



# **Cálculo de Esforços Eletromecânicos em ligações horizontais e verticais de Subestações Elétricas**

**Patrícia Sá e Sousa da Costa**

**PARA APRECIAÇÃO POR JÚRI**

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. José Eduardo Neves dos Santos

Co-orientador: Eng.º Armando Santos

24 de Janeiro de 2021



# Resumo

Atualmente a energia elétrica é uma componente essencial no dia a dia da sociedade. A dependência elétrica continua a aumentar tornando a eletricidade um bem cada vez mais indispensável à garantia da qualidade de vida de milhões de pessoas. A sua distribuição fiável e segura desde os centros de produção até aos consumidores é, por isso, extremamente importante.

As subestações elétricas são instalações que estão inseridas na rede de distribuição de energia, desempenhando um papel essencial na estrutura de um Sistema Elétrico de Energia. O correto dimensionamento das ligações constituintes de uma subestação revela-se um problema complexo e que necessita de resultados rigorosos para que a subestação seja construída de forma segura e que no futuro não seja alvo de problemas.

Como forma de garantir a fiabilidade e segurança desejadas, é importante a realização de um dimensionamento adequado das ligações elétricas projetadas, de forma rápida e automatizada. A existência de uma aplicação computacional fiável que cumpra as normas aplicáveis e que calcule os esforços eletromecânicos das ligações da subestação surge como a solução ideal para este problema.

Assim, a solução adotada passou pelo desenvolvimento de uma aplicação computacional, desenvolvida em *Microsoft Excel*, capaz de realizar os cálculos dos esforços eletromecânicos de ligações verticais e horizontais de uma subestação elétrica e cujo desenvolvimento se encontra descrito ao longo do trabalho.

Nesta dissertação, encontram-se descritas as principais características das subestações elétricas, a formalização do cálculo dos esforços eletromecânicos de acordo com as normas internacionais, sendo ainda detalhadas as características da aplicação computacional criada. No capítulo final, são detalhados os resultados obtidos através da aplicação criada para os casos de estudo considerados.

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio do *Grupo Quadrante*.



# Abstract

Nowadays, electrical energy is an essential component for society's day-to-day life. The dependency on electrical energy continues to rise, making electricity an increasingly important asset in order to ensure the quality of life of millions of people. A safe and reliable distribution of electrical energy, from its production centers up to the final consumers, is extremely important.

Electrical substations are installations, inserted into the power network, that play a key role on an Electrical Energy System structure. The correct sizing of the constituting connections of a substation proves to be a complex problem, which needs rigorous results in order to build safe and long-lasting installations that also require the lowest possible maintenance.

In order to ensure the desired safety and reliability, an adequate sizing of the projected electrical connections, in a fast and automatic manner, is important. An ideal solution is the development of a reliable computational application that follows all the applicable international norms and calculates the substation's electromechanical "efforts". To this aim, the presented solution is a computational tool developed using *Microsoft Excel* which is capable of calculating all the necessary electromechanical quantities for both vertical and horizontal connections of an electrical substation, exposed in detail throughout this work.

This dissertation begins by describing the main characteristics of electrical substations, followed by a formal presentation of the necessary steps to calculate the electromechanical quantities according to the international norms and finally a detailed explanation of the developed application. In the final chapter, the results, obtained by using the devised solution on the considered use-case examples, are presented and analyzed.

This work was made possible with the support of *Grupo Quadrante*.



# Agradecimentos

Ao Prof. José Neves dos Santos o meu enorme agradecimento por ter confiado nas minhas capacidades e respondido sempre com interesse e rapidez às minhas questões, principalmente neste período difícil de confinamento.

Ao Eng.<sup>o</sup> Armando Santos e a toda a equipa do *Grupo Quadrante*, por me disponibilizarem todos os recursos necessários à realização do meu trabalho.

Aos meus pais, um agradecimento muito grande por todo o apoio incondicional prestado ao longo de todo o curso e por me proporcionarem todas as possibilidades para o realizar.

À Beatriz, por me fazer a cama muitas vezes durante este semestre, por me distrair com palavreado médico de vez em quando e mesmo pelas discussões habituais de irmãs.

Ao Pedro, por me chatear todos os dias com conversas sem sentido, com documentos para imprimir e com futebol todos os fins de semana nas minhas costas.

Ao André, por me vir incomodar sempre que faz um intervalo no estudo, por me manter sempre a par das últimas notícias e por não ter desistido de escolher o mesmo percurso académico que eu, mesmo sabendo que, por vezes, pode ser doloroso.

A todos os meus amigos que me acompanharam ao longo do curso e que tornaram estes anos realmente inesquecíveis.

Ao António, literalmente por tudo. Sem ti, esta etapa não estaria concluída. Obrigada.

Patrícia Sá e Sousa da Costa



*“Opportunities present themselves every day - to everyone.  
You just have to be alert and ready to act.”*

Marc Ostrofsky



# Conteúdo

|          |                                                                          |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>                                                        | <b>1</b>  |
| 1.1      | Enquadramento . . . . .                                                  | 1         |
| 1.2      | Motivação e objetivos . . . . .                                          | 1         |
| 1.3      | Estrutura da Dissertação . . . . .                                       | 2         |
| <b>2</b> | <b>Subestações Elétricas - Caracterização Geral</b>                      | <b>3</b>  |
| 2.1      | Introdução . . . . .                                                     | 3         |
| 2.2      | Classificação . . . . .                                                  | 4         |
| 2.2.1    | Níveis de tensão . . . . .                                               | 5         |
| 2.2.2    | Funções . . . . .                                                        | 5         |
| 2.2.3    | Localizações na rede . . . . .                                           | 5         |
| 2.2.4    | Tipos de instalação . . . . .                                            | 6         |
| 2.3      | Parque Exterior de Aparelhagem . . . . .                                 | 7         |
| 2.3.1    | Transformadores . . . . .                                                | 8         |
| 2.3.2    | Descarregadores de Sobreensões . . . . .                                 | 10        |
| 2.3.3    | Disjuntores . . . . .                                                    | 11        |
| 2.3.4    | Seccionadores . . . . .                                                  | 14        |
| 2.3.5    | Isoladores . . . . .                                                     | 14        |
| 2.4      | Outros equipamentos . . . . .                                            | 16        |
| 2.4.1    | Banco de condensadores . . . . .                                         | 16        |
| 2.4.2    | Reatâncias Limitadoras de Corrente . . . . .                             | 16        |
| 2.4.3    | Transformador de Serviços Auxiliares . . . . .                           | 17        |
| 2.4.4    | Barramentos . . . . .                                                    | 18        |
| 2.5      | Edifício de Comando . . . . .                                            | 18        |
| <b>3</b> | <b>Formalização do algoritmo de cálculo dos Esforços Eletromecânicos</b> | <b>19</b> |
| 3.1      | Dados de entrada e parâmetros característicos . . . . .                  | 19        |
| 3.2      | Escolha do condutor . . . . .                                            | 21        |
| 3.3      | Posição de montagem vertical . . . . .                                   | 21        |
| 3.3.1    | Dados de entrada . . . . .                                               | 21        |
| 3.3.2    | Cálculo dos esforços estáticos . . . . .                                 | 22        |
| 3.3.3    | Cálculo dos esforços dinâmicos . . . . .                                 | 22        |
| 3.3.4    | Conclusões . . . . .                                                     | 28        |
| 3.4      | Posição de montagem horizontal . . . . .                                 | 29        |
| 3.4.1    | Dados de entrada . . . . .                                               | 29        |
| 3.4.2    | Cálculo dos esforços estáticos . . . . .                                 | 31        |
| 3.4.3    | Cálculo dos esforços dinâmicos . . . . .                                 | 34        |
| 3.4.4    | Conclusões . . . . .                                                     | 38        |

|          |                                                                              |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4</b> | <b>Desenvolvimento da ferramenta de cálculo dos Esforços Eletromecânicos</b> | <b>41</b> |
| 4.1      | Botões utilizados na ferramenta computacional . . . . .                      | 41        |
| 4.2      | Arquitetura da ferramenta computacional . . . . .                            | 42        |
| 4.3      | Dados de entrada e detalhes das ligações . . . . .                           | 44        |
| 4.4      | Base de dados . . . . .                                                      | 47        |
| 4.5      | Dados de entrada . . . . .                                                   | 48        |
| 4.6      | Cálculo dos esforços eletromecânicos . . . . .                               | 49        |
| 4.6.1    | Introdução das condições de cálculo . . . . .                                | 49        |
| 4.6.2    | Esforços eletromecânicos de ligações verticais . . . . .                     | 50        |
| 4.6.3    | Esforços eletromecânicos de ligações horizontais . . . . .                   | 53        |
| 4.7      | Output . . . . .                                                             | 57        |
| <b>5</b> | <b>Caso de Estudo e Análise de Resultados</b>                                | <b>59</b> |
| 5.1      | Introdução dos dados de entrada do sistema . . . . .                         | 59        |
| 5.2      | Introdução dos detalhes das ligações . . . . .                               | 61        |
| 5.3      | Cálculo dos esforços da primeira ligação da subestação . . . . .             | 62        |
| 5.4      | Cálculo dos esforços da última ligação da subestação . . . . .               | 65        |
| 5.5      | Cálculo dos esforços de uma ligação vertical com $n=2$ . . . . .             | 70        |
| <b>6</b> | <b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>                                          | <b>73</b> |
| 6.1      | Conclusões . . . . .                                                         | 73        |
| 6.2      | Trabalho Futuro . . . . .                                                    | 74        |
|          | <b>Referências</b>                                                           | <b>75</b> |

# Lista de Figuras

|      |                                                                                                                   |    |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Estrutura do Sistema Elétrico . . . . .                                                                           | 4  |
| 2.2  | Subestação com isolamento a ar (à esquerda) e com isolamento com gás (à direita) [1] . . . . .                    | 6  |
| 2.3  | Subestação com isolamento híbrido [2] . . . . .                                                                   | 7  |
| 2.4  | Principais equipamentos de uma Subestação [3] . . . . .                                                           | 8  |
| 2.5  | Transformador de Potência [3] . . . . .                                                                           | 9  |
| 2.6  | Transformador de Intensidade (à esquerda) e Transformador de Tensão (à direita) [4] . . . . .                     | 10 |
| 2.7  | Descarregador de Sobretensões [4] . . . . .                                                                       | 11 |
| 2.8  | Disjuntor isolado com gás SF6 [3] . . . . .                                                                       | 13 |
| 2.9  | Seccionador de Linha [4] . . . . .                                                                                | 14 |
| 2.10 | Isolador de porcelana [5] . . . . .                                                                               | 15 |
| 2.11 | Banco de condensadores [3] . . . . .                                                                              | 16 |
| 2.12 | Reatância Limitadora de Corrente [4] . . . . .                                                                    | 17 |
| 2.13 | Transformador de Serviços Auxiliares [3] . . . . .                                                                | 17 |
| 2.14 | Barramentos [4] . . . . .                                                                                         | 18 |
| 3.1  | Principais parâmetros caracterizadores de uma ligação vertical [6] . . . . .                                      | 22 |
| 3.2  | Determinação gráfica do fator $v_2$ , de acordo com a figura 9 da norma IEC 60865-1 [7] . . . . .                 | 24 |
| 3.3  | Determinação gráfica do fator $v_3$ , de acordo com a figura 10 da norma IEC 60865-1 [7] . . . . .                | 25 |
| 3.4  | Determinação gráfica do fator $\xi$ , de acordo com a figura 11 da norma IEC 60865-1 [7] . . . . .                | 26 |
| 3.5  | Determinação gráfica do fator $\eta$ , de acordo com as figuras 12a, 12b e 12c da norma IEC 60865-1 [7] . . . . . | 27 |
| 3.6  | Principais parâmetros caracterizadores de uma ligação horizontal [6] . . . . .                                    | 30 |
| 3.7  | Fluxograma para a determinação do pior estado atmosférico . . . . .                                               | 33 |
| 3.8  | Determinação gráfica do fator $\psi$ , de acordo com a figura 7 da norma IEC 60865-1 [7] . . . . .                | 37 |
| 4.1  | Algoritmo utilizado na ferramenta computacional desenvolvida . . . . .                                            | 43 |
| 4.2  | Página inicial da ferramenta computacional - definição das principais características do sistema . . . . .        | 44 |
| 4.3  | Base de dados das características do sistema . . . . .                                                            | 45 |
| 4.4  | Detalhes das ligações da subestação elétrica . . . . .                                                            | 46 |
| 4.5  | Detalhes das ligações de uma subestação . . . . .                                                                 | 46 |
| 4.6  | Escolha do condutor a utilizar na ligação em causa . . . . .                                                      | 49 |

|      |                                                                                                                                 |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.7  | Introdução das condições de cálculo de uma ligação vertical . . . . .                                                           | 50 |
| 4.8  | Introdução das condições de cálculo de uma ligação horizontal . . . . .                                                         | 50 |
| 4.9  | Exemplo de cálculo dos esforços de uma ligação vertical . . . . .                                                               | 53 |
| 4.10 | Exemplo de cálculo dos esforços estáticos de uma ligação horizontal . . . . .                                                   | 54 |
| 4.11 | Exemplo de cálculo dos esforços dinâmicos de uma ligação horizontal . . . . .                                                   | 56 |
| 4.12 | Tabela de <i>Output</i> que contém os resultados dos esforços eletromecânicos da 1 <sup>a</sup> ligação da subestação . . . . . | 57 |
| 5.1  | Introdução dos dados de entrada do sistema . . . . .                                                                            | 59 |
| 5.2  | Confirmação dos dados de entrada do sistema . . . . .                                                                           | 60 |
| 5.3  | Introdução dos detalhes da primeira ligação da subestação . . . . .                                                             | 61 |
| 5.4  | Introdução dos detalhes da última ligação da subestação . . . . .                                                               | 61 |
| 5.5  | Tabela resumo dos detalhes de todas as ligações da subestação . . . . .                                                         | 62 |
| 5.6  | Escolha do cabo a utilizar na primeira ligação . . . . .                                                                        | 63 |
| 5.7  | Introdução das condições de cálculo da primeira ligação . . . . .                                                               | 63 |
| 5.8  | Cálculos dos esforços da primeira ligação . . . . .                                                                             | 64 |
| 5.9  | Tabela de <i>Output</i> . . . . .                                                                                               | 65 |
| 5.10 | Introdução das condições de cálculo da última ligação . . . . .                                                                 | 66 |
| 5.11 | Cálculos dos esforços estáticos da última ligação com valor de $F_{st,pe}$ errado . . . . .                                     | 67 |
| 5.12 | Cálculos dos esforços estáticos da última ligação com valor de $F_{st,pe}$ correto . . . . .                                    | 67 |
| 5.13 | Cálculos dos esforços dinâmicos da última ligação . . . . .                                                                     | 69 |
| 5.14 | Tabela de <i>Output</i> . . . . .                                                                                               | 70 |
| 5.15 | Escolha do condutor da ligação . . . . .                                                                                        | 71 |
| 5.16 | Introdução das características específicas da ligação . . . . .                                                                 | 71 |
| 5.17 | Cálculo dos esforços eletromecânicos da ligação . . . . .                                                                       | 72 |

# Lista de Tabelas

|     |                                                                     |    |
|-----|---------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Níveis de tensão limites e típicos em Portugal . . . . .            | 5  |
| 3.1 | Dados de entrada . . . . .                                          | 19 |
| 3.2 | Valores constantes a ser considerados no projeto . . . . .          | 20 |
| 3.3 | Dados de entrada das ligações verticais . . . . .                   | 21 |
| 3.4 | Dados de entrada das ligações horizontais . . . . .                 | 29 |
| 3.5 | Determinação do coeficiente de forma . . . . .                      | 31 |
| 3.6 | Determinação da pressão do vento . . . . .                          | 32 |
| 4.1 | Funções dos botões utilizados na ferramenta computacional . . . . . | 42 |
| 4.2 | Características presentes na base de dados dos cabos . . . . .      | 47 |
| 4.3 | Características presentes na base de dados dos tubos . . . . .      | 48 |
| 4.4 | Características presentes na base de dados das barras . . . . .     | 48 |



# Abreviaturas

|      |                                                  |
|------|--------------------------------------------------|
| AIS  | <i>Air Insulated Substation</i>                  |
| AT   | Alta Tensão                                      |
| BT   | Baixa Tensão                                     |
| DST  | Descarregador de Sobretensões                    |
| GIS  | <i>Gas Insulated Substation</i>                  |
| HIS  | <i>Hybrid Insulated Substation</i>               |
| IEC  | <i>International Electrotechnical Commission</i> |
| MAT  | Muito Alta Tensão                                |
| MT   | Média Tensão                                     |
| PT   | Posto de Transformação                           |
| QMMT | Quadro Metálico de Média Tensão                  |
| SEE  | Sistema Elétrico de Energia                      |
| SPCC | Sistemas de Proteção, Comando e Controlo         |
| TI   | Transformador de Intensidade                     |
| TP   | Transformador de Potência                        |
| TSA  | Transformador de Serviços Auxiliares             |
| TT   | Transformador de Tensão                          |
| TTR  | Tensão Transitória de Restabelecimento           |



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento

A presente dissertação foi desenvolvida com o objetivo de sistematizar o processo de cálculo dos esforços eletromecânicos estáticos e eletrodinâmicos de curto-circuito suscetíveis de ocorrer em condutores de interligação entre equipamentos de subestações, em ligações verticais e horizontais, de acordo com a normativa IEC aplicável.

A utilização de diferentes condutores, os diferentes tipos de montagem das ligações e as próprias características da subestação tornam o processo de cálculo dos esforços um processo lento e muito difícil de ser realizado manualmente, principalmente de forma precisa.

Embora existam ferramentas computacionais no mercado capazes de realizar os cálculos dos esforços mencionados, os resultados não são os mais precisos e mostram-se incompletos, havendo a necessidade da realização de cálculos adicionais fora do contexto da ferramenta.

Para o *Grupo Quadrante* é essencial a existência de uma ferramenta computacional capaz de realizar os cálculos e obter resultados, de acordo com as normas, com resultados rigorosos e precisos. É essencial que se verifique o seu funcionamento em várias situações diferentes, uma vez que existe uma grande dificuldade em modelizar subestações, levando a que cada caso tenha de ser tratado como um caso único.

### 1.2 Motivação e objetivos

Atualmente, cada vez são mais necessárias soluções rápidas e eficientes na distribuição de energia, sendo que os clientes no mercado energético pretendem serviços sem interrupções, ao menor custo, com qualidade e segurança. Por outro lado, o projetista tem de dar respostas cada vez mais rápidas e com mais qualidade ao cliente, sendo pertinente o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem o projetista nos cálculos dos esforços eletromecânicos de subestações elétricas.

Esta dissertação passa pelo estudo das forças aplicadas nas ligações de uma subestação elétrica. Deve ser desenvolvida uma ferramenta que deve colmatar as lacunas evidenciadas pela

aplicação atualmente ao dispor do *Grupo Quadrante*, desenvolvida em *Microsoft Excel*. Desta forma, os principais objetivos do trabalho são:

- Sistematizar o processo de cálculo dos esforços mecânicos estáticos e eletrodinâmicos de ligações horizontais e verticais entre equipamentos em subestações;
- Formalizar o algoritmo de cálculo, segundo a normativa aplicável;
- Desenvolver uma ferramenta computacional para o cálculo;
- Verificar o funcionamento da ferramenta computacional para casos de estudo conhecidos.

### 1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos, sendo este o capítulo que explica o tema tratado e a sua importância de desenvolvimento.

No Capítulo 2 é analisado o funcionamento e as características de uma subestação elétrica, começando por se fazer o enquadramento de uma subestação na estrutura do Sistema Elétrico de Energia.

No Capítulo 3 é realizada a formalização do algoritmo de cálculo, seguindo a normativa aplicável. Para além de todo o processo de cálculo são, também, sistematizados os dados de entrada, parâmetros característicos necessários e resultados mais relevantes, tanto nas ligações verticais como nas horizontais.

No Capítulo 4 é apresentada a ferramenta de cálculo realizada com o auxílio do *Excel*. Esta foi criada de raiz e tem como base um documento já existente com o qual o *Grupo Quadrante* trabalha diariamente. Assim, são enumeradas as várias bases de dados que foram criadas e descritos os procedimentos necessários para a realização dos cálculos e extração dos principais resultados, com exemplos ilustrativos da interface gráfica da aplicação.

No Capítulo 5 é demonstrado um caso de estudo específico que, utilizando a formulação matemática apresentada no Capítulo 3 e a ferramenta computacional desenvolvida com o auxílio do *Excel* e exposta no Capítulo 4, se obtêm os resultados. No Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões retiradas do trabalho realizado e a indicação de trabalhos futuros que se possam realizar com vista a melhorar a ferramenta computacional desenvolvida.

## Capítulo 2

# Subestações Elétricas - Caracterização Geral

Neste capítulo serão abordados vários conceitos sobre subestações elétricas, começando por uma breve explicação de como esta instalação está inserida no Sistema Elétrico de Energia.

### 2.1 Introdução

Um Sistema Elétrico de Energia (SEE) tradicional divide-se em várias etapas. A produção é uma etapa importante neste processo, uma vez que é nesta fase que se produz a eletricidade que irá ser utilizada pelo consumidor. A eletricidade é produzida em centrais hidroelétricas, centrais termoelétricas, centrais eólicas, entre outras. É necessário que a produção assegure a elevada fiabilidade que os clientes exigem, regulando a frequência e a tensão, bem como a geração de reserva. A eletricidade produzida em locais afastados das zonas de consumo é entregue na rede de transporte e conduzida em muito alta tensão (MAT), de modo a fazer chegar grandes quantidades de energia aos vários pontos do território sem perdas significativas, assim garantindo o abastecimento independentemente da distância às centrais elétricas. Em Portugal, o transporte é efetuado através da RNT (Rede Nacional de Transportes) em regime de serviço público e de exclusividade à REN (Redes Energéticas Nacionais). As redes de distribuição asseguram o trânsito de eletricidade entre a rede nacional de transporte e os consumidores: a eletricidade conduzida em grandes distâncias pela rede de transporte, em muito alta tensão (MAT), é depois entregue à rede de distribuição, que a transforma nas subestações para a poder conduzir em distâncias menores em alta, média e baixa tensão (AT, MT e BT) até às instalações dos consumidores. Os consumidores são a razão de ser de todo este complexo sistema.[8][9][10][11]

É através do estabelecimento de uma ligação à rede que qualquer instalação elétrica, produtora ou consumidora, é integrada em exploração nas redes de transporte e distribuição de eletricidade. Esta situação ocorre para instalações elétricas muito diversas, desde habitações a lojas, parques industriais ou centrais de produção de energia.[12]

A rede de distribuição pública em AT é constituída por linhas aéreas e subterrâneas e por um conjunto de subestações. Entre a geração e os consumidores, a energia passa por várias subestações, que vão transformando os níveis de tensão de acordo com o que é necessário. A utilização de subestações é mais económica, uma vez que em curtas distâncias não compensa o investimento em cabos de AT, e, por outro lado, aumenta a segurança das pessoas, aproximando os valores de potencial aos dos aparelhos que são utilizados a nível doméstico e industrial. Assim, as subestações apresentam um papel muito importante, uma vez que asseguram a rentabilidade económica e a viabilidade técnica do SEE. Uma subestação está sempre inserida num fluxo energético que vai desde a produção até ao consumidor. As subestações de MT são denominadas de postos de transformação (PT's), sendo estas responsáveis pela ligação aos consumidores.[2][13][12]

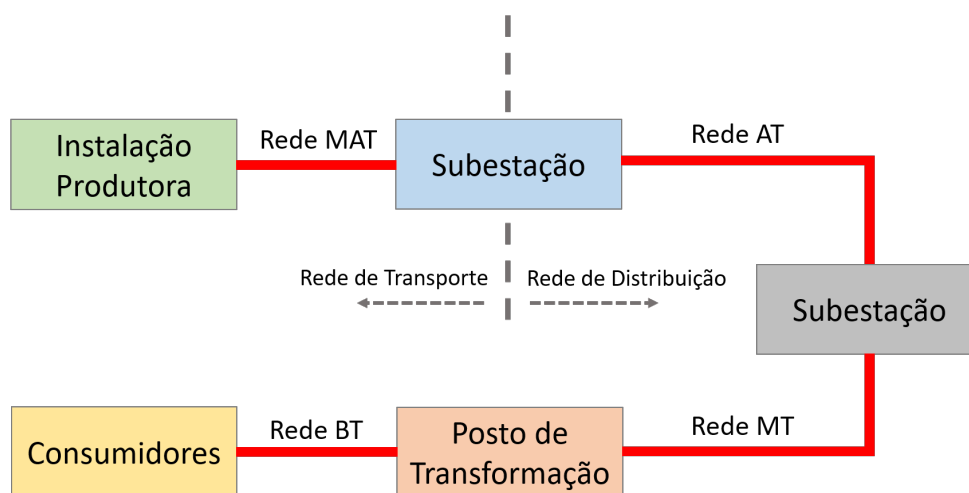


Figura 2.1: Estrutura do Sistema Elétrico

Uma subestação é, então, uma instalação de AT que se destina à transformação da corrente elétrica, por um ou mais transformadores estáticos, quando o secundário desses transformadores se destina a alimentar postos de transformação ou outras subestações.[8]

Sabendo que o SEE nacional tem vindo a tornar-se mais complexo é cada vez mais importante o papel da subestação por ser um elemento de interligação e gestão do trânsito de energia, que, para além de efetuar transformações dos níveis de tensão, protege a rede em situações de curto-circuito e sobrecargas, permite gerir falhas de energia e possibilita a gestão do fluxo de energia.[14]

## 2.2 Classificação

As subestações podem ser classificadas relativamente a diferentes parâmetros, como os níveis de tensão, a função que desempenha, a sua aplicação e o tipo de instalação.[2]

### 2.2.1 Níveis de tensão

As subestações têm como principal função efetuar as transformações dos níveis de tensão. Em Portugal Continental existem quase 6,1 milhões de consumidores, sendo a sua esmagadora maioria em Baixa Tensão, 23500 em Média Tensão e cerca de 350 em Alta e Muito Alta Tensão. Os níveis de tensão, em Portugal, são os apresentados na seguinte tabela: [10]

Tabela 2.1: Níveis de tensão limites e típicos em Portugal

| Nível de tensão | Limite dos níveis de tensão (kV) | Valores típicos (kV) |
|-----------------|----------------------------------|----------------------|
| BT              | <1                               | 0,4 e 0,23           |
| MT              | <45                              | 10, 15 e 30          |
| AT              | <110                             | 60                   |
| MAT             | >110                             | 150, 220 e 400       |

### 2.2.2 Funções

As subestações podem ter diferentes funções consoante as necessidades da rede. No contexto desta dissertação, são de salientar as subestações elevadoras e as abaixadoras.

As subestações elevadoras são as que se constroem à saída da geração de energia e têm como objetivo elevar a tensão a que a energia é produzida, de modo a ser transportada com o mínimo custo e maior fiabilidade possíveis. Na produção de energia elétrica, estas subestações estabelecem a ligação entre as máquinas geradoras e as linhas de AT ou MAT.[2][8]

As subestações abaixadoras são as que baixam os níveis de tensão da energia que provém do transporte, de forma a que chegue aos consumidores.[2]

### 2.2.3 Localizações na rede

As subestações podem ter diversas localizações na rede. Podem ser de transporte, de distribuição e de cliente.

As subestações de transporte ou de transmissão são as que se encontram mais perto da geração de energia. Estas subestações elevam as tensões ainda mais do que o valor vindo das subestações elevadoras, de forma a transmitir energia para longas distâncias. Funcionam, também, como ponto de interligação e seccionam as linhas de transmissão, assegurando que o transporte à rede de distribuição é realizado corretamente.[2]

As subestações de distribuição situam-se nas periferias dos grandes centros urbanos ou mesmo no seu interior e interliga duas zonas de distribuição. Estas subestações reduzem os valores de tensão para que a energia esteja em condições de ser utilizada pelos consumidores finais, na sua grande maioria de BT, como já referido anteriormente.[8][2]

A subestação de cliente é propriedade do cliente e é aplicada no caso do consumidor de energia produzir energia para grande parte do seu consumo.

## 2.2.4 Tipos de instalação

As instalações das subestações podem ser exteriores, a céu aberto, ou interiores, dentro de um edifício, sendo que o isolamento da subestação é uma componente essencial desta. O isolamento dos painéis das subestações podem ser feitos com ar, no caso das AIS (Air Insulated Substation) (Figura 2.2), com gás, as GIS (Gas Insulated Substation) (Figura 2.2), ou de forma híbrida, nas HIS (Hybrid Insulated Substation) (Figura 2.3).[1]

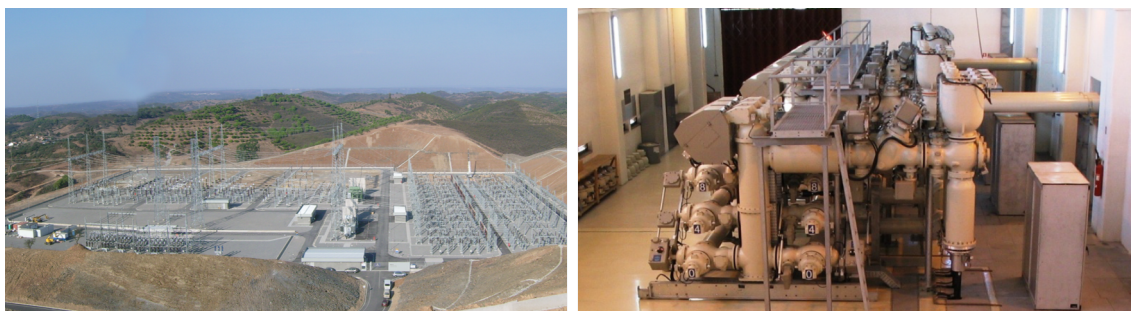


Figura 2.2: Subestação com isolamento a ar (à esquerda) e com isolamento com gás (à direita) [1]

No isolamento, a melhor alternativa ao ar é o gás, mais concretamente o hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>). O SF<sub>6</sub> é um dos gases mais densos conhecidos, cerca de cinco vezes a densidade do ar, não tóxico e biologicamente inerte. Este gás suscita interesse nesta área, uma vez que tem grande vantagem como meio isolante e de interrupção sobre o ar. Apresenta uma rigidez dielétrica elevada, cerca de cinco vezes a do ar e uma baixa constante de tempo térmica, de onde resulta uma diminuição muito rápida da condutibilidade do canal ionizado a seguir à passagem da corrente por zero, o que é uma característica favorável do ponto de vista da interrupção do arco elétrico. Rapidamente o SF<sub>6</sub> mostrou ser uma boa alternativa ao ar e ao óleo como isolante, com a grande vantagem de reduzir os incidentes devido a explosões ou incêndios. Uma das vantagens da utilização do gás é não ser necessário o restabelecimento do mesmo numa subestação, pois, apesar de se decompor a altas temperaturas, volta à sua forma inicial. Os resíduos originados devido à presença de ar, humidade e outros contaminantes acabam por ser eliminados. Uma das grandes desvantagens do SF<sub>6</sub> é o facto de ser um gás muito poluente, contribuindo para o efeito de estufa. A utilização de SF<sub>6</sub> está proibida na generalidade das utilizações, apesar da sua utilização ser permitida como meio isolante em instalações e equipamentos de MT e AT. Já existem formas de reciclar o gás e de diminuir a sua libertação, pelo que é espectável que o avanço tecnológico atenuie esta desvantagem. [15][16]

A construção das AIS é mais económica que a das GIS, uma vez que o custo do equipamento de uma GIS é mais elevado, devido à estrutura metálica fechada e à existência de uma cabine de controlo local. As AIS ocupam mais espaço físico em comparação com as GIS, fazendo com que o custo de planeamento seja superior, logo são adequadas quando não existem restrições espaciais na construção da subestação. Uma GIS pode ser até dez vezes mais pequena que uma AIS. De notar que, para as AIS manterem a sua eficácia, são necessários metros de espaço de

isolamento, o que não acontece no caso das GIS, que pode ser isolado em centímetros. Quanto maior for o valor da tensão, mais se sentem as vantagens de compactação da GIS, uma vez que este aumento de potencial, no caso de uma AIS, obriga a que se aumente a distância de isolamento nos equipamentos.[16][2]

É necessário ter especial cuidado ao local onde a subestação é instalada, tendo em atenção as condições atmosféricas a que está sujeito. A GIS tem um tempo de vida útil maior e é mais fiável do que a AIS, uma vez que não está exposta ao ar atmosférico, à humidade e à poluição. Por estas razões, as GIS acabam também por necessitar de menor manutenção.[14]

Como foi acima referido, existe também uma opção híbrida (HIS) para o isolamento de subestações (figura 2.3), em que se conjugam as tecnologias AIS e GIS. A HIS é constituída por disjuntores isolados a SF6 (nível de tensão mais baixo), mas incorpora barramentos isolados a ar (nível de tensão superior). Esta tecnologia é mais fácil de instalar, a sua área é cerca de 70% menor que a AIS e tem um custo inferior em comparação com as GIS. As condições climáticas não são um problema para as HIS e a construção no exterior de um único módulo independente elimina muitos dos riscos da instalação em comparação com as AIS. [2] [17]



Figura 2.3: Subestação com isolamento híbrido [2]

## 2.3 Parque Exterior de Aparelhagem

A transformação dos níveis de tensão é um processo com alguma complexidade, do qual faz parte um conjunto de equipamentos que agrupados formam um sistema capaz de elevar e diminuir os níveis de tensão gerada. É no Parque Exterior de Aparelhagem que se encontram instalados os painéis de Alta Tensão e os equipamentos de Média Tensão. [3]

Nesta secção vai proceder-se à descrição das características e do funcionamento dos principais equipamentos presentes no parque exterior de aparelhagem de uma subestação. Na figura 2.4 é possível distinguir os seguintes equipamentos:

- Transformadores de Tensão (1), de intensidade (3) e de potência (7);
- Descarregadores de Sobretensão (2);
- Disjuntores (4);
- Seccionadores (5);
- Isolador (6);
- Linha de Alta Tensão (8);
- Cabo de Média Tensão (9).

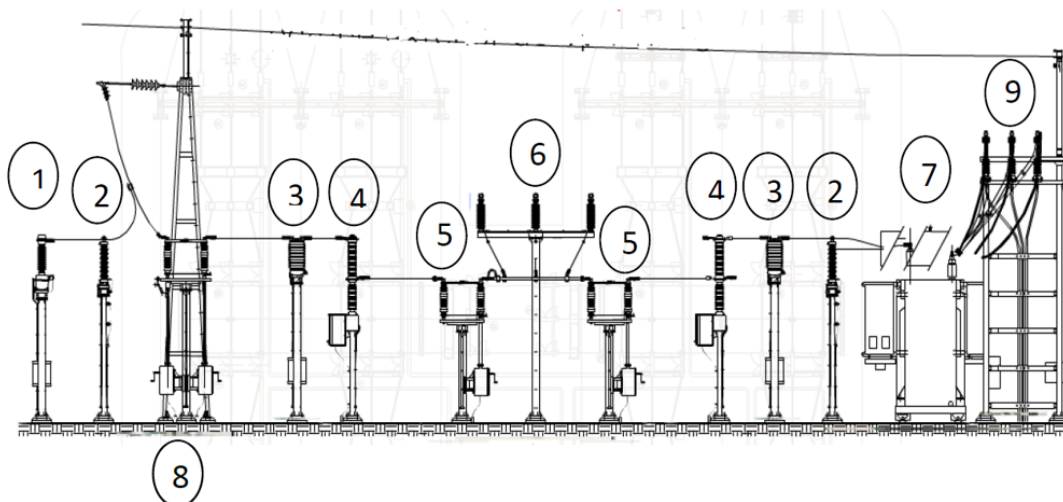


Figura 2.4: Principais equipamentos de uma Subestação [3]

### 2.3.1 Transformadores

Nas subestações destacam-se os transformadores de potência e os de medida.

#### 2.3.1.1 Transformadores de potência

Os transformadores de potência (TP) (figura 2.5) são os elementos base de uma subestação, uma vez que têm como função a transformação dos níveis de tensão. Estes transformadores são geralmente usados na rede de transmissão para aumentar ou diminuir o nível de tensão, operando, principalmente, durante cargas altas ou de pico, tendo a máxima eficiência na carga total ou perto desta. Estes equipamentos mantêm a potência constante do primário para o secundário, alterando a amplitude da tensão. Os TP possuem um comutador de tomadas que se destina a modificar a relação de transformação do transformador, adaptando-o a eventuais regimes de carga que se venham a verificar.[4][18][19][20]



Figura 2.5: Transformador de Potência [3]

Os transformadores de potência são elementos dispendiosos, sendo necessária uma análise prévia cuidada antes da escolha do equipamento. Estes transformadores têm um rendimento elevado e possuem dimensões consideráveis, que aumentam com o aumento da tensão. [2]

#### 2.3.1.2 Transformadores de medida

Os transformadores de medida destinam-se a transformar os valores elevados de corrente e de tensão em valores adequados para serem registados pelos contadores de energia, relés de proteção e outros aparelhos de medida que se encontrem na subestação. A sua principal função é, então, a alimentação dos relés de proteção e de equipamentos de medida. O interesse destes equipamentos resulta da possibilidade de economizar e padronizar a aparelhagem de medida, bem como da exigência de segurança que certos sistemas e regulamentos obrigam, como é o caso das subestações.[19][2][21]

Existem dois tipos de transformadores de medida (figura 2.6): os transformadores de intensidade (TI) ou de corrente, usados na aquisição de intensidades de corrente e os transformadores de tensão (TT) ou de potencial usados na aquisição de tensões.



Figura 2.6: Transformador de Intensidade (à esquerda) e Transformador de Tensão (à direita) [4]

Os transformadores de intensidade de corrente têm como função produzir uma imagem da corrente que transita no circuito, nos casos em que os valores de corrente são demasiado elevados para permitirem a utilização de aparelhagem de medição certa. Os TI são utilizados quando o circuito a observar é de tensão elevada ou quando os valores de corrente primária são demasiado elevados para permitirem a utilização de aparelhagem de baixo custo e reduzidas dimensões.[4][22]

Os transformadores de tensão têm como função efetuar a transformação da tensão do primário para uma tensão proporcionalmente mais baixa no enrolamento do secundário, possibilitando a utilização de dispositivos para monitorização de elevadas tensões no primário. Um dos problemas deste tipo de transformadores é o fenómeno de ferrorressonância. Este fenómeno ocorre quando há interação de indutância não linear adicionado de uma capacidade com um núcleo magnético saturável alimentado por uma fonte sinusoidal. Esta situação pode proporcionar sobretensões de 4 a 5 vezes o valor nominal num TT indutivo, podendo danificar o seu isolamento, provocando a avaria do TT. Este fenómeno é causado por descargas atmosféricas, manobras de disjuntores, energização ou desenergização de transformadores ou cargas. Assim, os TT indutivos contribuem para a ferrorressonância, mas também são indispensáveis nos painéis equipados com proteções rápidas, que necessitam de uma imagem correta da tensão no início do curto-circuito. Os TT capacitivos não causam este fenómeno, mas apenas devem ser utilizados em painéis equipados com proteções com menor rapidez de operação, sendo, por exemplo, instalados em barramentos para alimentar equipamentos de medida e controladores de sincronismo.[4][20][2]

### 2.3.2 Descarregadores de Sobretensões

Os descarregadores de sobretensões (DST) (Figura 2.7) são uma proteção indispensável numa instalação elétrica exterior. Aquando a ocorrência de uma sobretensão, o descarregador atua conduzindo a elevada corrente gerada durante a sobretensão para o circuito de terras, evitando danos nos equipamentos. Por vezes, em caso de sobretensão, não é necessária a intervenção do descarregador, desde que os valores de tensão se mantenham abaixo dos níveis máximos de isolamento

suportados pelos equipamentos. Quando estes valores limite são ultrapassados, os descarregadores devem garantir uma margem de segurança para a tensão máxima suportada e assegurar que suportam continuamente uma elevada tensão sem perigo de causar danos nos equipamentos. [4][2]



Figura 2.7: Descarregador de Sobretensões [4]

### 2.3.3 Disjuntores

Um disjuntor é um interruptor no qual a abertura do circuito se faz de uma forma automática em condições pré-estabelecidas. Estes aparelhos são os principais equipamentos de segurança de uma subestação, uma vez que são essenciais para a proteção e comutação de um Sistema Elétrico, permitindo alterar o estado elétrico de um circuito. Quando são chamados a atuar, os disjuntores têm uma atuação praticamente instantânea, apesar de poderem estar durante longos períodos de tempo na posição de fechados ou abertos. A velocidade de fecho e de abertura do disjuntor têm um papel importante na escolha do mesmo.[8][15]

A principal função dos disjuntores é o corte de correntes de defeito no menor tempo possível, de forma a evitar ou limitar possíveis danos nos equipamentos. A maior dificuldade para um disjuntor consiste na atuação em condições de curto-circuito, devido às condições extremamente severas em que é chamado a atuar. Quando existem alterações nos Sistemas Elétricos, os disjuntores são chamados a intervir, fechando circuitos em situação de curto-circuito. Estes equipamentos devem ser sempre acompanhados dos respetivos relés de proteção, que são responsáveis pela deteção de correntes elétricas no circuito, tomando a decisão de atuação do disjuntor. Sem os relés de proteção, os disjuntores não teriam características de proteção, tornando-se apenas equipamentos de manobra.[15][2]

As características do disjuntor, a capacidade de corte de correntes de curto-circuito e o comportamento do disjuntor para suportar as sobretensões de manobra variam de acordo com o princípio utilizado para a extinção do arco elétrico. Os disjuntores podem ser classificados de acordo com o nível de tensão da instalação, o tipo de instalação (interior ou exterior) e o seu tipo construtivo.

Este último é a característica mais utilizada, sendo que os tipos construtivos dos disjuntores têm o seu nome de acordo com o princípio utilizado para a extinção do arco elétrico. Os principais tipos de disjuntores são:

- De grande volume de óleo
- De ar comprimido
- De hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>)
- De pequeno volume de óleo
- De vácuo

Os disjuntores de grande volume de óleo foram os primeiros a ser utilizados e consistiam numa tina de óleo na qual existiam dois contactos móveis que ao se afastarem originavam a interrupção da corrente. Estes disjuntores já praticamente não se utilizam, uma vez que necessitam de uma grande quantidade de óleo, tendo um risco elevado de incêndio ou explosão.[15]

Os disjuntores de ar comprimido têm um elevado poder de corte e tempos de atuação muito pequenos. Apesar destas vantagens, estes disjuntores necessitam de ar comprimido a pressões muito elevadas (cerca de 2MPa), logo a possibilidade de fugas é muito elevada, pelo que exige uma manutenção cara. A sua atuação é, também, muito ruidosa pelo que, quando instalados em zonas residenciais, necessitam de silenciadores, o que torna o equipamento mais volumoso e, consequentemente, mais dispendioso.[15]

Os disjuntores de hexafluoreto de enxofre (figura 2.8) funcionam por ação de uma mola que é mantida em tensão por um servomotor e podem realizar mais de dez mil manobras sem haver necessidade de substituir qualquer componente. Estes disjuntores apresentam boas características de corte, não sendo, em geral, necessária a utilização de resistências em paralelo para a redução da tensão de restabelecimento. Tendo um impacto visual e uma dimensão reduzidos, estes disjuntores podem ser utilizados em instalações subterrâneas, em zonas com condições climáticas adversas e em locais sujeitos a cheias. Estes equipamentos necessitam de pouca manutenção e possuem uma taxa de avarias reduzida. No entanto, os disjuntores de SF<sub>6</sub> apresentam também desvantagens ligadas ao facto da utilização do gás ser maléfico para o ambiente, como já foi referido e explicado na Secção **Tipos de instalação**. Atualmente, para a Alta Tensão, não há alternativas de disjuntores para substituir os disjuntores de SF<sub>6</sub>. [2][15]



Figura 2.8: Disjuntor isolado com gás SF6 [3]

Os disjuntores de pequeno volume de óleo foram já muito utilizados e há ainda um grande número em utilização. Estes disjuntores têm a vantagem de serem praticamente insensíveis a taxa de crescimento da Tensão Transitória de Restabelecimento (TTR). A manutenção destes equipamentos, quando comparada à dos disjuntores de ar comprimido, é muito mais simples e barata. No entanto, os disjuntores de pequeno volume de óleo tem dificuldades no corte de correntes de curto-circuito pouco elevadas, que estão associadas TTR mais severas. Tal como os disjuntores de grande volume de óleo, estes estão a cair em desuso devido aos problemas ambientais resultantes da utilização do óleo, já não sendo produzidos pela generalidade dos fabricantes.[15]

Para tensões inferiores a 60kV, os disjuntores de vácuo são uma alternativa muito interessante e a solução utilizada atualmente para equipamentos novos. A atuação dos disjuntores de vácuo necessita de uma energia muito reduzida, sendo hoje realizada através de circuitos magnéticos, o que permite uma atuação muito rápida destes disjuntores. Os disjuntores de vácuo são capazes de interromper tensões com TTR muito elevadas, o que é para esta tecnologia uma vantagem, quando comparada com outras. A grande expansão destes equipamentos deve-se às suas boas características de corte, baixos custos de manutenção e ausência de problemas ambientais na sua utilização. Um dos problemas desta tecnologia é que a característica dielétrica do vácuo depende muito do seu grau. Por exemplo, se a pressão do vácuo aumenta para  $10^{-3}$  bar, a resistividade do vácuo a esta pressão é extraordinariamente baixa. Assim, qualquer aumento da pressão do vácuo para valores superiores a  $10^{-3}$  bar torna-se numa avaria muito grave do disjuntor.[15]

### 2.3.4 Seccionadores

Um seccionador é um aparelho, sem poder de corte em carga, destinado a interromper ou estabelecer a continuidade de um circuito. Existem dois tipos de seccionadores, os de linha (figura 2.9) e os de terra. Ambos funcionam durante ações de manutenção que possam ocorrer nas subestações, apesar de terem os dois funções diferentes durante essa manutenção. Os seccionadores de linha conferem uma maior segurança à equipa de manutenção, uma vez que a separação dos contactos é realizada de uma forma visível do local de manobra. Os seccionadores de terra têm como função ligar a linha em manutenção à rede de terras, de forma a prevenir acidentes caso a linha seja inadvertidamente energizada. Estes equipamentos são de extrema importância no contexto de uma subestação e têm características que obrigam a que a sua ação, de fecho ou abertura, ocorra de forma temporizada de maneira a que não existam danos no equipamento e não se coloquem em risco vidas humanas. Os seccionadores não devem oferecer resistência à passagem de corrente elétrica quando estão na posição fechada. Aquando a manutenção de um equipamento numa subestação, os seccionadores são instalados no equipamento em causa e, estando em posição aberta, garantem que não passa corrente elétrica, podendo realizar-se a manutenção em segurança.[8][4][2]



Figura 2.9: Seccionador de Linha [4]

A forma como as lâminas do seccionador operam também é um fator importante deste equipamento, podendo ser de abertura lateral, central, vertical ou uma combinação das anteriores. Para escolher essa característica, devemos ter em conta aspetos como os níveis de tensão, a manobra da subestação, as limitações do afastamento elétrico e a função que se está a desempenhar.[14]

### 2.3.5 Isoladores

Os isoladores desempenham um papel fundamental numa subestação, impedindo a passagem para a terra de fluxo indesejado de corrente através dos pontos de apoio da instalação. Os iso-

ladores têm como função evitar que a passagem de corrente transportada pelos condutores passe para as estruturas metálicas do parque de linhas e atinja o solo, evitando, assim, um curto-circuito. Deste modo, afastam eletricamente qualquer parte em tensão das estruturas que os suportam.[4][3]

Os isoladores podem ser revestidos de várias formas dependendo do fim a que se destinam. O material constituinte dos isoladores deverá garantir as seguintes propriedades:[4]

- Robustez mecânica de forma a suportar o peso e tensão mecânica dos condutores;
- Elevada resistência elétrica para permitir suportar continuamente elevados valores de tensão elétrica;
- Elevada resistência de isolamento evitando, assim, fugas de corrente para a terra;
- O material não deverá conter impurezas na sua constituição;
- Não poderá ser poroso, nem conter cavidades de modo a não acumular humidade nem gases.

Em espaços interiores são usados isoladores de porcelana ou de materiais epóxicos (por exemplo, polímero). Ao ar livre adotam-se habitualmente isoladores de porcelana ou de vidro. Atualmente, a porcelana (figura 2.10) é o material mais utilizado no fabrico de isoladores, destacando-se pela sua elevada capacidade de isolamento elétrico e resistência mecânica. No entanto, nos últimos anos, os isoladores de vidro têm vindo a ganhar espaço, principalmente nos sistemas de distribuição de energia.[4][2]



Figura 2.10: Isolador de porcelana [5]

Os isoladores podem ser de suporte ou em cadeia. Os isoladores de suporte constituem o tipo mais simples de isolador e têm como função suportar os condutores dos barramentos. Apresentam diversas formas, conforme a sua aplicação específica e a tensão de serviço da instalação. Os isoladores em cadeia são utilizados em cadeias de amarração e têm a vantagem de permitir praticamente qualquer distância de contornamento que se pretenda, pelo recurso a um número conveniente de unidades, umas a seguir às outras. Estes são classificados como isoladores à prova de perfuração, pois, no caso de ocorrer uma descarga entre a haste e a campânula, apenas a asa do isolador fica danificada, devendo ser posteriormente substituída de forma a evitar consequências numa segunda descarga na parte enfraquecida.[20]

## 2.4 Outros equipamentos

### 2.4.1 Banco de condensadores

O banco de condensadores (figura 2.11) é constituído por vários conjuntos de baterias de condensadores em série ou em paralelo. Estas baterias têm como função realizar a compensação da potência reativa de forma a minimizar as perdas nas linhas e otimizar o desempenho do sistema, compensando o fator de potência das cargas. Esta compensação de potência reativa tem diversas vantagens, tais como a redução do custo do sistema pela redução de perdas, permite uma melhor regulação da tensão e aumenta os níveis de tensão nos terminais da carga.[2]



Figura 2.11: Banco de condensadores [3]

A inserção de baterias de condensadores nos sistemas de transporte diminui a reatância série das linhas, aumentando a capacidade de transporte dessa linha e, consequentemente, a estabilidade do sistema.[23]

### 2.4.2 Reatâncias Limitadoras de Corrente

As reatâncias limitadoras de corrente (figura 2.12) têm como principal função limitar a intensidade das correntes de curto-circuito. Estas reatâncias são utilizadas quando se pretende reduzir a potência de curto-circuito das redes ou instalações a um valor aceitável, relativamente à resistência, aos curtos-circuitos da aparelhagem existente ou à potência de corte da aparelhagem. São equipamentos que possuem alguns aspetos de construção semelhantes aos transformadores, como o modo de aplicação dos enrolamentos e a possibilidade de serem imersas em óleo ou com isolamento seco.[4][20]

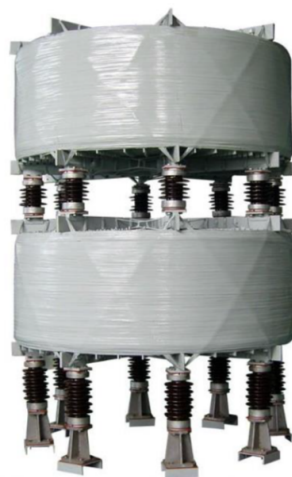


Figura 2.12: Reatância Limitadora de Corrente [4]

### 2.4.3 Transformador de Serviços Auxiliares

O Transformador de Serviços Auxiliares (TSA) (figura 2.13) é utilizado para alimentar os circuitos auxiliares de uma subestação, tais como ar condicionado, iluminação e circuitos de alimentação das unidades de proteção do retificador. Este equipamento tem um funcionamento igual ao do TP, diferenciando-se apenas na sua potência que é bastante mais reduzida.[3]



Figura 2.13: Transformador de Serviços Auxiliares [3]

#### 2.4.4 Barramentos

O barramento (figura 2.14) é o conjunto de condutores que permitem a conexão de todos os equipamentos da subestação. Dependendo do contexto, barramento poderá significar apenas uma das fases, uma vez que para dimensionar os perfis a serem utilizados no barramento, basta dimensionar um dos condutores (uma das fases) e os outros serão iguais. Os barramentos têm, então, o objetivo de efetuar as interligações entre os diversos aparelhos da subestação e servir como elemento de distribuição, ou seja, pontos a partir dos quais os circuitos divergem.[24][4]

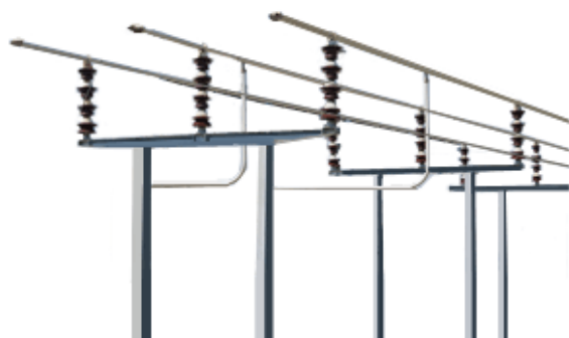


Figura 2.14: Barramentos [4]

Existem vários tipos de configurações para os barramentos de uma subestação, de forma a que apresentem sempre a maior fiabilidade e flexibilidade possíveis, enquanto respeitam os requisitos do sistema e minimizam os custos de investimento. Uma subestação deve funcionar com regularidade e deve ser económica, segura e o mais simples possível. Assim, a seleção do barramento da subestação, tendo em conta os equipamentos usados, a localização escolhida e o trabalho necessário, deve ter como objetivo satisfazer os requisitos técnicos mínimos, de forma aos custos serem os mais baixos possíveis.[2][8]

### 2.5 Edifício de Comando

O edifício de comando está situado perto do Parque Exterior de Aparelhagem e é constituído por uma ampla sala onde está instalado o equipamento principal de MT, como o Quadro Metálico de Média Tensão (QMMT) e armários que integram os Sistemas de Proteção, Comando e Controlo (SPCC). [3]

## Capítulo 3

# Formalização do algoritmo de cálculo dos Esforços Eletromecânicos

Neste capítulo é apresentada a formalização do algoritmo de cálculo dos esforços eletromecânicos de uma subestação elétrica, realizado de acordo com as normas IEC 60865-1 e IEC 60865-2. [7][6] Este algoritmo trata dos esforços eletromecânicos de ligações com diferentes posições de montagem: verticais ou horizontais. Apesar desta diferenciação, é de notar que em ambos os casos existem características da rede elétrica e da subestação que devem ser conhecidas *a priori*, uma vez que não dependem do perfil escolhido. Após a definição dos dados de entrada deve, então, proceder-se à escolha do condutor para a ligação e, finalmente, realizar os cálculos necessários para o correto dimensionamento do barramento.

### 3.1 Dados de entrada e parâmetros característicos

Para que seja possível iniciar o procedimento relativo ao dimensionamento do barramento, é necessário definir as características tanto da subestação em causa como da rede elétrica. Assim, na Tabela 3.1 encontram-se todos os dados de entrada utilizados para o cálculo e explicados posteriormente.

Tabela 3.1: Dados de entrada

| Dados de entrada                                                             | Símbolo  | Unidades |
|------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|
| Tensão nominal do sistema                                                    | $U_n$    | kV       |
| Corrente de curto-circuito inicial simétrica                                 | $I_k''$  | A        |
| Duração da corrente de curto-circuito                                        | $T_{k1}$ | s        |
| Frequência do sistema                                                        | $f$      | Hz       |
| Relação X/R                                                                  | $X/R$    | -        |
| Fator empírico para o cálculo do valor de pico da corrente de curto-circuito | k        | -        |

**Tensão nominal do sistema:** Tensão entre fases que caracteriza uma rede e em relação à qual são referidas certas características de funcionamento. Em operação normal, a tensão do sistema não deve exceder a sua tensão nominal. [25]

**Corrente de curto-circuito inicial simétrica:** Valor eficaz da corrente de curto-circuito simétrica no instante em que ocorre o curto-circuito. [26]

**Duração da corrente de curto-circuito:** Tempo de duração do curto-circuito.

**Frequência do sistema:** Frequência elétrica da instalação/rede (normalmente, 50Hz). [24]

**Relação X/R:** Depende do tipo de rede da subestação. Normalmente, considera-se uma rede fortemente indutiva.

**Fator empírico para o cálculo do valor de pico da corrente de curto-circuito:** Fator que traduz a maior ou menor rapidez de decaimento da componente contínua e é função da razão R/X vista do local de defeito.

É importante referir alguns parâmetros constantes que são considerados para todos os cálculos, apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Valores constantes a ser considerados no projeto

| Dados de entrada                 | Símbolo  | Valor          | Unidades  |
|----------------------------------|----------|----------------|-----------|
| Valor convencional da aceleração | $g$      | 9,81           | $m/s^2$   |
| Espessura da camada de gelo      | $t$      | 0,01           | $m$       |
| Densidade do gelo                | $\rho$   | 0,9            | $kg/dm^3$ |
| Coeficiente de redução           | $\alpha$ | 0,6            | -         |
| Permeabilidade do vácuo          | $\mu_0$  | $4\pi 10^{-7}$ | $H/m$     |

Existem também alguns fatores, apresentados de seguida, que tomam o mesmo valor para as ligações verticais e horizontais e que são relevantes para os cálculos dos esforços apresentados nos capítulos seguintes.

A norma de rigidez pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$N = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{nE_{eff}A_s} \quad [N^{-1}] \quad (3.1)$$

Em que:

$S$  representa a constante de elasticidade resultante dos suportes  $[N/mm]$ ;

$l$  representa a distância entre suportes  $[m]$ ;

$n$  representa o número de subcondutores;

$E_{eff}$  representa o módulo de Young real  $[N/mm^2]$ ;

$A_s$  representa a área de secção do subcondutor  $[mm^2]$ .

O cálculo do módulo de Young real ( $E_{eff}$ ) depende do valor de  $\frac{F_{st}}{nA_s}$ , em que  $F_{st}$  é a força de tensão estática num condutor flexível, calculada posteriormente, e é dado por:

$$E_{eff} = \begin{cases} E(0,3 + 0,7 \operatorname{sen} \left[ \left( \frac{F_{st}}{nA_s \sigma_{fin}} \right) 90^\circ \right]) & \text{para } \frac{F_{st}}{nA_s} \leq \sigma_{fin} \\ E & \text{para } \frac{F_{st}}{nA_s} > \sigma_{fin} \end{cases} \quad [N/m^2] \quad (3.2)$$

Em que  $\sigma_{fin}$  representa o menor valor de  $\sigma$  quando o módulo de Young se torna constante e é dado por  $\sigma_{fin} = 50 \cdot 10^6 N/m^2$ .

## 3.2 Escolha do condutor

Os cálculos realizados no dimensionamento de cada barramento da subestação dependem não só da posição em que este se encontra montado, mas também do condutor escolhido para essa ligação.

Os barramentos podem ser flexíveis ou rígidos. Para subestações de grandes dimensões, utiliza-se normalmente o cabo nú (condutor flexível). Os barramentos rígidos são utilizados quando a otimização do espaço ou os fatores estéticos são os principais parâmetros a ter em conta e podem ter várias formas, sendo que as barras e os tubos são as mais utilizadas em subestações. A utilização de condutores flexíveis traz algumas desvantagens, uma vez que estes são constituídos por material maleável e, por isso, estão sujeitos a maiores oscilações provenientes do vento e da chuva. No entanto, em comparação com os condutores rígidos, a utilização de condutores flexíveis é mais barata, uma vez que se utilizam um menor número de estruturas metálicas.[27]

## 3.3 Posição de montagem vertical

### 3.3.1 Dados de entrada

Quando a ligação entre dois equipamentos é realizada na vertical, são necessários alguns dados de entrada extra para além dos já referidos anteriormente (Tabela 3.3):

Tabela 3.3: Dados de entrada das ligações verticais

| Dados de entrada                         | Símbolo | Unidades |
|------------------------------------------|---------|----------|
| Distância entre condutores               | $a$     | m        |
| Altura da baixada                        | $h$     | m        |
| Largura da baixada                       | $w$     | m        |
| Distância entre suportes                 | $l$     | m        |
| Comprimento total do condutor da baixada | $l_v$   | m        |
| Distância entre peças de conexão         | $l_s$   | m        |
| Distância entre subcondutores            | $a_s$   | m        |

Na figura 3.1 estão representados os principais parâmetros que caracterizam uma ligação vertical de uma subestação, mencionados na Tabela 3.3:

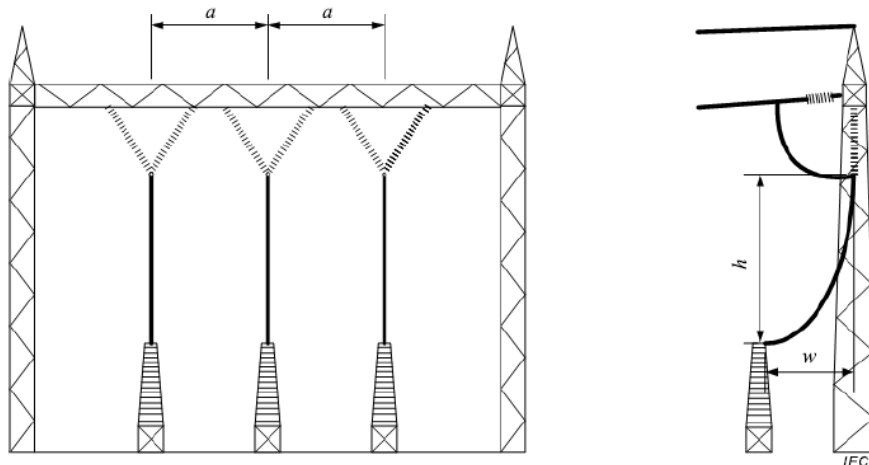


Figura 3.1: Principais parâmetros caracterizadores de uma ligação vertical [6]

### 3.3.2 Cálculo dos esforços estáticos

#### 3.3.2.1 Força de tensão estática

A componente horizontal da força causada pelo subcondutor no ponto mais baixo ( $H_s$ ) pode ser calculada através da expressão:

$$H_s = \sqrt{\frac{1}{24} \frac{(m'_s g)^2 w^2}{\frac{\sqrt{l_v^2 - h^2}}{w} - 1}} \quad [N] \quad (3.3)$$

A componente vertical da força causada por um subcondutor no ponto mais alto pode ser dada por:

$$V_s = m'_s l_v g \quad [N] \quad (3.4)$$

Deste modo, é possível calcular a força de tensão estática num condutor flexível ( $F_{st}$ ), sendo que esta é dada por:

$$F_{st} = n \frac{H_s + V_s}{2} \quad [N] \quad (3.5)$$

### 3.3.3 Cálculo dos esforços dinâmicos

#### 3.3.3.1 Força de tensão devida a um curto-circuito

A força de tensão devida a um curto-circuito num condutor principal flexível ( $F_{t,d}$ ) depende da corrente de curto-circuito e da distância entre os condutores, podendo ser calculada através da

seguinte expressão:

$$F_{t,d} = \frac{5}{3} l_v \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{(I_k'')^2}{a} \frac{l_v}{w} \quad [N] \quad (3.6)$$

Em que,  $1.4w \leq l_v \leq 3.3w$ .

### 3.3.3.2 Força de *pinch*

Para configurações simétricas até quatro subcondutores, a força de tensão (ou força de *pinch*) é dada por:

$$F_{pi,d} = 1,1 F_{t,d} \quad [N] \quad (3.7)$$

Quando a distância  $a_s$  e  $l_s$  satisfazem as condições 3.8 e 3.9 apresentadas de seguida considera-se que os subcondutores colidem.

$$\frac{a_s}{d} \leq 2,0 \quad \text{e} \quad l_s \geq 50a_s \quad (3.8)$$

$$\frac{a_s}{d} \leq 2,5 \quad \text{e} \quad l_s \geq 70a_s \quad (3.9)$$

Quando estas condições não são satisfeitas, o cálculo da força de *pinch* ( $F_{pi,d}$ ) desenvolve-se de outra forma e depende de vários parâmetros. Primeiramente, esta força vai depender do parâmetro  $j$ , calculado da seguinte forma:

$$j = \sqrt{\frac{\varepsilon_{pi}}{1 + \varepsilon_{st}}} \quad (3.10)$$

Em que  $\varepsilon_{pi}$  e  $\varepsilon_{st}$  são fatores de deformação e são dados por:

$$\varepsilon_{st} = 1,5 \frac{F_{st} l_s^2 N}{(a_s - d)^2} \left( \sin \frac{180}{n} \right)^2 \quad (3.11)$$

$$\varepsilon_{pi} = 0,375 n \frac{F_v l_s^3 N}{(a_s - d)^3} \left( \sin \frac{180}{n} \right)^3 \quad (3.12)$$

Em que:

$F_{st}$  representa a força de tensão estática (calculada anteriormente)  $[N]$ ;

$N$  representa a norma de rigidez  $[N^{-1}]$ ;

$d$  representa o diâmetro do condutor  $[m]$ ;

$n$  representa o número de subcondutores;

$F_v$  representa a força da corrente de curto-circuito  $[N]$ .

A força da corrente de curto-circuito é dada por:

$$F_v = (n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{I_k''}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} \frac{v_2}{v_3} \quad [N] \quad (3.13)$$

Em que  $v_2$  e  $v_3$  são fatores explicados de seguida.

O fator  $v_2$  é obtido a partir da figura 9 da norma IEC 60865-1 (Figura 3.2), como uma função de  $v_1$ , dado por:

$$v_1 = f \frac{1}{\sin \frac{180}{n}} \sqrt{\frac{(a_s - d)m'_s}{\frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{I_k''}{n} \right)^2 \frac{n-1}{a_s}}} \quad (3.14)$$

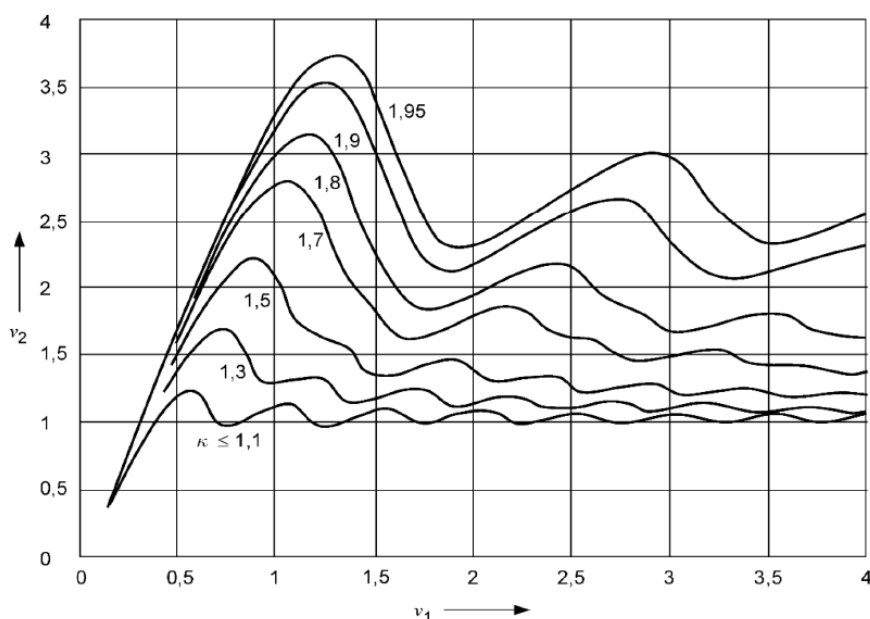


Figura 3.2: Determinação gráfica do fator  $v_2$ , de acordo com a figura 9 da norma IEC 60865-1 [7]

Uma vez tendo  $k$  (fator empírico para o cálculo do valor de pico da corrente de curto-circuito) e  $v_1$  definidos previamente, é possível a determinação gráfica do fator  $v_2$ .

O fator  $v_3$  é também obtido a partir da figura 10 da norma IEC 60865-1 (Figura 3.3) e o seu valor depende do valor da relação  $\frac{a_s}{d}$ .

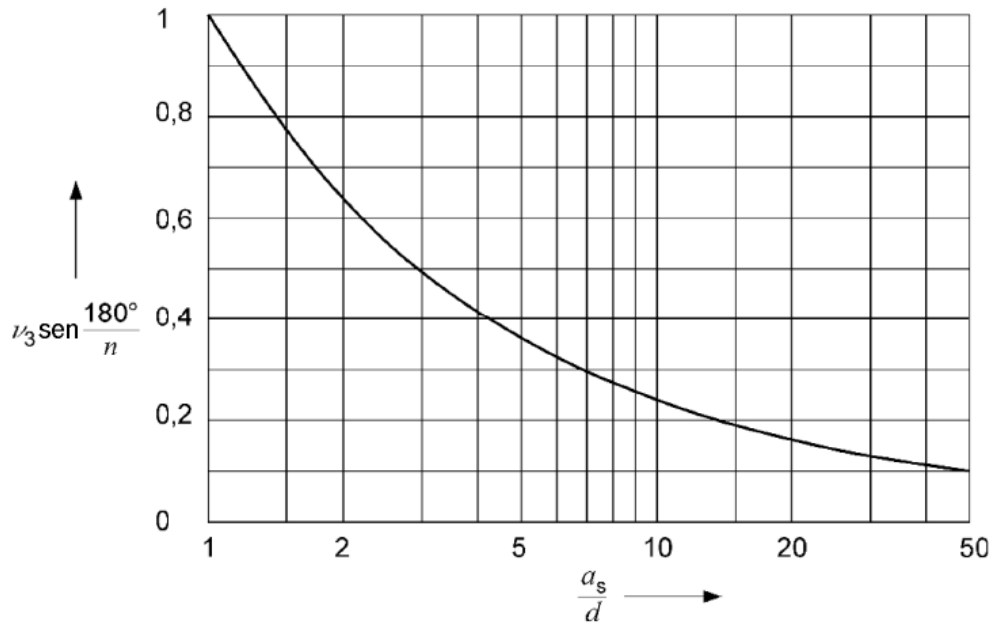


Figura 3.3: Determinação gráfica do fator  $v_3$ , de acordo com a figura 10 da norma IEC 60865-1 [7]

Finalmente, o cálculo da força de *pinch* vai depender de o parâmetro  $j$  ser maior ou menor do que 1.

Se  $j \geq 1$ , significa que os condutores colidem durante o curto-circuito. Para o cálculo da força de tensão são necessários alguns fatores, tais como  $v_e$ ,  $v_4$  e  $\xi$ .

O fator  $v_e$  é dado por:

$$v_4 = \frac{a_s - d}{d} \quad (3.15)$$

O fator  $\xi$  é obtido a partir da figura 11 da norma IEC 60865-1 (Figura 3.4) e o seu valor depende dos valores de  $j$  e  $\epsilon_{st}$ .

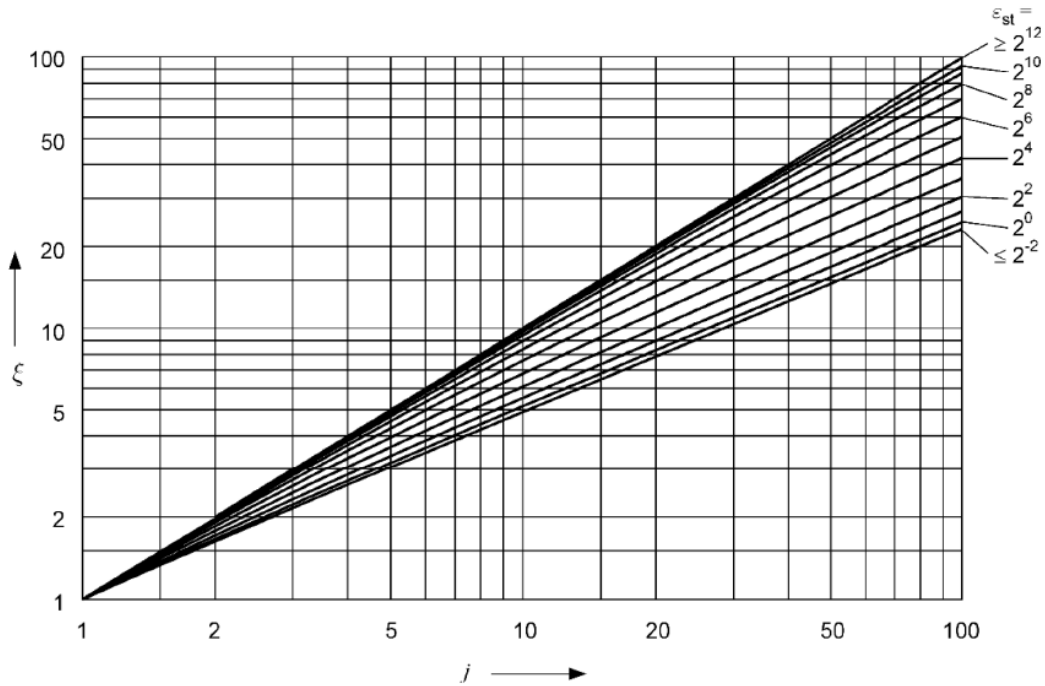


Figura 3.4: Determinação gráfica do fator  $\xi$ , de acordo com a figura 11 da norma IEC 60865-1 [7]

O fator  $v_e$  pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$v_e = \frac{1}{2} \left[ \frac{9}{8} n(n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{I_k''}{n} \right)^2 N v_2 \left( \frac{l_s}{a_s - d} \right)^4 \frac{(\sin \frac{180}{n})^4}{\xi^3} \left\{ 1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (3.16)$$

Assim, a força de tensão é dada por:

$$F_{pi,d} = F_{st} \left( 1 + \frac{v_e}{\epsilon_{st}} \xi \right) \quad [N] \quad (3.17)$$

Se  $j < 1$  significa que os condutores não colidem durante o curto-circuito. Mais uma vez, são necessários parâmetros específicos para este cálculo, tais como  $v_e$ ,  $v_4$  e  $\eta$ , sendo que  $v_e$  e  $v_4$  são calculados de forma diferente da explicada anteriormente.

O fator  $\eta$  é obtido a partir das figuras 12a, 12b e 12c da norma IEC 60865-1 (Figura 3.5) e o seu valor depende da relação  $a_s/d$ , do valor de  $j$  e de  $\epsilon_{st}$ .

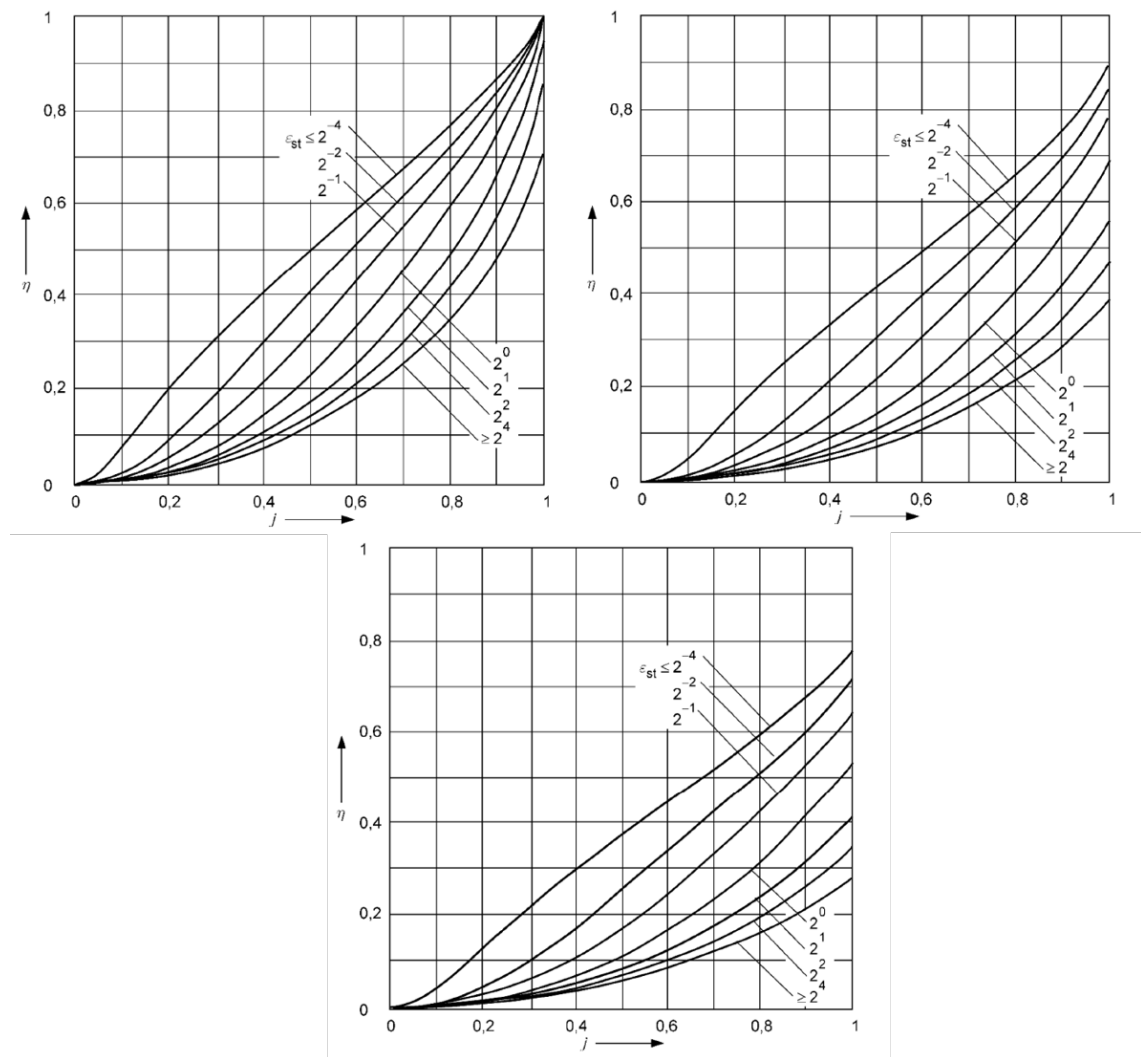


Figura 3.5: Determinação gráfica do fator  $\eta$ , de acordo com as figuras 12a, 12b e 12c da norma IEC 60865-1 [7]

O fator  $v_4$  é dado por:

$$v_4 = \eta \frac{a_s - d}{a_s - \eta(a_s - d)} \quad (3.18)$$

O fator  $v_e$  pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$v_e = \frac{1}{2} \left[ \frac{9}{8} n(n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{I_k''}{n} \right)^2 N v_2 \left( \frac{l_s}{a_s - d} \right)^4 \frac{(\sin \frac{180}{n})^4}{\eta^3} \left\{ 1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (3.19)$$

Assim, a força de tensão é dada por:

$$F_{pi,d} = F_{st} \left( 1 + \frac{v_e}{\epsilon_{st}} \eta^2 \right) \quad [N] \quad (3.20)$$

### 3.3.3.3 Deslocamento horizontal máximo e distância mínima no ar

O deslocamento horizontal máximo ( $b_h$ ) apenas depende da geometria e calcula-se com  $l_v \leq 2l$ :

$$b_h = \left[ 0,60 \sqrt{\frac{l_v}{l}} - 1 + 0,44 \left( \frac{l_v}{l} - 1 \right) - 0,32 \ln \frac{l_v}{l} \right] \frac{l^2}{l_v} \quad [m] \quad (3.21)$$

A distância mínima no ar entre condutores (fase-fase) durante o curto-circuito ( $a_{min}$ ) é dada por:

$$a_{min} = a - 2b_h \quad [m] \quad (3.22)$$

### 3.3.4 Conclusões

Tendo em conta os cálculos efetuados previamente conclui-se que, numa ligação vertical entre dois equipamentos de uma subestação, existem várias forças aplicadas que são necessárias calcular. Dos cálculos efetuados, interessa salientar os resultados dos esforços estáticos e dinâmicos.

Os esforços estáticos são, então:

- A componente horizontal causada por um subcondutor no ponto inferior da baixada ( $F_x$ );
- A força de ação do vento sobre o condutor ( $F_y$ ) - calculado para o estado da Primavera, uma vez que é a estação do ano com mais vento;
- A força de ação do peso do próprio cabo ( $F_z$ ).

Estas forças são dadas por:

$$F_x = H_s \quad [N] \quad (3.23)$$

$$F_y = \alpha \cdot c \cdot q_p \cdot d \quad [N] \quad (3.24)$$

$$F_z = m'_s \cdot l_v \cdot g \quad [N] \quad (3.25)$$

Quanto aos esforços dinâmicos apenas é considerada a força de tensão máxima ( $F_{max}$ ), dada por:

$$F_{max} = \max(F_{t,d}; F_{pi,d}) \quad [N] \quad (3.26)$$

### 3.4 Posição de montagem horizontal

#### 3.4.1 Dados de entrada

Quando a ligação entre dois equipamentos de uma subestação é realizada na horizontal, são necessários alguns dados de entrada para além dos já referidos na Secção 3.1. Assim, na Tabela 3.4 encontram-se todos os dados de entrada utilizados para o cálculo dos esforços eletromecânicos horizontais:

Tabela 3.4: Dados de entrada das ligações horizontais

| Dados de entrada                      | Símbolo   | Unidades |
|---------------------------------------|-----------|----------|
| Comprimento efetivo do vão            | $l_{eff}$ | m        |
| Altura do ponto de ligação mais alto  | $h_A$     | m        |
| Altura do ponto de ligação mais baixo | $h_B$     | m        |
| Distâncias entre os condutores        | $a_1$     | m        |
|                                       | $a_2$     | m        |

Na figura 3.6 estão representados alguns destes parâmetros:

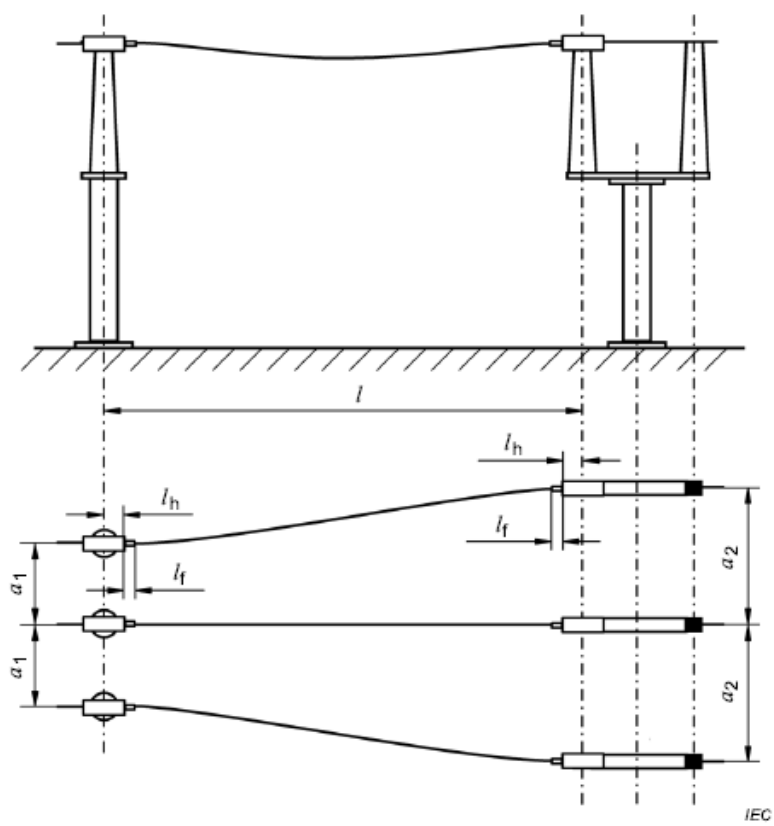


Figura 3.6: Principais parâmetros caracterizadores de uma ligação horizontal [6]

### 3.4.2 Cálculo dos esforços estáticos

Os esforços estáticos das ligações horizontais dependem principalmente das diferentes ações que os agentes atmosféricos exercem sobre as ligações, dependendo da região onde será construída a subestação e acentuando-se nas diferentes estações do ano. Assim, os agentes atmosféricos a considerar são o vento, o gelo e a temperatura do ar. Com a combinação destes três agentes consideram-se três estações:

- **Inverno:** Temperatura reduzida, vento reduzido e possibilidade de existência de gelo;
- **Primavera:** Temperatura média, ventos muito intensos e ausência de gelo;
- **Verão:** Temperatura elevada e ausência de vento e de gelo.

#### 3.4.2.1 Força do vento

A força do vento é calculada para o estado em que o vento é mais forte, ou seja, a Primavera e é dado por:

$$F_{vento} = \alpha \cdot c \cdot q_p \cdot d \quad [N] \quad (3.27)$$

Em que:

$\alpha$  representa o coeficiente de redução (0,6 para condutores e 1 para isoladores) [ $^{\circ}C^{-1}$ ];

$c$  representa o coeficiente de forma;

$q_p$  representa a pressão dinâmica do vento na Primavera (estação onde o vento é máximo) [Pa];

$d$  representa o diâmetro do condutor [m].

O coeficiente de forma ( $c$ ) depende do diâmetro do condutor e apresenta os seguintes valores:

Tabela 3.5: Determinação do coeficiente de forma

| Diâmetro [mm]  | Coeficiente de forma $c$ |
|----------------|--------------------------|
| <12,5          | 1,2                      |
| de 12,5 a 15,8 | 1,1                      |
| >15,8          | 1,0                      |

A pressão do vento depende da altura acima do solo e é definida *à priori*. Determina-se seguindo os valores apresentados na Tabela 3.6:

Tabela 3.6: Determinação da pressão do vento

| Altura acima do solo [m] | Pressão dinâmica q [Pa] |                |
|--------------------------|-------------------------|----------------|
|                          | Vento máximo            | Vento reduzido |
| <30                      | 750                     | 300            |
| de 30 a 50               | 900                     | 360            |
| >50                      | 1050                    | 420            |

### 3.4.2.2 Determinação dos coeficientes de sobrecarga

O coeficiente de sobrecarga ( $m$ ) confere ao peso próprio do condutor um agravamento que traduz a ação do vento e do gelo existente. Desta forma, o coeficiente de sobrecarga permite comparar os estados Primavera e Inverno quanto aos esforços que exercem sobre os apoios. [28] Assim, o coeficiente de sobrecarga é dado por:

$$m = \frac{\sqrt{\left(w + \rho_{gelo} \cdot \frac{\pi}{4} [(d + 2e)^2 - d^2]\right)^2 + F_{vento}^2}}{w} \quad (3.28)$$

Em que:

$w$  representa o peso do próprio condutor [ $N/m$ ];

$\rho_{gelo}$  representa a densidade do gelo [ $kg/dm^3$ ];

$d$  representa o diâmetro do condutor [ $m$ ];

$e$  representa a espessura do gelo [ $m$ ];

$F_{vento}$  representa a força do vento [ $N$ ].

O coeficiente de sobrecarga deve, então, ser calculado para os estados de Primavera e Inverno.

### 3.4.2.3 Determinação do vão crítico

O vão crítico ( $L_{cr}$ ) é o vão teórico para o qual os condutores ficam sujeitos a uma mesma tensão máxima nos dois piores estados, quer de temperatura mínima (Inverno) ou de vento máximo (Primavera). O vão crítico é dado por:

$$L_{cr} = \frac{\sigma \cdot t_{serv}}{w} \cdot \sqrt{\frac{24 \cdot \alpha_d \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{m_2^2 - m_1^2}} \quad [m] \quad (3.29)$$

Em que:

$\sigma$  representa a secção do condutor [ $mm^2$ ];

$t_{serv}$  representa a tensão máxima de serviço [ $N$ ];

$w$  representa o peso próprio do condutor [ $N/m$ ];

$\alpha_d$  representa o coeficiente de dilatação térmica [ $^{\circ}C^{-1}$ ];

$\theta_2$  e  $\theta_1$  representam as temperaturas na Primavera e no Inverno, respetivamente [ $^{\circ}C$ ];

$m_2$  e  $m_1$  representam os coeficientes de sobrecarga na Primavera e no Inverno, respetivamente.

### 3.4.2.4 Determinação do pior estado atmosférico

Para a determinação do pior estado atmosférico ou estado mais desfavorável, é necessário ter em conta os valores dos coeficientes de sobrecarga. O diagrama apresentado de seguida (Figura 3.7) auxilia na verificação desse estado.

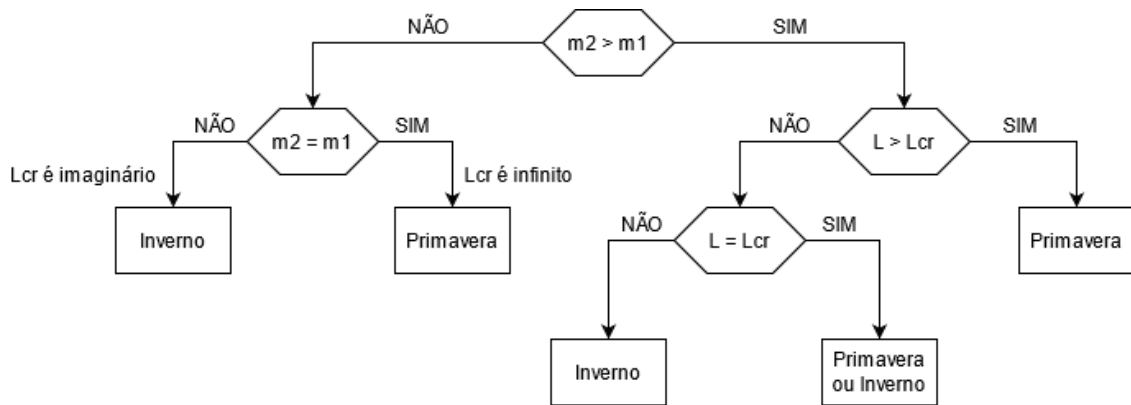


Figura 3.7: Fluxograma para a determinação do pior estado atmosférico

Em que:

$L = l_{eff}$  representa o comprimento efetivo do vão  $[m]$ .

Pela observação do fluxograma e sabendo que  $m_1$  e  $m_2$  correspondem ao coeficiente de sobrecarga nos estados de Inverno e Primavera, respetivamente, conclui-se que:

- Nos casos em que  $m_1 > m_2$  o vão crítico é imaginário, sendo o pior estado atmosférico o Inverno;
- Nos casos em que  $m_1 = m_2$  o vão crítico é infinito, sendo o pior estado atmosférico a Primavera;
- Nos casos em que o comprimento do vão é menor ao comprimento do vão crítico ( $L < L_{cr}$ ) o pior estado atmosférico é o Inverno;
- Nos casos em que o comprimento do vão é igual ao comprimento do vão crítico ( $L = L_{cr}$ ) o pior estado atmosférico tanto pode ser o Inverno como a Primavera;
- Nos casos em que o comprimento do vão é superior ao comprimento do vão crítico ( $L > L_{cr}$ ) o pior estado atmosférico a Primavera;

### 3.4.2.5 Equação dos estados

A equação dos estados é uma equação de equilíbrio mecânico que relaciona a tensão mecânica nos condutores num determinado estado atmosférico a partir da tensão existente dos condutores

noutro estado atmosférico já conhecido, sendo também conhecidos os valores das temperaturas e dos coeficientes de carga. Assim, a equação dos estados é dada por:

$$\theta_i + \frac{t_i}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_i^2 \cdot w^2 \cdot L^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_i^2} = \theta_k + \frac{t_k}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_k^2 \cdot w^2 \cdot L^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_k^2} \quad (3.30)$$

Em que:

$\theta_i$  e  $\theta_k$  representam a temperatura no estado atmosférico i e k, respetivamente [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$t_i$  e  $t_k$  representam a tensão mecânica do condutor no estado atmosférico i e k [ $\text{daN/mm}^2$ ];

$m_i$  e  $m_k$  representam os coeficientes de sobrecarga nos estados atmosféricos i e k, respetivamente;

$w$  representa o peso específico do condutor por unidade de comprimento [ $\text{daN/m}$ ];

$L$  representa o comprimento efetivo do vão [ $\text{m}$ ];

$\alpha_d$  representa o coeficiente de dilatação térmica linear do condutor [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ];

$\sigma$  representa a secção do condutor [ $\text{mm}^2$ ];

$E$  representa o módulo de elasticidade ou módulo de Young do condutor [ $\text{daN/mm}^2$ ].

Esta igualdade é viável caso se saiba previamente os valores das temperaturas e dos coeficientes de sobrecarga em ambos os estados atmosféricos, as características dos condutores utilizados e o valor de tensão mecânica num desses estados.

Assim, com esta equação pretende-se calcular a força de tensão máxima admissível ( $F_{st,pe}$ ) no estado mais desfavorável, definido anteriormente através do fluxograma. Com a equação dos estados é também possível calcular a força tensão estática do condutor no dia da montagem ( $F_{st,v}$ ), comparando os valores no estado de verão com os valores no pior estado atmosférico.

### 3.4.3 Cálculo dos esforços dinâmicos

#### 3.4.3.1 Carga eletromagnética e parâmetros característicos

A carga eletromagnética característica por unidade de comprimento sobre os condutores flexíveis em ligações horizontais trifásicas caso a corrente flua ao longo de todo o comprimento do vão do condutor principal é dada por:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I_k'')^2}{a} \frac{l_c}{l_{eff}} \quad [\text{N}] \quad (3.31)$$

Em que:

$I_k''$  representa o valor eficaz da corrente inicial simétrica de curto-circuito trifásico [ $\text{A}$ ];

$a$  representa a distância equivalente entre os condutores [ $\text{m}$ ];

$l_c$  representa o comprimento do condutor principal no vão [ $\text{m}$ ];

$l_{eff}$  representa o comprimento efetivo do vão [ $\text{m}$ ].

A distância equivalente (a) é dada por:

$$a = \frac{a_1 + a_2}{2} \quad [m] \quad (3.32)$$

A relação entre a força eletromagnética apresentada acima e a força da gravidade sobre um condutor é dado pelo parâmetro r:

$$r = \frac{F'}{nm'_s g} \quad (3.33)$$

A direção da força resultante exercida sobre o condutor é dada por:

$$\delta_1 = \arctan(r) \quad [^\circ] \quad (3.34)$$

A flecha estática equivalente do condutor em metade do vão depende da força estática ( $F_{st}$ ) calculada anteriormente pela equação dos estados (Equação 3.30) e é dada por:

$$f_{es} = \frac{nm'_s g l^2}{8F_{st}} \quad [m] \quad (3.35)$$

Deve calcular-se a  $f_{es}$  no pior estado atmosférico ( $f_{es,pe}$ ), Inverno ou Primavera, dependendo do caso em estudo, e no dia da montagem, no Verão ( $f_{es,v}$ ).

O período de oscilação do condutor também deve ser calculado para o pior estado atmosférico ( $T_{pe}$ ) e para o estado de verão ( $T_v$ ) e é dado por:

$$T = 2\pi \sqrt{0,8 \frac{f_{es}}{g}} \quad [s] \quad (3.36)$$

Assim, o período resultante de oscilação ( $T_{res}$ ) é dado por:

$$T_{res} = \frac{T}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[ 1 - \frac{\pi^2}{64} \left( \frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad [s] \quad (3.37)$$

De seguida, deve calcular-se o módulo de Young real e a norma de rigidez, de acordo com as Equações 3.2 e 3.1, para o pior estado atmosférico e para o estado de Verão.

O fator de tensão mecânica é calculado também para o estado atmosférico mais desfavorável e para o estado de Verão e é dado por:

$$\zeta = \frac{(ngm'_s l_{eff})^2}{24F_{st}^3 N} \quad (3.38)$$

É necessário ter em consideração que para o cálculo das Equações 3.39, 3.44 e 3.46, se  $T_{k1} > 0,4T$  deve utilizar-se  $T_{k1} = 0,4T$ .

O ângulo de oscilação final,  $\delta_{end}$ , calcula-se para o pior estado atmosférico e para o estado de Verão da seguinte forma:

$$\delta_{end} = \begin{cases} \delta_l \left[ 1 - \cos\left(360^\circ \frac{T_{k1}}{T_{res}}\right) \right] & \text{para } 0 \leq \frac{T_{k1}}{T_{res}} \leq 0,5 \\ 2\delta_l & \text{para } \frac{T_{k1}}{T_{res}} > 0,5 \end{cases} \quad [^\circ] \quad (3.39)$$

O ângulo máximo de oscilação ( $\delta_{max}$ ) depende da magnitude desse ângulo ( $\chi$ ) que depende do ângulo de oscilação final calculado anteriormente. Todos estes valores devem ser calculados para o pior estado atmosférico e para o estado de Verão. Deste modo, temos que  $\chi$  e  $\delta_{max}$  são dados, respetivamente, por:

$$\chi = \begin{cases} 1 - r \cdot \sin\delta_{end} & \text{para } 0 \leq \delta_{end} \leq 90^\circ \\ 1 - r & \text{para } \delta_{end} > 90^\circ \end{cases} \quad (3.40)$$

$$\delta_{max} = \begin{cases} 1,25 \cdot \arccos\chi & \text{para } 0,766 \leq \chi \leq 1 \\ 10^\circ + \arccos\chi & \text{para } -0,985 \leq \chi \leq 0,766 \\ 180^\circ & \text{para } \chi < -0,985 \end{cases} \quad [^\circ] \quad (3.41)$$

### 3.4.3.2 Força de tensão durante o curto-circuito

A força de tensão durante o curto-circuito ( $F_{td}$ ) é a força máxima de tensão verificada entre o pior estado atmosférico e o estado de Verão. Assim, temos:

$$F_{td} = \max(F_{td,pe}; F_{td,v}) \quad [N] \quad (3.42)$$

Utilizando os valores calculados anteriormente correspondentes à força estática no pior estado atmosférico e no estado de Verão, calculam-se dois valores diferentes de  $F_{td}$ . De uma forma geral,  $F_{td}$  é dada por:

$$F_{td} = F_{st}(1 + \phi\psi) \quad [N] \quad (3.43)$$

Em que:

$F_{st}$  representa a força estática máxima admissível, calculada anteriormente [N];

$\phi$  representa o parâmetro de carga;

$\psi$  representa um fator que depende de  $\zeta$  e  $\phi$ .

O parâmetro de carga é dado por:

$$\phi = \begin{cases} 3(\sqrt{1+r^2}-1) & \text{para } T_{k1} \geq T_{res}/4 \\ 3(r \cdot \sin\delta_{end} + \cos\delta_{end} - 1) & \text{para } T_{k1} < T_{res}/4 \end{cases} \quad (3.44)$$

O fator  $\psi$  é obtido a partir do gráfico da figura 7 da norma IEC 60865-1:

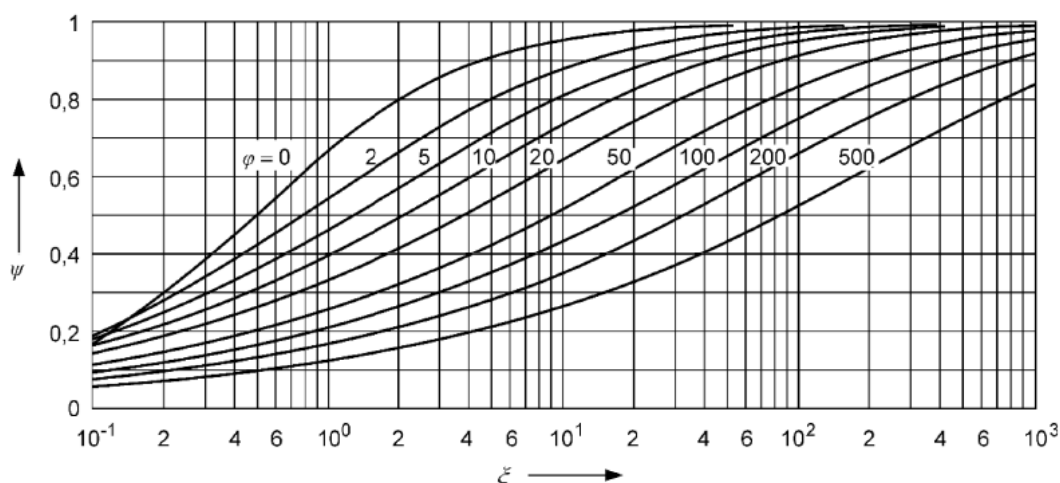


Figura 3.8: Determinação gráfica do fator  $\psi$ , de acordo com a figura 7 da norma IEC 60865-1 [7]

### 3.4.3.3 Flecha dinâmica

Com as alterações das condições climáticas, a flecha vai sofrendo alterações ao longo do tempo, sendo por isso importante o cálculo da flecha dinâmica. Para este cálculo é utilizada a temperatura de Verão, uma vez que o calor terá uma maior influência no comprimento da flecha do que o frio ou o vento.

A expansão elástica é dada por:

$$\epsilon_{ela} = N_v(F_{td,v} - F_{st,v}) \quad (3.45)$$

A expansão térmica é dada por:

$$\epsilon_{th} = \begin{cases} c_{th} \left( \frac{I_k''}{nA_s} \right)^2 \cdot \frac{T_{res}}{4} & \text{para } T_{k1} \geq T_{res}/4 \\ c_{th} \left( \frac{I_k''}{nA_s} \right)^2 \cdot T_{k1} & \text{para } T_{k1} < T_{res}/4 \end{cases} \quad (3.46)$$

Em que  $c_{th}$  representa a constante de material do condutor.

O fator  $C_D$  permite o aumento da deflexão causada pelo alongamento elástico e térmico do condutor e é dado por:

$$C_D = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left[ \frac{l}{f_{es}} \right]^2 \cdot (\epsilon_{ela} + \epsilon_{th})} \quad (3.47)$$

O fator  $C_F$  permite um possível aumento na deflexão dinâmica do condutor causado por uma mudança na forma da curva do condutor e é dada por:

$$C_F = \begin{cases} 1,05 & \text{para } r \leq 0,8 \\ 0,97 + 0,1r & \text{para } 0,8 < r < 1,8 \\ 1,15 & \text{para } r \geq 1,8 \end{cases} \quad (3.48)$$

Por fim, é possível calcular a flecha dinâmica, em função dos fatores calculados acima e da flecha estática calculada em 3.35 e é dada por:

$$f_{ed} = C_F C_D f_{es} \quad [m] \quad (3.49)$$

#### 3.4.3.4 Força de tensão após o curto-circuito

A força de tensão após o curto-circuito ( $F_{fd}$ ) é a força máxima de tensão verificada entre o pior estado atmosférico e o estado de Verão após a ocorrência de um curto-circuito. Temos:

$$F_{fd} = \max(F_{fd,pe}; F_{fd,v}) \quad [N] \quad (3.50)$$

Tal como acontece quando é calculada a força de tensão durante o curto-circuito, neste caso calculam-se dois valores diferentes de  $F_{fd}$ , utilizando os valores calculados anteriormente correspondentes à força de tensão estática nos dois estados acima referidos. De uma forma geral,  $F_{fd}$  é dada por:

$$F_{fd} = 1,2 F_{st} \sqrt{1 + 8\zeta \frac{\delta_{max}}{180^\circ}} \quad [N] \quad (3.51)$$

Esta equação é apenas válida se  $r > 0,6$  e se  $\delta_{max} \geq 70^\circ$ .

#### 3.4.3.5 Deslocamento horizontal máximo e distância mínima no ar

O deslocamento horizontal máximo de um vão ( $b_h$ ) devido a um curto-circuito é dado por:

$$b_h = \begin{cases} f_{ed} & \text{para } \delta_{max} \geq 90^\circ \\ f_{ed} \cdot \sin \delta_{max} & \text{para } \delta_{max} < 90^\circ \end{cases} \quad [m] \quad (3.52)$$

A distância mínima no ar entre os condutores é dada por:

$$a_{min} = a - 2b_h \quad [m] \quad (3.53)$$

### 3.4.4 Conclusões

Tendo em conta os cálculos efetuados conclui-se que, numa ligação horizontal entre dois equipamentos de uma subestação, existem várias forças aplicadas que são necessárias calcular. Dos cálculos efetuados, interessa salientar os resultados dos esforços estáticos e dinâmicos.

Tal como acontece nas ligações verticais, os esforços estáticos são:

- A componente horizontal causada por um subcondutor no ponto inferior da baixada ( $F_x$ ), que corresponde à força estática máxima admissível no pior estado atmosférico;
- A força de ação do vento sobre o condutor ( $F_y$ ) - calculado para o estado da Primavera, uma vez que é a estação do ano com mais vento;
- A força de ação do peso do próprio cabo ( $F_z$ ).

Estas forças são dadas por:

$$F_x = F_{st,pe} \quad [N] \quad (3.54)$$

$$F_y = \alpha \cdot c \cdot q_p \cdot d \quad [N] \quad (3.55)$$

$$F_z = m'_s \cdot \frac{l_{eff}}{2} \cdot g \quad [N] \quad (3.56)$$

O sistema de fixação do condutor deverá ser especificado para a seguinte carga dinâmica máxima:

$$F_x = \max(1, 5F_{td}; F_{fd}) \quad [N] \quad (3.57)$$

No entanto, os suportes e as fundações em questão devem suportar a seguinte força de flexão:

$$F_{max} = \max(F_{td}; F_{fd}) \quad [N] \quad (3.58)$$



## Capítulo 4

# Desenvolvimento da ferramenta de cálculo dos Esforços Eletromecânicos

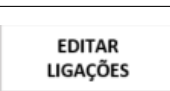
Neste capítulo é descrito todo o processo de desenvolvimento da ferramenta computacional, começando pela descrição da arquitetura geral da aplicação.

Como já foi referido anteriormente, um dos principais objetivos desta ferramenta é a automatização do processo de cálculos dos esforços eletromecânicos sentidos nas ligações de uma subestação elétrica. Foram, então, desenvolvidas várias bases de dados para facilitar o trabalho do projetista na introdução dos dados no sistema. Foram, também, incluídas na aplicação todas as fórmulas necessárias para obter os resultados pretendidos com a maior precisão possível e sem comprometer a velocidade de processamento da ferramenta desenvolvida. Um dos objetivos principais consiste no facto do projetista não ter que consultar os gráficos apresentados no Capítulo 3, tendo todos esses gráficos sido programados com fórmulas complexas presentes nos anexos da norma IEC 60865-1.

### 4.1 Botões utilizados na ferramenta computacional

Ao longo do texto do presente capítulo são referidos vários botões usados para a navegação. Por uma questão de clareza e para permitir uma referência rápida, optou-se por reunir todos os botões e as suas funções na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Funções dos botões utilizados na ferramenta computacional

| Botão                                                                               | Função                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | Faz <i>reset</i> a todo o projeto existente até ao momento                                                                                        |
|    | Remete o utilizador para o ecrã onde pode confirmar e alterar vários dados de entrada relevantes                                                  |
|    | Adiciona uma ligação à subestação e guarda a adicionada imediatamente antes na base de dados de ligações                                          |
|    | Remete o utilizador para a edição das condições de uma ou várias ligações                                                                         |
|    | Direciona o utilizador para o próximo passo a realizar                                                                                            |
|    | Direciona o utilizador para o passo imediatamente anterior, já realizado                                                                          |
|    | Elimina os dados introduzidos manualmente pelo utilizador no ecrã onde se pressiona o botão em causa                                              |
|   | Cria condições para que o utilizador possa introduzir um cabo que não esteja presente na base de dados da aplicação                               |
|  | Guarda os dados do novo condutor introduzido pelo utilizador na base de dados da aplicação                                                        |
|  | Direciona o utilizador para o ecrã onde é possível visualizar as principais características de todas as ligações da subestação                    |
|  | Calcula e atualiza todos os resultados do ecrã onde se pressiona o botão em causa                                                                 |
|  | Calcula os valores das tensões estáticas no verão e no pior estado atmosférico e verifica se a flecha estática do condutor no verão é cerca de 4% |
|  | Calcula o valor do fator $v_2$                                                                                                                    |
|  | Calcula os valores de $\xi$ e $\eta$ , dependendo se $j$ é maior ou menor do que 1                                                                |
|  | Calcula o valor de $\varphi$ no pior estado atmosférico e no verão                                                                                |

## 4.2 Arquitetura da ferramenta computacional

De forma a esquematizar de forma generalizada as etapas funcionais da ferramenta desenvolvida apresenta-se na Figura 4.1 o fluxograma da aplicação:

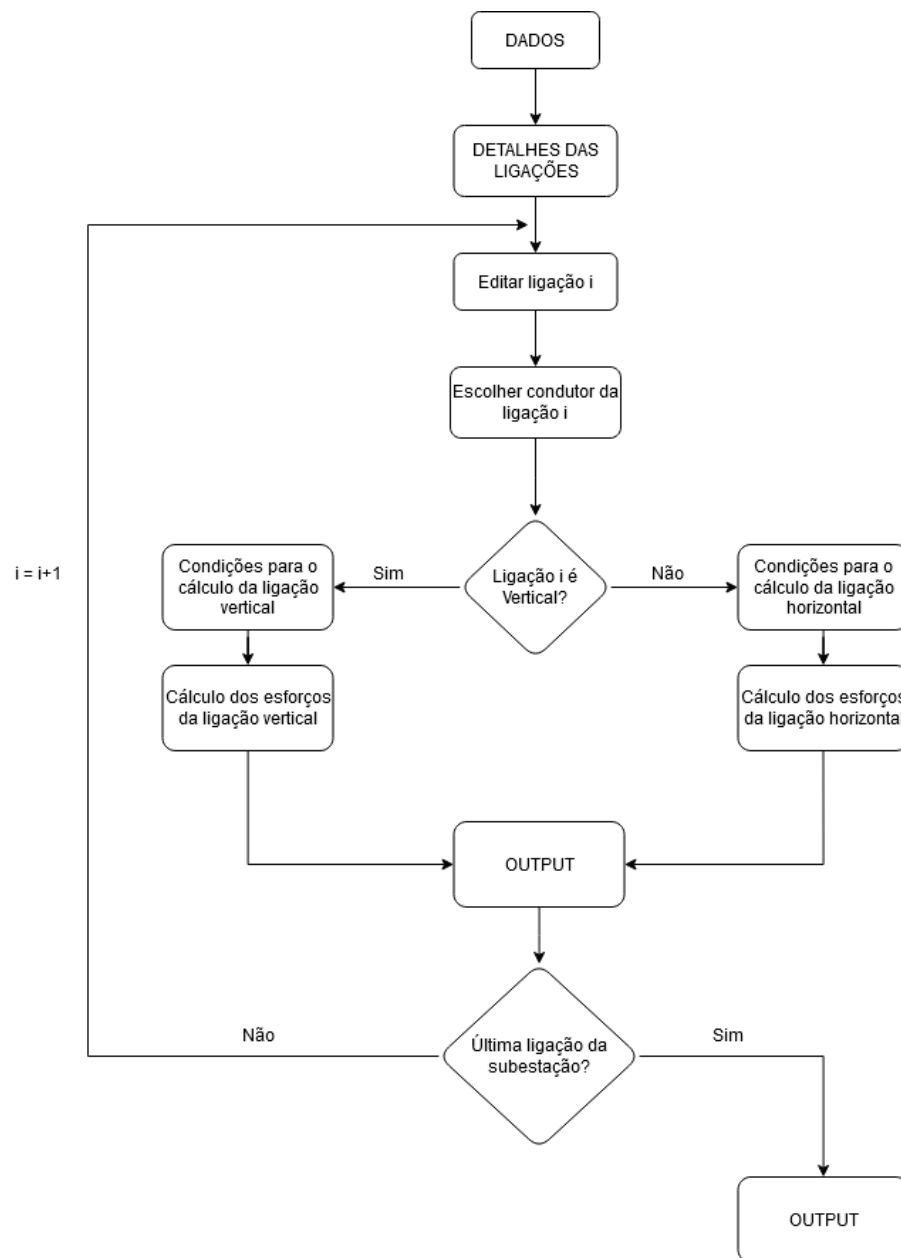


Figura 4.1: Algoritmo utilizado na ferramenta computacional desenvolvida

### 4.3 Dados de entrada e detalhes das ligações

A fase inicial de um projeto de uma subestação elétrica é a definição das características do sistema. Assim, a página inicial da ferramenta computacional exibe um ecrã como o mostrado na Figura 4.2:

A interface de usuário da ferramenta computacional para a definição das características do sistema. O formulário contém os seguintes campos:

| CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA                         |      |        |
|----------------------------------------------------|------|--------|
| Tensão nominal do sistema                          | Un   | [ ] kV |
| Corrente inicial de cc trifásico simétrico inicial | Ik'' | [ ] A  |
| Duração da corrente de cc                          | Tk1  | [ ] s  |

À esquerda do formulário, há um botão rotulado "PROJETO NOVO". À direita, há um botão rotulado "CONFIRMAR DADOS DE ENTRADA" com uma seta indicando a transição para a próxima etapa.

Figura 4.2: Página inicial da ferramenta computacional - definição das principais características do sistema

O botão **PROJETO NOVO** elimina todos os dados do projeto que estiver realizado nesse momento, não só das características do sistema, como de todos os dados que se adicionam posteriormente. As três características apresentadas na Figura 4.2 são as habitualmente variam de projeto para projeto. No entanto, existem características presentes numa base de dados escondida que tem as características do sistema e condições de cálculo, apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2, que tendem a permanecer constantes. Ainda assim, é aconselhado que o projetista reveja esta base de dados no início do projeto, de forma a que os dados estejam sempre coerentes com o que é pretendido. O botão **CONFIRMAR DADOS DE ENTRADA** direciona o projetista para a seguinte página:

| BASE DE DADOS - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA                       |           |       |    |
|------------------------------------------------------------------|-----------|-------|----|
| Tensão nominal do sistema                                        | $U_n$     | 0     | kV |
| Corrente inicial de cc trifásico simétrico inicial               | $I_{k''}$ | 0     | A  |
| Duração da corrente de cc                                        | $T_{k1}$  | 0     | s  |
| Frequência do sistema                                            | $f$       | 50    | Hz |
| Relação X/R                                                      | $X/R$     | 13,11 |    |
| Fator empírico para o cálculo do valor de pico da corrente de cc | $k$       | 1,81  |    |

| BASE DE DADOS - CONDIÇÕES DE CÁLCULO |            |     |    |
|--------------------------------------|------------|-----|----|
| Hipótese A (Estado de Inverno)       | $\theta_i$ | -10 | °C |
|                                      | $q_i$      | 300 | Pa |
| Hipótese B (Estado de Primavera)     | $\theta_p$ | 15  | °C |
|                                      | $q_p$      | 750 | Pa |
| Hipótese A (Estado de Verão)         | $\theta_v$ | 80  | °C |
|                                      | $q_v$      | 0   | Pa |

|                                  |          |             |                    |
|----------------------------------|----------|-------------|--------------------|
| Densidade do gelo                | $\rho$   | 0,9         | kg/dm <sup>3</sup> |
| Espessura da camada de gelo      | $t$      | 0,01        | m                  |
| Coefficiente de redução          | $\alpha$ | 0,6         |                    |
| Valor convencional da aceleração | $g$      | 9,81        | m/s <sup>2</sup>   |
| Permeabilidade do vácuo          | $\mu_0$  | 1,25664E-06 | H/m                |

|                       |     |   |  |
|-----------------------|-----|---|--|
| Coefficiente de forma | $c$ | 1 |  |
|-----------------------|-----|---|--|

Figura 4.3: Base de dados das características do sistema

Os valores da tensão nominal do sistema ( $U_n$ ), da corrente inicial de curto-circuito trifásico simétrico inicial ( $I_{k''}$ ) e da duração da corrente de curto-circuito ( $T_{k1}$ ) são preenchidos automaticamente nesta base de dados, de acordo com os valores definidos na fase anterior.

Depois da introdução das características do sistema, o utilizador deve definir os detalhes de todas as ligações que irão existir na subestação elétrica. Uma ligação poderá ser vertical ou horizontal e o seu condutor poderá ser um cabo, tubo ou barra. Por limitação de tempo no desenvolvimento da dissertação, não foi possível implementar os cálculos dos esforços para ligações que utilizem tubos ou barras como condutor. No entanto, já a pensar que será possível implementar futuramente essa função no programa, é possível selecionar esses condutores quando são definidos os detalhes das ligações.

O projetista deve, então, preencher os dados de cada ligação, sendo que estes dados são guardados numa base de dados de fácil acesso, para que seja possível alterar algum dado mais tarde. Na figura 4.4 é possível ver o aspeto do programa antes do utilizador colocar os detalhes da primeira ligação da subestação.

Figura 4.4: Detalhes das ligações da subestação elétrica

O botão **+** adiciona uma ligação ao projeto guardando os dados inseridos na base de dados referida anteriormente e o botão representado com um **LÁPIS** () dirige o utilizador para a base de dados onde pode editar as ligações já introduzidas. Nas listas pendentes de **Início** e de **Fim** é possível escolher os equipamentos de início e de fim da ligação em causa.

Após a introdução de todas as ligações da subestação, o utilizador é direcionado para a base de dados onde estão armazenados todas as informações das ligações que acabou de preencher. Nessa página, mostrada na Figura 4.5, é possível verificar se está tudo correto e alterar alguma informação em qualquer uma das ligações da subestação, se assim for necessário.

| LIGAÇÕES DA SUBESTAÇÃO |                           |                           |                 |                     |                                                                                       |
|------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| LIGAÇÃO                | Início                    | Fim                       | Cabo/Tubo/Barra | Vertical/Horizontal |                                                                                       |
| 1                      | Linha AT                  | Linha AT                  | CABO            | VERTICAL            |  |
| 2                      | Barramento MT             | Barramento MT             | TUBO            | HORIZONTAL          |  |
| 3                      | Disjuntor                 | Transformador de Tensão   | CABO            | HORIZONTAL          |  |
| 4                      | Seccionador               | Transformador de Corrente | CABO            | HORIZONTAL          |  |
| 5                      | Transformador de Corrente | Disjuntor                 | CABO            | HORIZONTAL          |  |
| 6                      | Transformador de Tensão   | Transformador de Potência | CABO            | HORIZONTAL          |  |

Figura 4.5: Detalhes das ligações de uma subestação

O botão representado por um **LÁPIS** () presente do lado direito de cada ligação reenca-minha o utilizador para a escolha do condutor a utilizar na ligação (dependendo se é cabo, tubo ou barra), de seguida para os dados de entrada a inserir sobre essa ligação (dependendo se é vertical ou horizontal) e, por fim, irá efetuar o cálculo dos esforços da ligação.

## 4.4 Base de dados

Para além das bases de dados já referidas anteriormente, a criação da base de dados das características dos condutores facilitou o acesso às características dos cabos, tubos e barras utilizadas nos cálculos dos esforços eletromecânicos. Originalmente, não existia qualquer base de dados, havendo a necessidade de em todos os projetos ou cada vez que o projetista quisesse alterar o condutor de uma ligação, tivesse de consultar a tabela do fabricante e adicionar as características do condutor manualmente.

Foram, então, criadas três bases de dados diferentes, para cabos, tubos e barras. Foram inseridos nestas bases de dados os condutores que mais se utilizam nos projetos do *Grupo Quadrante* e as respetivas características. Por existir uma grande quantidade de cabos, tubos e barras diferentes não foi possível realizar uma base de dados que contenha todos os condutores existentes no mercado. Por esse motivo, foi implementada a opção do utilizador acrescentar condutores à base de dados a qualquer momento.

Assim, foram analisadas as características dos cabos, tubos e barras necessárias para o cálculo dos esforços eletromecânicos, apresentadas de seguida nas Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 e inseridas na respetiva base de dados.

Tabela 4.2: Características presentes na base de dados dos cabos

| Característica                                    | Símbolo    | Unidades         |
|---------------------------------------------------|------------|------------------|
| Diâmetro do subcondutor                           | $d$        | $m$              |
| Área de secção do subcondutor                     | $t$        | $m$              |
| Massa por unidade de comprimento                  | $m's$      | $kg/m$           |
| Constante de material do condutor                 | $c_{th}$   | $m^4/A^2s$       |
| Coefficiente de dilatação                         | $\alpha_e$ | $^{\circ}C^{-1}$ |
| Constante de elasticidade resultante dos suportes | $S$        | $N/mm$           |
| Módulo de Young                                   | $E$        | $N/mm^2$         |

Tabela 4.3: Características presentes na base de dados dos tubos

| Característica                                            | Símbolo | Unidades |
|-----------------------------------------------------------|---------|----------|
| Diâmetro exterior                                         | $D$     | $m$      |
| Diâmetro interior                                         | $d$     | $m$      |
| Espessura                                                 | $t$     | $m$      |
| Área de secção do subcondutor                             | $Ac$    | $mm^2$   |
| Área da superfície do condutor por unidade de comprimento | $As$    | $m$      |
| Massa por unidade de comprimento                          | $m's$   | $kg/m$   |
| Módulo de Young                                           | $E$     | $N/mm^2$ |
| Momento de inércia                                        | $Jm$    | $m^4$    |
| Módulo de flexão                                          | $Wm$    | $m^4$    |

Tabela 4.4: Características presentes na base de dados das barras

| Característica                                                  | Símbolo    | Unidades |
|-----------------------------------------------------------------|------------|----------|
| Dimensão do condutor principal em direção perpendicular à força | $b_m$      | $m$      |
| Dimensão do condutor principal na direção da força              | $cm$       | $m$      |
| Massa por unidade de comprimento                                | $m's$      | $kg/m$   |
| Módulo de Young                                                 | $E$        | $N/mm^2$ |
| Tensão mecânica correspondente ao limite elástico mínimo        | $f_{ymin}$ | $m$      |
| Tensão mecânica correspondente ao limite elástico máximo        | $f_{ymax}$ | $m$      |

## 4.5 Dados de entrada

Com a existência das bases de dados, a escolha do condutor é um processo simples. Por norma, o cliente já refere que condutores se devem utilizar nas ligações, sendo apenas necessário seleccionar esse condutor. No programa desenvolvido, ao seleccionar um condutor que já esteja na base de dados, aparecem automaticamente as características relevantes para os cálculos, explicitadas anteriormente. Caso o condutor pretendido não se encontre na base de dados, poderá inserir-se um novo condutor à base de dados já existente, tendo assim a hipótese de ir alargando a base de dados para projetos futuros.

O aspeto visual da ferramenta no momento em que se pretende escolher um cabo é o apresentado na Figura 4.6. Em cima, visualiza-se o aspeto da aplicação antes de escolher o cabo e em baixo após a escolha do cabo, neste caso, já pertencente à base de dados.

**Escolher o CABO**

|            | $d$ [m]                 | $n$                     | $A_s$ [mm <sup>2</sup> ]      | $m'$ [kg/m]                      | $\epsilon m$ [m <sup>4</sup> /(A <sup>2</sup> s)] | $\alpha_e$ [°C <sup>-1</sup> ] | $S$ [N/mm]                                        | $E$ [N/mm <sup>2</sup> ] |
|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------|
| Designação | Diâmetro do subcondutor | Número de subcondutores | Área de secção do subcondutor | Massa por unidade de comprimento | Constante de material do condutor                 | Coefficiente de dilatação      | Constante de elasticidade resultante dos suportes | Módulo de Young          |
|            |                         |                         |                               |                                  |                                                   |                                |                                                   |                          |

PREENCHER!

---

**Escolher o CABO**

|                       | $d$ [m]                 | $n$                     | $A_s$ [mm <sup>2</sup> ]      | $m'$ [kg/m]                      | $\epsilon m$ [m <sup>4</sup> /(A <sup>2</sup> s)] | $\alpha_e$ [°C <sup>-1</sup> ] | $S$ [N/mm]                                        | $E$ [N/mm <sup>2</sup> ] |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------|
| Designação            | Diâmetro do subcondutor | Número de subcondutores | Área de secção do subcondutor | Massa por unidade de comprimento | Constante de material do condutor                 | Coefficiente de dilatação      | Constante de elasticidade resultante dos suportes | Módulo de Young          |
| 851 - AL4 (ASTER 851) | 0,038                   | 1                       | 850,7                         | 2,3607                           | 2,70E-19                                          | 2,300E-05                      | 100                                               | 52500                    |

PREENCHER!

Figura 4.6: Escolha do condutor a utilizar na ligação em causa

O botão de **RESET** elimina o condutor escolhido para que seja possível escolher outro mais adequado, o botão **UTILIZAR OUTRO CABO** permite ao utilizador inserir manualmente um cabo que ainda não se encontre na base de dados e o botão **GUARDAR NA BD** permite guardar esse novo cabo na base de dados para utilização futura. Na lista pendente é possível escolher um cabo que já se encontre na base de dados e os dados serão preenchidos automaticamente, facilitando muito o trabalho do projetista. A única variável que terá de ser introduzida manualmente é o número de subcondutores do cabo a utilizar ( $n$ ), uma vez que varia de projeto para projeto e, até, de ligação para ligação. No entanto, por limitação de tempo, no caso de se tratar de uma ligação horizontal, os cálculos dos esforços eletromecânicos só estarão corretos para  $n=1$ , sendo relativamente simples, com mais tempo, a implementação no programa dos cálculos para  $n>1$ . Na página da escolha do condutor tem, ainda, dois espaços que são preenchidos automaticamente com o tipo de condutor que estamos a tratar (no caso da figura 4.6, o cabo) e que tipo de ligação estamos a tratar (no caso da figura 4.6, horizontal).

## 4.6 Cálculo dos esforços eletromecânicos

Após a escolha do condutor a utilizar na ligação em causa são definidas as condições de cálculo, dependendo se se está a tratar de uma ligação vertical ou horizontal. Após a inserção desses dados no programa, serão calculados os esforços eletromecânicos pretendidos.

### 4.6.1 Introdução das condições de cálculo

Tal como referido nas secções 3.3.1 e 3.4.1, para efetuar o cálculo dos esforços eletromecânicos numa ligação vertical ou numa ligação horizontal entre dois equipamentos de uma subestação elétrica são necessários os dados apresentados nas tabelas 3.3 e 3.4, respetivamente.

Na ferramenta computacional desenvolvida, o utilizador apenas terá de preencher os espaços em branco correspondentes a essas características da ligação, como é mostrado nas Figuras 4.7 e 4.8, dependendo se se trata de uma ligação vertical ou horizontal.

The interface for vertical connections is titled "LIGAÇÕES VERTICAIS". It features a red "RESET" button and a white "EDITAR LIGAÇÕES" button. Below these is a section titled "CONDIÇÕES DE CÁLCULO" containing a list of parameters and their corresponding input fields, all in meters (m):

|                                          |    |                      |   |
|------------------------------------------|----|----------------------|---|
| Distância entre condutores               | a  | <input type="text"/> | m |
| Altura da baixada                        | h  | <input type="text"/> | m |
| Largura da baixada                       | w  | <input type="text"/> | m |
| Distância entre suportes                 | l  | <input type="text"/> | m |
| Comprimento total do condutor da baixada | lv | <input type="text"/> | m |
| Distância entre peças de conexão         | ls | <input type="text"/> | m |
| Distância entre subcondutores            | as | <input type="text"/> | m |

Figura 4.7: Introdução das condições de cálculo de uma ligação vertical

The interface for horizontal connections is titled "LIGAÇÕES HORIZONTAIS". It features a red "RESET" button and a white "EDITAR LIGAÇÕES" button. Below these is a section titled "CONDIÇÕES DE CÁLCULO" containing a list of parameters and their corresponding input fields, all in meters (m):

|                                       |      |                      |   |
|---------------------------------------|------|----------------------|---|
| Comprimento efetivo do vão            | leff | <input type="text"/> | m |
| Altura do Ponto de ligação mais alto  | hA   | <input type="text"/> | m |
| Altura do Ponto de ligação mais baixo | hB   | <input type="text"/> | m |
| Distâncias entre os condutores        | a1   | <input type="text"/> | m |
|                                       | a2   | <input type="text"/> | m |

Figura 4.8: Introdução das condições de cálculo de uma ligação horizontal

O botão de **RESET** elimina todos os dados inseridos, caso seja necessário. O botão **EDITAR LIGAÇÕES** reencaminha o utilizador para a página onde se encontram todas as ligações da subestação, como mostra a Figura 4.5.

#### 4.6.2 Esforços eletromecânicos de ligações verticais

Após o preenchimento das condições de cálculo de uma ligação vertical, são realizados os cálculos dos esforços eletromecânicos. A principal diferença para a aplicação existente foi precisamente a automatização da ferramenta de forma a que seja rápido e fácil calcular os esforços

pretendidos, apenas com a introdução dos dados acima apresentados. Na Secção 3.3, mostrou-se como são realizados os cálculos dos esforços, evidenciando a sua complexidade. Em muitas das variáveis necessárias seria preciso analisar gráficos presentes na norma IEC 60865-1. Esse processo, para além de moroso, é pouco preciso, levando a erros nos resultados obtidos. Desta forma, serão descritos seguidamente os passos seguidos para que seja possível a automatização dos cálculos das ligações verticais.

Para o cálculo dos esforços estáticos de uma ligação vertical não são necessárias simplificações, uma vez que, como concluído na Secção 3.3.4, as forças apenas dependem de condições de cálculo inseridas anteriormente pelo utilizador.

Já no caso dos esforços dinâmicos de uma ligação vertical, a força da corrente de curto-circuito (Equação 3.13) depende de vários fatores, sendo que  $v_2$  e  $v_3$  são calculados pela observação dos gráficos presentes nas Figuras 3.2 e 3.3, respetivamente.

Pela análise da aplicação utilizada pelo *Grupo Quadrante*, conclui-se que  $v_2$  era um fator quase desvalorizado, sendo que se utilizava sempre um valor constante. No entanto, verificou-se que esse procedimento leva a erros no cálculo da força da corrente de curto-circuito. Assim, em vez de analisar o gráfico presente na Figura 3.2, o fator  $v_2$  foi programado através da seguinte expressão:

$$v_2 = 1 - \frac{\text{sen}(4\pi f T_{pi} - 2\gamma) + \text{sen}2\gamma}{4\pi f T_{pi}} + \frac{f\tau}{f T_{pi}} \left( 1 - e^{-\frac{2f T_{pi}}{f\tau}} \right) \text{sen}^2\gamma - \frac{8\pi f \tau \text{sen}\gamma}{1 + (2\pi f \tau)^2} \left[ \left( 2\pi f \tau \frac{\cos(2\pi f T_{pi} - \gamma)}{2\pi f T_{pi}} + \frac{\text{sen}(2\pi f T_{pi} - \gamma)}{2\pi f T_{pi}} \right) e^{-\frac{f T_{pi}}{f\tau}} + \frac{\text{sen}\gamma - 2\pi f \tau \cos\gamma}{2\pi f T_{pi}} \right] \quad (4.1)$$

Em que:

$T_{pi}$  representa o tempo desde o começo do curto-circuito até aparecer  $F_{pi,d}$  [s];

$\gamma$  representa o fator para a estimação da frequência própria;

$\tau$  representa a constante de tempo da rede [s].

$\tau$  pode ser calculado seguindo a norma IEC 60909-0, com a seguinte expressão:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{-2\pi f}{3} \ln \frac{k - 1,02}{0,98} \quad (4.2)$$

Esta expressão apenas é válida para  $k \geq 1,1$ . Quando  $k < 1,1$  deve utilizar-se para o cálculo de  $\tau$ ,  $k=1,1$ .

O fator  $\gamma$  é dado por:

$$\gamma = \arctan(2\pi f \tau) \quad (4.3)$$

$T_{pi}$  é a solução da seguinte equação:

$$T_{pi} = \frac{v_1}{f\sqrt{v_2}} \quad [s] \quad (4.4)$$

O fator  $v_3$ , também necessário para o cálculo da força de curto-circuito entre subcondutores, é de fácil programação, através da expressão:

$$v_3 = \frac{d/a_s}{\text{sen}\frac{180^\circ}{n}} \cdot \frac{\sqrt{(a_s/d) - 1}}{\arctan\sqrt{(a_s/d) - 1}} \quad (4.5)$$

Como analisado na Secção 3.3.4 para o cálculo da força de tensão devida à contração dos condutores ( $F_{pi,d}$ ) são necessários dois parâmetros,  $\xi$  e  $\eta$ , que se são obtidos pela análise dos gráficos das Figuras 3.4 e 3.5. De forma a automatizar o máximo possível a ferramenta de cálculo, estes dois parâmetros foram programados com o auxílio da ferramenta *Solver* do *Excel* com as expressões apresentadas de seguida.

$\xi$  é a solução real da equação:

$$\xi^3 + \varepsilon_{st}\xi^2 - j^2(1 + \varepsilon_{st}) = 0 \quad (4.6)$$

Em que:  $j^{2/3} \leq \xi \leq j$

$\eta$  pode ser obtido resolvendo a equação cúbica seguinte, com  $0 < \eta \leq 1$ :

$$\eta^3 + \varepsilon_{st}\eta - j^2(1 + \varepsilon_{st})f_\eta = 0 \quad (4.7)$$

Em que  $f_\eta$  representa o fator que descreve a proximidade do subcondutor na viga e é dado por:

$$f_\eta = \frac{v_3}{a_{sw}/a_s} \quad (4.8)$$

Em que  $a_{sw}$  representa a distância equivalente entre os subcondutores da viga e é dada por:

$$a_{sw} = a_s \cdot \frac{2y_a/a_s}{\text{sen}\frac{180^\circ}{n}} \cdot \frac{\sqrt{\frac{1-2y_a/a_s}{2y_a/a_s}}}{\arctan\sqrt{\frac{1-2y_a/a_s}{2y_a/a_s}}} \quad [m] \quad (4.9)$$

Em que  $y_a$  representa a distância de feixes que não colidem durante o curto-circuito e é dado por:

$$y_a = \frac{a_s}{2} \cdot (1 - \eta)(1 - d/a_s) \quad [m] \quad (4.10)$$

Após a introdução das condições de cálculo nos espaços mostrados na Figura 4.7, quando o utilizador clica na “seta para a frente” (➡), irá para a página mostrada na Figura 4.9 e, premindo

o botão **ATUALIZAR LIGAÇÃO**, é realizado o cálculo do fator  $v_2$  e a atualização do *solver* para calcular  $\xi$  ou  $\eta$ , dependendo se  $j$  é maior ou menor do que 1.

The interface is titled "LIGAÇÕES VERTICAIS" and features two main sections: "CONDIÇÕES DE CÁLCULO" (Calculation Conditions) on the left and "CÁLCULOS" (Calculations) on the right. At the top, there are navigation arrows and buttons for "ATUALIZAR LIGAÇÃO" (Update Connection) and "EDITAR LIGAÇÕES" (Edit Connections).

**CONDIÇÕES DE CÁLCULO:**

- Distância entre condutores:  $a = 6$  m
- Altura da baixada:  $h = 12,3$  m
- Largura da baixada:  $w = 5$  m
- Distância entre suportes:  $l = 13,28$  m
- Comprimento do total do condutor da baixada:  $l_v = 14$  m
- Distância entre peças de conexão:  $l_s = 13,28$  m
- Distância entre subcondutores:  $a_s = 0,1$  m
- Parâmetros característicos para  $n \neq 1$ :
  - Verificar se  $1,4w < l_v < 3,3w$ : Verificado
  - Verificar se  $l_v < 2l$ : Verificado
  - Verificar se  $a/d < 2$  e  $l_s \geq 50a_s$  e se  $a/d < 2,5$  e  $l_s \geq 70a_s$ : Não verificado
- Força de cc entre subcondutores:  $F_v = 46291$  N
- Fatores de cálculo de  $F_v$ :
  - $v_1 = 0,643$
  - $v_2 = 2,105$  (highlighted in green)
  - $v_3 = 0,483$
- Verificar se  $F_v/nA_s \leq \sigma_{lin}$ : Verificado
- Módulo de Young real:  $E_{eff} = 1,86E+10$  N/m<sup>2</sup>
- Norma de rigidez:  $N = 7,97E-07$  N<sup>-1</sup>
- Fatores de deformação:
  - est:  $13,8$
  - epi:  $2,08E+05$
- Parâmetro  $j$ :  $118,43$
- Fator  $v_4$ :  $2,11$
- Parâmetro  $ve$ :  $1,30$
- Parâmetros  $\xi$  e  $\eta$ :
  - $\xi = 55,0$  (highlighted in green)
  - $\eta$  (highlighted in red)

**CÁLCULOS:**

- Força de tensão de cc e o deslocamento horizontal máximo:**
  - Força de tensão durante o cc:  $F_{cd} = 3484$  N
  - Deslocamento horizontal máximo:  $b_h = 1,85$  m
  - Distância mínima no ar entre condutores (fase-fase) durante o cc:  $a_{min} = 2,30$  m
- Força de tensão estática:**
  - Componente horizontal causada por um subcondutor no ponto inferior da baixada:  $H_s = 34$  N
  - Componente vertical causada por um subcondutor no ponto superior da baixada:  $V_s = 268$  N
  - Força de tensão estática média na baixada:  $F_{s,t} = 301$  N
- Força de tensão devida à contração:**  $F_{pl,d} = 1861$  N
- Força de tensão máxima:**  $F_{max} = 3484$  N
- Força de ação do vento sobre o condutor:**  $F_y = 14$  N
- Força de ação do peso do próprio cabo:**  $F_z = 268$  N

Figura 4.9: Exemplo de cálculo dos esforços de uma ligação vertical

No caso ilustrado na Figura 4.9, como  $j > 1$ , é utilizado o parâmetro  $\xi$  para o cálculo. A ferramenta está programada de forma a escolher automaticamente qual o parâmetro a utilizar e preencher essa célula a cor verde e a que não se utiliza a vermelho, para auxiliar o utilizador na interpretação dos resultados.

Assim, sem afetar a velocidade de processamento da ferramenta de cálculo e com poucos movimentos por parte do projetista, podem obter-se os resultados dos esforços e algumas informações pertinentes sobre a ligação em causa.

O botão **EDITAR LIGAÇÕES** reencaminha o utilizador para a página onde estão todas as ligações da subestação, definidas inicialmente, como é mostrado na Figura 4.5.

### 4.6.3 Esforços eletromecânicos de ligações horizontais

Após o preenchimento das condições de cálculo de uma ligação horizontal, são realizados os cálculos dos esforços eletromecânicos dessa ligação. A principal diferença para a aplicação existente e com o qual o *Grupo Quadrante* trabalha, tal como acontece nos cálculos dos esforços das ligações verticais, é a automatização da ferramenta de forma a que seja rápido e fácil calcular os esforços pretendidos, apenas com a introdução das 5 condições de cálculo mostradas na Figura 4.8. Na Secção 3.4 é mostrado como são realizados os cálculos, sendo evidente a dificuldade em serem resolvidos manualmente. Desta forma, serão descritos os passos que foram implementados

no programa para que seja possível a melhor automatização possível dos cálculos das ligações horizontais.

O cálculo dos esforços estáticos de uma ligação horizontal é um processo complexo, uma vez que é necessário definir o estado mais desfavorável para aplicar posteriormente na equação dos estados. A força de tensão máxima admissível ( $F_{st,pe}$ ) é, então, a força de tensão estática do condutor no pior estado atmosférico e é determinada tendo em conta a flecha máxima que o condutor pode adquirir. Ora, considera-se que a flecha estática do condutor é máxima no Verão, devido às temperaturas elevadas, calculando-se, por isso, a força de tensão máxima admissível considerando que a flecha no verão deve ser cerca de 4%. O *layout* da ferramenta computacional é a apresentada na Figura 4.10 e é explicada de seguida.

Figura 4.10: Exemplo de cálculo dos esforços estáticos de uma ligação horizontal

Utilizando a ferramenta desenvolvida, o utilizador insere um valor para  $F_{st,pe}$  e clica no botão **ATUALIZAR SEMPRE QUE ALTERAR Tmax**. Ao clicar nesse botão irão correr dois *solver's* que calculam os valores da força de tensão estática no verão (correspondente ao dia de montagem) e a força de tensão estática no pior estado atmosférico (Inverno ou Primavera). Como mencionado anteriormente, a flecha estática do condutor no Verão terá um valor próximo de 4%. A ferramenta computacional foi desenvolvida de forma a aceitar valores dessa flecha entre os 3,95% e os 4,05%, sendo que quando está neste intervalo de valores a célula correspondente a  $F_{st,pe}$  é preenchida a verde. Caso contrário, esta célula é preenchida a vermelho e o utilizador terá de experimentar outro valor para  $F_{st,pe}$  e repetir o procedimento. No caso ilustrado na Figura 4.10, quando  $F_{st,pe} = 360N$  o valor da flecha estática do condutor no Verão toma o valor de 3,994%, o que indica que o resultado

da força estática máxima admissível é favorável e que o projetista poderá avançar para o cálculo dos esforços dinâmicos da ligação em causa.

O cálculo dos esforços dinâmicos de uma ligação horizontal é também um processo complexo, com vários parâmetros que variam consoante as condições em causa.

Pelo que foi analisado na Secção 3.4.3, o único parâmetro que seria necessário colocar de forma automática é o fator  $\psi$ , necessário para o cálculo da força de tensão durante o curto-circuito. Para além de facilitar o trabalho do projetista, evitando que este tenha que ir à norma IEC 60865-1 analisar o gráfico da Figura 3.8, torna os resultados mais precisos, não pondo em causa a velocidade com que estes são obtidos. Assim, considerando que  $0 < \psi \leq 1$ ,  $\psi$  é a solução da seguinte equação:

$$\varphi^2 \psi^3 + \varphi(2 + \zeta) \psi^2 + (1 + 2\zeta) \psi - \zeta(2 + \varphi) = 0 \quad (4.11)$$

Em que todos os parâmetros utilizados na equação já foram explicados anteriormente. Relembrando, temos que:

$\varphi$  representa o parâmetro de carga, calculado em 3.44;

$\zeta$  representa o fator de tensão mecânica, calculado em 3.38.

À semelhança do *layout* apresentado para os cálculos realizados anteriormente, a Figura 4.11 apresenta o aspeto visual da ferramenta para o cálculo dos esforços dinâmicos de uma ligação horizontal.

←
**LIGAÇÕES HORIZONTAIS - ESFORÇOS DINÂMICOS**
→

ATUALIZAR LIGAÇÃO
EDITAR LIGAÇÕES

| CONDIÇÕES DE CÁLCULO                                     |                   |                | CÁLCULOS                                                      |                |          |
|----------------------------------------------------------|-------------------|----------------|---------------------------------------------------------------|----------------|----------|
| Comprimento efetivo do vão                               | $l_{eff}$         | 2,1 m          | Carga dinâmica                                                | $F_x$          | 3552 N   |
| Altura do Ponto de ligação mais alto                     | $h_a$             | 4,9 m          | Carga eletromagnética característica por comprimento unitário | $F'$           | 202,53 N |
| Altura do Ponto de ligação mais baixo                    | $h_b$             | 4,5 m          | Forças de tensão durante o curto-circuito                     | $F_{td,pe}$    | 2368 N   |
| Distâncias entre os condutores                           | $a_1$             | 1,05 m         |                                                               | $F_{td,v}$     | 2089 N   |
|                                                          | $a_2$             | 1,32 m         |                                                               | $F_{td}$       | 2368 N   |
| Força estática                                           | $F_{st,pe}$       | 360 N          | Flecha dinâmica                                               | $f_{ed}$       | 0,17 m   |
|                                                          | $F_{st,v}$        | 155 N          | Forças de tensão depois do curto-circuito                     | $F_{td,pe}$    | 916 N    |
| Distância equivalente                                    | $a$               | 1,185 m        |                                                               | $F_{td,v}$     | 1245 N   |
| Parâmetro $r$                                            | $r$               | 8,75           |                                                               | $F_{td}$       | 1245 N   |
| Direção da força resultante no condutor                  | $\delta_i$        | 83,5 °         | Deslocamento horizontal máximo                                | $b_h$          | 0,17 m   |
|                                                          | $\sigma_{lin}$    | 5,0E+07        | Distância mínima no ar                                        | $\delta_{min}$ | 0,84 m   |
| Flecha estática equivalente do condutor em metade do vão | $f_{es,pe}$       | 0,035 m        | Força máxima suportada                                        | $F_{max}$      | 2368 N   |
|                                                          | $f_{es,v}$        | 0,082 m        |                                                               |                |          |
| Período de oscilação                                     | $T_{pe}$          | 0,338 s        |                                                               |                |          |
|                                                          | $T_v$             | 0,515 s        |                                                               |                |          |
| Período resultante                                       | $T_{res,pe}$      | 0,131 s        |                                                               |                |          |
|                                                          | $T_{res,v}$       | 0,200 s        |                                                               |                |          |
| Verificar se $F_{st,-20}/nA_s \leq \sigma_{lin}$         |                   | SIM            |                                                               |                |          |
| Verificar se $F_{st,60}/nA_s \leq \sigma_{lin}$          |                   | SIM            |                                                               |                |          |
| Módulo de Young real                                     | $E_{eff,pe}$      | 1,62E+10 N/m²  |                                                               |                |          |
|                                                          | $E_{eff,v}$       | 1,60E+10 N/m²  |                                                               |                |          |
| Norma de rigidez                                         | $N_{pe}$          | 4,834E-06 1/N  |                                                               |                |          |
|                                                          | $N_v$             | 4,836E-06 1/N  |                                                               |                |          |
| Verificar se $0,4 \cdot T_{-20} > T_{k1}$                |                   | Não verificado |                                                               |                |          |
| Verificar se $0,4 \cdot T_{60} > T_{k1}$                 |                   | Não verificado |                                                               |                |          |
| Fator de tensão mecânica                                 | $\zeta_{pe}$      | 0,44           |                                                               |                |          |
|                                                          | $\zeta_v$         | 5,48           |                                                               |                |          |
| Verificar se $T_{k1}/T_{res,-20} > 0,5$                  |                   | SIM            |                                                               |                |          |
| Verificar se $T_{k1}/T_{res,60} > 0,5$                   |                   | SIM            |                                                               |                |          |
| Ângulo de oscilação final                                | $\delta_{end,pe}$ | 166,95 °       |                                                               |                |          |
|                                                          | $\delta_{end,v}$  | 166,95 °       |                                                               |                |          |
| Magnitude para o ângulo máximo de oscilação              | $\chi_{pe}$       | -7,75          |                                                               |                |          |
|                                                          | $\chi_v$          | -7,75          |                                                               |                |          |
| Ângulo máximo de oscilação                               | $\delta_{max,pe}$ | 180,00 °       |                                                               |                |          |
|                                                          | $\delta_{max,v}$  | 180,00 °       |                                                               |                |          |
| Verificar se $T_{k1} \geq T_{res,-20}/4$                 |                   | SIM            |                                                               |                |          |
| Verificar se $T_{k1} \geq T_{res,60}/4$                  |                   | SIM            |                                                               |                |          |
| Parâmetro de carga                                       | $\varphi_{pe}$    | 23,41          |                                                               |                |          |
|                                                          | $\varphi_v$       | 23,41          |                                                               |                |          |
| Fator $\psi$                                             | $\psi_{pe}$       | 0,238          |                                                               |                |          |
|                                                          | $\psi_v$          | 0,533          |                                                               |                |          |
| Fator de dilatação                                       | $C_d$             | 1,81           |                                                               |                |          |
| Fator de forma                                           | $C_f$             | 1,15           |                                                               |                |          |
| Verificar se $r > 0,6$                                   |                   | SIM            |                                                               |                |          |
| Verificar se $\delta_{max} \geq 70$                      |                   | SIM            |                                                               |                |          |
| Verificar se $\delta_{max} \geq 90$                      |                   | SIM            |                                                               |                |          |

Figura 4.11: Exemplo de cálculo dos esforços dinâmicos de uma ligação horizontal

Tanto no cálculo dos esforços estáticos como nos dinâmicos de uma ligação horizontal, o botão **EDITAR LIGAÇÕES** reencaminha o utilizador para a página onde estão todas as ligações da subestação, definidas inicialmente, como é mostrado na Figura 4.5. Já o botão **ATUALIZAR LIGAÇÃO**, atualiza todos os valores presentes na página de cálculos correspondente, podendo correr o programa de uma só vez ao invés do utilizador ter que clicar nos botões apresentados a verde.

## 4.7 Output

Depois de calcular os esforços eletromecânicos das ligações, o utilizador já tem os resultados finais pretendidos e que são resumidos na tabela do *Output*. Utiliza-se na ferramenta desenvolvida a mesma tabela de *Output* já utilizada pelo *Grupo Quadrante*. Na Figura 4.12 é apresentada essa tabela, sendo que, neste caso, apenas estão calculados os esforços eletromecânicos da primeira ligação da subestação em causa.

|                                                                                                                  |       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <div><div>QUADRANTE</div></div> |       | <div>CÁLCULO DOS ESFORÇOS ELETROMECÂNICOS</div> <div><div></div><div><div>EDITAR</div><div>LIGAÇÕES</div><div></div></div></div> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Nome do Projeto:                                                                                                 |       | Subestação 60/30kV - Central Solar Mogadouro                                                                                                                                                                                                                                                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Tabela Resumo - Esforços Eletromecânicos                                                                         |       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Características do Sistema:                                                                                      |       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Ligação:                                                                                                         |       | Linha AT - Linha AT                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Condutor:                                                                                                        |       | 851 - AL4 (ASTER 851)                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Forças aplicadas por fase:                                                                                       |       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Esforços Estáticos                                                                                               | $F_x$ | 9 N                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                                                                                                  | $F_y$ | 17 N                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                                                                                                  | $F_z$ | 108 N                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Esforços Dinâmicos                                                                                               | $F_x$ | 1162 N                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                                                                                                  |       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Figura 4.12: Tabela de *Output* que contém os resultados dos esforços eletromecânicos da 1ª ligação da subestação

Após o cálculo dos esforços de uma ligação, quando o utilizador clica na “seta para a frente” (➡) que é mostrada nas Figuras 4.9 e 4.11 poderá ver os resultados dessa ligação e das calculadas anteriormente. Ou seja, depois do utilizador realizar os cálculos da última ligação da subestação elétrica pode visualizar na tabela de *Output* os resultados dos esforços eletromecânicos de todas as ligações.



## Capítulo 5

# Caso de Estudo e Análise de Resultados

Neste capítulo é apresentado um exemplo prático do cálculo dos esforços eletromecânicos de uma subestação elétrica, utilizando a ferramenta de cálculo desenvolvida. É feita, também, uma comparação, utilizando o exemplo, das principais diferenças entre a aplicação com que o *Grupo Quadrante* trabalha atualmente e a aplicação desenvolvida no decorrer desta dissertação.

A subestação que é utilizada como exemplo é a subestação de Mogadouro, em Portugal. Este foi um projeto realizado pelo *Grupo Quadrante* no ano de 2019 e que tem como referências principais as normas IEC 60865-1 e IEC 60865-2. Como este exemplo não cobre todos os cálculos que se poderiam apresentar, nomeadamente nos cálculos dos esforços da ligação vertical, é ainda demonstrado um exemplo extra.

### 5.1 Introdução dos dados de entrada do sistema

O primeiro passo a realizar quando o projetista está perante um projeto novo, é analisar o que é pedido pelo cliente e todas as suas exigências para o projeto em causa. Assim, na ferramenta de cálculo irão ser introduzidos, primeiramente, as características do sistema. A tensão nominal, a corrente de curto-circuito simétrico inicial e a duração da corrente de curto-circuito são as três principais características a preencher pelo utilizador. Deve, também, confirmar os restantes dados de entrada, como explicado na Secção 4.3.

No caso da subestação de Mogadouro são inseridos os dados de entrada do sistema apresentados na Figura 5.1. Os números a vermelho presentes nas figuras que se apresentam neste capítulo, representam a ordem pela qual devem ser realizados os movimentos do projetista.

| CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA                         |      |
|----------------------------------------------------|------|
| Tensão nominal do sistema                          | Un   |
| Corrente inicial de cc trifásico simétrico inicial | Ik'' |
| Duração da corrente de cc                          | Tk1  |

1 PROJETO NOVO

2 60 kV, 31500 A, 3 s

3 CONFIRMAR DADOS DE ENTRADA

Figura 5.1: Introdução dos dados de entrada do sistema

Como explicado na Secção 4.3, quando o utilizador pressiona o botão da Figura 5.1 sinalizado com o número 3, irá confirmar os dados de entrada do sistema que não costumam ser alterados de projeto para projeto. Por exemplo, conhecendo o local da subestação poderá ser necessário alterar as temperaturas e a pressão atmosférica nos diferentes estados. A Figura 5.2 exhibe o ecrã onde se confirmam estes dados.

| BASE DE DADOS - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA                       |           |       |    |
|------------------------------------------------------------------|-----------|-------|----|
| Tensão nominal do sistema                                        | $U_n$     | 60    | kV |
| Corrente inicial de cc trifásico simétrico inicial               | $I_{k''}$ | 31500 | A  |
| Duração da corrente de cc                                        | $T_{k1}$  | 3     | s  |
| Frequência do sistema                                            | $f$       | 50    | Hz |
| Relação X/R                                                      | $X/R$     | 13,11 | 1  |
| Fator empírico para o cálculo do valor de pico da corrente de cc | $k$       | 1,81  |    |

| BASE DE DADOS - CONDIÇÕES DE CÁLCULO |            |             |                    |
|--------------------------------------|------------|-------------|--------------------|
| Hipótese A (Estado de Inverno)       | $\theta_i$ | -10         | °C                 |
|                                      | $q_i$      | 300         | Pa                 |
| Hipótese B (Estado de Primavera)     | $\theta_p$ | 15          | °C                 |
|                                      | $q_p$      | 750         | Pa                 |
| Hipótese A (Estado de Verão)         | $\theta_v$ | 80          | °C                 |
|                                      | $q_v$      | 0           | Pa                 |
| Densidade do gelo                    | $\rho$     | 0,9         | kg/dm <sup>3</sup> |
| Espessura da camada de gelo          | $t$        | 0,01        | m                  |
| Coefficiente de redução              | $\alpha$   | 0,6         | 3                  |
| Valor convencional da aceleração     | $g$        | 9,81        | m/s <sup>2</sup>   |
| Permeabilidade do vácuo              | $\mu_0$    | 1,25664E-06 | H/m                |
| Coeficiente de forma                 | $c$        | 1           |                    |

Figura 5.2: Confirmação dos dados de entrada do sistema

O projetista deve seguir a ordem proposta pelos números escritos a vermelho. O coeficiente de forma ( $c$ ) é o único fator que não necessita de ser confirmado nesta fase, uma vez que depende do diâmetro do condutor escolhido posteriormente. Ao cumprir a ordem 4, o projetista irá introduzir os detalhes de todas as ligações da subestação de Mogadouro.

Como os dados de entrada do sistema são comuns a todo o projeto apenas é necessário preencher estes valores uma vez. No *Excel* que o *Grupo Quadrante* utiliza atualmente não existe este procedimento, tendo o projetista de introduzir estes dados no início de cada ligação. A empresa utiliza uma folha de cálculo por ligação, daí existir esta necessidade que faz com que todo o processo seja mais demorado e mais propício ao erro humano.

## 5.2 Introdução dos detalhes das ligações

Após a introdução dos dados de entrada do sistema, são introduzidos os detalhes de todas as ligações da subestação em causa. A subestação de Mogadouro é constituída por 6 ligações. Nas Figuras 5.3 e 5.4, é exemplificada a introdução dos detalhes da primeira e da última ligações, sendo que o processo é muito simples e rápido.

The screenshot shows the 'DETALHES DAS LIGAÇÕES' form. On the left, there are two buttons: 'Adicionar ligação' (marked with a red box and the number 4) and 'Editar ligações'. Below them are two large grey arrows pointing left and right. On the right, the 'Nº de ligações' field shows the value '1'. Below this, the 'Início' and 'Fim' dropdown menus both show 'Linha AT' (marked with a red box and the number 1). Below these, there are two groups of buttons. The first group, marked with a red box and the number 2, contains 'CABO', 'TUBO', and 'BARRA'. The second group, marked with a red box and the number 3, contains 'VERTICAL' and 'HORIZONTAL'.

Figura 5.3: Introdução dos detalhes da primeira ligação da subestação

The screenshot shows the 'DETALHES DAS LIGAÇÕES' form. On the left, the 'Adicionar ligação' button is disabled, and the 'Editar ligações' button is active (marked with a red box and the number 4). Below them are two large grey arrows pointing left and right. On the right, the 'Nº de ligações' field shows the value '6'. Below this, the 'Início' dropdown menu shows 'Transformador de Tensão' and the 'Fim' dropdown menu shows 'Transformador de Potência' (both marked with a red box and the number 1). Below these, there are two groups of buttons. The first group, marked with a red box and the number 2, contains 'CABO', 'TUBO', and 'BARRA'. The second group, marked with a red box and the number 3, contains 'VERTICAL' and 'HORIZONTAL'.

Figura 5.4: Introdução dos detalhes da última ligação da subestação

Como se pode ver nas figuras, o utilizador apenas terá de escolher, de uma lista, o ponto de início e de fim da ligação, se é realizada por cabo, tubo ou barra e se é vertical ou horizontal. No caso da primeira ligação, após a introdução destes dados, o projetista adiciona mais uma ligação à subestação repetindo o procedimento para a segunda ligação. Este processo é repetido tantas vezes quanto o número de ligações da subestação. É de salientar que o utilizador sabe sempre quantas ligações já acrescentou à subestação, 1 no caso da Figura 5.3 e 6 no caso da Figura 5.4.

Na Figura 5.5 é apresentado o ecrã que é mostrado após o utilizador clicar no botão da Figura 5.4 representado por um **LÁPIS** ()

| LIGAÇÃO | LIGAÇÕES DA SUBESTAÇÃO    |                           |                 |                     |  |
|---------|---------------------------|---------------------------|-----------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|         | Início                    | Fim                       | Cabo/Tubo/Barra | Vertical/Horizontal |                                                                                     |
| 1       | Linha AT                  | Linha AT                  | CABO            | VERTICAL            |  |
| 2       | Barramento MT             | Barramento MT             | TUBO            | HORIZONTAL          |  |
| 3       | Disjuntor                 | Transformador de Tensão   | CABO            | HORIZONTAL          |  |
| 4       | Seccionador               | Transformador de Corrente | CABO            | HORIZONTAL          |  |
| 5       | Transformador de Corrente | Disjuntor                 | CABO            | HORIZONTAL          |  |
| 6       | Transformador de Tensão   | Transformador de Potência | CABO            | HORIZONTAL          |  |
|         |                           |                           |                 |                     |  |
|         |                           |                           |                 |                     |  |
|         |                           |                           |                 |                     |  |
|         |                           |                           |                 |                     |  |

Figura 5.5: Tabela resumo dos detalhes de todas as ligações da subestação

Esta tabela é o ponto de partida do cálculo de cada ligação. O utilizador poderá realizar em primeiro lugar os cálculos da ligação que pretender e não obrigatoriamente começar pela primeira. Se for detetado algum erro em algum detalhe de qualquer ligação, poderá também ser editado, bastando escrever por cima da célula o conteúdo correto.

Este passo também não existe na atual folha de cálculo com que o *Grupo Quadrante* trabalha, pois, como já referido anteriormente, as ligações são tratadas individualmente e não como um todo. Após o desenvolvimento desta ferramenta, tornam-se perceptíveis as claras vantagens de ter uma visão geral de toda a subestação antes de começar a tratar cada ligação individualmente.

Nesta demonstração de resultados são realizados os cálculos da primeira e última ligações, de modo a exemplificar o cálculo de uma ligação vertical e de uma ligação horizontal.

### 5.3 Cálculo dos esforços da primeira ligação da subestação

Depois da introdução de todos os detalhes das ligações e da confirmação dos mesmos é iniciado o processo de cálculo da primeira ligação da subestação. Quando o utilizador clica no botão representado por um **LÁPIS** () , rodeado a vermelho na Figura 5.5, é reencaminhado para a escolha do condutor da primeira ligação. Como a primeira ligação é feita por cabo, o projetista é imediatamente direcionado para a página onde será escolhido o cabo pretendido. Como se pode visualizar na Figura 5.6, ao escolher o cabo pretendido (851 - AL4), como esse cabo já pertence à base de dados existente, as variáveis necessárias para o cálculo são automaticamente preenchidas. Apenas é necessário introduzir o número de subcondutores pretendido que, neste caso, é 1.

Escolher o CABO 1

851 - AL4 (ASTER 851)

CABO VERTICAL

RESET UTILIZAR OUTRO CABO GUARDAR NA BD

| Designação            | $d$ [m] | $n$ | $A_s$ [mm <sup>2</sup> ] | $m's$ [kg/m] | $c_{th}$ [m <sup>4</sup> /(A <sup>2</sup> s)] | $\alpha_e$ [°C <sup>-1</sup> ] | $S$ [N/mm] | $E$ [N/mm <sup>2</sup> ] |
|-----------------------|---------|-----|--------------------------|--------------|-----------------------------------------------|--------------------------------|------------|--------------------------|
| 851 - AL4 (ASTER 851) | 0,038   | 1   | 850,7                    | 2,3607       | 2,70E-19                                      | 2,300E-05                      | 100        | 52500                    |

PREENCHER!

2

3

Figura 5.6: Escolha do cabo a utilizar na primeira ligação

Na aplicação utilizada atualmente pelo *Grupo Quadrante* existe a necessidade da introdução manual das características do cabo pretendido, o que implica que o projetista tenha que verificar as características nos catálogos dos fabricantes.

Concluída a escolha do cabo, o utilizador está em condições de introduzir as condições de cálculo específicas necessárias para a primeira ligação da subestação.

Como a primeira ligação da subestação de Mogadouro é montada verticalmente, as condições de cálculo são as apresentadas na Figura 5.7. O utilizador é reencaminhado para o ecrã exibido nesta figura, onde terá de preencher manualmente as sete células correspondentes a dimensões próprias da ligação em causa.

LIGAÇÕES VERTICAIS

RESET EDITAR LIGAÇÕES

CONDIÇÕES DE CÁLCULO

Distância entre condutores  
Altura da baixada  
Largura da baixada  
Distância entre suportes  
Comprimento total do condutor da baixada  
Distância entre peças de conexão  
Distância entre subcondutores

|    |      |   |
|----|------|---|
| a  | 6    | m |
| h  | 4,46 | m |
| w  | 1,03 | m |
| l  | 4,58 | m |
| lv | 4,66 | m |
| ls | 1,5  | m |
| as | 0    | m |

1

2

Figura 5.7: Introdução das condições de cálculo da primeira ligação

Neste momento, o projetista tem reunidas todas as condições para efetuar o cálculo dos esforços eletromecânicos da primeira ligação da subestação de Mogadouro. A “seta para a frente” (➡) mostrada na Figura 5.7 reencaminha o utilizador para o ecrã apresentado na Figura 5.8, com os cálculos a realizar (neste caso, verticais) e este terá apenas de atualizar a ligação para que todos os cálculos sejam efetuados automaticamente.

**LIGAÇÕES VERTICAIS**

←

1

2

→

ATUALIZAR LIGAÇÃO

EDITAR LIGAÇÕES

| CONDIÇÕES DE CÁLCULO                                                                    |                                 | CÁLCULOS                                                                      |                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Distância entre condutores                                                              | a = 6 m                         | <b>Força de tensão de cc e o deslocamento horizontal máximo</b>               |                   |
| Altura da baixada                                                                       | h = 4,46 m                      | Força de tensão durante o cc                                                  | $F_{t,d}$ 1162 N  |
| Largura da baixada                                                                      | w = 1,03 m                      | Deslocamento horizontal máximo                                                | $b_h$ 0,37 m      |
| Distância entre suportes                                                                | l = 4,58 m                      | Distância mínima no ar entre condutores (fase-fase) durante o cc              | $a_{min}$ 5,27 m  |
| Comprimento do total do condutor da baixada                                             | $l_v$ 4,66 m                    | <b>Força de tensão estática</b>                                               |                   |
| Distância entre peças de conexão                                                        | $l_s$ 1,5 m                     | Componente horizontal causada por um subcondutor no ponto inferior da baixada | $H_s$ 9 N         |
| Distância entre subcondutores                                                           | $a_s$ 0 m                       | Componente vertical causada por um subcondutor no ponto superior da baixada   | $V_s$ 108 N       |
| <b>Parâmetros característicos para n=1</b>                                              |                                 | Força de tensão estática média na baixada                                     | $F_{s,t}$ 58 N    |
| Verificar se $1,4w < l_v < 3,3w$                                                        | Não Verificado                  | <b>Força de tensão devida à contração</b>                                     |                   |
| Verificar se $l_v < 2l$                                                                 | Verificado                      |                                                                               | $F_{pl,d}$ N.A. N |
| Verificar se $a_s/d \leq 2$ e $l_s \geq 50a_s$ e se $a_s/d \leq 2,5$ e $l_s \geq 70a_s$ | Não verificado                  | <b>Força de tensão máxima</b>                                                 |                   |
| Força de cc entre subcondutores                                                         | $F_v$ N.A. N                    |                                                                               | $F_{max}$ 1162 N  |
| Fatores de cálculo de $F_v$                                                             | $v_1$ N.A.                      | Força de ação do vento sobre o condutor                                       | $F_y$ 17 N        |
|                                                                                         | $v_2$ N.A.                      | Força de ação do peso do próprio cabo                                         | $F_z$ 108 N       |
|                                                                                         | $v_3$ N.A.                      |                                                                               |                   |
| Verificar se $F_{s,t}/nA_s \leq \sigma_{in}$                                            | Verificado                      |                                                                               |                   |
| Módulo de Young real                                                                    | $E_{eff}$ N.A. N/m <sup>2</sup> |                                                                               |                   |
| Norma de rigidez                                                                        | N N.A. N <sup>1</sup>           |                                                                               |                   |
| Fatores de deformação                                                                   | est N.A.                        |                                                                               |                   |
| Parâmetro j                                                                             | $\epsilon_{pi}$ N.A.            |                                                                               |                   |
| Fator $v_4$                                                                             | j 0,00                          |                                                                               |                   |
| Parâmetro $v_e$                                                                         | $v_4$ N.A.                      |                                                                               |                   |
| Parâmetros $\xi$ e $\eta$                                                               | $v_e$ N.A.                      |                                                                               |                   |
|                                                                                         | $\xi$ 0,0                       |                                                                               |                   |
|                                                                                         | $\eta$ 0,0                      |                                                                               |                   |

Figura 5.8: Cálculos dos esforços da primeira ligação

Como existe apenas 1 subcondutor ( $n=1$ ), muitos destes cálculos e condições não se aplicam, sendo que esses resultados aparecem como *N.A.* ou 0. Por este motivo, neste caso, não são notadas muitas diferenças para o *Excel* original e, por isso, posteriormente, irá ser apresentado outro caso de outra ligação vertical com  $n=2$ .

De qualquer forma são obtidos todos os resultados pretendidos e algumas informações extra, como, por exemplo, o valor do deslocamento horizontal máximo e a distância mínima no ar entre condutores. Os resultados que surgem dentro das células com sombreado verde na Figura 5.8 são os que irão ser apresentados na tabela de *Output*, apresentada posteriormente.

O último passo para concluir os cálculos referentes à primeira ligação da subestação consiste em colocar os resultados na tabela do *Output*. Assim, quando o utilizador clica na “seta para a frente” (➡) presente no ecrã apresentado na Figura 5.8 é mostrada a tabela com todos os resultados de todas as ligações calculadas até ao momento. Neste caso, apenas aparecem os resultados da primeira ligação (Figura 5.9).

|                                                                                                                  |       |                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <div><div>QUADRANTE</div></div> |       | <div>CÁLCULO DOS ESFORÇOS ELETROMECÂNICOS</div> <div><div></div><div><div>EDITAR</div><div>LIGAÇÕES</div></div></div> |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Nome do Projeto:                                                                                                 |       | Subestação 60/30kV - Central Solar Mogadouro                                                                                                                                                                                                                                            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Tabela Resumo - Esforços Eletromecânicos                                                                         |       |                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Características do Sistema:                                                                                      |       |                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Ligação:                                                                                                         |       | Linha AT - Linha AT                                                                                                                                                                                                                                                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Condutor:                                                                                                        |       | 851 - AL4 (ASTER 851)                                                                                                                                                                                                                                                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Forças aplicadas por fase:                                                                                       |       |                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Esforços Estáticos                                                                                               | $F_x$ | 9 N                                                                                                                                                                                                                                                                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                                                                                                  | $F_y$ | 17 N                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                                                                                                  | $F_z$ | 108 N                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Esforços Dinâmicos                                                                                               | $F_x$ | 1162 N                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                                                                                                  |       |                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Figura 5.9: Tabela de *Output*

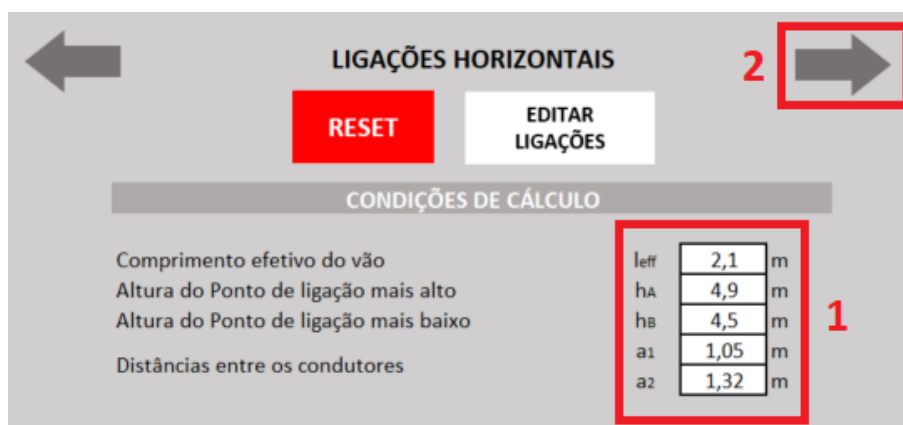
Como se pode verificar, com apenas alguns cliques e com a introdução manual de poucos dados, o utilizador terá os resultados dos esforços eletromecânicos pretendidos. No *Excel* que a empresa utiliza atualmente, como não existe apenas uma folha de cálculo para todas as ligações, os resultados de uma ligação não aparecem de forma automática na tabela de *Output*.

## 5.4 Cálculo dos esforços da última ligação da subestação

Tal como é realizado para o cálculo dos esforços da primeira ligação da subestação de Mogadouro, depois do utilizador introduzir no programa as características do sistema e os detalhes das ligações está em condições de prosseguir para o cálculo de qualquer ligação. Neste caso, trata-se da última ligação desta subestação que, como foi visto na Figura 5.5, corresponde à ligação 6, entre um transformador de tensão e um transformador de potência e é realizada por cabo, horizontalmente. Assim, quando o projetista clica no botão representado por um **LÁPIS** () correspondente à edição desta ligação, é direcionado para a página onde será escolhido o cabo pretendido. O cabo é escolhido da mesma forma que foi escolhido para a primeira ligação. Acontece que a última ligação utilizará o mesmo tipo de cabo (851 - AL4) que a primeira ligação, ou seja, trata-se de um condutor que já existe na base de dados, sendo apenas necessário selecionar esse cabo, como já foi mostrado na Figura 5.6. Neste caso, o número de subcondutores é, também, 1.

Concluída a escolha do cabo, o utilizador está em condições de introduzir as condições de cálculo específicas necessárias para a última ligação da subestação.

Como a última ligação da subestação de Mogadouro é montada horizontalmente, as condições de cálculo são as apresentadas na Figura 5.10. O utilizador é reencaminhado para esta página, onde terá de preencher manualmente as 5 células correspondentes a dimensões próprias da ligação em causa.



**LIGAÇÕES HORIZONTAIS**

**RESET**    **EDITAR LIGAÇÕES**

**CONDICÕES DE CÁLCULO**

Comprimento efetivo do vão

Altura do Ponto de ligação mais alto

Altura do Ponto de ligação mais baixo

Distâncias entre os condutores

|      |      |   |
|------|------|---|
| leff | 2,1  | m |
| hA   | 4,9  | m |
| hB   | 4,5  | m |
| a1   | 1,05 | m |
| a2   | 1,32 | m |

Figura 5.10: Introdução das condições de cálculo da última ligação

Neste momento, o projetista tem reunidas todas as condições para efetuar o cálculo dos esforços eletromecânicos da última ligação da subestação de Mogadouro. A “seta para a frente” (➡) mostrada no ecrã apresentado na Figura 5.10 reencaminha o utilizador para a página dos cálculos dos esforços estáticos de uma ligação horizontal.

Como é referido na Secção 4.6.3, é necessário calcular a força estática máxima admissível. Esta força é calculada por tentativa erro, ou seja, o projetista escreve um valor na célula correspondente à célula de  $F_{st,pe}$  e atualiza no botão de atualizar no topo da página ou no botão verde intitulado **ATUALIZAR SEMPRE QUE ALTERAR Tmax**. Tanto um botão como o outro fará o cálculo da tensão sentida no Verão e da tensão sentida no pior estado atmosférico e, consequentemente, calcula os valores da flecha estática do condutor no verão e no estado mais desfavorável. Se o valor da flecha estática no Verão não estiver entre 3,95% e os 4,05%, a célula onde o projetista escreve o valor de  $F_{st,pe}$  aparecerá a vermelho, o que significa que terá de escolher outro valor para a força estática máxima admissível e repetir todo o procedimento, até que a célula seja preenchida a cor verde. Na Figura 5.11 é mostrado um exemplo de um valor que não pode ser admitido como valor final de  $F_{st,pe}$  e na Figura 5.12 é mostrado o mesmo exemplo depois do ajuste de  $F_{st,pe}$ . É de notar que o valor da flecha estática no Verão toma o valor de 3,994%.

**LIGAÇÕES HORIZONTAIS - ESFORÇOS ESTÁTICOS**

1 **ATUALIZAR LIGAÇÃO** **EDITAR LIGAÇÕES**

| CONDIÇÕES DE CÁLCULO                                             |                                                                   | CÁLCULOS                                                         |                   |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Comprimento efetivo do vão                                       | $l_{eff}$ 2,1 m                                                   | Força estática máxima admissível                                 | $F_{st,pe}$ 315,0 |
| Altura do Ponto de ligação mais alto                             | $h_A$ 4,9 m                                                       | Força de ação do vento sobre o condutor                          | $F_y$ 17 N        |
| Altura do Ponto de ligação mais baixo                            | $h_B$ 4,5 m                                                       | Força de ação do peso do próprio cabo                            | $F_z$ 24 N        |
| Distâncias entre os condutores                                   | $a_1$ 1,05 m<br>$a_2$ 1,32 m                                      | Estado mais desfavorável (para aplicar na equação dos estados)   | Inverno           |
| Distância equivalente                                            | $a$ 1,185 m                                                       | Força da tensão estática do condutor no dia da montagem (verão)  | $F_{st,v}$ 144 N  |
| <b>Forças Exercidas pelos Agentes Atmosféricos e pelos Cabos</b> |                                                                   | Flecha estática do condutor no dia da montagem (verão)           | $f_v$ 0,090 m     |
| Força devida à ação do peso do próprio cabo                      | $W$ 23,158 N/m                                                    | Força da tensão estática do condutor no estado mais desfavorável | $F_{st,pe}$ 315 N |
| Força devida à ação do gelo                                      | $W_g$ 13,314 N/m                                                  | Flecha estática do condutor no estado mais desfavorável          | $f_{pe}$ 0,0676 m |
| Força devida à ação do vento                                     | $F_{vi}$ 10,44 N/m<br>$F_{vp}$ 17,1 N/m                           |                                                                  |                   |
| Força resultante aplicada sobre o condutor                       | $F_{ri}$ 37,937 N/m<br>$F_{rp}$ 28,788 N/m<br>$F_{rv}$ 23,158 N/m |                                                                  |                   |
| Coefficiente de Sobrecarga                                       | $m_{ri}$ 1,638<br>$m_{rp}$ 1,243<br>$m_{rv}$ 1,000                |                                                                  |                   |
| Verificar se $m_{rp} > m_{ri}$                                   | NÃO                                                               |                                                                  |                   |
| Verificar se $m_{rp} = m_{ri}$                                   | NÃO                                                               |                                                                  |                   |
| Verificar se $L > L_{cr}$                                        | NÃO                                                               |                                                                  |                   |
| Verificar se $L = L_{cr}$                                        | NÃO                                                               |                                                                  |                   |
| Vão crítico                                                      | $L_{cr}$ Imaginário                                               |                                                                  |                   |

Figura 5.11: Cálculos dos esforços estáticos da última ligação com valor de  $F_{st,pe}$  errado

**LIGAÇÕES HORIZONTAIS - ESFORÇOS ESTÁTICOS**

1 **ATUALIZAR LIGAÇÃO** **EDITAR LIGAÇÕES** 2

| CONDIÇÕES DE CÁLCULO                                             |                                                                   | CÁLCULOS                                                         |                   |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Comprimento efetivo do vão                                       | $l_{eff}$ 2,1 m                                                   | Força estática máxima admissível                                 | $F_{st,pe}$ 360,0 |
| Altura do Ponto de ligação mais alto                             | $h_A$ 4,9 m                                                       | Força de ação do vento sobre o condutor                          | $F_y$ 17 N        |
| Altura do Ponto de ligação mais baixo                            | $h_B$ 4,5 m                                                       | Força de ação do peso do próprio cabo                            | $F_z$ 24 N        |
| Distâncias entre os condutores                                   | $a_1$ 1,05 m<br>$a_2$ 1,32 m                                      | Estado mais desfavorável (para aplicar na equação dos estados)   | Inverno           |
| Distância equivalente                                            | $a$ 1,185 m                                                       | Força da tensão estática do condutor no dia da montagem (verão)  | $F_{st,v}$ 155 N  |
| <b>Forças Exercidas pelos Agentes Atmosféricos e pelos Cabos</b> |                                                                   | Flecha estática do condutor no dia da montagem (verão)           | $f_v$ 0,084 m     |
| Força devida à ação do peso do próprio cabo                      | $W$ 23,158 N/m                                                    | Força da tensão estática do condutor no estado mais desfavorável | $F_{st,pe}$ 360 N |
| Força devida à ação do gelo                                      | $W_g$ 13,314 N/m                                                  | Flecha estática do condutor no estado mais desfavorável          | $f_{pe}$ 0,0591 m |
| Força devida à ação do vento                                     | $F_{vi}$ 10,44 N/m<br>$F_{vp}$ 17,1 N/m                           |                                                                  |                   |
| Força resultante aplicada sobre o condutor                       | $F_{ri}$ 37,937 N/m<br>$F_{rp}$ 28,788 N/m<br>$F_{rv}$ 23,158 N/m |                                                                  |                   |
| Coefficiente de Sobrecarga                                       | $m_{ri}$ 1,638<br>$m_{rp}$ 1,243<br>$m_{rv}$ 1,000                |                                                                  |                   |
| Verificar se $m_{rp} > m_{ri}$                                   | NÃO                                                               |                                                                  |                   |
| Verificar se $m_{rp} = m_{ri}$                                   | NÃO                                                               |                                                                  |                   |
| Verificar se $L > L_{cr}$                                        | NÃO                                                               |                                                                  |                   |
| Verificar se $L = L_{cr}$                                        | NÃO                                                               |                                                                  |                   |
| Vão crítico                                                      | $L_{cr}$ Imaginário                                               |                                                                  |                   |

Figura 5.12: Cálculos dos esforços estáticos da última ligação com valor de  $F_{st,pe}$  correto

Os restantes valores são obtidos automaticamente pelas fórmulas que foram programadas na ferramenta. É de salientar a eficiência do programa.

Tendo os esforços estáticos da ligação horizontal calculados, o utilizador está em condições de prosseguir para o cálculo dos esforços dinâmicos, clicando na “seta para frente” (➡) apresenta na Figura 5.12.

No caso das ligações horizontais, o cálculo dos esforços dinâmicos é realizado automaticamente pelo programa, sendo que o utilizador apenas tem que atualizar a ligação, clicando no botão **ATUALIZAR LIGAÇÃO**, para que todas as condições de cálculo e resultados pretendidos sejam calculados.

**LIGAÇÕES HORIZONTAIS - ESFORÇOS DINÂMICOS**

1 **ATUALIZAR LIGAÇÃO** EDITAR LIGAÇÕES 2

| CONDIÇÕES DE CÁLCULO                                     |                                                                        | CÁLCULOS                                                      |                                                            |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Comprimento efetivo do vão                               | $l_{eff}$ 2,1 m                                                        | Carga dinâmica                                                | $F_x$ 2547 N                                               |
| Altura do Ponto de ligação mais alto                     | $h_A$ 4,9 m                                                            | Carga eletromagnética característica por comprimento unitário | $F'$ 125,60 N                                              |
| Altura do Ponto de ligação mais baixo                    | $h_B$ 4,5 m                                                            | Forças de tensão durante o curto-circuito                     | $F_{td,pe}$ 1698 N<br>$F_{td,v}$ 1426 N<br>$F_{td}$ 1698 N |
| Distâncias entre os condutores                           | $a_1$ 1,05 m<br>$a_2$ 1,32 m                                           | Flecha dinâmica                                               | $f_{ed}$ 0,15 m                                            |
| Força estática                                           | $F_{st,pe}$ 360 N<br>$F_{st,v}$ 155 N                                  | Forças de tensão depois do curto-circuito                     | $F_{td,pe}$ 916 N<br>$F_{td,v}$ 1245 N<br>$F_{td}$ 1245 N  |
| Distância equivalente                                    | $a$ 1,185 m                                                            | Deslocamento horizontal máximo                                | $b_h$ 0,15 m                                               |
| Parâmetro $r$                                            | $r$ 5,42                                                               | Distância mínima no ar                                        | $a_{min}$ 0,89 m                                           |
| Direção da força resultante no condutor                  | $\delta_1$ 79,6 °<br>$\sigma_{lin}$ 5,0E+07                            | Força máxima suportada                                        | $F_{max}$ 1698 N                                           |
| Flecha estática equivalente do condutor em metade do vão | $f_{es,pe}$ 0,035 m<br>$f_{es,v}$ 0,082 m                              |                                                               |                                                            |
| Período de oscilação                                     | $T_{pe}$ 0,338 s<br>$T_v$ 0,515 s                                      |                                                               |                                                            |
| Período resultante                                       | $T_{res,pe}$ 0,164 s<br>$T_{res,v}$ 0,249 s                            |                                                               |                                                            |
| Verificar se $F_{st,-20}/nA_s \leq \sigma_{lin}$         | SIM                                                                    |                                                               |                                                            |
| Verificar se $F_{st,60}/nA_s \leq \sigma_{lin}$          | SIM                                                                    |                                                               |                                                            |
| Módulo de Young real                                     | $E_{eff,pe}$ 1,62E+10 N/m²<br>$E_{eff,v}$ 1,60E+10 N/m²                |                                                               |                                                            |
| Norma de rigidez                                         | $N_{pe}$ 4,834E-06 1/N<br>$N_v$ 4,836E-06 1/N                          |                                                               |                                                            |
| Verificar se $0,4 \cdot T_{-20} > T_{k1}$                | Não verificado                                                         |                                                               |                                                            |
| Verificar se $0,4 \cdot T_{60} > T_{k1}$                 | Não verificado                                                         |                                                               |                                                            |
| Fator de tensão mecânica                                 | $\zeta_{pe}$ 0,44<br>$\zeta_v$ 5,48                                    |                                                               |                                                            |
| Verificar se $T_{k1}/T_{res,-20} > 0,5$                  | SIM                                                                    |                                                               |                                                            |
| Verificar se $T_{k1}/T_{res,60} > 0,5$                   | SIM                                                                    |                                                               |                                                            |
| Ângulo de oscilação final                                | $\delta_{end,pe}$ 159,11 °<br>$\delta_{end,v}$ 159,11 °                |                                                               |                                                            |
| Magnitude para o ângulo máximo de oscilação              | $\chi_{pe}$ -4,42<br>$\chi_v$ -4,42                                    |                                                               |                                                            |
| Ângulo máximo de oscilação                               | $\delta_{max,pe}$ 180,00 °<br>$\delta_{max,v}$ 180,00 °                |                                                               |                                                            |
| Verificar se $T_{k1} \geq T_{res,-20}/4$                 | SIM                                                                    |                                                               |                                                            |
| Verificar se $T_{k1} \geq T_{res,60}/4$                  | SIM                                                                    |                                                               |                                                            |
| Parâmetro de carga                                       | $\varphi_{pe}$ 13,54<br>$\varphi_v$ 13,54                              |                                                               |                                                            |
| Fator $\psi$                                             | <b>ATUALIZAR <math>\psi</math></b> $\psi_{pe}$ 0,274<br>$\psi_v$ 0,606 |                                                               |                                                            |
| Extensão elástica                                        | $\epsilon_{ela}$ 6,15E-03                                              |                                                               |                                                            |
| Dilatação térmica                                        | $\epsilon_{th}$ 1,51E-05                                               |                                                               |                                                            |
| Fator de dilatação                                       | $C_D$ 1,58                                                             |                                                               |                                                            |
| Fator de forma                                           | $C_r$ 1,15                                                             |                                                               |                                                            |
| Verificar se $r > 0,6$                                   | SIM                                                                    |                                                               |                                                            |
| Verificar se $\delta_{max} \geq 70$                      | SIM                                                                    |                                                               |                                                            |
| Verificar se $\delta_{max} \geq 90$                      | SIM                                                                    |                                                               |                                                            |

Figura 5.13: Cálculos dos esforços dinâmicos da última ligação

Tal como acontece na primeira ligação são obtidos todos os resultados pretendidos e algumas informações extra, como, por exemplo, o valor do deslocamento horizontal máximo e a distância mínima no ar entre condutores. Os resultados que estão rodeados a cor verde nas Figuras 5.12 e 5.13 são os que irão ser apresentados na tabela de *Output*, apresentada posteriormente.

O último passo para concluir os cálculos referentes à última ligação da subestação consiste em colocar os resultados na tabela do *Output*. Assim, quando o utilizador clica na “seta para a frente” (➡) presente na Figura 5.13 é mostrada a tabela com todos os resultados de todas as ligações calculadas até ao momento. Neste caso, apenas aparecem os resultados da primeira e da última ligações (Figura 5.14).

|                                                                                                                  |                       |                                                                                                      |  |  |  |                                                     |  |  |  |  |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|-----------------------------------------------------|--|--|--|--|--|
| <div><div>QUADRANTE</div></div> |                       | <div>CÁLCULO DOS ESFORÇOS ELETROMECÂNICOS</div> <div><div></div><div>EDITAR<br/>LIGAÇÕES</div></div> |  |  |  |                                                     |  |  |  |  |  |
| Nome do Projeto:                                                                                                 |                       | Subestação 60/30kV - Central Solar Mogadouro                                                         |  |  |  |                                                     |  |  |  |  |  |
| Tabela Resumo - Esforços Eletromecânicos                                                                         |                       |                                                                                                      |  |  |  |                                                     |  |  |  |  |  |
| Características do Sistema:                                                                                      |                       |                                                                                                      |  |  |  |                                                     |  |  |  |  |  |
| Ligação:                                                                                                         | Linha AT - Linha AT   |                                                                                                      |  |  |  | Transformador de Tensão - Transformador de Potência |  |  |  |  |  |
| Condutor:                                                                                                        | 851 - AL4 (ASTER 851) |                                                                                                      |  |  |  | 851 - AL4 (ASTER 851)                               |  |  |  |  |  |
| Forças aplicadas por fase:                                                                                       |                       |                                                                                                      |  |  |  |                                                     |  |  |  |  |  |
| Esforços Estáticos                                                                                               | $F_x$                 | 9 N                                                                                                  |  |  |  | 360 N                                               |  |  |  |  |  |
|                                                                                                                  | $F_y$                 | 17 N                                                                                                 |  |  |  | 17 N                                                |  |  |  |  |  |
|                                                                                                                  | $F_z$                 | 108 N                                                                                                |  |  |  | 24 N                                                |  |  |  |  |  |
| Esforços Dinâmicos                                                                                               | $F_x$                 | 1162 N                                                                                               |  |  |  | 2547 N                                              |  |  |  |  |  |

Figura 5.14: Tabela de *Output*

Como se pode verificar, com apenas alguns cliques e com a introdução manual de poucos dados, o utilizador terá os resultados dos esforços eletromecânicos pretendidos, de forma simples, eficaz e rápida.

## 5.5 Cálculo dos esforços de uma ligação vertical com $n=2$

Como foi dito na Secção 5.3 no exemplo da primeira ligação da subestação de Mogadouro muitos dos cálculos não se aplicam, uma vez que se trata de uma ligação vertical com  $n=1$ . Deste modo, será exemplificado de forma breve o cálculo dos esforços de uma ligação vertical quando  $n=2$ .

De forma a confirmar os resultados demonstrados de seguida, seguiu-se o exemplo 7 da norma IEC 60865-2 [6]. O exemplo será descrito com o auxílio de imagens da ferramenta de cálculo, para melhor e mais fácil compreensão dos cálculos e respetivos resultados. Neste exemplo, a base para o cálculo é um sistema trifásico de 380kV e com uma corrente inicial de curto-circuito trifásico simétrico inicial de 40kA.

O condutor escolhido não existia na base de dados da ferramenta, tendo havido a necessidade de introduzir os dados manualmente. Como se pode ver acompanhando os passos mostrados na Figura 5.15, depois da introdução das características do cabo, este é guardado na base de dados, para que possa ser utilizado em projetos futuros. O número de subcondutores desta ligação é 2 ( $n=2$ ).

Escolher o CABO: 550-AL1/71-ST1A

CABO VERTICAL

RESET

1 UTILIZAR OUTRO CABO

3 GUARDAR NA BD

| Designação      | $d$ [m]                 | $n$                     | $A_s$ [mm <sup>2</sup> ]      | $m' s$ [kg/m]                    | $c th$ [m <sup>4</sup> /(A <sup>2</sup> s)] | $\alpha_e$ [°C <sup>-1</sup> ] | $S$ [N/mm]                                        | $E$ [N/mm <sup>2</sup> ] |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------|
|                 | Diâmetro do subcondutor | Número de subcondutores | Área de secção do subcondutor | Massa por unidade de comprimento | Constante de material do condutor           | Coefficiente de dilatação      | Constante de elasticidade resultante dos suportes | Módulo de Young          |
| 550-AL1/71-ST1A | 0,0322                  | 2                       | 611,2                         | 1,95                             | 2,70E-19                                    | 2,300E-05                      | 100                                               | 62000                    |

2

4 PREENCHER!

2

5

Figura 5.15: Escolha do condutor da ligação

De seguida, são introduzidos na ferramenta de cálculo as características específicas das dimensões da ligação a calcular (Figura 5.16).

LIGAÇÕES VERTICAIS

RESET

2 EDITAR LIGAÇÕES

CONDICÕES DE CÁLCULO

|                                          |    |       |   |
|------------------------------------------|----|-------|---|
| Distância entre condutores               | a  | 6     | m |
| Altura da baixada                        | h  | 12,3  | m |
| Largura da baixada                       | w  | 5     | m |
| Distância entre suportes                 | l  | 13,28 | m |
| Comprimento total do condutor da baixada | lv | 14    | m |
| Distância entre peças de conexão         | ls | 13,28 | m |
| Distância entre subcondutores            | as | 0,1   | m |

1

Figura 5.16: Introdução das características específicas da ligação

Neste momento, o projetista tem as condições reunidas para efetuar o cálculo dos esforços eletromecânicos da ligação. Quando o utilizador clica na “seta para a frente” (➡) mostrada na Figura 5.16 é direcionado para a página de cálculo, onde apenas é necessário atualizar a ligação para que todos os cálculos sejam realizados (Figura 5.17).

**LIGAÇÕES VERTICAIS**

←

1

2

→

ATUALIZAR LIGAÇÃO

EDITAR LIGAÇÕES

| CONDIÇÕES DE CÁLCULO                                                                    |                                                 | CÁLCULOS                                                                      |                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Distância entre condutores                                                              | a = 6 m                                         | <b>Força de tensão de cc e o deslocamento horizontal máximo</b>               |                          |
| Altura da baixada                                                                       | h = 12,3 m                                      | Força de tensão durante o cc                                                  | $F_{t,d}$ = 3484 N       |
| Largura da baixada                                                                      | w = 5 m                                         | Deslocamento horizontal máximo                                                | $b_h$ = 1,85 m           |
| Distância entre suportes                                                                | l = 13,28 m                                     | Distância mínima no ar entre condutores (fase-fase) durante o cc              | $\hat{a}_{min}$ = 2,30 m |
| Comprimento do total do condutor da baixada                                             | $l_v$ = 14 m                                    | <b>Força de tensão estática</b>                                               |                          |
| Distância entre peças de conexão                                                        | $l_s$ = 13,28 m                                 | Componente horizontal causada por um subcondutor no ponto inferior da baixada | $H_s$ = 34 N             |
| Distância entre subcondutores                                                           | $a_s$ = 0,1 m                                   | Componente vertical causada por um subcondutor no ponto superior da baixada   | $V_s$ = 268 N            |
| <b>Parâmetros característicos para nº1</b>                                              |                                                 | Força de tensão estática média na baixada                                     | $F_{s,t}$ = 301 N        |
| Verificar se $1,4w < l_v < 3,3w$                                                        | Verificado                                      | <b>Força de tensão devida à contração</b>                                     |                          |
| Verificar se $l_v < 2l$                                                                 | Verificado                                      |                                                                               | $F_{pl,d}$ = 1861 N      |
| Verificar se $a_s/d \leq 2$ e $l_s \geq 50a_s$ e se $a_s/d \leq 2,5$ e $l_s \geq 70a_s$ | Não verificado                                  | <b>Força de tensão máxima</b>                                                 |                          |
| Força de cc entre subcondutores                                                         | $F_v$ = 46291 N                                 |                                                                               | $F_{max}$ = 3484 N       |
| Fatores de cálculo de $F_v$                                                             | $v_1$ = 0,643<br>$v_2$ = 2,105<br>$v_3$ = 0,483 | Força de ação do vento sobre o condutor                                       | $F_y$ = 14 N             |
| <b>Verificar se <math>F_{st}/nA_s \leq \sigma_{lin}</math></b>                          |                                                 | Força de ação do peso do próprio cabo                                         | $F_z$ = 268 N            |
| Módulo de Young real                                                                    | $E_{eff}$ = 1,86E+10 N/m²                       |                                                                               |                          |
| Norma de rigidez                                                                        | $N$ = 7,97E-07 N/m                              |                                                                               |                          |
| Fatores de deformação                                                                   | $est$ = 13,8<br>$epi$ = 2,08E+05                |                                                                               |                          |
| Parâmetro j                                                                             | $j$ = 118,43                                    |                                                                               |                          |
| Fator v4                                                                                | $v_4$ = 2,11                                    |                                                                               |                          |
| Parâmetro ve                                                                            | $ve$ = 1,30                                     |                                                                               |                          |
| Parâmetros $\xi$ e $\eta$                                                               | $\xi$ = 55,0<br>$\eta$ =                        |                                                                               |                          |

Figura 5.17: Cálculo dos esforços eletromecânicos da ligação

É de notar a precisão e rigor dos resultados obtidos sem que o utilizador tenha que intervir diretamente nos cálculos realizados. Todos os parâmetros que antes seria necessário ir consultar manualmente a gráficos da norma, são agora calculados automaticamente, reduzindo a probabilidade de erro humano, aumentando a precisão dos resultados e a velocidade com que se obtêm os mesmos. O resultado dos esforços eletromecânicos a introduzir na tabela de *Output* são os delimitados a verde na Figura 5.17.

## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalho Futuro

### 6.1 Conclusões

Nesta dissertação foi apresentado o processo de cálculo dos esforços eletromecânicos em ligações verticais e horizontais de uma subestação elétrica, com o objetivo final de criar e desenvolver uma ferramenta computacional que pudesse substituir a aplicação em *Excel* utilizada atualmente pelo *Grupo Quadrante* para o efeito.

Numa fase inicial foi apresentada uma síntese sobre subestações elétricas, onde se explica como é que estas instalações se inserem no Sistema Elétrico de Energia e quais os principais equipamentos que o constituem. Depois, foi apresentada a formalização do algoritmo de cálculo dos esforços eletromecânicos, com base nas normas IEC aplicáveis.

No Capítulo 4, foi descrita em pormenor uma aplicação computacional, criada de raiz e desenvolvida em *Excel*. O desenvolvimento desta ferramenta resultou da necessidade de melhorar o *software* de cálculo utilizado atualmente pelo *Grupo Quadrante*, tornando-o mais automático e mais simples de manusear por parte do utilizador. Na aplicação utilizada pela empresa, o utilizador tinha de introduzir manualmente os dados de entrada do sistema no início dos cálculos de cada ligação da subestação, uma vez que os esforços de cada ligação eram calculados em folhas de cálculo diferentes. Também não eram detalhadas todas as ligações inicialmente, sendo que este procedimento se mostrou pertinente, pois facilita a compreensão de como será constituída a subestação na sua totalidade. A introdução das bases de dados dos condutores na nova aplicação permite que o utilizador não tenha que introduzir as características de um cabo, por exemplo, sempre que o utilize numa ligação, como era realizado na folha de cálculo atualmente utilizada pelo *Grupo Quadrante*. Na folha de cálculo desenvolvida é definido inicialmente se cada ligação é vertical ou horizontal, facilitando o reencaminhamento do utilizador para o cálculo pretendido dependendo da posição de montagem da ligação em causa. Na aplicação com que a empresa trabalha existem duas folhas de cálculo diferentes (uma para ligações verticais e outra para ligações horizontais) e o utilizador tem de utilizar a que mais se adequa consoante a ligação. Este processo, para além de mais moroso, é pouco intuitivo do ponto de vista do utilizador e bastante propício ao erro humano.

A principal e mais notória diferença entre as duas ferramentas reside na facilidade com que o utilizador realiza os cálculos pretendidos. De facto, atualmente o projetista tem que analisar gráficos contidos na normativa aplicável, algo que, para além de demorar muito mais tempo, leva a erros nos resultados. Por fim, uma vez que na aplicação do *Grupo Quadrante* não existe uma folha de cálculo única com o projeto da subestação completa, os resultados dos esforços eletromecânicos não aparecem de forma automática na tabela de *Output*.

A ferramenta desenvolvida foi testada para um caso de estudo baseados num projeto do *Grupo Quadrante*, como forma de demonstrar as possibilidades de cálculo da aplicação e toda a sua dinâmica. Esta exemplificação permitiu verificar o rigor dos resultados obtidos e a rapidez com que estes são obtidos.

## 6.2 Trabalho Futuro

A criação da base de dados dos condutores foi, sem dúvida, uma enorme melhoria em relação à ferramenta já existente. Um objetivo futuro passará certamente por alargar esta base de dados, através da adição das características sobre diferentes condutores (cabos, tubos e barras). Este processo permitiria poupar tempo ao utilizador, pois eliminaria a necessidade de criação de novos condutores durante o processo de cálculo.

Por limitação de tempo, no decorrer do desenvolvimento da ferramenta computacional, não foi possível colocar a hipótese de cálculo dos esforços para ligações que utilizem o tubo ou a barra como condutor. Apesar do cabo ser o condutor mais utilizado em subestações, seria importante a melhoria da ferramenta neste aspeto. Não seria demasiado complexo fazer esta melhoria, sendo que a aplicação está pronta para que isto aconteça: as bases de dados de tubos e barras já existem, apenas falta a programação dos cálculos dos esforços.

Apesar de ser pouco comum nas subestações projetadas pela empresa, seria também importante a adição à ferramenta da possibilidade de resolução dos cálculos dos esforços em ligações horizontais com o número de subcondutores maior que 1 ( $n > 1$ ).

Por fim, seria importante existir a possibilidade de exportação de um relatório com os resultados dos cálculos realizados.

# Referências

- [1] Albino Marques. Subestações da rede nacional de transporte de eletricidade - topologias, tecnologias e fiabilidade. *REN*, 2014.
- [2] Jorge Pedro Lourenço Gonçalves. Estudo do projecto eléctrico de uma subestação elevadora. 2017.
- [3] Ana Catarina Fonseca Ramos. *Sistema de apoio à gestão da manutenção de subestações: estágio na EDP Distribuição*. Tese de doutoramento, 2015.
- [4] Filipe André Maduro Tavares. *Aplicação informática para dimensionamento de barramentos em subestações*. Tese de doutoramento, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2015.
- [5] José Rui Ferreira. Sistemas Eléctricos de Energia - Linhas de Transmissão. *FEUP - DEEC*, 2004.
- [6] IEC. 60865-2: 2015. *Short-circuit currents-Calculation of effects-Part, 2*.
- [7] TR IEC. 60865-1: 2011. *Short-circuit currents – Calculation of effects-Part, 1*.
- [8] Hélder Leite. Subestações: Arquitetura, tecnologia e equipamentos. 2018.
- [9] ERSE. Transporte. URL: <https://www.erse.pt/eletricidade/funcionamento/transporte/>.
- [10] REN. o setor eléctrico. URL: [https://www.ren.pt/pt-PT/o\\_que\\_fazemos/eletricidade/o\\_setor\\_eletrico](https://www.ren.pt/pt-PT/o_que_fazemos/eletricidade/o_setor_eletrico).
- [11] ERSE. Distribuição. URL: <https://www.erse.pt/eletricidade/funcionamento/distribuicao/>.
- [12] EDP Distribuição. Manual de ligações à rede eléctrica de serviço público. *Guia técnico e logístico de boas práticas*, 2018.
- [13] J. Eduardo Neves dos Santos. Redes de distribuição de energia (AT e MT) e postos de transformação: Noções gerais. DEEC/FEUP, 2016.
- [14] John D McDonald. *Electric power substations engineering*. CRC press, 2017.
- [15] F. Maciel Barbosa. Sobreensões de manobra. *FEUP*, 2015.
- [16] T. Tabke E. Pawlowski, M. Zdrallek e T. Marx. Gas-insulated substations (gis). URL: <https://electrical-engineering-portal.com/gas-insulated-substations-gis>.

- [17] TGOOD. Hybrid gas insulated switchgear. URL: <http://tgood.com/la/en/our-offer/hv-hybrid-gas-insulated-switchgear>.
- [18] Electrical4U. Electrical power transformer: Definition types of transformers. URL: <https://www.electrical4u.com/electrical-power-transformer-definition-and-types-of-transformer/>.
- [19] Ana Leonor Tavares Madureira. Análise dielétrica de um transformador de potência. 2014.
- [20] EDP Distribuição. Guia técnico - subestações de distribuição. URL: <https://paginas.fe.up.pt/~ee97153/>.
- [21] Artur Fernandes Costa. Transformadores elétricos. *FEUP - DEEC*, 2018.
- [22] Miguel Ângelo Semedo Folgado. *Subestações de tração e postos de catenária-engenharia*. Tese de doutoramento, Instituto Politécnico de Tomar, 2013.
- [23] ESTABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE ENERGIA. F. maciel barbosa. 2013.
- [24] Hélder Jorge Duarte Faria. *Cálculo de barramentos*. Tese de doutoramento, Universidade do Porto, 2009.
- [25] REN. Caracterização da rede nacional de transporte para efeitos de acesso à rede. 2019.
- [26] Carlos Moreira. Análise de Curto-Circuitos simétricos. RESEE/FEUP, 2009.
- [27] Aramis Tisott. Estudo do uso de barramentos rígidos em subestações. 2011.
- [28] José Pedro Carvalho Magalhães. Cabos de alta temperatura em linhas aéreas at-condições de falha térmica/mecânica. 2013.