e exprime-se pela 3.20

$$B_k = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_k \quad [S/km] \quad (3.20)$$

Onde:

- f - Frequência [Hz];
- C_k - Capacidade [F/km].

3.11 Condutância

A condutância é um parâmetro que representa a facilidade com que a corrente elétrica flui mediante um condutor. Em termos matemáticos, a condutância é definida como o inverso da resistência elétrica, sendo expressa pela seguinte equação:

$$G = \frac{1}{R} \quad [S] \quad (3.21)$$

Onde:

- G - Condutância [Siemens (S)];
- R - Resistência elétrica [Ω].

No contexto do dimensionamento é, geralmente, desprezada no cálculo.

3.12 Impedância

A impedância é um parâmetro complexo definida pela seguinte expressão:

$$\underline{Z}_k = R_k + jX_k \quad [\Omega] \quad (3.22)$$

Onde:

- R_k - Resistência elétrica $[\Omega]$;
- X_k - Reactância $[\Omega]$.

3.13 Admitância

A admitância é um parâmetro complexo, que por convenção da condutância ser desprezível, se resume à susceptância. A admitância é obtida segundo a expressão 3.23.

$$\underline{Y}_k = G_k + jB_k \quad [\Omega] \quad (3.23)$$

Onde:

- G_k - Condutância $[S]$;
- B_k - Susceptância $[S]$.

3.14 Impedância característica

A impedância característica é um valor constante que relaciona a tensão e a corrente, para toda a linha. Esta grandeza é dada pela seguinte expressão:

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{\underline{Z}_k}{\underline{Y}_k}} \quad [\Omega] \quad (3.24)$$

Onde:

- R_k - Impedância $[\Omega/km]$;
- X_k - Admitância $[S/km]$.

3.15 Perdas da linha

Ao longo da linha vai-se perdendo potência por efeito Joule, e essas perdas podem ser calculadas pela seguinte expressão:

$$p = n \cdot R \cdot I^2 \quad [W] \quad (3.25)$$

Onde:

- n - Número de condutores da linha;
- R - Resistência elétrica $[\Omega]$.
- I - Corrente nominal por fase $[A]$.

3.16 Queda de tensão

O objetivo final de dimensionamento elétrico de uma linha aérea é garantir que a queda de tensão não exceda os 5% da tensão nominal, ao longo da linha. A queda de tensão entre duas extremidades da linha é dada pela expressão 3.26.

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi) \quad [V] \quad (3.26)$$

Onde:

- φ - Ângulo de defasamento;
- R - Resistência elétrica $[\Omega]$;
- I - Corrente nominal da linha $[A]$;
- X_k - Reactância $[\Omega]$.

Quando a abordagem da queda de tensão é comum utilizar-se o valor percentual que pode ser obtido pela expressão 3.27.

$$\Delta U = \frac{\Delta U}{U_{\text{nominal}}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.27)$$

Capítulo 4

Software de Cálculo Desenvolvido

Concluída a análise teórica do cálculo elétrico e do alargado estudo do funcionamento do SEE, neste capítulo será apresentado o programa de cálculo desenvolvido denominado InLinhas.

4.1 Apresentação do programa

O InLinhas é um *software* de cálculo, desenvolvido de raiz no Microsoft Excel, que foi concebido para o processo de dimensionamento elétrico de linhas de MT, AT e MAT. Este programa oferece uma ferramenta intuitiva e acessível para engenheiros e técnicos, permitindo realizar cálculos complexos de forma eficiente e precisa. Através do uso de macros e fórmulas avançadas, o InLinhas automatiza muitas das tarefas repetitivas, reduzindo o tempo necessário para concluir os cálculos e minimizando a possibilidade de erros humanos.

O programa tem como finalidade devolver ao utilizador uma solução personalizada consoante as preferências do mesmo. Esta solução, varia consoante o regime de cálculo escolhido, mas de modo geral, devolve uma tabela com valores pertinentes para o estudo elétrico de um projeto de linhas aéreas. Os valores de saída que o programa consegue calcular são:

- Distância geométrica entre condutores;
- Susceptância;
- Condutância;
- Admitância;
- Reactância;
- Impedância;
- Impedância característica;
- Corrente máxima admissível;
- Potência máxima admissível;

- Perdas de energia;
- Queda de tensão.

Sendo que, os valores finais mais procurados pelo utilizador, normalmente, são as perdas de energia e a queda da tensão da linha.

O resultado desenvolvido ao longo da dissertação envolveu, *a priori*, uma hipotética caracterização do *design* com a finalidade do programa funcionar harmoniosamente. O InLinhas foi desenhado para ser de fácil utilização e intuitivo. Para tal, foi desenvolvido um menu, onde o utilizador pode navegar e após seleccionar o dimensionamento desejado introduz os valores de entrada e obtêm instantaneamente os resultados esperados.

Para o desenvolvimento do programa é necessário um levantamento de dados, fórmulas pertinentes e a criação de uma base dados.

A última parcela da arquitetura do programa trata-se da ligação de todas as partes constituintes e pertinentes a usar em cada situação solicitada pelo utilizador. Para isso, algo que não está acessível ao utilizador, no entanto, foram programadas, instruções e rotinas que tornam a navegação automatizada e sem erros.

Na figura 4.1, pode-se observar um esboço da arquitetura, que resume a harmonia do programa.

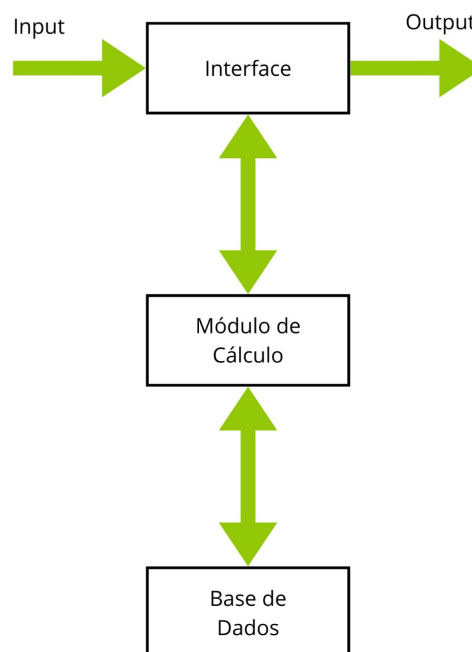


Figura 4.1: Esquema da arquitetura do InLinhas

4.2 Bases de dados desenvolvidas

Após o estudo do dimensionamento elétrico teórico, surge a necessidade de aplicar o mesmo. A primeira etapa baseia-se em reunir os dados necessários para o dimensionamento de linhas. Segue-se uma exposição dos primeiros dados reunidos e organizados numa base de dados localizada no InLinhas:

- Distância da disposição entre cada fase para um determinado tipo de armação do apoio. Para esta informação ser coletada, uma vez que não existe nenhuma base de dados disponível com tal informação, procedeu-se a uma procura exaustiva individual para cada armação, utilizada pela E-REDES e pela REN para MT, AT e MAT. Um exemplo de um catálogo pode-se observar na figura 4.2; após a recolha de cada distância foi necessário usar essas mesmas distâncias e para cada armação calcular a distância geométrica entre fases. Isto tudo foi calculado e organizado em divisões do Excel que estão escondidas do utilizador, mas que se tornam essenciais para o cálculo elétrico. Alguns exemplos dessas bases de dados podem ser observadas nas figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6.

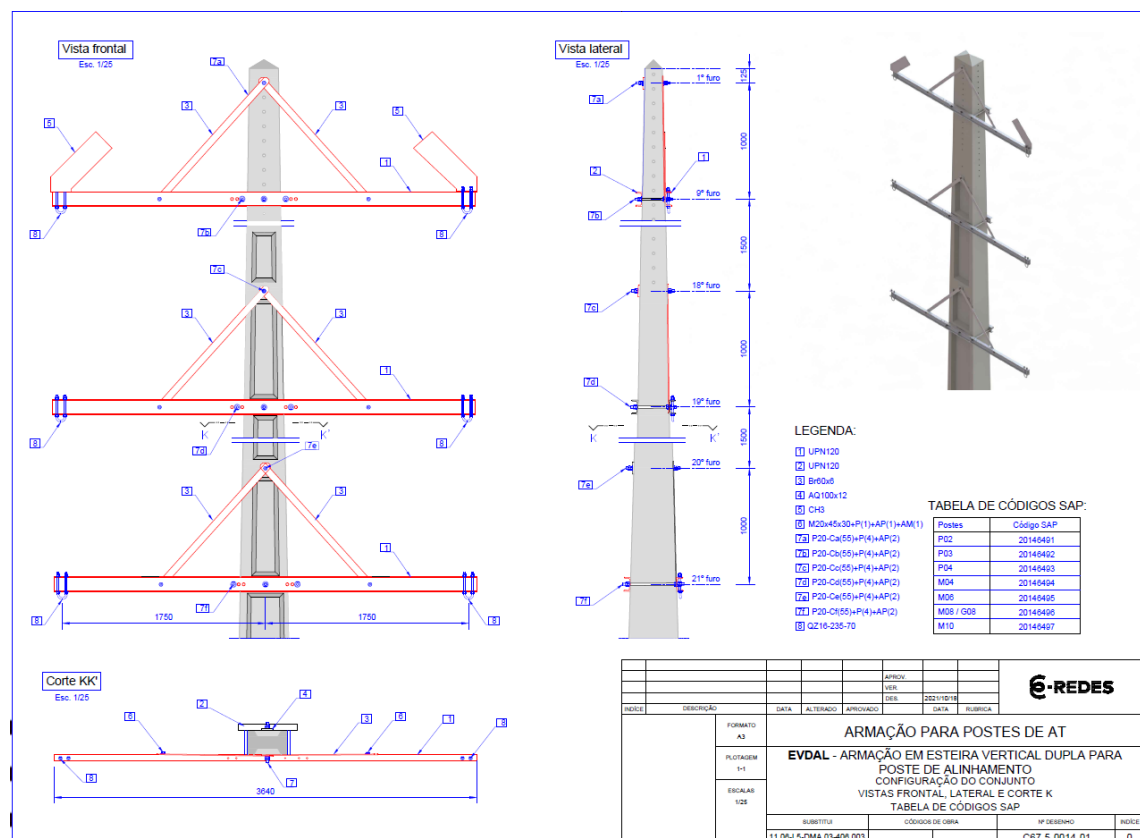


Figura 4.2: Armação em esteira vertical dupla para poste de alinhamento, para linhas de AT [10]

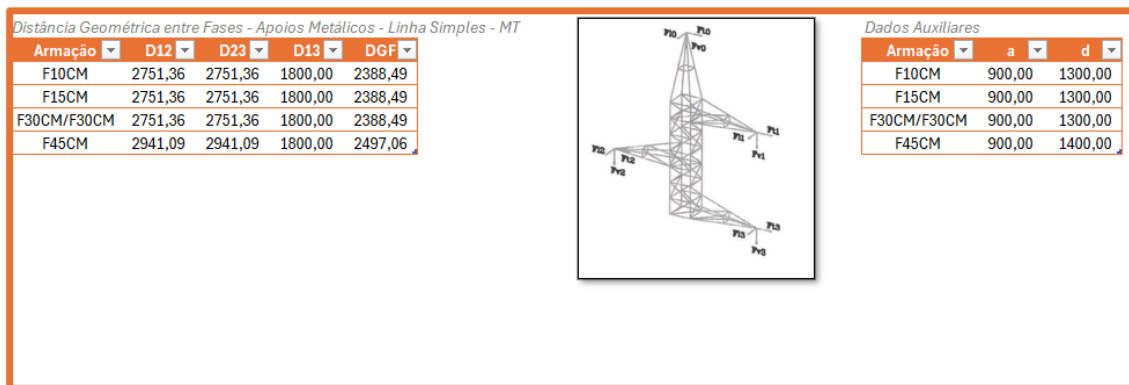


Figura 4.3: Exemplo retirado da base de dados para o cálculo da distância geométrica entre condutores para um apoio metálico para linha simples

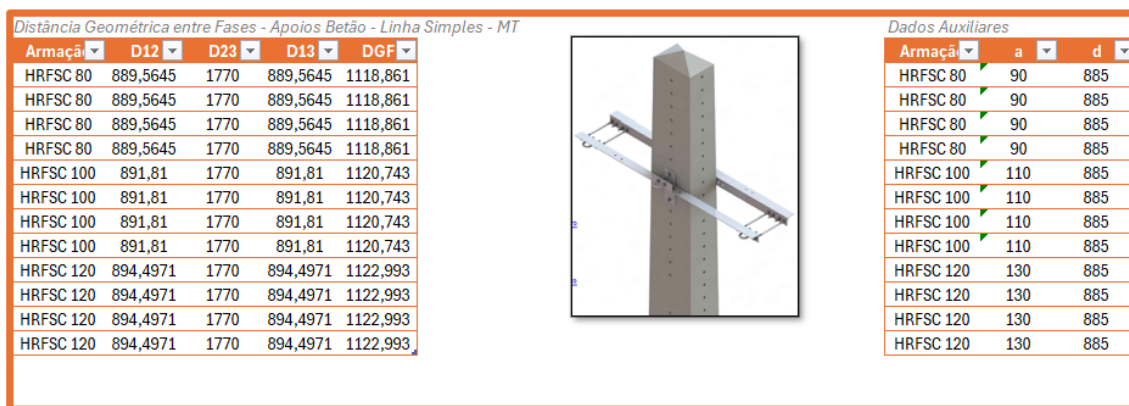


Figura 4.4: Exemplo retirado da base de dados para o cálculo da distância geométrica entre condutores para um apoio de betão para linha simples

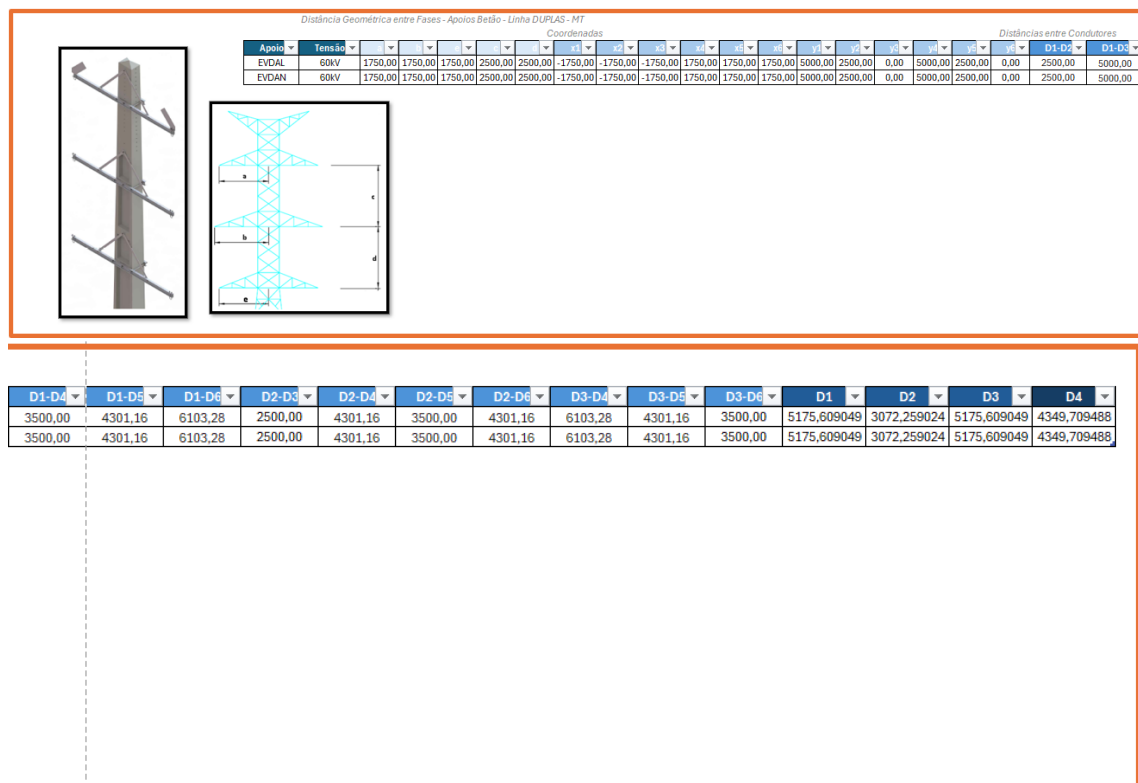
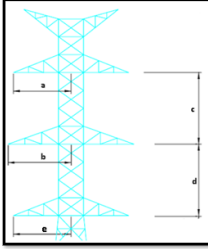


Figura 4.5: Exemplo retirado da base de dados para o cálculo da distância geométrica entre condutores para um apoio de betão para linha dupla

Distância Geométrica entre Fases - Apoios Metálicos - Linha DUPLAS - MAT



Coordenadas

Apoio	Tensão	a	b	c	d	e	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8	g9	g10	g11	g12	g13	g14	g15	g16	g17	g18	g19	g20	g21	g22	g23	g24	g25	g26	g27	g28	g29	g30	g31	g32	g33	g34	g35	g36	g37	g38	g39	g40	g41	g42	g43	g44	g45	g46	g47	g48	g49	g50	g51	g52	g53	g54	g55	g56	g57	g58	g59	g60	g61	g62	g63	g64	g65	g66	g67	g68	g69	g70	g71	g72	g73	g74	g75	g76	g77	g78	g79	g80	g81	g82	g83	g84	g85	g86	g87	g88	g89	g90	g91	g92	g93	g94	g95	g96	g97	g98	g99	g100	g101	g102	g103	g104	g105	g106	g107	g108	g109	g110	g111	g112	g113	g114	g115	g116	g117	g118	g119	g120	g121	g122	g123	g124	g125	g126	g127	g128	g129	g130	g131	g132	g133	g134	g135	g136	g137	g138	g139	g140	g141	g142	g143	g144	g145	g146	g147	g148	g149	g150	g151	g152	g153	g154	g155	g156	g157	g158	g159	g160	g161	g162	g163	g164	g165	g166	g167	g168	g169	g170	g171	g172	g173	g174	g175	g176	g177	g178	g179	g180	g181	g182	g183	g184	g185	g186	g187	g188	g189	g190	g191	g192	g193	g194	g195	g196	g197	g198	g199	g200	g201	g202	g203	g204	g205	g206	g207	g208	g209	g210	g211	g212	g213	g214	g215	g216	g217	g218	g219	g220	g221	g222	g223	g224	g225	g226	g227	g228	g229	g230	g231	g232	g233	g234	g235	g236	g237	g238	g239	g240	g241	g242	g243	g244	g245	g246	g247	g248	g249	g250	g251	g252	g253	g254	g255	g256	g257	g258	g259	g260	g261	g262	g263	g264	g265	g266	g267	g268	g269	g270	g271	g272	g273	g274	g275	g276	g277	g278	g279	g280	g281	g282	g283	g284	g285	g286	g287	g288	g289	g290	g291	g292	g293	g294	g295	g296	g297	g298	g299	g300	g301	g302	g303	g304	g305	g306	g307	g308	g309	g310	g311	g312	g313	g314	g315	g316	g317	g318	g319	g320	g321	g322	g323	g324	g325	g326	g327	g328	g329	g330	g331	g332	g333	g334	g335	g336	g337	g338	g339	g340	g341	g342	g343	g344	g345	g346	g347	g348	g349	g350	g351	g352	g353	g354	g355	g356	g357	g358	g359	g360	g361	g362	g363	g364	g365	g366	g367	g368	g369	g370	g371	g372	g373	g374	g375	g376	g377	g378	g379	g380	g381	g382	g383	g384	g385	g386	g387	g388	g389	g390	g391	g392	g393	g394	g395	g396	g397	g398	g399	g400	g401	g402	g403	g404	g405	g406	g407	g408	g409	g410	g411	g412	g413	g414	g415	g416	g417	g418	g419	g420	g421	g422	g423	g424	g425	g426	g427	g428	g429	g430	g431	g432	g433	g434	g435	g436	g437	g438	g439	g440	g441	g442	g443	g444	g445	g446	g447	g448	g449	g450	g451	g452	g453	g454	g455	g456	g457	g458	g459	g460	g461	g462	g463	g464	g465	g466	g467	g468	g469	g470	g471	g472	g473	g474	g475	g476	g477	g478	g479	g480	g481	g482	g483	g484	g485	g486	g487	g488	g489	g490	g491	g492	g493	g494	g495	g496	g497	g498	g499	g500	g501	g502	g503	g504	g505	g506	g507	g508	g509	g510	g511	g512	g513	g514	g515	g516	g517	g518	g519	g520	g521	g522	g523	g524	g525	g526	g527	g528	g529	g530	g531	g532	g533	g534	g535	g536	g537	g538	g539	g540	g541	g542	g543	g544	g545	g546	g547	g548	g549	g550	g551	g552	g553	g554	g555	g556	g557	g558	g559	g560	g561	g562	g563	g564	g565	g566	g567	g568	g569	g570	g571	g572	g573	g574	g575	g576	g577	g578	g579	g580	g581	g582	g583	g584	g585	g586	g587	g588	g589	g590	g591	g592	g593	g594	g595	g596	g597	g598	g599	g600	g601	g602	g603	g604	g605	g606	g607	g608	g609	g610	g611	g612	g613	g614	g615	g616	g617	g618	g619	g620	g621	g622	g623	g624	g625	g626	g627	g628	g629	g630	g631	g632	g633	g634	g635	g636	g637	g638	g639	g640	g641	g642	g643	g644	g645	g646	g647	g648	g649	g650	g651	g652	g653	g654	g655	g656	g657	g658	g659	g660	g661	g662	g663	g664	g665	g666	g667	g668	g669	g670	g671	g672	g673	g674	g675	g676	g677	g678	g679	g680	g681	g682	g683	g684	g685	g686	g687	g688	g689	g690	g691	g692	g693	g694	g695	g696	g697	g698	g699	g700	g701	g702	g703	g704	g705	g706	g707	g708	g709	g710	g711	g712	g713	g714	g715	g716	g717	g718	g719	g720	g721	g722	g723	g724	g725	g726	g727	g728	g729	g730	g731	g732	g733	g734	g735	g736	g737	g738	g739	g740	g741	g742	g743	g744	g745	g746	g747	g748	g749	g750	g751	g752	g753	g754	g755	g756	g757	g758	g759	g760	g761	g762	g763	g764	g765	g766	g767	g768	g769	g770	g771	g772	g773	g774	g775	g776	g777	g778	g779	g780	g781	g782	g783	g784	g785	g786	g787	g788	g789	g790	g791	g792	g793	g794	g795	g796	g797	g798	g799	g800	g801	g802	g803	g804	g805	g806	g807	g808	g809	g810	g811	g812	g813	g814	g815	g816	g817	g818	g819	g820	g821	g822	g823	g824	g825	g826	g827	g828	g829	g830	g831	g832	g833	g834	g835	g836	g837	g838	g839	g840	g841	g842	g843	g844	g845	g846	g847	g848	g849	g850	g851	g852	g853	g854	g855	g856	g857	g858	g859	g860	g861	g862	g863	g864	g865	g866	g867	g868	g869	g870	g871	g872	g873	g874	g875	g876	g877	g878	g879	g880	g881	g882	g883	g884	g885	g886	g887	g888	g889	g890	g891	g892	g893	g894	g895	g896	g897	g898	g899	g900	g901	g902	g903	g904	g905	g906	g907	g908	g909	g910	g911	g912	g913	g914	g915	g916	g917	g918	g919	g920	g921	g922	g923	g924	g925	g926	g927	g928	g929	g930	g931	g932	g933	g934	g935	g936	g937	g938	g939	g940	g941	g942	g943	g944	g945	g946	g947	g948	g949	g950	g951	g952	g953	g954	g955	g956	g957	g958	g959	g960	g961	g962	g963	g964	g965	g966	g967	g968	g969	g970	g971	g972	g973	g974	g975	g976	g977	g978	g979	g980	g981	g982	g983	g984	g985	g986	g987	g988	g989	g990	g991	g992	g993	g994	g995	g996	g997	g998	g999	g1000	g1001	g1002	g1003	g1004	g1005	g1006	g1007	g1008	g1009	g1010	g1011	g1012	g1013	g1014	g1015	g1016	g1017	g1018	g1019	g1020	g1021	g1022	g1023	g1024	g1025	g1026	g1027	g1028	g1029	g1030	g1031	g1032	g1033	g1034	g1035	g1036	g1037	g1038	g1039	g1040	g1041	g1042	g1043	g1044	g1045	g1046	g1047	g1048	g1049	g1050	g1051	g1052	g1053	g1054	g1055	g1056	g1057	g1058	g1059	g1060	g1061	g1062	g1063	g1064	g1065	g1066	g1067	g1068	g1069	g1070	g1071	g1072	g1073	g1074	g1075	g1076	g1077	g1078	g1079	g1080	g1081	g1082	g1083	g1084	g1085	g1086	g1087	g1088	g1089	g1090	g1091	g1092	g1093	g1094	g1095	g1096	g1097	g1098	g1099	g1100	g1101	g1102	g1103	g1104	g1105	g1106	g1107	g1108	g1109	g1110	g1111	g1112	g1113	g1114	g1115	g1116	g1117	g1118	g1119	g1120	g1121	g1122	g1123	g1124	g1125	g1126	g1127	g1128	g1129	g1130	g1131	g1132	g1133	g1134	g1135	g1136	g1137	g1138	g1139	g1140	g1141	g1142	g1143	g1144	g1145	g1146	g1147	g1148	g1149	g1150	g1151	g1152	g1153	g1154	g1155	g1156	g1157	g1158	g1159	g1160	g1161	g1162	g1163	g1164	g1165	g1166	g1167	g1168	g1169	g1170	g1171	g1172	g1173	g1174	g1175	g1176	g1177	g1178	g1179	g1180	g1181	g1182	g1183	g1184	g1185	g1186	g1187	g1188	g1189	g1190	g1191	g1192	g1193	g1194	g1195	g1196	g1197	g1198	g1199	g1200	g1201	g1202	g1203	g1204	g120
-------	--------	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	------

- Diâmetro;
- Coeficiente de dilatação linear;
- Resistência a 20°C;
- Secção útil.

De notar, que dentro desta base de dados existem outros parâmetros guardados, mas não são cruciais para o cálculo efetuado no InLinhas.

4.3 Funcionalidades

O InLinhas oferece diversas funcionalidades que permitem realizar uma variedade de cálculos para o dimensionamento elétrico, sendo essa a sua principal funcionalidade. O programa está de tal forma blindado, que para uma hipotética necessidade de inserção de um cabo condutor que não esteja disponível na base de dados, este, oferece a possibilidade de inserir um novo cabo na base de dados. Além dessa possibilidade, o programa está também preparado para inserção de uma armação que não esteja disponível na base de dados. Esta inserção pode ser feita de duas formas:

1. Através de uma direta inserção da distância geométrica de fases, calculada pelo utilizador que se limita a inserir a mesma;
2. O utilizador pode calcular a distância dentro do programa com a inserção de coordenadas da localização espacial por onde passa cada fase da linha pela armação.

Para a opção número dois de introdução de uma nova armação, o programa conta com uma apresentação gráfica e intuitiva para mitigar possíveis erros de quando o cálculo é feito manualmente.

4.3.1 Funcionalidades do cálculo elétrico

No que concerne o cálculo elétrico, este programa está preparado a realizar três tipos de cálculo:

1. Dimensionamento segundo as normas de temperatura do RSLEAT;
2. Dimensionamento em regime permanente;
3. Dimensionamento em regime permanente otimizado.

4.3.1.1 Dimensionamento RSLEAT

A primeira forma de cálculo, esta será talvez a menos utilizada pelo utilizador, pois se trata mais de uma opção teórica e de guia, sem muito ponto de vista prático. No entanto, se o utilizador selecionar esta, o programa irá solicitar que o utilizador forneça os seguintes dados:

- Tipo de tensão;

- Tipo de linha;
- Número de condutores por fase;
- Espaçador, caso o número de condutores por fase seja superior a 1;
- Cabo desejado;
- Apoio/armação predominante na linha desejado;
- Comprimento da linha;
- Frequência da linha;
- Tensão nominal da linha;
- Fator de potência;
- Potência aparente a transmitir.

Devolvendo, instantaneamente, os seguintes parâmetros calculados:

- Distância geométrica entre fases para o apoio selecionado;
- Susceptância;
- Condutância;
- Admitância;
- Reactância;
- Impedância;
- Impedância característica;
- Perdas de energia;
- Queda de tensão.

Esta opção, não é realizada em regime permanente, portanto, a corrente máxima admissível será calculado consoante a potência de transporte que o utilizador inserir. Para o cálculo da resistência da linha é necessário considerar a temperatura máxima do cabo. Este modelo utiliza os valores de temperatura máximo permitidos pelo RSLEAT, e por isso, está apelidado “Dimensionamento RSLEAT” na *interface* do programa. As temperaturas máximas para os condutores segundo o RSLEAT varia consoante o nível de tensão nominal em corrente contínua. Estando configurados da seguinte maneira:

- 50°C para $15\text{kV} < \text{Tensão nominal} < 40\text{kV}$;
- 65°C para $40\text{kV} \leq \text{Tensão nominal} \leq 100\text{kV}$;

- 75°C para tensão nominal > 100kV.

Fica uma nota que estas temperaturas do RSLEAT, no ponto de vista prático, podem ser transgredidas, obedecendo às normas europeias que, por exemplo, permitem que a temperatura alcance os 85°C para linhas MAT.

4.3.1.2 Dimensionamento em regime permanente

A segunda forma de dimensionamento, já será mais interessante do ponto de vista do utilizador que deseje resolver um problema real. Este dimensionamento é realizado em regime permanente e solicita a introdução dos seguintes dados:

- Tipo de tensão;
- Tipo de linha;
- Número de condutores por fase;
- Espaçador, caso o número de condutores por fase seja superior a 1;
- Cabo desejado;
- Apoio/armação predominante na linha desejado;
- Comprimento da linha;
- Frequência da linha;
- Tensão nominal da linha;
- Fator de potência;
- Velocidade do vento;
- Emissividade em relação ao corpo negro;
- Temperatura ambiente;
- Temperatura máxima do cabo.

Devolvendo, instantaneamente, os seguintes parâmetros calculados:

- Distância geométrica entre fases para o apoio selecionado;
- Susceptância;
- Condutância;
- Admitância;
- Reactância;

- Impedância;
- Impedância característica;
- Corrente máxima;
- Potência máxima;
- Perdas de energia;
- Queda de tensão.

Portanto, com esta opção o programa irá realizar o cálculo da corrente máxima admissível, consequente potência máxima, as inevitáveis perdas de energia e a queda de tensão. Estes parâmetros são os mais requeridos quando é realizado um estudo do cálculo elétrico para uma linha.

O cálculo da corrente máxima é obtida com o recurso a uma funcionalidade do *Microsoft Excel*, o *solver*. No *solver* é inserida os dados necessários a resolver a fórmula de equilíbrio de Kuipers-Brown que retorna a corrente máxima admissível.

4.3.1.3 Dimensionamento em regime permanente otimizado

Esta terceira opção será de todas a que foi mais desafiante de implementar e, ao mesmo tempo, a que facilita deveras o dimensionamento elétrico para linhas aéreas. Esta maneira de dimensionamento desenvolvida foi o objetivo final requisitado no âmbito da dissertação.

Esta opção opera em regime permanente, mas com a particularidade que o utilizador não necessita de especificar o tipo de cabo condutor. Apenas solicita a introdução dos seguintes dados:

- Tipo de tensão;
- Tipo de linha;
- Número de condutores por fase;
- Espaçador, caso o número de condutores por fase seja superior a 1;
- Temperatura ambiente;
- Apoio/armação predominante na linha desejado;
- Comprimento da linha;
- Frequência da linha;
- Tensão nominal da linha;
- Fator de potência;
- Potência aparente a transmitir;

- Velocidade do vento;
- Emissividade em relação ao corpo negro.

De notar algumas diferenças relativamente à opção dois. A primeira é que como já referido, não é necessário a introdução do cabo condutor. Outra diferença é que não é necessário introduzir a temperatura máxima do cabo. A última diferença resume-se a ser necessário a introdução da potência de transporte.

O programa devolverá os cabos devidamente ordenados, decrescentemente, por queda de tensão e com a respetiva temperatura máxima atingida pelo cabo. Esta solução permite, ainda, depois da introdução dos dados é apresentado ao utilizador um pequeno menu onde é possível regular a temperatura máxima dos cabos, a queda de tensão máxima e após a confirmação o programa atualiza os cabos segundo a preferência selecionada.

4.4 Manual de utilização

Para uma melhor perceção das funcionalidades do InLinhas, será feita uma visita guiado pelo programa, para se visualizar a potencialidade do programa e o que o utilizador pode esperar encontrar.

Inicialmente, ao abrir o programa de cálculo, irá encontrar o seguinte menu com botões interativos:

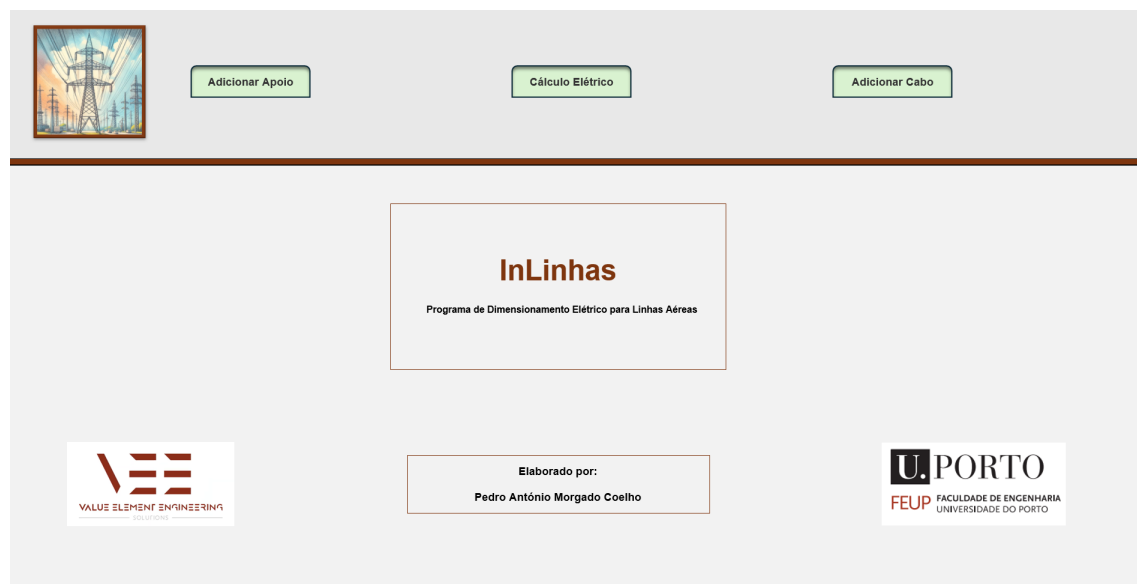


Figura 4.7: Menu inicial do programa InLinhas

Os botões que facilitam a navegação deste menu são os seguintes:

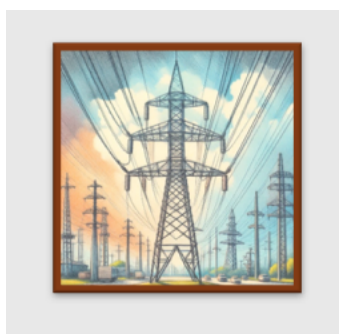


Figura 4.8: Botão que regressa ao menu inicial do programa InLinhas

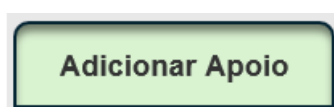


Figura 4.9: Botão que permite aceder ao menu para adicionar um apoio à base de dados

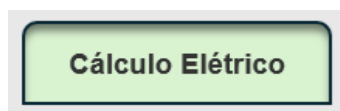


Figura 4.10: Botão que permite aceder ao menu do cálculo elétrico

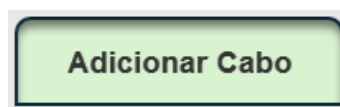
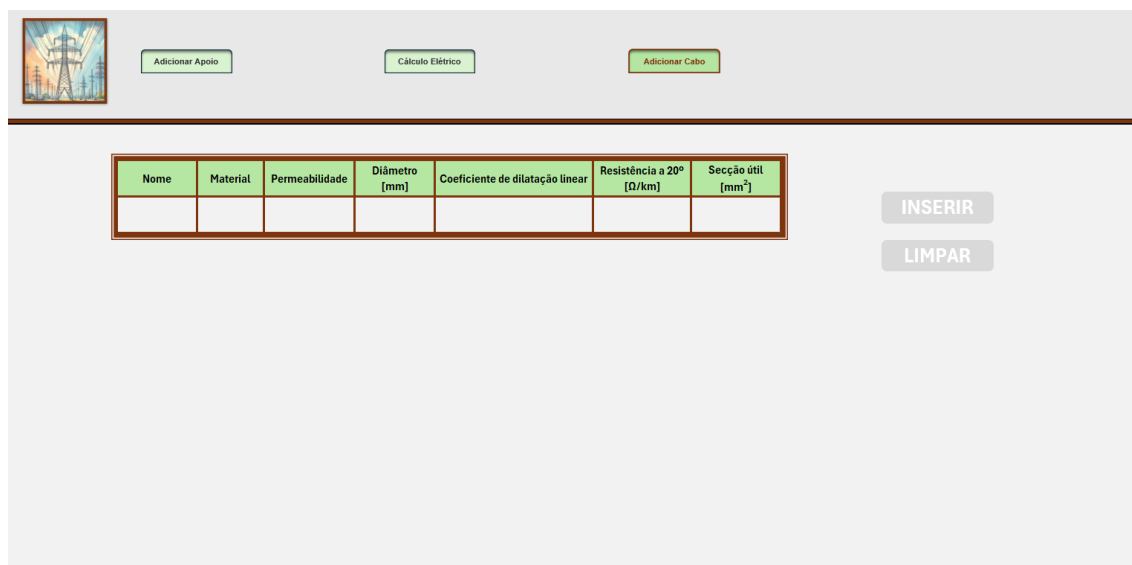


Figura 4.11: Botão que permite aceder ao menu para adicionar um cabo condutor à base de dados

Após clicar no botão “Adicionar Cabo”, encontra-se o seguinte menu da figura 4.12. Como se pode constatar é apresentada uma tabela editável pelo utilizador onde deve introduzir os parâmetros desejados para o novo condutor. Finalizando os valores pretendidos, para adicionar à base de dados é só clicar no Botão “INSERIR”. Caso queira adicionar outro cabo pode, clicar no botão “LIMPAR” que automaticamente a tabela fica vazia e pronta a adicionar um novo cabo.



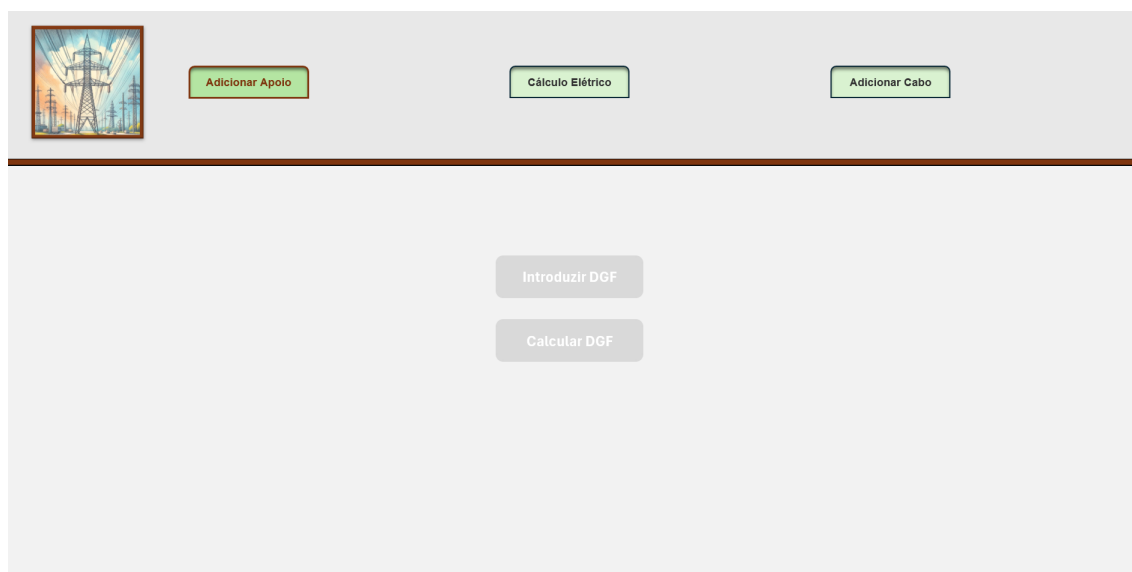
Nome	Material	Permeabilidade	Diâmetro [mm]	Coeficiente de dilatação linear	Resistência a 20° [Ω/km]	Secção útil [mm²]

INSERIR

LIMPAR

Figura 4.12: Menu para adicionar um novo cabo

Após clicar no botão “Adicionar Apoio”, encontra-se o seguinte menu da figura 4.13. Neste menu, o utilizador deve seleccionar se insere directamente a distância geométrica entre fases, clicando no botão “Introduzir DGF”, ou se prefere fazer o cálculo, da mesma, no programa clicando no botão “Calcular DGF”.

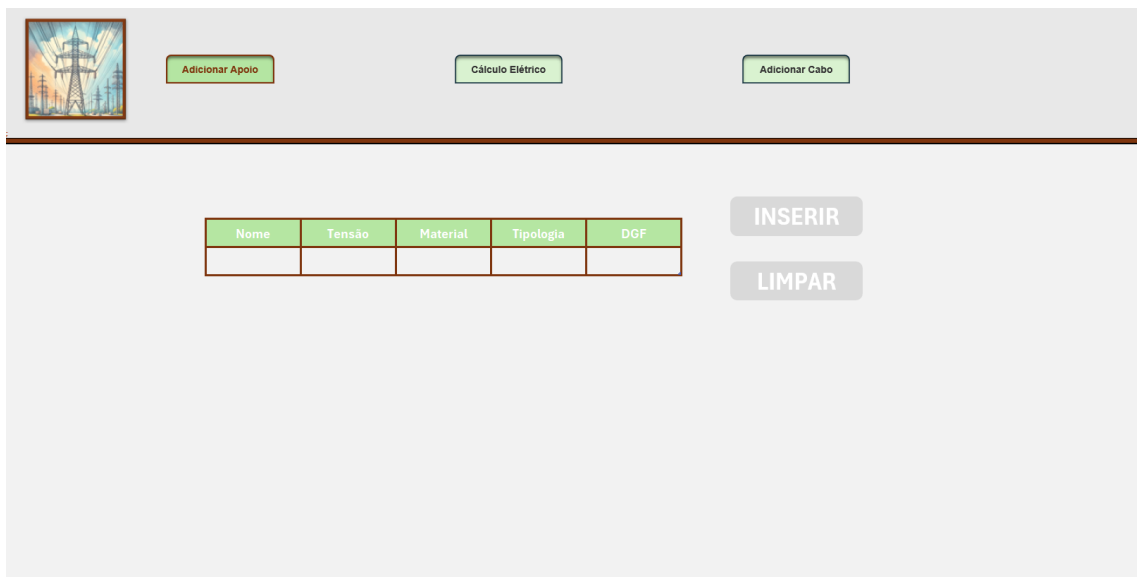


Introduzir DGF

Calcular DGF

Figura 4.13: Menu para adicionar um novo apoio

Caso clique no botão “Introduzir DGF” é apresentado a seguinte página presente na figura 4.14 onde o utilizador deve inserir os dados do novo apoio, e a seguir clicar no botão “INSERIR” para que este seja adicionado à base de dados. Caso queira adicionar outro apoio pode clicar no botão “LIMPAR” que automaticamente a tabela fica vazia e pronta a adicionar um novo apoio.



Nome	Tensão	Material	Tipologia	DGF

Figura 4.14: Adicionar um novo apoio introduzindo a distância geométrica entre fases

Caso, no menu da figura 4.13 seleccionar o botão “Calcular DGF”, irá ser apresentado o menu de seleção da figura 4.15. Onde o utilizador terá de escolher se quer adicionar um apoio simples, clicando no botão “Apoio Simples”, ou se adiciona um apoio duplo e para isso terá de clicar no botão “Apoio Duplo”.

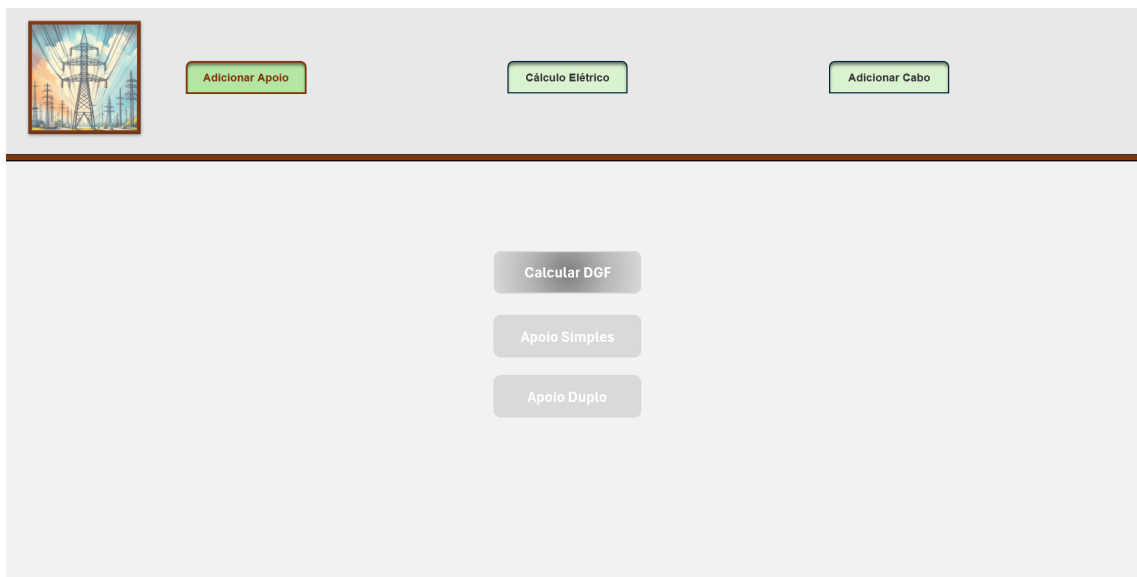
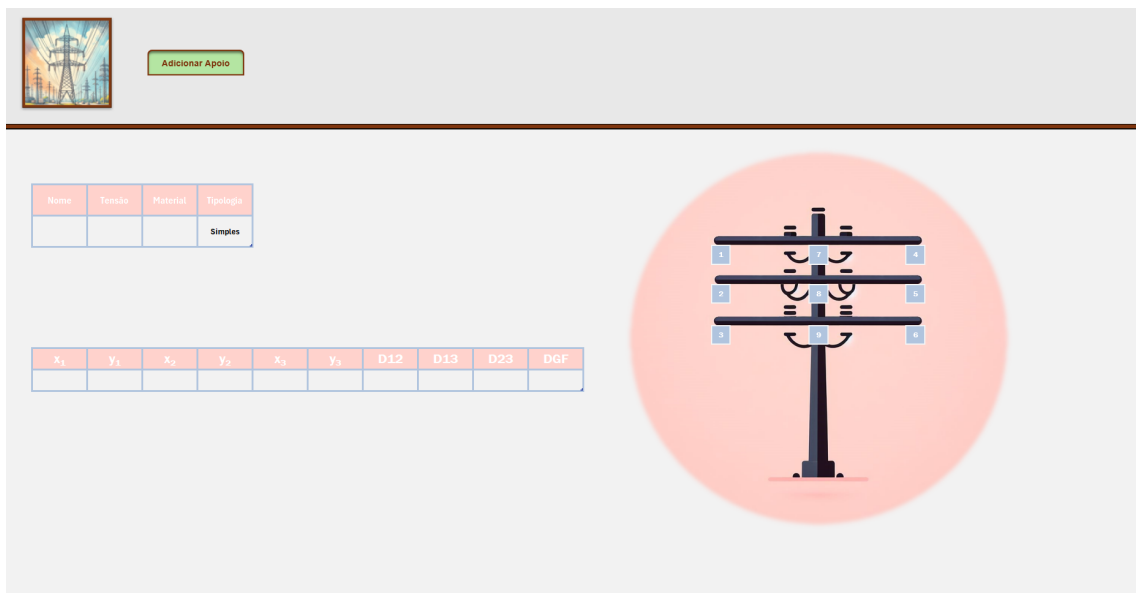


Figura 4.15: Menu de seleção do tipo de apoio que quer calcular a distância geométrica entre fases

Caso o utilizador selecione um apoio simples, o programa apresenta a seguinte *interface* gráfica presente na figura 4.16.

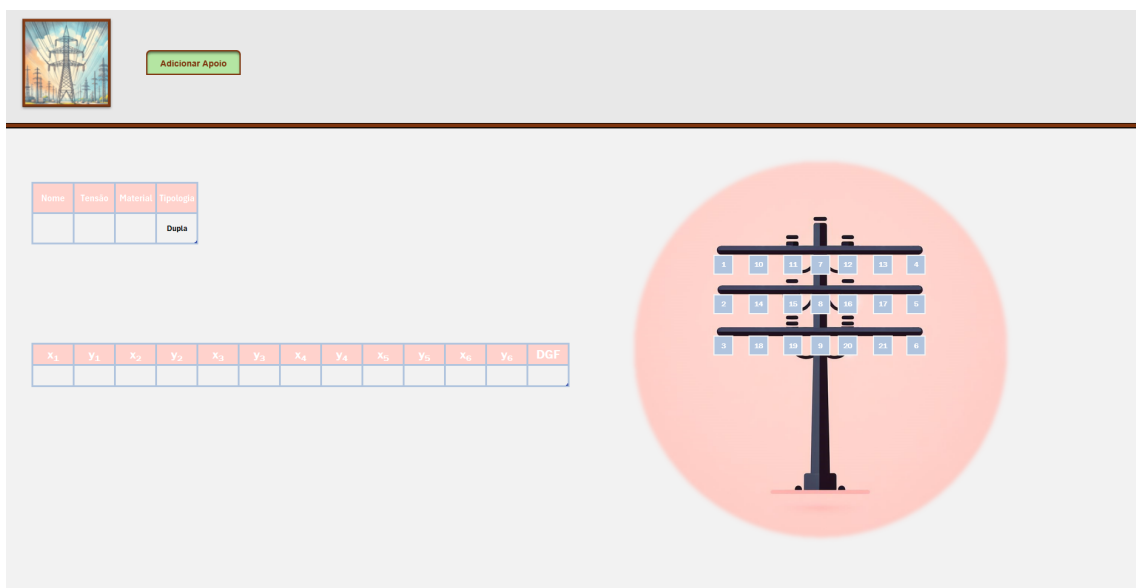


Nome	Tensão	Material	Tipologia
			Simplex

x ₁	y ₁	x ₂	y ₂	x ₃	y ₃	D12	D13	D23	DGF

Figura 4.16: Menu interativo para introdução de coordenadas de cada condutor para um apoio simples

Caso o utilizador selecione um apoio duplo, o programa apresenta a seguinte *interface* gráfica presente na figura 4.17.



Nome	Tensão	Material	Tipologia
			Dupla

x ₁	y ₁	x ₂	y ₂	x ₃	y ₃	x ₄	y ₄	x ₅	y ₅	x ₆	y ₆	DGF

Figura 4.17: Menu interativo para introdução de coordenadas de cada condutor para um apoio duplo

Para o utilizador seja possibilitado de introduzir as coordenadas de cada condutor, ele terá de clicar num dos botões numerados de 1 a 9, que representam localizações possíveis, meramente ilustrativas, do condutor presente. Ao clicar, por exemplo, no botão 1 ilustrado na figura 4.18



Figura 4.18: Botão que permite introduzir uma possível localização de um condutor

Após o clique do botão será apresentado uma janela onde o utilizador deve inserir a coordenada X do ponto 1 que representa um condutor na posição 1, apresentada na figura 4.19. Quando for introduzida a coordenada X e clicar “OK” irá aparecer outra janela onde será pedido a coordenada Y do ponto 1, como se pode observar na figura 4.20. Quando inserir a coordenada e clicar “OK” o programa vai colorir a verde o botão 4.18, como pode ser observado na figura 4.21.

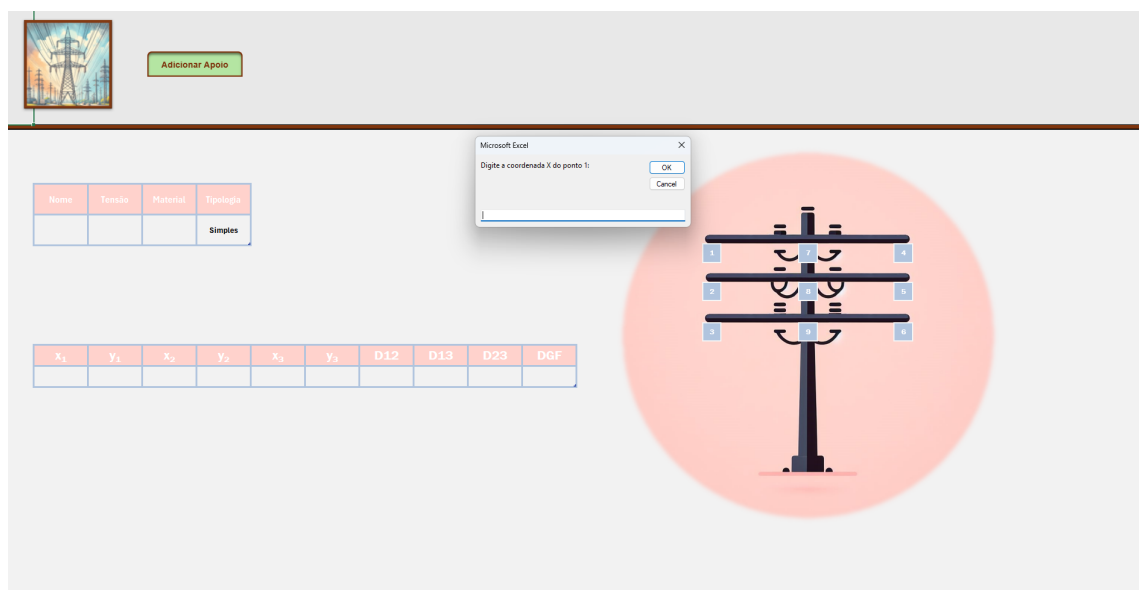


Figura 4.19: Janela que permite introduzir a coordenada X do condutor

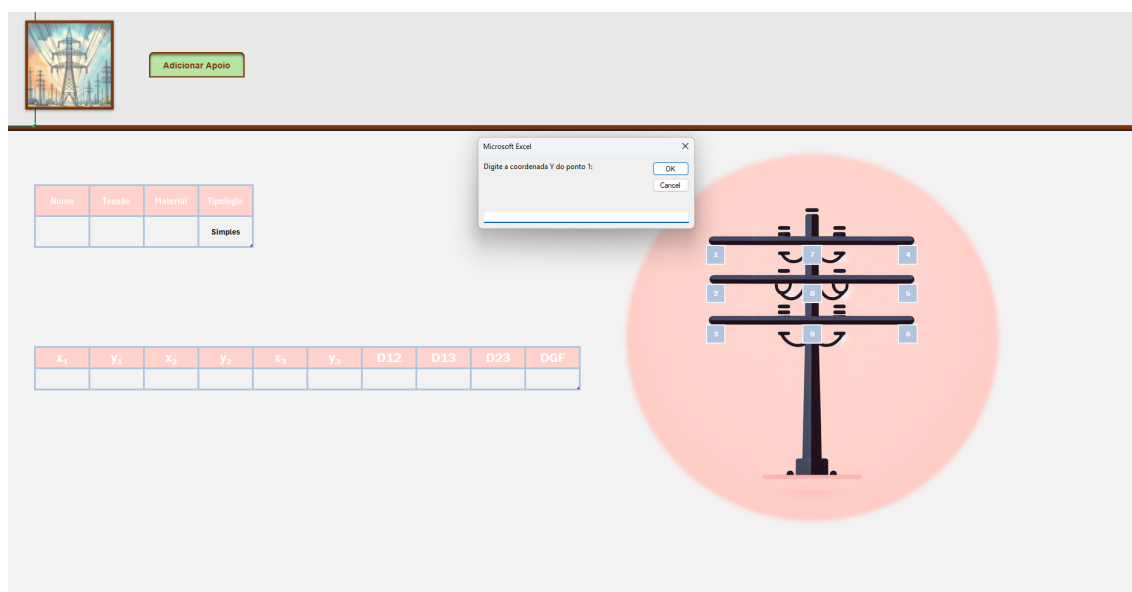


Figura 4.20: Janela que permite introduzir a coordenada Y do condutor

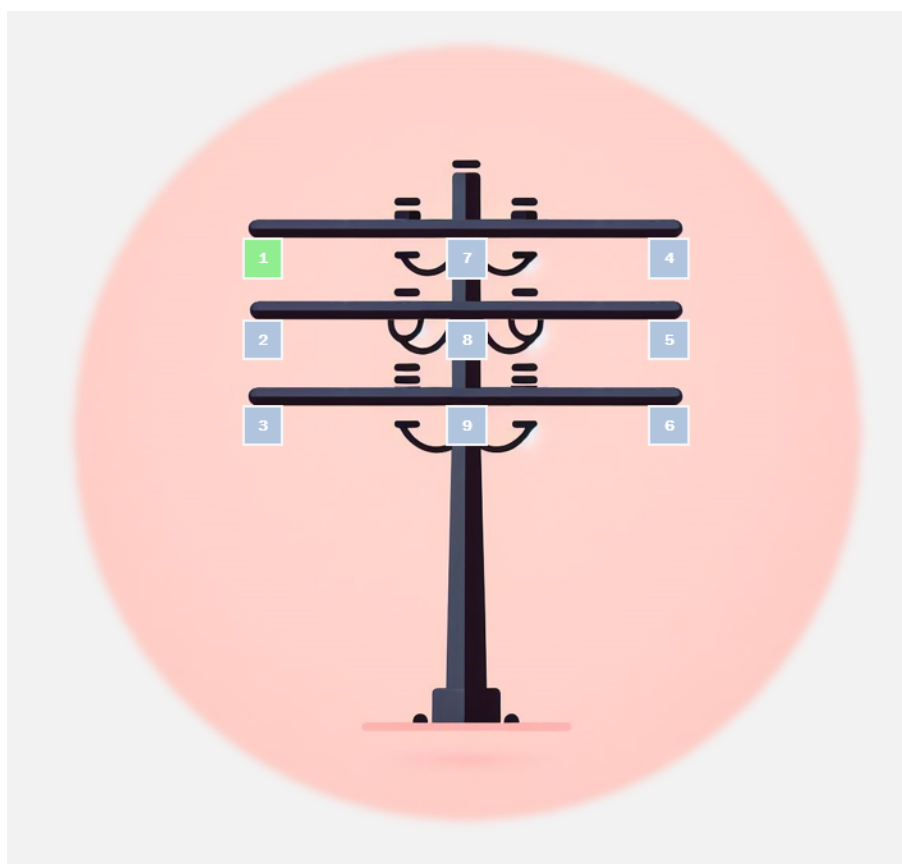


Figura 4.21: Modificação visual do grafismo de introdução de condutores de modo que o utilizador reconheça quantos condutores foram introduzidos

Seguidamente à introdução do primeiro par de coordenadas, o programa fica à espera que o

utilizador clique em mais dois botões para introduzir as outras coordenadas. Ao fim de ser introduzido os três condutores, o programa devolve os valores das coordenadas e a distância geométrica entre condutores, na tabela. E ainda, adiciona o novo apoio/armação à base de dados. De notar, que o referencial cartesiano fica ao critério do utilizador.

Para apoios duplos, o raciocínio será o mesmo, mas terá de ser inseridos seis pares de coordenadas no menu da figura 4.17.

A parte do dimensionamento elétrico do InLinhas, é muito intuitiva. Quando se clica no botão 4.10, o utilizador irá encontrar o seguinte menu ilustrado na figura 4.22. Onde pode seleccionar o tipo de dimensionamento que quer executar, clicando num dos três botões disponíveis para o dimensionamento: “Dimensionamento Regime Permanente”, “Dimensionamento Otimizado” e “Dimensionamento RSLEAT”. A funcionalidade de cada tipo de cálculo efetuado já foi explicado em 4.3.1.1, 4.3.1.2 e 4.3.1.3.

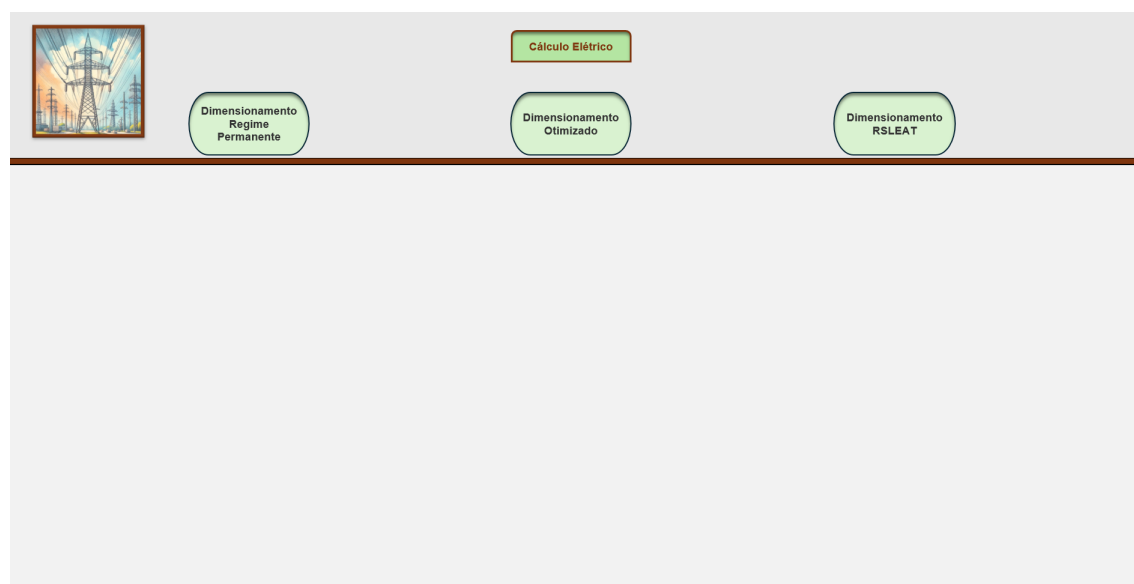


Figura 4.22: Menu de seleção do tipo de dimensionamento elétrico pretendido

Caso seleccione o “Dimensionamento RSLEAT”, o utilizador será encaminhado para paginar da figura 4.23, onde se podem ver tabelas já preenchidas, mas podem ser editáveis pelo utilizador e altera automaticamente o valor da tabela de *output*. De notar, que existe uma lista suspensa de todas as possibilidades que o utilizador precisa de introduzir para o tipo de tensão, o tipo de linha, o cabo escolhido e o apoio predominante.



Dimensionamento
RSLEAT

INPUT											
Caso	Tipo de Tensão	Linha	Nº de Condutores por Fase	[mm] Espaçador	Cabo	Apoio Predominante	[m] Comprimento de Linha	[Hz] Frequência	[kV] Tensão Nominal	Fator de Potência	[MVA] Potência Aparente a Transmissita
1	MT	SIMPLES	1,00		CU 150	F45CA	5,00	50,00	60,00	0,98	30,00

OUTPUT									
DGF	[S/km] Susceptância	[S/km] Condutância	[Ω] Admitância	[Ω] Reatância	[Ω] Impedância	[Ω] Impedância Característica	[W] Perdas de Energia	[V] Queda de Tensão	[%] Queda de Tensão
3745,59	0,000002838	0,000000000009	4,50485738028393E-11+0,000014188266602j	2,01654714	0,623774065363459+2,01654713799388j	381,379134765603-57,6376931292792j	162174,86497	513,43840	0,85573

Figura 4.23: Dimensionamento elétrico teórico segundo o RSLEAT

Caso selecione o botão “Dimensionamento Regime Permanente”, o utilizador será encaminhado para a página da figura 4.24, onde se podem ver tabelas já preenchidas, mas mais uma vez, pode ser editável pelo utilizador. Quando os valores da tabela de entrada forem introduzidos, o utilizador deve clicar no botão “CALCULAR” presente na figura 4.24 e de seguida os valores da tabela de *output* serão apresentados. De notar, que existe uma lista suspensa de todas as possibilidades que o utilizador precisa de introduzir para o tipo de tensão, o tipo de linha, o cabo escolhido, o apoio predominante, a velocidade do vento e a emissividade em relação ao corpo negro.



Dimensionamento
Regime
Permanente

INPUT														
Caso	Tipo de Tensão	Linha	Nº de Condutores por Fase	[mm] Espaçador	Cabo	Apoio Predominante	[m] Comprimento de Linha	[Hz] Frequência	[kV] Tensão Nominal	Fator de Potência	Velocidade do Vento	Emissividade em relação ao corpo negro	[°C] Temperatura Ambiente	[°C] Temperatura Máxima do Cabo
1	MAT	SIMPLES	1,00		PARTRIDGE 160	F95CA	5,00	50,00	30,00	0,98	0,60	0,60	32,00	75,00

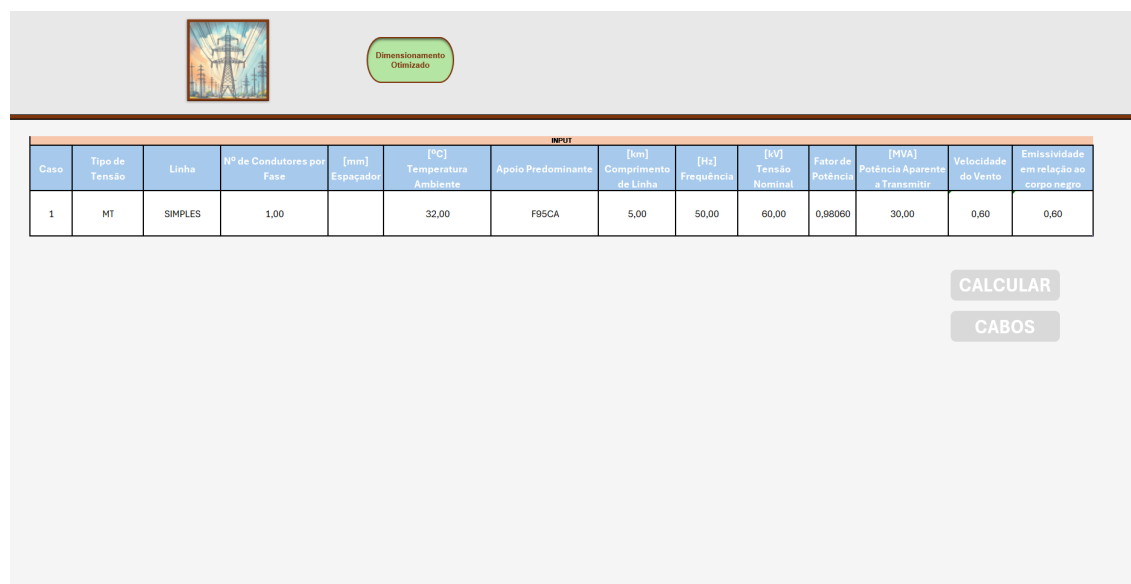
CALCULAR

OUTPUT											
DGF	[S/km] Susceptância	[S/km] Condutância	[Ω] Admitância	[Ω] Reatância	[Ω] Impedância	[Ω] Impedância Característica	[A] Corrente Máxima	[MVA] Potência Máxima	[W] Perdas de Energia	[V] Queda de Tensão	[%] Queda de Tensão
3995,02	0,00000283	0,0000000001272	6,2614142473551E-10+0,0000141322245699981j	2,01654714	1,06503525523537+2,01654713799388j	389,913371724045-96,6314090596507j	423,3070	21,57	572527,28	1055,54	3,52

Figura 4.24: Dimensionamento elétrico em regime permanente

Caso selecione o botão “Dimensionamento Otimizado”, o utilizador será encaminhado para

paginar da figura 4.25, onde se podem ver tabelas já preenchidas, mas mais uma vez, pode ser editável pelo utilizador. Quando os valores da tabela de entrada forem introduzidos, o utilizador deve clicar no botão “CALCULAR” presente na figura 4.25 e a seguir clicar no botão “CABOS”. Este clique leva o utilizador diretamente para a página demonstrada na figura 4.26



Caso	Tipo de Tensão	Linha	Nº de Condutores por Fase	[mm] Espaçador	[°C] Temperatura Ambiente	Apoio Predominante	[km] Comprimento de Linha	[Hz] Frequência	[kV] Tensão Nominal	Fator de Potência	[MVA] Potência Aparente a Transmitir	Velocidade do Vento	Emissividade em relação ao corpo negro
1	MT	SIMPLES	1,00		32,00	F95CA	5,00	50,00	60,00	0,98060	30,00	0,60	0,60

Figura 4.25: Dimensionamento elétrico em regime permanente otimizado

Na figura 4.26, pode ser observado uma lista dinâmica de cabos retornados dos valores submetidos na tabela de entrada do Dimensionamento Otimizado e da tabela à esquerda no canto superior, onde é possível selecionar a temperatura máxima desejada e a queda de tensão. Quando o utilizador estiver satisfeito da sua seleção clica no botão “OK” e os cabos serão atualizados consoante as preferências.

Temperatura	% Queda de Tensão
90,00	5,00

OK

Dimensionamento Otimizado



Nome	Temperatura	% Queda de Tensão
ACSR 70	85,10997478	2,376002799
ASTER 75,5	80,08530334	2,194563394
ACSR 90	73,76678094	1,949525077
CU 50	76,85786169	1,931314493
GUINEA 130	69,74666613	1,851734574
ACSR 105	66,58281425	1,665561322
CANNA 116	65,62692429	1,63430425
DORKING 153	63,96181867	1,594014593
ASTER 117	63,57842662	1,535190633
PASTEL 147,1	62,45034055	1,512211524
ACSR 125	61,9361844	1,466609941
CU 70	62,82407993	1,428143103
ASTER 148	57,98832553	1,285190457
PARTRIDGE 160	56,93127006	1,235628626
CU 95	56,36431235	1,169914051
ACSR 175	55,08842582	1,144935902
CU 120	52,78131839	1,013010006
ACSR 235	51,32813347	0,942030978
PANTHER 260	50,83670912	0,910954331
CU 150	50,01080027	0,878110724
BEAR 325	49,12718633	0,797502126
CU 185	48,18911724	0,777491995
CU 240	46,70731976	0,678414267
ZEBRA 485	47,13008409	0,627211793
CU 300	46,03734366	0,618584189
CARDINAL 546	46,97357975	0,598389643
RAILAW 517	46,81242154	0,595625858
ASTER 570	47,03306622	0,594778419
ZAMBEZE 595	46,7487999	0,567355498
CU 400	45,67555001	0,558879827
ASTER 851	47,11871035	0,522557793
ASTER 1144	47,67649637	0,493373861

Corrente Máxima
294,3862274

Figura 4.26: Menu onde se pode manipular os cabos retornados consoante os valores pretendidos da temperatura e queda de tensão

Capítulo 5

Verificações e Discussão de Resultados

Neste capítulo, será apresentada demonstrações do dimensionamento elétrico para linhas aéreas e resultados obtidos pelo InLinhas. Para tal será feito um caso de estudo.

5.1 Seleção do dimensionamento

O InLinhas, consegue efetuar o dimensionamento de três formas distintas, mas neste capítulo vamos cingir-nos a demonstrações dos resultados para os dimensionamentos em regime permanente, utilizando a opção “Dimensionamento Otimizado”, do programa.

5.1.1 Dimensionamento otimizado em regime permanente

A metodologia de cálculo utilizado para um dimensionamento otimizado, segundo o InLinhas, é necessário a introdução de algumas variáveis de entrada. São elas:

- Tensão nominal;
- Número de condutores por fase;
- Comprimento do espaçador, caso o número de fases exceda o valor 1;
- Apoio/armação predominante;
- Comprimento da linha;
- Frequência da linha;
- Fator de potência;
- Potência de transporte;
- Velocidade do vento;
- Emissividade em relação ao corpo negro.

Após a inserção destes dados, o InLinhas transporta o utilizador para outra página que é a página dos cabos retornados. Os cabos devolvidos podem ser ajustados. Pois, o utilizador pode ajustar a temperatura máxima e a queda de tensão máxima desejada. Após esta seleção os cabos são atualizados as vezes que o utilizador quiser.

A vantagem deste método é que, para descobrir que cabo se adequa melhor a um dimensionamento, não é necessário selecionar um cabo de cada vez, em modo tentativa erro. Portanto, a solução deste dimensionamento proporciona ao utilizador: o cálculo elétrico para todos os cabos existentes na base de dados do programa.

Depois de uma breve explicação do tipo de dimensionamento, é possível a demonstração de um caso a título exemplificativo fictício. Para tal será necessário criar uma linha hipotética, apresentada em 5.2.

5.2 Descrição da linha

A linha fictícia a ser projetada será uma linha aérea dupla com dois condutores por fase, onde a transmissão de energia elétrica é feita em corrente alternada trifásica. Para possibilidade de um caso de estudo, foi considerado as características da linha apresentadas na tabela 5.1:

Espaçador	200 [mm]
Comprimento da linha	5 [km]
Frequência	50 [Hz]
Tensão nominal	220 [kV]
Fator de potência	0,9806
Potência de transporte	200 [MVA]
Velocidade do vento	0,6 [m/s]
Emissividade em relação ao corpo negro	0,6
Temperatura ambiente	30 [°C]
Apoio e armação predominante	Apoio metálico com armação BWA, ilustrada na figura 5.8

Tabela 5.1: Características da linha necessárias para o dimensionamento otimizado do InLinhas

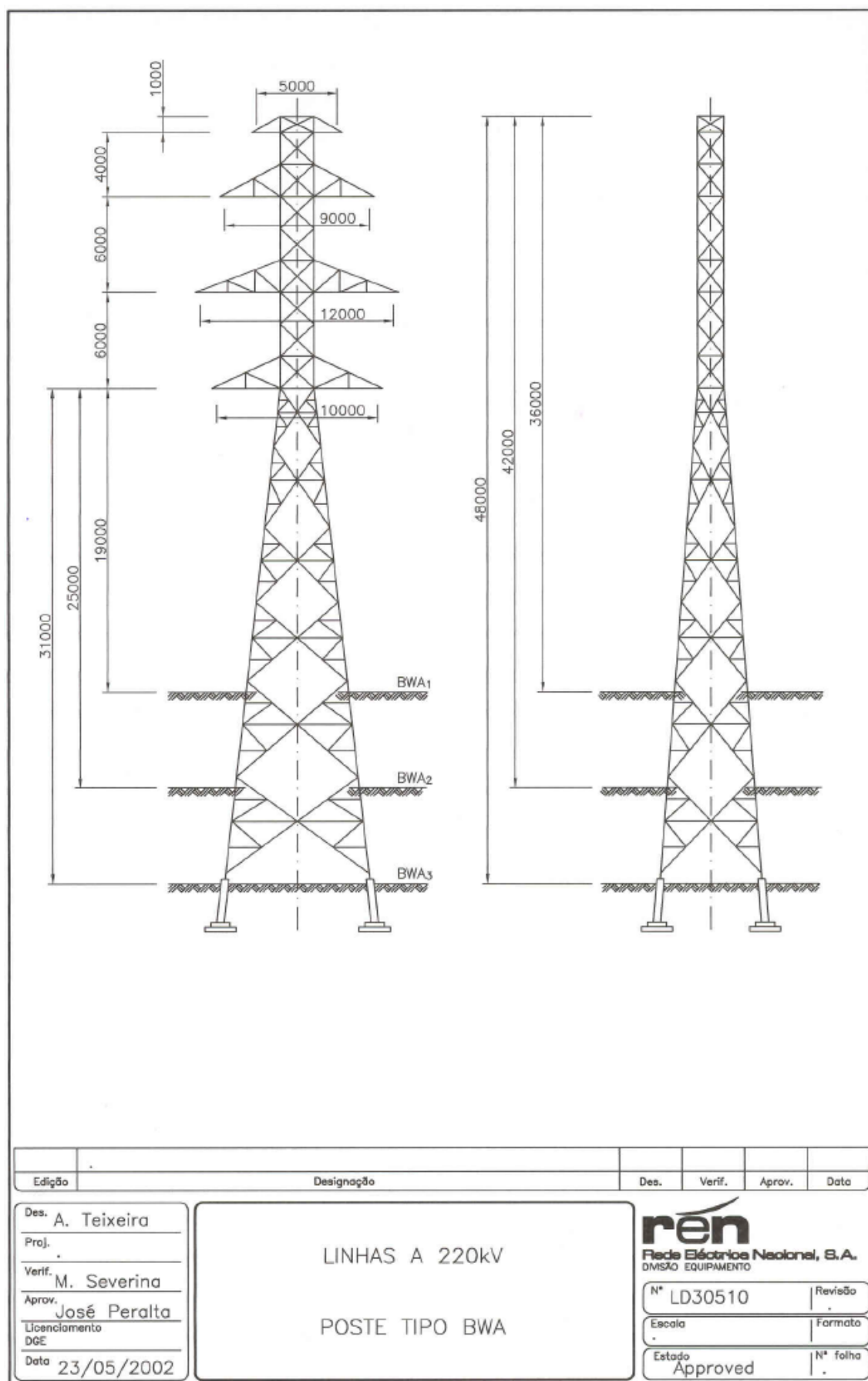


Figura 5.1: Catálogo da REN de um poste tipo BWA

5.3 Resumo do cálculo elétrico

O InLinhas, como já referido, faz o cálculo para todos os cabos e o cálculo pode ficar complexo. Para um melhor entendimento de todos os dados e cálculos necessários para cada cabo, será feito um pequeno resumo do algoritmo utilizado para o cálculo elétrico, com o auxílio dos seguintes esquemas.

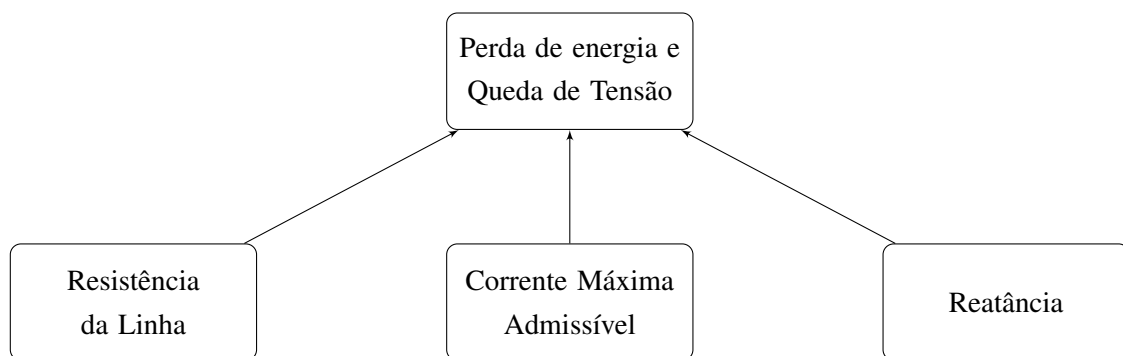


Figura 5.2: Dados necessários para o cálculo da queda de tensão e perda de energia

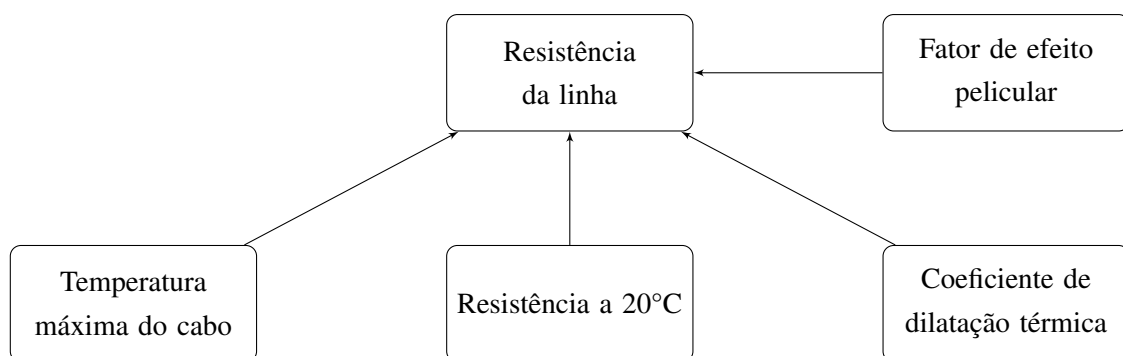


Figura 5.3: Dados necessários para o cálculo da resistência da linha

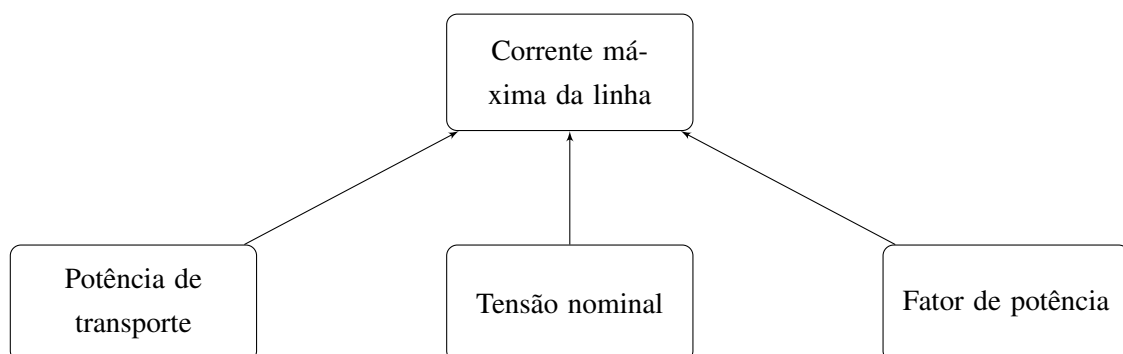


Figura 5.4: Dados necessários para o cálculo da corrente máxima da linha

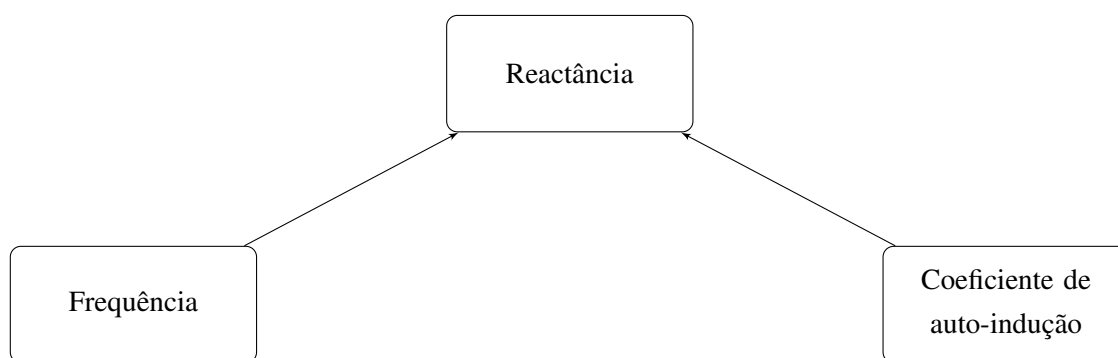


Figura 5.5: Dados necessários para o cálculo da reactância

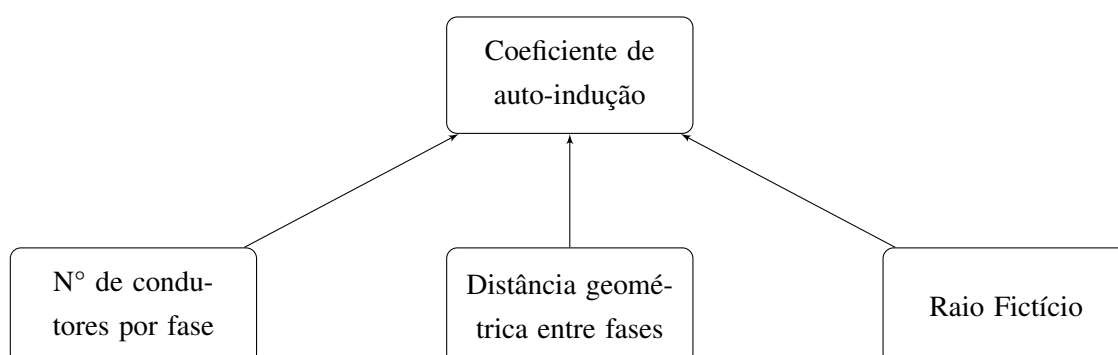


Figura 5.6: Dados necessários para o cálculo do Coeficiente de auto-indução

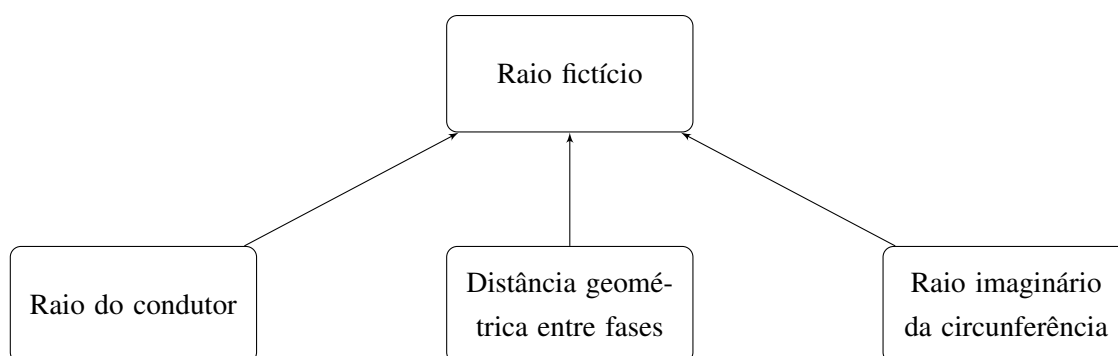


Figura 5.7: Dados necessários para o cálculo do Raio fictício

5.4 Demonstração do Dimensionamento do cálculo elétrico

Após conhecidas e inseridas as condições, para o dimensionamento, o programa, executa nos bastidores o cálculo elétrico e apresenta instantaneamente a solução para todos os cabos. Como existe uma enormidade de cabos, para efeitos simplificativos, a demonstração será feita para o cabo Zebra485 que apresenta as seguintes características:

Material	ACSR
Coefficiente de permeabilidade	1
Diâmetro	28,62[mm]
Coefficiente de dilatação linear	0,0000193
Resistência a 20°C	0,067[Ω/km]
Secção útil	484,48[mm ²]

Tabela 5.2: Características do cabo Zebra485

5.4.1 Cálculo da Distância Geométrica entre Fases para a Armação Dupla BWA

Dados fornecidos:

- $a_1 = 9000$ mm;
- $a_2 = 12000$ mm;
- $a_3 = 10000$ mm;
- $b_1 = b_2 = 6000$ mm.

Em que:

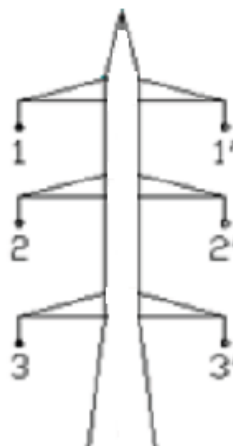


Figura 5.8: Esboço auxiliar do apoio BWA

- a_1 = distância horizontal entre os condutores 1 e 1';

- a_2 = distância horizontal entre os condutores 2 e 2';
- a_3 = distância horizontal entre os condutores 3 e 3';
- b_1 = distância vertical entre as travessas onde estão os condutores 1 e 1' e onde estão os condutores 2 e 2';
- b_2 = distância vertical entre as travessas onde estão os condutores 2 e 2' e onde estão os condutores 3 e 3';

Após as distâncias fornecidas facilmente chegam-se as distâncias (em mm):

D_{12}	D_{13}	$D_{11'}$	$D_{12'}$	$D_{13'}$
6184,66	12010,41	9000,00	12093,39	15305,23

D_{23}	$D_{21'}$	$D_{22'}$	$D_{23'}$
6082,76	12093,39	12000,00	12529,96

$D_{31'}$	$D_{32'}$	$D_{33'}$
15305,23	12529,96	10000,00

Agora utilizam-se as fórmulas:

$$D = \sqrt[3]{D_1 \cdot D_2 \cdot D_3}$$

$$D_1 = \frac{\sqrt{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{12'} \cdot D_{13'}}}{D_{11'}}$$

$$D_2 = \frac{\sqrt{D_{21} \cdot D_{23} \cdot D_{21'} \cdot D_{23'}}}{D_{22'}}$$

$$D_3 = \frac{\sqrt{D_{31} \cdot D_{32} \cdot D_{31'} \cdot D_{32'}}}{D_{33'}}$$

Realizam-se os cálculos:

$$\begin{aligned}
 D_1 &= \frac{\sqrt{6184,66 \cdot 12010,41 \cdot 12093,39 \cdot 15305,23}}{9000,00} \\
 &= \frac{\sqrt{13731669308718,9}}{9000,00} \\
 &\approx 13069,15 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_2 &= \frac{\sqrt{6184,66 \cdot 6082,76 \cdot 12093,39 \cdot 12529,96}}{12000,00} \\
 &= \frac{\sqrt{5624639246122,39}}{12000,00} \\
 &\approx 6249,70 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_3 &= \frac{\sqrt{12010,41 \cdot 6082,76 \cdot 15305,23 \cdot 12529,96}}{10000,00} \\
 &= \frac{\sqrt{13731669308718,9}}{10000,00} \\
 &\approx 11762,24 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Obtém-se a distância geométrica final:

$$\begin{aligned}
 D &= \sqrt[3]{13069,15 \cdot 6249,70 \cdot 11762,24} \\
 &= \sqrt[3]{961921555909,45} \\
 &\approx 9871,29 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Portanto, a distância geométrica entre fases para a armação dupla BWA é aproximadamente 9871,29 mm. O valor calculado do InLinhas é 9899,868674 mm, a discrepância, apesar de irrisória, deve-se ao arredondamento, pois o Excel utiliza mais casas decimais em aproximações.

5.4.2 Cálculo do Raio Fictício para o Condutor Zebra485

A fórmula para o cálculo do raio fictício é:

$$r' = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot R^{n-1}} \quad [mm] \quad (5.1)$$

Onde:

- r - Raio do condutor [mm]
- n - Número de condutores por fase
- R - Raio da circunferência imaginária que passa pelos condutores da mesma fase [mm]

Dados fornecidos:

- Raio do condutor (r) = 14,31 mm
- Número de condutores por fase (n) = 2
- Espaçador = 200 mm

Cálculo do raio da circunferência imaginária (R):

Como o número de condutores por fase é 2 (maior que 1), usa-se a fórmula:

$$R = \frac{\text{Espaçador}}{2}$$

$$R = \frac{200}{2} = 100 \text{ mm}$$

Agora, pode-se calcular o raio fictício:

$$\begin{aligned} r' &= \sqrt[n]{n \cdot r \cdot R^{n-1}} \\ &= \sqrt[2]{2 \cdot 14,31 \cdot 100^{2-1}} \\ &= \sqrt[2]{2 \cdot 14,31 \cdot 100} \\ &= \sqrt{2862} \\ &\approx 53,50 \text{ mm} \end{aligned}$$

Portanto, o raio fictício do condutor Zebra485 na configuração dada é aproximadamente 53,50 mm.

5.4.3 Cálculo do Coeficiente de Auto-indução

A fórmula para o cálculo do coeficiente de auto-indução é:

$$L_k = \left[\frac{\mu}{2 \cdot n} + 4,605 \cdot \log \left(\frac{D}{r'} \right) \right] \cdot 10^{-4} \quad [H/km] \quad (5.2)$$

Onde:

- μ - Permeabilidade relativa do condutor
- n - Número de condutores por fase
- D - Distância geométrica entre condutores [mm]
- r' - Raio fictício do condutor [mm]

Dados fornecidos e assumidos:

- $\mu = 1$ (assumindo que o condutor não é de aço galvanizado)
- $n = 2$
- $D = 9871,29 \text{ mm}$ (usando o valor calculado anteriormente para a distância geométrica entre fases)

- $r' = 53,50 \text{ mm}$

Agora, pode-se calcular o coeficiente de auto-indução:

$$\begin{aligned}
 L_k &= \left[\frac{\mu}{2 \cdot n} + 4,605 \cdot \log \left(\frac{D}{r'} \right) \right] \cdot 10^{-4} \\
 &= \left[\frac{1}{2 \cdot 2} + 4,605 \cdot \log \left(\frac{9871,29}{53,50} \right) \right] \cdot 10^{-4} \\
 &= [0,25 + 4,605 \cdot \log(184,51)] \cdot 10^{-4} \\
 &= [0,25 + 4,605 \cdot 2,2661] \cdot 10^{-4} \\
 &= [0,25 + 10,4354] \cdot 10^{-4} \\
 &= 10,6854 \cdot 10^{-4} \\
 &= 1,06854 \cdot 10^{-3} \text{ H/km}
 \end{aligned}$$

Portanto, o coeficiente de auto-indução da linha é aproximadamente $1,06854 \cdot 10^{-3} \text{ H/km}$ ou $1,06854 \text{ mH/km}$.

5.4.4 Cálculo da Reactância da Linha de Transmissão

A reactância por unidade de comprimento de uma linha de transmissão é calculada utilizando a seguinte equação:

$$X_k = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_k \quad [\Omega/\text{km}] \quad (5.3)$$

Onde:

- f - Frequência [Hz]
- L_k - Indutância [H/km]

Para o cálculo, consideram-se os seguintes dados:

- Frequência da rede: $f = 50 \text{ Hz}$ (valor padrão para sistemas europeus)
- Coeficiente de auto-indução: $L_k = 1,06854 \cdot 10^{-3} \text{ H/km}$ (calculado previamente)
- Comprimento da linha: $l = 5 \text{ km}$

Procedimento de cálculo da reactância por unidade de comprimento:

$$\begin{aligned}
 X_k &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_k \\
 &= 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,06854 \cdot 10^{-3} \\
 &= 100\pi \cdot 1,06854 \cdot 10^{-3} \\
 &\approx 0,3355 \quad [\Omega/km]
 \end{aligned}$$

A reactância indutiva por unidade de comprimento da linha de transmissão é aproximadamente 0,3355 Ω/km .

5.4.5 Cálculo da Reactância Total da Linha

Para obter a reactância total da linha, multiplica-se a reactância por unidade de comprimento pelo comprimento total da linha:

$$X_{\text{total}} = X_k \cdot l \quad [\Omega] \quad (5.4)$$

Onde:

- X_{total} - Reactância total da linha [Ω]
- X_k - Reactância por unidade de comprimento [Ω/km]
- l - Comprimento da linha [km]

Cálculo da reactância total:

$$\begin{aligned}
 X_{\text{total}} &= X_k \cdot l \\
 &= 0,3355 \cdot 5 \\
 &= 1,6775 \quad [\Omega]
 \end{aligned}$$

Conclui-se que a reactância total da linha de transmissão, considerando o comprimento de 5 km, é aproximadamente 1,6775 Ω .

5.4.6 Cálculo da Corrente Máxima da Linha de Transmissão

A corrente máxima da linha de transmissão é calculada utilizando a seguinte equação:

$$I_{\text{max}} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot \cos \phi \cdot U_n} \quad [A] \quad (5.5)$$

Onde:

- $I_{\max}$ - Corrente máxima da linha [A]
- S - Potência aparente a transmitir [VA]
- $\cos \phi$ - Fator de potência
- U_n - Tensão nominal [V]

Para realizar o cálculo, consideram-se os seguintes dados:

- Potência aparente a transmitir: $S = 200 \text{ MVA}$
- Fator de potência: $\cos \phi = 0,98060$
- Tensão nominal: $U_n = 220 \text{ kV}$

Procedimento de cálculo:

$$\begin{aligned}
 I_{\max} &= \frac{S}{\sqrt{3} \cdot \cos \phi \cdot U_n} \\
 &= \frac{200 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 0,98060 \cdot 220 \cdot 10^3} \\
 &= \frac{200 \cdot 10^6}{1,7320508 \cdot 0,98060 \cdot 220 \cdot 10^3} \\
 &= \frac{200 \cdot 10^6}{373,669 \cdot 220 \cdot 10^3} \\
 &= \frac{200 \cdot 10^6}{82,20718 \cdot 10^6} \\
 &\approx 535,25 \quad [\text{A}]
 \end{aligned}$$

Conclui-se que, para as condições especificadas, com uma potência aparente a transmitir de 200 MVA e uma tensão nominal de 220 kV, a corrente máxima da linha de transmissão é aproximadamente 535,25 A.

É importante ressaltar que este valor representa a corrente máxima teórica baseada na potência a ser transmitida e na tensão nominal do sistema. Na prática, a corrente máxima admissível da linha pode ser limitada por outros fatores, como a capacidade térmica dos condutores, as quedas de tensão admissíveis e as condições ambientais de operação.

5.4.7 Cálculo da Resistência em Corrente Contínua

A fórmula para calcular a resistência em corrente contínua é:

$$R_{CC} = R_{20^\circ\text{C}} \cdot [1 + \alpha_{20^\circ\text{C}} \cdot (T_{\max} - 20)] \quad [\Omega/\text{km}] \quad (5.6)$$

Onde:

- $R_{20^{\circ}\text{C}} = 0,067 \Omega/\text{km}$ - Resistência em corrente contínua do condutor a 20°C ;
- $\alpha_{20^{\circ}\text{C}} = 1,93 \times 10^{-5} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ - Coeficiente de dilatação térmica a 20°C ;
- $T_{\text{máx}} = 43,80113867^{\circ}\text{C}$ - Temperatura de operação máxima.

Cálculo:

$$\begin{aligned}
 R_{\text{CC}} &= 0,067 \cdot [1 + 1,93 \times 10^{-5} \cdot (43,80113867 - 20)] \\
 &= 0,067 \cdot [1 + 1,93 \times 10^{-5} \cdot 23,80113867] \\
 &= 0,067 \cdot [1 + 4,592847 \times 10^{-4}] \\
 &= 0,067 \cdot 1,0004592847 \\
 &\approx 0,067030778 \Omega/\text{km}
 \end{aligned}$$

Conclui-se que a resistência em corrente contínua do condutor, ajustada para a temperatura máxima de operação de $43,80113867^{\circ}\text{C}$, é aproximadamente $0,067030778 \Omega/\text{km}$.

É importante notar que este cálculo considera a temperatura máxima de operação atualizada, determinada pelo *software* InLinhas, com o auxílio da ferramenta *solver*, aplicado ao modelo de Kuirpers-Brown. A resistência calculada reflete as condições de operação esperadas para o condutor sob carga máxima temperatura máxima.

Esta resistência em corrente contínua será utilizada como base para os cálculos subsequentes, como o da resistência em corrente alternada e o efeito pelicular.

5.4.8 Cálculo da Resistência em Corrente Alternada

Utilizam-se as seguintes fórmulas da norma da Comissão Eletrônica Internacional (IEC) para o efeito pelicular:

$$Y_s = \frac{(X_s)^4}{192 + 0,8 \cdot (X_s)^4} \quad (5.7)$$

$$(X_s)^2 = \frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R_{\text{CC}}} \cdot 10^{-7} \cdot K_s \quad (5.8)$$

Para a resistência em corrente alternada:

$$R_{\text{CA}} = R_{\text{CC}} \cdot (1 + Y_s) \quad (5.9)$$

Dados:

- $R_{\text{CC}} = 0,067030778 \Omega/\text{km}$
- $f = 50\text{Hz}$

- $K_s = 1$

Cálculos:

1. Valor de $(X_s)^2$:

$$(X_s)^2 = 0,001874717$$

2. Cálculo de $(X_s)^4$:

$$\begin{aligned}(X_s)^4 &= (0,001874717)^2 \\ &\approx 3,51255243 \times 10^{-6}\end{aligned}$$

3. Cálculo de Y_s :

$$\begin{aligned}Y_s &= \frac{(X_s)^4}{192 + 0,8 \cdot (X_s)^4} \\ &= \frac{3,51255243 \times 10^{-6}}{192 + 0,8 \cdot 3,51255243 \times 10^{-6}} \\ &= \frac{3,51255243 \times 10^{-6}}{192 + 2,81004194 \times 10^{-6}} \\ &= \frac{3,51255243 \times 10^{-6}}{192,00000281} \\ &\approx 1,83 \times 10^{-8}\end{aligned}$$

4. Cálculo da resistência em corrente alternada:

$$\begin{aligned}R_{CA} &= R_{CC} \cdot (1 + Y_s) \\ &= 0,067030778 \cdot (1 + 1,83 \times 10^{-8}) \\ &\approx 0,067030779 \Omega/\text{km}\end{aligned}$$

Após o cálculo da resistência em corrente alternada por condutor, é necessário ajustar este valor para obter a resistência por fase, considerando o número de condutores por fase e o tipo de linha (simples ou dupla).

A fórmula para este ajuste é:

$$R_{\text{fase}} = \begin{cases} \frac{R_{CA}}{n}, & \text{para linha simples} \\ \frac{R_{CA}}{2n}, & \text{para linha dupla} \end{cases} \quad (5.10)$$

Onde:

- R_{fase} - Resistência por fase [Ω/km]
- R_{CA} - Resistência em corrente alternada por condutor [Ω/km]

- n - Número de condutores por fase

Para a linha considerada para o cálculo, a resistência por fase é calculada da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 R_{\text{fase}} &= \frac{R_{\text{CA}}}{2n} \\
 &= \frac{0,067030779}{2 \cdot 2} \\
 &= \frac{0,067030779}{4} \\
 &\approx 0,016757695 \Omega/\text{km}
 \end{aligned}$$

Conclui-se que:

- O fator de efeito pelicular Y_s é aproximadamente $1,83 \times 10^{-8}$.
- A resistência em corrente alternada por condutor é $0,067030779 \Omega/\text{km}$.
- A resistência por fase, considerando dois condutores por fase, é $0,016757695 \Omega/\text{km}$.

É importante notar que o efeito pelicular tem um impacto extremamente pequeno neste caso, aumentando a resistência em apenas cerca de $0,0000015\%$ relativamente à resistência em corrente contínua. Isto é usual para condutores de linhas de transmissão operando em frequências de 50 Hz. O valor final de R_{fase} , representa a resistência efetiva por fase. Esta resistência reduzida por fase é um dos benefícios de usar múltiplos condutores, diminuindo as perdas da linha e melhora a capacidade de transporte de energia.

5.4.9 Cálculo da Resistência Total da Linha

A resistência total da linha é calculada multiplicando a resistência por fase pelo comprimento total da linha:

$$R_{\text{linha}} = R_{\text{fase}} \cdot L \quad (5.11)$$

Onde:

- R_{linha} - Resistência total da linha [Ω]
- R_{fase} - Resistência por fase [Ω/km]
- L - Comprimento total da linha [km]

Dados:

- $R_{\text{fase}} = 0,016757695 \Omega/\text{km}$

- $L = 5 \text{ km}$

Cálculo:

$$\begin{aligned} R_{\text{linha}} &= R_{\text{fase}} \cdot L \\ &= 0,016757695 \Omega/\text{km} \cdot 5 \text{ km} \\ &= 0,083788475 \Omega \end{aligned}$$

Resultado:

A resistência total da linha, considerando o seu comprimento de 5 km, é aproximadamente 0,083788475 Ω .

Para os cálculos de queda de tensão ou perdas de potência na linha, este valor de resistência é essencial como já enunciado nos esquemas do cálculo elétrico anteriores.

5.4.10 Cálculo das Perdas de Energia da Linha

Para calcular as perdas de energia numa linha de transmissão dupla, utilizamos a seguinte fórmula:

$$p = n \cdot R \cdot I^2 \quad [W] \quad (5.12)$$

Onde:

- n - Número de condutores da linha;
- R - Resistência elétrica por fase [Ω];
- I - Corrente nominal por fase [A].

Dados:

- Número de condutores (n): 12 (2 linhas $\times$ 3 fases $\times$ 2 condutores por fase)
- Resistência por fase (R): 0,083788475 Ω
- Corrente nominal por fase (I): 535,25 A

Substituindo os valores na equação:

$$\begin{aligned} p &= n \cdot R \cdot I^2 \\ &= 12 \cdot 0,083788475 \, \Omega \cdot (535,25 \, \text{A})^2 \\ &= 12 \cdot 0,083788475 \cdot 286498,0625 \\ &= 12 \cdot 24002,9009 \\ &= 288034,8108 \, \text{W} \\ &\approx 288,0348 \, \text{kW} \end{aligned}$$

Cálculo da percentagem das perdas de energia:

$$\begin{aligned} \text{Percentagem das Perdas} &= \frac{288034,8108 \, \text{W}}{200.000.000 \, \text{VA}} \times 100\% \\ &= \frac{288,0348 \, \text{kW}}{200.000 \, \text{kVA}} \times 100\% \\ &= 0,001440174 \times 100\% \\ &= 0,1440174\% \\ &\approx 0,144\% \end{aligned}$$

A percentagem das perdas na linha de transmissão, considerando as perdas calculadas de 288034,8108 W e uma potência de transporte de 200MVA, é aproximadamente 0,144%.

5.4.11 Cálculo da Queda de Tensão

Dados:

- Resistência da linha: 0,083788475 Ω
- Corrente nominal: 535,25 A
- Reactância da linha: 1,6775 Ω
- Tensão nominal: 220 kV
- Fator de potência: 0,98060

Primeiro, procede-se ao cálculo do ângulo de desfasamento:

$$\begin{aligned}
 \varphi &= \arccos(\text{Fator de Potência}) \\
 &= \arccos(0,98060) \\
 &\approx 0,1974 \text{ radianos} \\
 &\approx 11,31^\circ
 \end{aligned}$$

Agora, aplica-se a fórmula da queda de tensão:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi) \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned}
 \Delta U &= \sqrt{3} \cdot 535,25 \cdot (0,083788475 \cdot \cos 11,31^\circ + 1,6775 \cdot \sin 11,31^\circ) \\
 &= 927,27 \cdot (0,083788475 \cdot 0,9807 + 1,6775 \cdot 0,1961) \\
 &= 927,27 \cdot (0,08217 + 0,32896) \\
 &= 927,27 \cdot 0,41113 \\
 &= 381,22 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Cálculo da percentagem da queda de tensão:

Utilizando a fórmula:

$$\Delta U(\%) = \frac{\Delta U}{U_{\text{nominal}}} \cdot 100 \quad (5.14)$$

Substituindo os valores:

$$\begin{aligned}
 \Delta U(\%) &= \frac{381,22}{220000} \cdot 100 \\
 &= 0,1733\%
 \end{aligned}$$

A queda de tensão é de 381,22 V, o que representa 0,1733% da tensão nominal. Com isto chega-se ao objetivo final da demonstração do cálculo. E pode-se concluir, tendo em conta os resultados, o seguinte:

1. A queda de tensão obtida é relativamente baixa em comparação com a tensão nominal de 220 kV;
2. A percentagem da queda de tensão está bem abaixo do limite de 5% exigido, indicando que a linha está bem dimensionada;
3. A linha tem muita mais capacidade de transporte.

5.5 Discussão dos resultados

Após a demonstração do cálculo elétrico, pode-se fazer a comparação com os valores obtidos pelo InLinhas. Nas figuras seguintes estão expostos os resultados do programa para o mesmo caso de estudo:



Dimensionamento
Otimizado

INPUT													
Caso	Tipo de Tensão	Linha	Nº de Condutores por Fase	[mm] Espaçador	[°C] Temperatura Ambiente	Apoio Predominante	[mm] Comprimento de Linha	[Hz] Frequência	[kV] Tensão Nominal	Fator de Potência	[MVA] Potência Aparente a Transmitir	Velocidade do Vento	Emissividade em relação ao corpo negro
1	MT	DUPLA	2,00	200,00	30,00	BWA	5,00	50,00	220,00	0,98060	200,00	0,60	0,60

CALCULAR

CABOS

Figura 5.9: Introdução dos dados de entrada

CABOS	Diametro do condutor	Raio do Condutor	Coefficiente pelicular	Coefficiente de dilatacao térmica, α_{ref}	R20	Temperatura do Cabo maxima	Temperatura de referencia [20°]	Resistencia de cabo a Tmax, [Ω/km]	Intensidade máxima dada pela potencia	DGF	Raio da Circunferencia
CEBRA 405	38.62	14.31	1.03E-05	1.03E-05	0.0070000	316.95	293.15	0.00075769461390	535.2476962	9899.869674	100
ZAPREDE 595	31.00	15.9	3.55E-06	2.51E-05	0.0519000	316.63	293.15	0.0127813568377	535.2476962	9899.869674	100
ASTER 54.4	7.50	3.75	6.30E-11	2.30E-05	0.0530000	386.46	293.15	0.2463337096079	535.2476962	9899.869674	100
ASTER 54.6	9.45	4.725	2.20E-10	2.30E-05	0.0040000	360.12	293.15	0.1511320744696	535.2476962	9899.869674	100
ASTER 75.5	11.25	5.625	4.29E-10	2.30E-05	0.4390000	343.85	293.15	0.1996778779153	535.2476962	9899.869674	100
ASTER 117	16.00	7	1.03E-09	2.30E-05	0.2830000	339.29	293.15	0.078034421011	535.2476962	9899.869674	100
ASTER 148	16.00	7.9	1.04E-09	2.30E-05	0.2240000	325.72	293.15	0.0500410500408	535.2476962	9899.869674	100
ASTER 170	31.0	15.55	2.36E-08	2.30E-05	0.0530000	316.91	293.15	0.0147589611493	535.2476962	9899.869674	100
ASTER 361	39.00	19	5.46E-08	2.30E-05	0.0200000	317.01	293.15	0.0007635513731	535.2476962	9899.869674	100
ASTER 1144	44.00	22	9.77E-08	2.30E-05	0.0290000	317.49	293.15	0.0072546592380	535.2476962	9899.869674	100

Raio Ficticio	Coefficiente de Auto-Inducao	Resistencia Continua
53.48766	0.001060089	0.0670
56.39149	0.001068554	0.0611
27.38613	0.001203004	0.0613
30.74685	0.001179894	0.0649
33.54102	0.001162409	0.4395
37.41657	0.001146051	0.2832
39.74921	0.001128497	0.2242
55.76737	0.001060779	0.0590
61.54414	0.001040742	0.0390
66.33250	0.001026082	0.0290

Figura 5.10: Resultados dos cálculos para alguns cabos, inclusive o cabo de estudo

$I^2 \cdot R_{cond} + \alpha_s \cdot G \cdot d - 8,55 \cdot (T_{cond} - T_{amb}) \cdot (v \cdot d)^{0,448} - \pi \cdot E \cdot C \cdot d \cdot (T_{cond}^4 - T_{amb}^4) = 0$								
Modelo Kuipers-Brown								
Emissividade em relação ao corpo negro	Constante de Stefan-Boltzman	Diâmetro do cabo	Temperatura do cabo	Temperatura ambiente	Coeficiente de absorção solar	Energia radiante incidente sobre uma superfície	Velocidade do Vento	Intensidade da corrente elétrica
E	$\sigma, [W m^{-2} K^{-4}]$	d, [m]	T, [°C]	T _{amb} , [°C]	σ_{solar}	G _i , [W/m ²]	v, [m/s]	I, [A]
0,60	5,70E-08	0,0286200	43,80	30,00	0,50	1000,00	0,60	535,2476862
0,60	5,70E-08	0,0318000	43,48	30,00	0,50	1000,00	0,60	535,2476862
0,60	5,70E-08	0,0075000	125,31	30,00	0,50	1000,00	0,60	535,2476862
0,60	5,70E-08	0,0094500	86,97	30,00	0,50	1000,00	0,60	535,2476862
0,60	5,70E-08	0,0112500	70,70	30,00	0,50	1000,00	0,60	535,2476862
0,60	5,70E-08	0,0140000	57,14	30,00	0,50	1000,00	0,60	535,2476862
0,60	5,70E-08	0,0158000	52,57	30,00	0,50	1000,00	0,60	535,2476862
0,60	5,70E-08	0,0311000	43,76	30,00	0,50	1000,00	0,60	535,2476862
0,60	5,70E-08	0,0380000	43,86	30,00	0,50	1000,00	0,60	535,2476862
0,60	5,70E-08	0,0440000	44,34	30,00	0,50	1000,00	0,60	535,2476862

Figura 5.11: Resultados dos cálculos do modelo de Kuipers-Brown para alguns cabos, inclusive o cabo de estudo

Angulo de desfasamento	Reatância	Perdas	Queda de Tensao	Porcentagem de tensao	Resistencia ohm
0,197297001	1,679321344	288054,8019	381,34601	0,173339	0,083788473
0,197297001	1,662771965	219703,9437	360,26432	0,163757	0,063906791
0,197297001	1,889675047	4131142,295	1435,81361	0,652643	1,201653653
0,197297001	1,853373444	2599597,992	1024,22508	0,465557	0,756162872
0,197297001	1,82598709	1888737,062	831,27285	0,377851	0,549389885
0,197297001	1,791636741	1217189,377	647,45083	0,294296	0,354052211
0,197297001	1,772638251	963327,887	576,86885	0,262213	0,28020978
0,197297001	1,666268188	253682,2921	369,88468	0,168129	0,073790306
0,197297001	1,634793995	167688,687	341,42545	0,155193	0,048776757
0,197297001	1,611766426	124692,9631	325,87125	0,148123	0,036270296

Figura 5.12: Resultados dos cálculos para alguns cabos, inclusive o cabo de estudo

Temperatura	% Queda de Tensão
85,00	5,00

OK

**Dimensionamento
Otimizado**

Nome	Temperatura	% Queda de Tensão
CU 35	81,76237021	0,415752861
ACSR 70	74,83082813	0,400768114
ASTER 75,5	70,69900705	0,377851298
ACSR 90	65,50130195	0,346957394
CU 50	67,87176105	0,346547979
GUINEA 130	62,30999177	0,333519583
ACSR 105	59,61362171	0,310844732
CANNA 116	58,85052718	0,306677924
DORKING 153	57,57215233	0,300791674
ASTER 117	57,14366477	0,294295833
PASTEL 147.1	56,29943629	0,290671327
ACSR 125	55,80847217	0,28545585
CU 70	56,32381064	0,282520115
ASTER 148	52,57449774	0,262213114
PARTRIDGE 160	51,71669443	0,25578032
CU 95	51,01872035	0,249206319
ACSR 175	50,21664829	0,244005935
CU 120	48,08633243	0,228610253
ACSR 235	47,16440792	0,217338649
PANTHER 260	46,79576956	0,213014125
CU 150	45,81678478	0,210600564
BEAR 325	45,42508098	0,197628046
CU 185	44,32837669	0,196772312
CU 240	43,11880258	0,182533776
CU 300	42,56542642	0,17335769
ZEBRA 485	43,80113867	0,173339096
RAIL AW 517	43,51142881	0,168506614
ASTER 570	43,76065129	0,168129401
ZAMBEZE 595	43,47511551	0,163756508
CU 400	42,24869585	0,163164234
ASTER 851	43,86107543	0,155193384
ASTER 1144	44,33900658	0,148123296
CARDINAL 546	43,68780428	0,168792324

Corrente Máxima
535,2476862

Figura 5.13: Menu de cabos final onde o utilizador pode manipular a temperatura máxima de 85°C e 5% queda de tensão

As imagens apresentadas, trata-se de recortes do programa, em que algumas partes estão ocultas ao utilizador. Nas imagens 5.10, 5.11 e 5.12 é apresentado o resultado de alguns cabos da base de dados. Caso seja difícil interpretação fica aqui uma nota de esclarecimento, que cada linha da tabela representa um cabo pela seguinte ordem, respetivamente:

- ZEBRA 485
- ZAMBEZE 595
- ASTER 34,4
- ASTER 54,6
- ASTER 75,5
- ASTER 117
- ASTER 148
- ASTER 570
- ASTER 851
- ASTER 1144

O modo de dimensionamento demonstrado, foi escolhido para poder demonstrar a capacidade mais pertinente e diferente de outros programas existentes. O caso de estudo foi escolhido especificamente para o caso mais complexo em termos de tipologia de linha.

Como se pode verificar visualmente, os resultados do InLinhas são congruentes com o resultados obtidos na demonstração do exemplo, a possível não substancial discrepância será devida a efeitos de aproximações.

Capítulo 6

Conclusão

Neste capítulo será enfatizado o sumário da pertinência e contributo dos temas abordados, e será finalizado com possíveis melhorias futuras.

A necessidade, progressiva, de transportar energia é crescente, e as empresas responsáveis pelo transporte e distribuição de energia, encaram severos obstáculos. Obstáculos como o ciclo de vida das linhas portuguesas, fazem equacionar a construção de novas linhas. Por outro lado, poderá ser mais benéfico e necessário a remodelação das redes existentes.

No contexto energético mundial, dão-se passos para a libertação dos combustíveis fósseis. No entanto, os impactos ambientais continuam-se a sentir um pouco em todo o mundo, e o ano de 2023 conseguiu bater recordes de temperaturas máximas atingidas, aumentando os custos de eletricidade e emissões de carbono. Este será mais um motivo para a liberalização da dependência de energias não renováveis, e na enfatização de investimento em energias mais limpas, que reduzam o consumo de combustíveis fósseis e contribuam para o efeito estufa.

Dado o cenário não muito favorável, há uma meta mundial de duplicar a taxa média anual de melhorias na eficiência energética global, no intervalo de 2022 a 2030. Para isso, foram formadas políticas, regulamentos, incentivos e um investimento triplicado global. Portanto, dado o passo do investimento, com o propósito de terminar a maratona, cuja meta simboliza a autossuficiência energética, a modernização das redes elétricas é uma etapa que urge.

O dimensionamento elétrico, desempenha uma parte relevante quando é projetada uma linha elétrica. O aumento da capacidade de transporte de energia, de maneira eficiente, e com mínimas perdas, é o objetivo para um engenheiro que dimensiona linhas de redes elétricas. Após uma avaliação da condição da instalação, podem ser apontadas lacunas que estrategicamente podem otimizar e aumentar a capacidade de transporte. Este acréscimo após a avaliação, caso viável, pode ser feito através da substituição de condutores.

Um responsável por um projeto, para uma linha, terá que colocar vários fatores na balança como a preservação ambiental, a segurança das suas implementações, o ponto de vista financeiro e técnico do projeto. Um fator importante que por vezes pode ser menosprezado é o tempo, que as pequenas tarefas podem ocupar. E apesar, da existência de aplicações que realizam cálculo mais avançado, e ainda, disponibilizam o cálculo mecânico, é sempre necessário fazer alguns testes e

parametrizações para pequenos casos, casos mais rápidos e menos complexos. Por isso, considero que o programa automático de cálculo desenvolvido no âmbito desta dissertação, pode auxiliar na agilização de alguns processos. Por exemplo, uma utilidade pertinente, será caso o utilizador pretenda fazer modificações a uma linha existente, visando aumentar a capacidade de transporte da mesma. Pode fazê-lo subindo temperatura de operação do condutor, ou pela substituição de condutores. Isto representa algo que está ao alcance do InLinhas.

6.1 Possíveis melhorias

Os objetivos do programa foram todos atingidos, embora seria interessante acrescentar as seguintes melhorias:

- Do ponto vista estético, com a implementação de menus no friso do Excel, aumentando a unicidade do programa e tornando a sua navegação ainda superior;
- O retorno de um relatório ao fim do cálculo realizado, apesar do grau de facilidade ser elevado, a sua implementação não está presente;
- Implementação do cálculo mecânico e adição de bases de dados para o mesmo ser possibilitado.

Referências

- [1] Dicionário Infopédia da Língua Portuguesa.
- [2] Ana Alves. *Manutenção de Linhas Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica*
}Caso de Estudo da Linha MT Senhora da Graça-Zebreira
} Estágio na EDP Distribuição. Tese de doutoramento, 2015.
- [3] *Autoridade Nacional da Aviação Civil. Informação Aeronáutica - Limitações em Altura e Balizagem de Obstáculos Artificiais à Navegação Aérea. Relatório técnico, 2003.*
- [4] *Manuel' 'Bolotinha. LINHAS AÉREAS -Tipologias, Características, Equipamentos e Princípios Construtivos. 2020.*
- [5] *Rafael Cardoso. Cálculo automático para projeto de linha aérea até 30kV. Tese de doutoramento, 2016.*
- [6] *João Carvalho e Oliveira. Projeto e construção de linhas aéreas MT e AT-Estabelecimento de linhas elétricas em zonas com alto risco de incêndios. Tese de doutoramento, 2018.*
- [7] *CENELEC. European Standard - EN 50341-1. Relatório técnico, 2012.*
- [8] *Direcção de Serviços de Energia Elétrica. Edição DGE do Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão. Relatório técnico.*
- [9] *Charles T Driscoll e Kimberley M Postek. The chemistry of aluminum in surface waters. Em The environmental chemistry of aluminum, páginas 363–418. CRC press, 2020.*
- [10] *Edição : e ; Revisão. Desenhos Técnicos Normativos Catálogo Digital complementar ao DMA-C67-605 MATERIAL PARA LINHAS AÉREAS Armações de aço para postes de betão de AT. Relatório técnico, 2022.*
- [11] *ERSE. Distribuição - ERSE.*
- [12] *ERSE. Transporte.*
- [13] *ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Enérgicos. ELETRICIDADE: COMO FUNCIONA?*
- [14] *Leonard L Grigsby. The electric power engineering handbook-five volume set. CRC press, 2018.*
- [15] *ICNF. Manual de apoio à análise de projetos relativos à instalação de linhas aéreas de distribuição e transporte de energia elétrica – versão revista. Instituto da Conservação da Natureza e Biodiversidade. Relatório não publicado. 2019.*

- [16] Fengshan LI, Mary Anne Bishop, e Tsamchu Drolma. *Power line strikes by Black-necked Cranes and Bar-headed Geese in Tibet Autonomous Region*. Chinese Birds, 2(4):167–173, 3 2012.
- [17] Nuno Mariano. *Sistemas de Terra e Protecção Contra Descargas Atmosféricas. Tese de doutoramento, 2011.*
- [18] João Neves. *Impacto da Rede de Distribuição Eléctrica nas Aves Selvagens em Portugal. Tese de doutoramento, 2010.*
- [19] André Pires. *Comparação entre a norma EN50341 e o Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão. Tese de doutoramento, 2021.*
- [20] REN. *CARACTERIZAÇÃO DA RNT.*
- [21] Luís Rocha. *Projeto de Linha Aérea de Alta Tensão - Estudo sobre a utilização de Cabo de Guarda. Tese de doutoramento, 2014.*
- [22] João António Santos e Costa Verde. *Desenvolvimento de Projeto de Linha Aérea de Alta Tensão – Viabilidade Técnica do Uso de Condutores de Alta Temperatura. Tese de doutoramento, 2016.*
- [23] Nuno Silva. *Projeto e Construção de Linhas Aéreas MT e AT. Tese de doutoramento, 2023.*
- [24] 'Solidal Condutores Eléctricos' e 'Quintas & Quintas Condutores Eléctricos'. *Guia técnico Portugal. 10ª edição, 2007.*
- [25] José Pedro' 'Sucena Paiva. *Redes de Energia Eléctrica: Uma Análise Sistémica. 4ª edição, 2015.*
- [26] Daniel Teixeira. *Projeto de uma Linha Aérea de Alta Tensão. Viabilidade Técnica e Económica na Aplicação da Tecnologia Cross-Bonding numa Linha Subterrânea . Tese de doutoramento, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2017.*