



Cálculo de Esforços Eletrodinâmicos de Barramentos/Condutores Flexíveis

HUGO RICARDO DA SILVA MELO PEREIRA DE LIMA

Outubro de 2022

CÁLCULO DE ESFORÇOS ELETRODINÂMICOS DE BARRAMENTOS/CONDUTORES FLEXÍVEIS

Hugo Ricardo da Silva Melo Pereira de Lima



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2022

Relatório elaborado para satisfação dos requisitos da Unidade Curricular de TEDSEE –
Dissertação/Estágio do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de
Energia

Candidato: Hugo Ricardo da Silva Melo Pereira de Lima, Nº 1171428,
1171428@isep.ipp.pt

Orientação científica: Custódio João Pais Dias, cpd@isep.ipp.pt

Empresa: SISINT-Supervisão, Conservação, Manutenção e Gestão de Redes de Energia
Lda.

Supervisão: Pedro Marques Maio, PMM@sisint.pt e César Seixas, CBS@sisint.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia
2022

Queria dedicar esta trabalho à minha Namorada por me ajudar a ultrapassar todas as dificuldades encontradas ao longo do curso e me dar força para nunca desistir.

Agradecimentos

Concluída a realização desta dissertação, resta-me manifestar o mais sincero agradecimento a todos aqueles que, direta ou indiretamente, se revelaram imprescindíveis e de alguma forma contribuíram para a sua concretização.

Aos colaboradores da SISINT, pela oportunidade de realizar o projeto de criação de uma folha Excel para o cálculo de esforços eletrodinâmicos em condutores de uma subestação e em especial aos Engenheiros Pedro Maio e César Seixas, do departamento de automação e controlo, pela preocupação e disponibilidade diária, que tiveram para me ajudar a realizar este projeto de final de curso.

Ao Professor Doutor Custódio Dias, do Instituto Superior de Engenharia do Porto, por ter aceitado orientar esta dissertação, pelos conselhos, disponibilidade e preocupação demonstrada ao longo do seu desenvolvimento.

Aos meus familiares pela motivação constante, apoio incondicional e paciência demonstrados ao longo destes anos de curso.

Por fim, um agradecimento a todos os meus amigos e colegas de curso que me acompanharam e apoiaram ao longo deste percurso.

Resumo

A presente dissertação é realizada no âmbito do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica-Sistemas Elétricos de Energia, na empresa SISINT - Supervisão, Conservação, Manutenção e Gestão de Redes de Energia Lda, localizada em Grijó, Vila Nova de Gaia.

As subestações elétricas são instalações inseridas na rede de distribuição de energia, desempenhando um papel essencial na estrutura de um Sistema Elétrico de Energia.

Realizar o estudo de qual o melhor condutor a usar é uma tarefa bastante complexa, pesada e morosa, o que requer a análise de diversas grandezas, entre as quais os esforços estáticos e dinâmicos causados por eles, de forma a que fiquem corretamente dimensionados e permitam um funcionamento seguro de acordo com as normas que lhes são aplicáveis.

Para garantir a fiabilidade e segurança desejadas é importante a realização de um dimensionamento adequado das ligações elétricas, de uma forma rápida e o mais automatizada possível, permitindo aos clientes da empresa soluções mais económicas aos seus problemas. A existência de uma aplicação computacional que permita fazer o cálculo de esforços eletrodinâmicos de condutores rígidos e de condutores flexíveis, nas ligações elétricas da subestação é a solução ideal para este problema.

A solução adotada passa pela criação de uma aplicação computacional, desenvolvida em *Microsoft Excel*, capaz de verificar se os condutores a utilizar nas subestações cumprem as condições necessárias de funcionamento, se os esforços causados por eles são os menores possíveis. O desenvolvimento dessa aplicação encontra-se descrito ao longo da dissertação.

Nesta dissertação encontram-se descritas as principais características das subestações elétricas, nomeadamente como podem ser classificadas e alguns dos seus constituintes, os cálculos necessários para termos condutores corretamente dimensionados, sendo, também, detalhadas as características da aplicação computacional criada. No final, são realizados alguns casos de estudo e os resultados obtidos com a ajuda da aplicação.

Palavras-Chave

Subestações, condutores rígidos, condutores flexíveis, normas, *Microsoft Excel*, esforços estáticos, esforços dinâmicos.

Abstract

This dissertation is carried out in the scope of the Master in Electrical Engineering-Electrical Power Systems, in the company SISINT - Supervisão, Conservação, Manutenção e Gestão de Redes de Energia Lda, located in Grijó, Vila Nova de Gaia.

The electric substations are installations that are inserted in the energy distribution network, playing an essential role in the structure of an Electric Power System.

Performing the study of which is the best conductor to use, is a very complex, heavy and time consuming task, which requires the analysis of several quantities, including the static and dynamic efforts caused by them, so that they are correctly sized and allow a safe operation, according to the standards that apply to them.

To ensure the desired reliability and safety, it is important to perform a proper sizing of the electrical connections, in a fast and as automated way as possible, allowing the company's customers more economical solutions to their problems. The existence of a computational application that allows the calculation of electrodynamic efforts of rigid busbars, flexible conductors in the substation's electrical connections is the ideal solution to this problem.

The adopted solution involves the development of a computational application, developed in *Microsoft Excel*, capable of checking whether the conductors to be used in substations meet the necessary operating conditions and if the efforts caused by them are the lowest possible.

In this dissertation, the main characteristics of electrical substations are described, namely how they can be classified and some of their constituents, the calculations required to have conductors correctly sized, and the characteristics of the computational application created are also detailed.

At the end, some case studies and the results obtained with the help of the application are presented.

Keywords

Substations, rigid conductors, flexible conductors, norms, Microsoft Excel, static efforts, dynamic efforts.

Résumé

Le présent mémoire est réalisé dans le cadre du Master en Génie Électrique - Systèmes Électriques de Puissance, dans l'entreprise SISINT - Supervisão, Conservação, Manutenção e Gestão de Redes de Energia Lda, située à Grijó, Vila Nova de Gaia. Les sous-stations électriques sont des installations insérées dans le réseau de distribution d'énergie, jouant un rôle essentiel dans la structure d'un système électrique.

Réaliser l'étude du meilleur conducteur à utiliser est une tâche très complexe, lourde et longue, qui nécessite l'analyse de diverses grandeurs, y compris les efforts statiques et dynamiques qu'ils provoquent, afin qu'ils soient correctement dimensionnés et permettent un fonctionnement sûr, conformément aux normes qui leur sont applicables.

Pour garantir la fiabilité et la sécurité souhaitées, il est important d'effectuer le dimensionnement correct des connexions électriques, de manière rapide et aussi automatisée que possible, permettant ainsi aux clients de l'entreprise de trouver des solutions plus économiques à leurs problèmes. L'existence d'une application informatique permettant de calculer les efforts électrodynamiques des conducteurs rigides, des conducteurs flexibles les connexions électriques de la sous-station est la solution idéale à ce problème.

La solution adoptée consiste à développer une application de calcul, développée en Microsoft Excel, capable de vérifier que les conducteurs à utiliser dans les sous-stations remplissent les conditions de fonctionnement nécessaires et que les efforts qu'ils occasionnent sont les plus faibles possibles.

Dans cette thèse, les principales caractéristiques des sous-stations électriques sont décrites, à savoir comment elles peuvent être classées et certaines de leurs composantes, les calculs nécessaires pour avoir des conducteurs correctement dimensionnés, étant également détaillées les caractéristiques de l'application de calcul créée. A la fin, quelques études de cas et les résultats obtenus à l'aide de l'application sont présentés.

Mots-clés

Sous-stations, conducteurs rigides, conducteurs flexibles, normes, Microsoft Excel, efforts statiques, efforts dynamiques.

Índice

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| AGRADECIMENTOS..... | I |
| RESUMO | III |
| ABSTRACT | VI |
| ÍNDICE | XII |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | XV |
| ÍNDICE DE TABELAS | XX |
| SIGLAS E ACRÓNIMOS | XXIII |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO..... | 1 |
| 1.2.OBJETIVOS | 2 |
| 1.3.CALENDARIZAÇÃO | 2 |
| 1.4.ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO | 3 |
| 2. SUBESTAÇÕES..... | 4 |
| 2.1.CLASSIFICAÇÃO DE SUBESTAÇÕES | 5 |
| 2.2.EQUIPAMENTOS DAS SUBESTAÇÕES..... | 8 |
| 3. METODOLOGIA DE CÁLCULO..... | 17 |
| 3.1.DADOS DE ENTRADA E PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS | 17 |
| 3.2.ESCOLHA DO CONDUTOR..... | 20 |
| 3.3.CÁLCULO DOS ESFORÇOS ESTÁTICOS | 34 |
| 3.4.ESFORÇOS DINÂMICOS | 46 |
| 4. DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA DE CÁLCULO DE ESFORÇOS ELETRODINÂMICOS | 73 |
| 4.1.BOTÕES UTILIZADOS NA FERRAMENTA COMPUTACIONAL | 73 |
| 4.2.ARQUITETURA DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL | 75 |
| 4.3.FUNCIONALIDADES DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL | 76 |
| 5. CASO DE ESTUDO E ANÁLISE DE RESULTADOS | 94 |
| 5.1.ECRÃ DE ABERTURA | 94 |
| 5.2.ECRÃ DADOS DE ENTRADA | 95 |
| 5.3.ECRÃ DETALHES DA LIGAÇÃO E ESCOLHA DO CONDUTOR | 96 |
| 5.4.ECRÃ SUMÁRIO..... | 99 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.5.CÁLCULO ESFORÇOS PARA UM CONDUTOR RÍGIDO | 100 |
| 5.6.CÁLCULO DE ESFORÇOS PARA UM CONDUTOR FLEXÍVEL COM DISPOSIÇÃO HORIZONTAL | 105 |
| 6. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO | 111 |
| 6.1.CONCLUSÕES | 111 |
| 6.2.TRABALHOS FUTUROS | 112 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 113 |
| ANEXO A. RELATÓRIO CÁLCULO ESFORÇOS ELETRODINÂMICOS EM CONDUTORES RÍGIDOS..... | 116 |
| ANEXO B. RELATÓRIO CÁLCULO ESFORÇOS ELETRODINÂMICOS EM CONDUTORES FLEXÍVEIS HORIZONTAIS..... | 122 |

Índice de Figuras

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Esquema Simplificado da Rede Primária [4] | 5 |
| Figura 2 - Transformador de potência | 10 |
| Figura 3 - Transformador de Intensidade de Corrente [8] | 10 |
| Figura 4 - Transformador de Tensão [8] | 11 |
| Figura 5 - Seccionador de linha (a) e Seccionador de terra (b)[1] | 12 |
| Figura 6 - Esquema de barramento simples (a), Esquema de barramento simples seccionado(b), Esquema de barramento duplo(c)[1] | 15 |
| Figura 7 - Fator k em função de X/R [13] | 21 |
| Figura 8 - Fator m [13] | 25 |
| Figura 9 - Fator n [13] | 26 |
| Figura 10 - Efeito coroa [21] | 31 |
| Figura 11 – Coeficiente Cf , 0 para cilindros circulares sem fluxo de extremidade livre e para diferentes relações k/b [15] | 39 |
| Figura 12 - Definição do rácio de solidão [15] | 41 |
| Figura 13 - Valores do fator de efeito final $\psi\lambda$ [15] | 41 |
| Figura 14 - Troço de subestação sujeita a maiores esforços [11] | 42 |
| Figura 15 – Fator $V\sigma m$ a usar em curto-circuito trifásicos [12] | 49 |
| Figura 16 - Fator $Vr m$ a usar em curto-circuito trifásicos [12] | 49 |
| Figura 17 - Fator VF a usar em curto-circuito trifásicos [12] | 51 |
| Figura 18 - Valores do ângulo máximo de oscilação δ_{max} [12] | 58 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 19 - Fator relativo à força de tração em condutores flexíveis [12] | 59 |
| Figura 20 - V_2 em função de V_1 [12] | 64 |
| Figura 21 - $V_3 \cdot \text{sen}180^\circ n$ em função de asd [12] | 65 |
| Figura 22 - ξ em função de ϵst [12] | 67 |
| Figura 23 - η , se $2,5 < asd \leq 5,0$ [12] | 69 |
| Figura 24 - η , se $5,0 < a_s/d \leq 10,0$ [12] | 69 |
| Figura 25 - η , se $10,0 < a_s/d \leq 15,0$ [12] | 70 |
| Figura 26 - Configuração em downdropper [12] | 71 |
| Figura 27 - Algoritmo utilizado na ferramenta computacional | 75 |
| Figura 28 - Ecrã ABERTURA | 76 |
| Figura 29 - Ecrã DADOS DE ENTRADA | 77 |
| Figura 30 - Ecrã de DETALHES DA LIGAÇÃO | 78 |
| Figura 31 - Ecrã ESCOLHA DO CONDUTOR | 79 |
| Figura 32 - Ecrã SUMÁRIO | 82 |
| Figura 33 - Ecrãs VERIFICAÇÃO CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO CONDUTOR | 83 |
| Figura 34 - Ecrã ESFORÇOS ESTÁTICOS PORTUGAL | 84 |
| Figura 35 - Ecrã ESFORÇOS ESTÁTICOS INGLATERRA | 85 |
| Figura 36 - Ecrã ESFORÇOS DINÂMICOS CONDUTORES RÍGIDOS | 86 |
| Figura 37 - Ecrã ESFORÇOS DINÂMICOS CONDUTORES FLEXÍVEIS VERTICAIS- DOWNDROPPER | 87 |
| Figura 38 - Ecrã ESFORÇOS DINÂMICOS CONDUTORES FLEXÍVEIS HORIZONTAL | |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 39-Ecrã ESFORÇOS DINÂMICOS CONDUTORES FLEXÍVEIS HORIZONTAL(Continuação) | 89 |
| Figura 40 - Ecrã ESFORÇOS DINÂMICOS CONDUTORES FLEXÍVEIS VERTICAL- FEIXE90 | |
| Figura 41 - Ecrã ESFORÇOS DINÂMICOS CONDUTORES FLEXÍVEIS VERTICAL- FEIXE (Continuação) | 91 |
| Figura 42 - Excerto do relatório (Folha 1) | 92 |
| Figura 43 - Excerto do relatório (folha2) | 93 |
| Figura 44 - Ecrã de abertura | 94 |
| Figura 45 - Ecrã DADOS DE ENTRADA para o caso de estudo de um condutor rígido95 | |
| Figura 46 - Ecrã DADOS DE ENTRADA para o caso de estudo de um condutor flexível com disposição horizontal | 96 |
| Figura 48 - Ecrã DETALHES DA LIGAÇÃO para o caso de estudo de um conduto flexível com disposição horizontal | 97 |
| Figura 47 - Ecrã DETALHES DA LIGAÇÃO para o caso de estudo de um condutor rígido 97 | |
| Figura 49 - Ecrã ESCOLHA DO CONDUTOR para o caso de estudo de um condutor rígido 98 | |
| Figura 50 - Ecrã ESCOLHA DO CONDUTOR para o caso de estudo de um condutor flexível com disposição horizontal | 98 |
| Figura 51 - Ecrã SUMÁRIO para um caso de estudo de um condutor rígido | 99 |
| Figura 52 -Ecrã SUMÁRIO para um caso de estudo de um condutor flexível com disposição horizontal | 100 |
| Figura 53 – Ecrã VERIFICAÇÃO CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO CONDUTOR101 | |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 54– Ecrã VERIFICAÇÃO CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO CONDUTOR(Continuação) | 102 |
| Figura 55 - Ecrã ESFORÇOS ESTÁTICOS | 103 |
| Figura 56 – Ecrã ESFORÇOS DINÂMICOS CONDUTORES RÍGIDOS | 104 |
| Figura 57 - Ecrã VERIFICAÇÃO CONDIÇÕES UTILIZAÇÃO DO CONDUTOR | 106 |
| Figura 58 - Ecrã ESFORÇOS ESTÁTICOS | 107 |
| Figura 59 - Ecrã ESFORÇOS DINÂMICOS CONDUTORES FLEXÍVEIS HORZONTAL 108 | |
| Figura 60 – Ecrã ESFORÇOS DINÂMICOS CONDUTORES FLEXÍVEIS HORZONTAL(Continuação) | 109 |

Índice de Tabelas

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Calendarização do projeto | 3 |
| Tabela 2 – Características gerais subestação | 18 |
| Tabela 3 - Característicos gerais sistema | 18 |
| Tabela 4 - Dados constantes Portugal | 19 |
| Tabela 5 - Dados Constantes Inglaterra | 19 |
| Tabela 6 - Valores de W e J de acordo com o tipo de barramento usado [19] | 23 |
| Tabela 7 - Valor de α | 29 |
| Tabela 8 - Módulo de Young [17] | 29 |
| Tabela 9 - Valores de m_0 [21] | 33 |
| Tabela 10 - Categorias de terrenos e os seus parâmetros [15] | 36 |
| Tabela 11 - Valores de k [15] | 39 |
| Tabela 12 - Valores recomendados de λ para cilindros, secções poligonais, secções retangulares [15] | 40 |
| Tabela 13 - Valores de ρ_g [16] | 43 |
| Tabela 14 - Valores do coeficiente de forma [14] | 45 |
| Tabela 15 - Valores de pressão dinâmica do vento [14] | 46 |
| Tabela 16 – Fatores α, β e γ para diferentes disposições de aboios de barramentos [12] | 48 |
| Tabela 17 Valor do fator $V\sigma m$ [12] | 50 |
| Tabela 18 Valor do fator $Vr m$ [12] | 50 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 19 - Valores de VF [12] | 51 |
| Tabela 20 - Botões utilizados na ferramenta e suas respectivas funções | 74 |

Siglas e Acrónimos

| | | |
|-----------------|---|--------------------------------------------------------------------|
| AT | – | Alta Tensão |
| BT | – | Baixa Tensão |
| CC | – | Curto-Circuito |
| DST | – | Descarregadores de Sobretensões |
| $F_{t,d}$ | – | Força de tração estática num condutor principal |
| $F_{f,d}$ | – | Força de tração de queda |
| $F_{pi,d}$ | – | Força de Pinch |
| Hz | – | Hertz |
| Ich | – | Corrente de Choque |
| ISEP | – | Instituto Superior Engenharia do Porto |
| M_f | – | Momento Fletor |
| MAT | – | Muita Alta Tensão |
| MEE-SEE | – | Mestrado em Engenharia Eletrotécnica-Sistemas Elétricos de Energia |
| PT | – | Posto de Transformação |
| R | – | Resistência |
| SF ₆ | – | Hexafluoreto de Enxofre |
| TIR | – | Tensão Transitória de Restabelecimento |
| TI | – | Transformador de Intensidade de Corrente |

- TP – Transformador de Potência
- TT – Transformador de Tensão
- VBA – *Visual Basic for Applications*
- W – Módulo de Flexão
- X – Reatância

1. INTRODUÇÃO

Este documento é desenvolvido no âmbito da unidade curricular de Dissertação/Estágio, do 2º ano do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia (MEE-SEE), do Departamento de Engenharia Eletrotécnica, do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Este regista o desenvolvimento do trabalho, incluindo pesquisas bibliográficas relativamente ao funcionamento base de uma subestação, os tipos, os seus componentes, os processos de cálculo necessários para o dimensionamento de condutores elétricos presentes numa subestação, bem como o processo de desenvolvimento e estudo da aplicação computacional criada. Nesta secção é apresentada uma contextualização do projeto que se pretendia desenvolver, a calendarização do projeto e os seus objetivos, bem como uma apresentação da estrutura deste documento.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Durante o trajeto desde uma central elétrica até ao consumidor final, a energia passa por várias instalações elétricas, em que a sua tensão vai aumentando e diminuindo. Este processo é realizado nas chamadas subestações. As subestações são constituídas por vários componentes tais como: reatâncias, disjuntores, seccionadores, barramentos, condutores flexíveis ou tendidos e transformadores, que podem ser abaixadores ou elevadores de tensão.

Este projeto surgiu por meio da SISINT, uma empresa de engenharia que desenvolve a sua atividade nas áreas da energia, gestão técnica de edifícios e transportes, que propôs um estágio para a realização da dissertação de mestrado ao diretor do curso de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica- Sistemas Elétricos de Energia. Sendo uma empresa em que as principais competências são a área do projeto de instalações elétricas, nomeadamente de subestações até 400kV, tratando-se de uma área de elevado interesse para mim, decidiu-se avançar com o estágio na área do dimensionamento de condutores rígidos e condutores flexíveis de uma subestação.

Este projeto engloba os vários processos que têm de existir até termos um barramento, ou vários condutores, corretamente dimensionados, de acordo com as normas que lhe são aplicáveis, que permitam oferecer aos clientes da empresa respostas o mais económicas e eficientes possível.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho de dissertação é adquirir conhecimentos sobre o cálculo de esforços eletrodinâmicos sobre condutores rígidos e flexíveis. Dada a complexidade inerente a este projeto, pode dizer-se que primeiramente para desenvolver um trabalho nesta área é necessário:

- Fazer um levantamento e um estudo das normas aplicáveis;
- Analisar soluções implementadas em projetos anteriores.

Para além disto, é necessário desenvolver, posteriormente:

- Uma ferramenta em Microsoft Excel que calcule os esforços eletrodinâmicos em todos os condutores numa subestação, seja em condutores rígidos ou flexíveis.

1.3. CALENDARIZAÇÃO

A calendarização do trabalho a realizar na dissertação é apresentada na tabela 1 que inclui um conjunto de tarefas, das quais se destaca:

- Análise dos documentos Excel que a SISINT utiliza no dimensionamento de condutores rígidos ou condutores flexíveis;

2. SUBESTAÇÕES

Os centros produtores de energia podem não ter a sua localização perto dos centros consumidores, por isso, para se poder efetuar o transporte de energia elétrica com a devida qualidade e de forma mais rentável, é necessário que a sua tensão seja elevada e, então, transportada em linhas de Alta Tensão (AT) ou Média Tensão (MT). Caso as centrais estejam perto desses centros o valor de tensão é baixado, por exemplo para AT ou MT, para que possa integrar a rede de distribuição de energia elétrica. Este trabalho de regulação dos níveis de tensão para transporte de energia é assegurado pelas subestações [1].

As subestações são instalações de AT destinadas a modificar algumas das características da energia elétrica, nomeadamente tensão e corrente, através de transformadores estáticos, o que permite a sua distribuição aos diversos pontos de consumo a níveis adequados. Estas subestações podem alimentar Postos de Transformação (PT) ou até mesmo outras subestações [2]. São constituídas essencialmente pelo parque de aparelhagem exterior, pelo edifício de comando e pela rede de terras. O parque exterior é formado por diversos equipamentos de manobra, transformação, proteção e monitorização, ao passo que o edifício de comando da subestação é onde está incorporado todo o equipamento de comando e controlo.

As subestações podem ser classificadas conforme a função a desempenhar, de acordo com a sua instalação, nível de tensão e operação. Existem subestações que permitem fazer a conversão de Muita Alta Tensão (MAT) para MAT, de MAT para AT e ainda de AT para MT. As Subestações MAT/MAT e MAT/AT não estão incorporadas nas centrais elétricas, estão incorporadas na Rede de Transporte de Energia, mais propriamente na rede primária, ao passo que as subestações AT/MT integram a Rede de Distribuição de Energia[3][4].

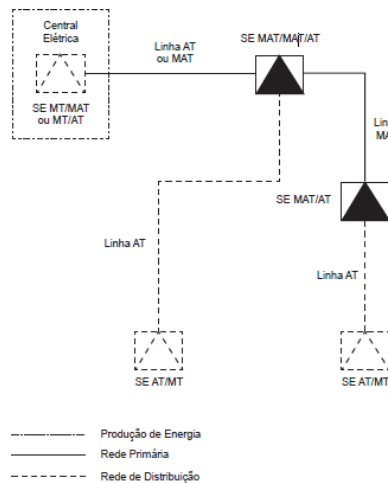


Figura 1 - Esquema Simplificado da Rede Primária [4]

2.1. CLASSIFICAÇÃO DE SUBESTAÇÕES

A rede elétrica é constituída por uma imensidão de equipamentos, dos quais as subestações são uma parte muito importante. Estas podem ser classificadas de várias formas, dependendo das suas funções, instalação, níveis de tensão e modo de operação.

2.1.1. CLASSIFICAÇÃO QUANTO À SUA FUNÇÃO

Quanto à sua função, as subestações podem ser transformadoras, seccionadoras, conversoras ou compensadoras.

As subestações transformadoras são aquelas em que a tensão de suprimento é alterada para um nível diferente, podendo este ser maior ou menor que o inicial. No caso de o segundo valor de tensão ser maior estaremos perante uma subestação elevadora, caso contrário teremos uma subestação abaixadora. Estas podem ser usadas tanto na etapa da produção de energia, como na do transporte, ou ainda, na da distribuição de energia elétrica. Na produção, são usadas maioritariamente as subestações do tipo elevadora, que estabelecem a ligação entre as máquinas geradoras e as linhas de alta tensão e encontram-se próximas da central

produtora. No transporte são utilizadas subestações abaixadoras de interligação ou repartição. Estas interligam as linhas de AT/MAT de uma rede de transporte de energia de forma direta (se as linhas forem da mesma tensão), ou através de transformadores (se forem de tensões diferentes) e, para além disto, efetuam a ligação entre as linhas de transporte e as linhas de AT de uma rede geral de distribuição. Na distribuição, também podemos ver subestações do tipo abaixadora, que estabelecem a ligação entre a rede de AT e as linhas de distribuição em MT, que alimentam os PT. Estas subestações abaixadoras são normalmente instaladas na periferia dos centros urbanos para evitar que as linhas de transmissão de tensões elevadas sejam construídas no espaço urbano, o que pode gerar transtornos à população e limitar o uso do solo. Para além disto, estas subestações encontram-se no final de um sistema de transmissão, próximos do centro de carga, ou de fornecimento a uma indústria [2][3][5][6].

A subestação seccionadora é aquela que interliga circuitos de suprimento sob o mesmo nível de tensão, o que possibilita a sua multiplicação. É, também, adotada para possibilitar o seccionamento de circuitos, permitindo a sua energização em trechos sucessivos de menor comprimento e ,também, aquela que se destina a realizar o chaveamento das linhas de transmissão [3][5][6].

A subestação do tipo conversora tem como função realizar a transformação de corrente através de retificadores. Normalmente pertence ao sistema de corrente contínua e faz a conversão de corrente contínua para alternada e vice-versa [2][6].

A subestação do tipo compensadora tem este nome por fazer exatamente a função de compensação de fator de potência [2].

2.1.2. CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO TIPO DE INSTALAÇÃO

Quanto ao tipo de instalação, as subestações podem ser: a céu aberto, interiores ou blindadas.

As subestações a céu aberto, são construídas em locais amplos ao ar livre e requerem aparelhos e máquinas próprias para funcionamento em condições atmosféricas adversas como com a chuva, vento, poluição, entre outros. Estas condições provocam o desgaste dos componentes da subestação, exigindo, por isso, uma manutenção mais frequente e, conseqüentemente, reduzem a eficácia do isolamento [3][5][7].

As subestações interiores são aquelas em que os equipamentos são instalados ao abrigo das condições climáticas, no interior de construções, não estando, por isso, sujeitos a intempéries como as subestações a céu aberto. Estas subestações servem, também, para instalações de corte e seccionamento para sistemas de AT e MT [5][7].

As subestações blindadas são construídas em locais abrigados, sendo os equipamentos instalados no interior de cubículos metálicos. Contudo se o grau de proteção deste cubículo for elevado, estas subestações podem ser instaladas ao tempo ou, então, somente em ambientes protegidos. Estas subestação encontram-se completamente protegidas e isoladas em óleo, com material sólido, ou em gás (ar comprimido ou hexafluoreto de enxofre (SF₆)). As subestações blindadas são bastante usadas em centros urbanos e em sistemas de AT e MT. Uma das maiores vantagens, em relação a outro tipo de instalação, é o facto de poder haver uma redução do espaço utilizado por ela, uma vez que apresenta um isolamento eficiente. Para além desta vantagem, apresenta uma baixa manutenção e uma operação em segurança. Em contrapartida, também apresenta algumas desvantagens, das quais se destacam a necessidade de pessoal com um treino especializado e as operações de manobra não poderem ser visualizadas, uma vez que podem ser supervisionadas apenas por indicadores luminosos [5][6][7].

2.1.3. CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO NÍVEL DE TENSÃO

Quanto ao nível de tensão existem subestações de alta tensão (AT), que têm tensão nominal abaixo de 230 kV, e existem ainda subestações de muita alta tensão (MAT), que tem tensão nominal acima de 230 kV. É importante enfatizar que em subestações deste tipo são necessários estudos complementares considerando o efeito Coroa [5].

2.1.4. CLASSIFICAÇÃO QUANTO À FORMA DE OPERAÇÃO

Relativamente ao modo de operação das subestações, elas podem ser de três tipos: as que têm operador, as semi-automática e as automatizadas.

As subestações com operador exigem um alto nível de treino do pessoal. O uso de computadores na supervisão e operação local só se justifica em instalações de grandes dimensões. Hoje em dia, este sistema está a cair em desuso e está-se aos poucos a migrar para sistemas com tecnologias mais avançadas de operação automática, semi-automática ou supervisionada [5][6].

As subestações semi-automáticas, possuem computadores locais ou encravamentos eletromecânicos que impedem operações indevidas por parte do operador local. Estas possuem um sistema digital capaz de acionar equipamentos, registar informações de grandezas elétricas, e está em contacto em tempo real com um centro de operação do sistema que controla, comanda e supervisiona toda a subestação [5][6].

2.2. EQUIPAMENTOS DAS SUBESTAÇÕES

O processo de alteração dos diferentes níveis de tensão do sistema elétrico de energia, desde a central de produção até aos consumidores finais de energia elétrica, é um processo bastante complexo e, para isso, as subestações contam com um conjunto de equipamentos capazes de elevar ou baixar a tensão elétrica, para que esta chegue às nossas casas com a devida qualidade e segurança. De uma forma geral, os equipamentos que constituem uma subestação são: os transformadores, seccionadores, disjuntores, descarregadores de sobretensões, reactâncias, barramentos, entre outros [1][8][9].

2.2.1. TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Um Transformador de Potência (TP) é um equipamento elétrico com a capacidade de transmitir energia elétrica de um circuito para outro, transformando tensões e correntes, aumentando ou diminuindo os seus valores, num circuito de corrente alternada, sem que haja alteração dos valores de frequência [1][9]. Este é um equipamento fundamental do ponto de vista técnico e económico, pois possibilita a flexibilidade da tensão, podendo regulá-la para o valor que se pretenda [9]. Trata-se do equipamento mais caro na subestação, mas em contrapartida tem um elevado rendimento e possuem dimensões consideráveis, que aumentam com o aumento do valor da tensão [8].

Os transformadores de potência podem ser classificados de acordo com a sua forma construtiva, bem como de acordo com número de fases, tipo de ligação e quanto ao seu isolante. Quanto ao número de fases estes podem ser monofásicos, bifásicos ou trifásicos. Quanto ao tipo de ligação estes podem ser conectados em triângulo, estrela e zigzag, sendo que a sua forma depende da aplicação do transformador. Quanto ao isolante, eles podem ser isolados com um líquido isolante, como óleo mineral, silicone ou ascarel ou, então, o transformador pode ser seco [9].

O transformador de potência é constituído por diferentes partes: pelo núcleo, geralmente de material ferromagnético; enrolamentos formados por várias bobinas, que permitem a passagem de cabos para a parte interior do transformador; comutadores que são enrolamentos especiais com derivações destinado a mudar a relação de transformação do transformador adaptando-o a possíveis regimes de carga que se venham a verificar; tanque de expansão que tem como principal função evitar que o transformador sofra excesso de pressão e que funciona em conjunto com um sistema de refrigeração, importante para a operação e vida útil do transformador; e, ainda, um relé Buchholz que protege o transformador contra falhas que provoquem a diminuição do nível de óleo, visíveis no indicador de óleo do transformador [8][9]. Estes relés encontram-se normalmente no exterior da subestação [1].

O modo de funcionamento do transformador de potência é simples. Basicamente, existem dois ou mais enrolamentos que estão construídos de maneira que eles estejam ligados pelo mesmo fluxo magnético. Quando o circuito primário é percorrido por uma corrente alternada, ocorre uma alteração no fluxo magnético desse circuito e também no enrolamento secundário. Este enrolamento é montado de forma a encontrar sob a influência direta do campo magnético estabelecido no circuito primário. Com isso, a variação no fluxo magnético da bobina secundária induz tensão elétrica na própria bobina secundária. Por fim com a indução magnética, uma corrente num enrolamento faz com que surja corrente, também, no outro enrolamento, sendo a magnitude da tensão e da corrente obtidas através da relação de espiras entre os enrolamentos dos transformadores [9].



Figura 2 - Transformador de potência

2.2.2. TRANSFORMADORES DE INTENSIDADE DE CORRENTE

Os Transformadores de Intensidade de Corrente (TI) destinam-se a transformar valores elevados de corrente em valores adequados a serem registados pelos equipamentos de medida, como contadores de energia, relés de proteção entre outros equipamentos [1][8].

Estes equipamentos são interessantes na medida em que com eles podemos economizar e standardizar aparelhagem de medida e cumprir com as exigências de segurança impostas pelas subestações.

É com a conversão eletromagnética que os TI transformam elevadas correntes, que circulam no primário e criam fluxo magnético, em pequenas correntes secundárias de acordo com a sua relação de transformação. Este facto, possibilita o uso de dispositivos capazes de monitorizar elevadas correntes de primário [1][9].

Quando se for escolher qual o TI a utilizar devem ser tidos em conta alguns aspetos como: a tensão nominal primária, a corrente nominal primária, a corrente nominal secundária, a classe de precisão e a potência nominal [1].



Figura 3 - Transformador de Intensidade de Corrente [8]

2.2.3. TRANSFORMADORES DE TENSÃO

Os Transformadores de Tensão [TT], são muito semelhantes aos TI, pois fazem o mesmo que os TI, mas com tensão, ou seja, eles efetuam a transformação de tensão do primário para uma tensão mais baixa no enrolamento secundário, possibilitando o uso de dispositivos de monitorização das elevadas tensões existentes no primário [1].

Um dos principais problemas destes transformadores é o facto de poder ocorrer o chamado fenómeno de ferroressonância. Este pode ocorrer quando há interação entre uma indutância não linear, adicionada de uma capacidade, com um núcleo magnético saturável alimentado por uma fonte sinusoidal. A ferroressonância pode proporcionar sobretensões de 4 a 5 vezes o valor nominal num TT indutivo, podendo danificar o seu isolamento, provocando avaria. Este fenómeno pode ser causado por descargas atmosféricas, manobras de disjuntores, energização ou desenergização de transformadores ou cargas. Os TT indutivos contribuem para a ferroressonância, mas, em contrapartida, são indispensáveis nos painéis equipados com proteções rápidas, que necessitam de uma imagem correta da tensão no início do curto-circuito. Os TT do tipo capacitivo 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 [8].



Figura 4 - Transformador de Tensão [8]

2.2.4. SECCIONADORES

Um seccionador é um aparelho elétrico que não tem poder de corte em carga e cuja função é interromper ou estabelecer a continuidade de um circuito [8]. Há dois tipos de seccionadores, os chamados de linha e os de terra, funcionando mesmo quando a subestação em que se inserem está em manutenção. Os seccionadores de linha dão maior segurança à equipa que realiza a manutenção, uma vez que a separação dos contactos acontece visivelmente do local onde se fazem manobras. Estes podem ser de duas ou três colunas rotativas, podendo ter abertura central ou dupla lateral de polos separados, sendo comandados de forma manual ou com motor. Os seccionadores de terra são idênticos aos de linha, permitindo, para além de interromper o circuito, ter como funcionalidade ligar a linha à rede de terra, de forma a prevenir acidentes caso passe corrente. Estes equipamentos são de extrema importância no contexto de uma subestação e têm características que obrigam a que a sua ação, fecho ou de abertura, ocorra de forma temporizada, de maneira 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 fechados [1][8].



Figura 5 - Seccionador de linha (a) e Seccionador de terra (b)[1]

2.2.5. DISJUNTORES

Os disjuntores são aparelhos elétricos de manobra, que permitem realizar a interrupção e o restabelecimento de corrente elétrica de forma automática na ocorrência de um defeito num circuito elétrico, protegendo os equipamentos da subestação de correntes e tensão de valor elevado [1][8][9]. Ao serem detetados curto-circuitos ou sobrecargas, os contactos do disjuntor abrem de forma a proteger a instalação a jusante deste.

Esta separação dos contactos irá provocar um arco elétrico e, de forma a evitar as perigosas consequências da formação do arco, os contactos estão situados numa chamada câmara de corte, que é preenchida com um gás dielétrico, que possibilita a rápida extinção do arco e o arrefecimento da temperatura [1].

Após a passagem de energia ser interrompida e o problema resolvido, segue-se a reposição do serviço, podendo esta reposição ser manual ou motorizada [1]. Estes equipamentos são, tal como os transformadores de potência, muito importantes para manter a segurança numa subestação, já que são essenciais para a comutação e proteção do Sistema Elétrico de Energia. Quando tem de intervir na subestação, estes atuam de forma instantânea, mesmo estando durante muito tempo na posição de fechado ou aberto. Por isso, a velocidade de abertura ou fecho tem de ser um parâmetro a ter em conta na escolha de um disjuntor [8].

Estes aparelhos, na sua função de proteção são comandados por relés. Estes relés são responsáveis pela deteção de correntes elétricas e que tomam a decisão se o disjuntor deve atuar, ou não. Sem estes relés de proteção, os disjuntores não possuíam características de proteção, tornando-se apenas equipamentos de manobra [8][9].

Os disjuntores podem ser classificados de diferentes formas no que respeita ao mecanismo de acionamento, à construção de polos e dos meios de interrupção do arco.

2.2.6. DESCARREGADORES DE SOBRETENSÕES

Os descarregadores de sobretensões (DST) são uma das várias proteções que podem existir numa subestação. Atuam quando ocorre uma sobretensão, descarregando o elevado valor de corrente gerada para o circuito de terras, evitando, assim, a ocorrência de danos nos equipamentos. Alguns valores de sobretensão podem não dar origem a entrada em funcionamento do descarregador, desde que os valores de tensão se mantenham abaixo dos níveis máximos de isolamento suportados pelo equipamento [1].

2.2.7. REATÂNCIAS LIMITADORAS

A principal função das reactâncias limitadoras é controlar a intensidade das correntes de curto-circuito. Tratam-se de equipamentos cujos elementos de construção são semelhantes aos transformadores, possuindo vários enrolamentos e têm a possibilidade de serem imersos em óleo ou com isolamento seco [1].

Estes equipamentos podem ser de duas categorias, ou série ou shunt. As reactâncias série, se forem aplicadas em pontos específicos da rede elétrica são fundamentais para baixar uma corrente originada por um defeito. As vantagens destes dispositivos podem ser diversas, com destaque para a económica que, se dimensionada corretamente, permitem que o custo da subestação diminua, podendo investir-se em outros aparelhos de maior importância de maior qualidade. No entanto e como desvantagem, causam o aumento da necessidade de regulação do sistema elétrico, particularmente nos casos de a alimentação de cargas com fatores de potência baixos. As reactâncias do tipo shunt utilizam-se, maioritariamente, em situações em que é necessário compensar correntes capacitivas bastante elevadas através da introdução de correntes em atraso, podendo usar-se controladores de tensão de modo a absorver energia capacitiva da rede, dependendo do comprimento da linha [1].

2.2.8. ISOLADORES

Os isoladores desempenham um grande papel numa subestação, que é o de impedir a passagem à terra de fluxo indesejado de corrente através dos pontos de apoio da instalação, evitando, assim, um curto-circuito. Os isoladores podem ser revestidos de várias formas, dependendo do fim a que se destinam. O material de que são feitos têm de garantir algumas propriedades, entre as quais se destacam, a robustez mecânica para suportar o peso e tensão mecânica dos condutores, a elevada resistência elétrica para permitir suportar elevados valores de tensão elétrica, a resistência do isolamento para evitar fugas de corrente para a terra. Realça-se que o material não deve conter impurezas e o isolador não pode ser poroso. Em ambientes interiores são usados isoladores de porcelana, ou de matérias epóxidos, e ao ar livre de porcelana ou vidro. Os isoladores podem ser de suporte ou de cadeia, sendo os de suporte que sustentam os condutores dos barramentos e os em cadeia são usados em séries de amarração, tendo como vantagem permitir qualquer distância de contornamento que se pretenda, com o recurso a um número conveniente de unidades montadas umas a seguir às outras [8].

2.2.9. BARRAMENTOS

Os barramentos são constituídos por vários condutores, que podem ser do tipo rígidos, se forem barras ou de tubos, ou, então, flexíveis como os cabos. Estes barramentos efetuam a interligação entre os diversos aparelhos da subestação e servem para fazer distribuição, ou seja, são pontos a partir dos quais os circuitos divergem. O seu dimensionamento deverá ter em conta algumas variáveis tais como: corrente de serviço contínuo, aquecimentos máximos, esforços eletromecânicos, que serão detalhados no próximo capítulo [1].

Existem vários tipos de configurações para os barramentos de uma subestação, por forma a apresentem sempre a maior fiabilidade e flexibilidade possíveis, enquanto respeitam os requisitos do sistema e minimizam os custos de investimento [8]. Podemos ter barramento duplo ou em anel, que são os mais importantes e, derivada da configuração em barramento duplo, podemos ter ligação em “U”, com bypass, com disjuntores, ou outros[1].

A configuração simples, tem apenas um barramento, sendo adequado a instalações de pequenas dimensões. É uma solução mais económica e pouco complexa, apresentando como desvantagem o facto de se ter de interromper todo o circuito caso se tenham de efetuar manutenções. A configuração simples seccionada é semelhante à simples, mas tem um seccionador que divide o barramento em duas partes, o que permite interromper apenas uma fração do circuito quando necessário. Os barramentos duplos são a configuração mais usada em subestações, sobretudo em subestações de grandes dimensões, por ser a que consegue dar mais flexibilidade e segurança à instalação, permitindo a realização de manutenção sem ter de desligar o circuito, possibilitando realizar diversas operações ao mesmo tempo [1].

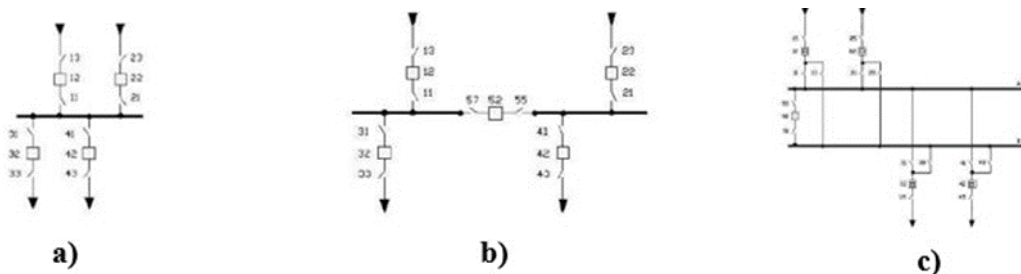


Figura 6 - Esquema de barramento simples (a), Esquema de barramento simples seccionado(b), Esquema de barramento duplo(c)[1]

2.2.10. CONDUTORES

Os condutores elétricos são os elementos das subestações responsáveis por realizar o transporte de energia elétrica de equipamento para equipamento e entre vários pontos, podendo apresentar-se em cobre, alumínio ou em ligas metálicas [1].

O cobre tem origem em matérias sulfurosos e é purificado através de processos eletrolíticos. É um material bastante dúctil, o que possibilita a aquisição de fios bastante finos e é maleável, o que implica algumas limitações, sobretudo devido ao endurecimento a que é exposto durante o seu fabrico[10][1]. Já o alumínio tem na sua constituição uma película de óxido chamada Alumina, que em contacto com o ar protege o metal da possível corrosão, apresenta baixa resistência mecânica e, também, grande ductilidade e maleabilidade [10][1].

O cobre é um excelente condutor elétrico face, aos condutores de alumínio, pois possui uma resistência mais baixa, cerca de $17,241 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$, sendo por isso, muito utilizado em instalações domésticas e urbanas. Já o alumínio como resiste de forma mais eficaz à deformação e tem metade do peso do cobre é muito utilizado em redes de transmissão [10].

Os condutores podem ser de dois tipos de configurações: condutor nu - sem qualquer isolamento, ou isolado, com alma condutora - revestida por uma ou várias camadas de material isolante. Podem ser classificados como condutores flexíveis, como os cabos, ou rígidos, no caso de tubos ou barras. Os condutores flexíveis, também chamados de barramentos apoiados, quando aplicados a subestações são muito utilizados quando estas são de grandes dimensões. Aqueles, por serem um material maleável, estão sujeitos a mais esforços e a intempérie que possa existir [11].

Os condutores rígidos são perfis fabricados em material condutor, podendo ter vários formatos, sendo mais utilizado o tubular que permitem uma capacidade de arrefecimento mais elevada, traduzindo-se num excelente comportamento eletromecânico. Os condutores rígidos são utilizados em subestações de menores dimensões, quando existe necessidade de poupar espaço ou por razões estéticas. Em relação aos condutores flexíveis, apresenta como maior vantagem a capacidade de melhor suportar as chuvas e ventos e outros fatores de carácter natural, a fácil visualização do seu esquema de ligações e melhor acessibilidade aos equipamentos [1][11].

3. METODOLOGIA DE CÁLCULO

Neste capítulo é apresentada a metodologia de cálculo para um correto dimensionamento de condutores rígidos e/ou de condutores flexíveis de uma subestação elétrica, bem como o cálculo dos respectivos esforços estáticos e dinâmicos. Este processo de cálculo é realizado de acordo com as normas IEC 60865-1, IEC 60909-0, [12][13] e de acordo com alguns documentos disponibilizados ao longo do curso e pela empresa. A empresa SISINT trabalha com empresas que não são localizadas em Portugal, como por exemplo em Inglaterra e, existem, por isso, algumas diferenças entre o cálculo dos esforços estáticos em Portugal e a Inglaterra. Devido a estas diferenças, relativamente aos cálculos dos esforços estáticos, em Portugal, apenas é tida em conta a força proveniente da ação do vento, conforme o decreto lei 1/92,[14]; já no caso da Inglaterra é tido em conta a norma BS EN 1991-4,[15] e a TS 3.01.04,[16]. Este algoritmo trata dos esforços eletrodinâmicos de ligações em diferentes posições de montagem: verticais ou horizontais. Inicialmente, devem ser conhecidas as características da rede elétrica e da subestação e, após a definição destes dados de entrada, é realizada a escolha do condutor a utilizar, sendo esta normalmente realizada pelo próprio cliente. Com a escolha do condutor a utilizar, o primeiro processo de cálculo é verificar se este cumpre as condições necessárias de funcionamento. De seguida, realiza-se o cálculo dos esforços estáticos e dinâmicos para cada ligação, de forma a obter, no final, um correto dimensionamento do condutor.

3.1. DADOS DE ENTRADA E PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS

Para que se possa dar início ao processo de dimensionamento dos condutores da subestação é necessário definir algumas características gerais da subestação e da rede elétrica e, também, algumas características gerais essenciais para os cálculos, presentes nas tabelas 2 e 3, respetivamente. Estas características são posteriormente explicadas.

Tabela 2 – Características gerais subestação

| Características gerais subestação | Símbolo | Unidades |
|--------------------------------------------------------|----------------|-----------------|
| Corrente simétrica inicial de curto-circuito trifásico | i''_k | A |
| Tempo de atuação das proteções | T_K | s |
| Tensão nominal do sistema | U_n | kV |
| Tensão máxima do sistema | U_m | kV |
| Corrente nominal do sistema | I_n | A |
| Frequência do sistema | f | Hz |
| Fator X/R do sistema | X/R | - |
| Temperatura no início do curto-circuito | Θ_b | °C |
| Temperatura no final do curto-circuito | Θ_e | °C |
| Temperatura normal | Θ_n | °C |
| Temperatura Inverno | Θ_i | °C |
| Temperatura Verão | Θ_k | °C |
| Valor da velocidade manutenção do vento | V_M | m/s |
| Valor fundamental da velocidade básica do vento | $V_{b,0}$ | m/s |

Tabela 3 - Característicos gerais sistema

| Características gerais cálculos | Símbolo | Unidades |
|--------------------------------------------------|----------------|-----------------|
| Distância entre eixos dos suportes | l | m |
| Distância entre eixos dos condutores | a | m |
| Número de subcondutores de um condutor principal | n | - |
| Número de separadores | n_c | - |
| Distância entre subcondutores | a_s | m |
| Espaçamento entre separadores | l_s | m |
| Comprimento do cabo | l_v | m |
| Largura do <i>dropper</i> | w | m |
| Altura do <i>dropper</i> | h | m |

Corrente simétrica inicial de curto-circuito trifásico - Valor eficaz da corrente de curto-circuito simétrica no momento em que o curto-circuito ocorre[8].

Duração da corrente de curto-circuito - Intervalo de tempo desde o início do curto-circuito até ao fim da passagem desta corrente em todas as fases[12].

Tensão nominal do sistema - É a tensão entre fases que caracteriza o sistema em uso e em relação à qual são referidas certas características de funcionamento. Esta tensão nominal não deve exceder a tensão máxima do sistema[8].

Frequência do sistema - Frequência elétrica da instalação ou da rede, que normalmente é igual a 50 Hertz (Hz)[8].

Fator X/R do sistema- Depende do tipo de rede da subestação. Normalmente, considera-se uma rede fortemente indutiva[8].

Distância entre eixos dos suportes - É dada como a distância entre dois suportes consecutivos [11].

Distancia entre eixos dos condutores - É a distância entre dois condutores de fases distintas [11].

Ao longo do processo de cálculo, existem diversos parâmetros que são constantes. De acordo com a localização do cliente é utilizado um de dois métodos de cálculos, chamados simplesmente de Portugal ou Inglaterra. Cada um dos métodos possui parâmetros constantes, sendo que na tabela 4 são apresentados os dados constantes relativamente às empresas que utilizam o método Portugal e na tabela 5, os dados constantes relativamente ao método Inglaterra.

Tabela 4 - Dados constantes Portugal

| Dados Constantes Portugal | Símbolo | Valor | Unidades |
|----------------------------------|----------------|----------------|--------------------|
| Permeabilidade absoluta do vácuo | μ_0 | $4\pi 10^{-7}$ | H/m |
| Valor convencional da aceleração | g | 9,81 | m/s ² |
| Espessura da manga de gelo | r | 10 | mm |
| Densidade do gelo | ρ_g | 0,9 | kg/dm ³ |
| Coeficiente redução | α | 0,6 | - |

Tabela 5 - Dados Constantes Inglaterra

| Dados Constantes Inglaterra | Símbolo | Valor | Unidades |
|---------------------------------------------------|----------------|---------------------|-------------------|
| Fator de direção do vento | C_{dir} | 1 | - |
| Fator de estação do ano | C_{season} | 1 | - |
| Fator orográfico | C_0 | 1 | - |
| Altura máxima dos condutores | Z_{max} | 200 | m |
| Comprimento de rugosidade do terreno de categoria | $Z_{0,II}$ | 0,05 | m |
| Fator de turbulência | K_I | 1 | - |
| Densidade do ar | ρ | 1,25 | Kg/m ³ |
| Viscosidade cinemática do ar | ν | 15×10^{-6} | m ² /s |
| Espessura da manga de gelo | r | 10 | mm |

3.2. ESCOLHA DO CONDUTOR

Os cálculos realizados, relativamente ao esforços estáticos e dinâmicos exercidos sobre os condutores, dependem não só do seu material, mas, também, da ligação em que se encontram montados.

Tal como já foi referido na secção 2.2.10., os condutores elétricos podem ser rígidos ou flexíveis e podem ser de cobre, alumínio, ou ligas metálicas. Os condutores flexíveis são normalmente utilizados quando as subestações são de grandes dimensões e podem existir sob a forma de condutores nus ou isolados. Já os condutores rígidos são utilizados em subestações de menores dimensões, podendo assumir vários formatos, sendo o tubular mais utilizado. A utilização de condutores flexíveis apresenta algumas desvantagens relativamente ao uso dos condutores rígidos. Os condutores flexíveis são constituídos por um material maleável estando sujeitos a mais esforços e a intempéries que possam existir, ao passo que os condutores permitem poupar espaço e têm uma melhor capacidade de resistir às chuvas e aos ventos, permitindo, uma fácil visualização do seu esquema de ligações, bem como uma melhor acessibilidade aos equipamentos. No entanto, comparativamente aos condutores rígidos, o uso de flexíveis é mais barato, uma vez que se utilizam um menor número de estruturas metálicas[1][11][8].

Habitualmente o cliente refere quais os condutores, que devem ser utilizados nas ligações da sua subestação, sendo apenas necessário utilizar os dados fornecidos para efetuar os restantes cálculos. Para facilitar a escolha de futuros condutores, foi criada uma base de dados com os condutores mais utilizados pela SISINT, contendo os vários condutores e as suas respetivas características. Caso o condutor que o cliente decide utilizar não conste da base de dados, ele pode ser adicionado à base de dados.

Escolhido o condutor, torna-se necessário verificar algumas condições que garantem se ele é ou não adequado à instalação elétrica que será utilizado, entre as quais:

1. Condição de aquecimento;
2. Resistência mecânica ao curto-circuito;
3. Capacidade da corrente de curto-circuito;
4. Sobrelevação da temperatura;
5. Condição de ressonância;
6. Efeito coroa.

A sobrelevação da temperatura e a condição de ressonância são apenas verificadas quando se trata de condutores rígidos.

3.2.1. CONDIÇÃO DE AQUECIMENTO

A verificação desta condição consiste em avaliar se o condutor escolhido é capaz de transportar a corrente de serviço da instalação, ou seja, realizar a simples comparação entre a corrente de serviço da instalação (I_n) e a corrente máxima admissível pelo condutor ($I_{n\max}$), presente na base de dados de condutores[7][17][11][18], sendo que a primeira tem de ser inferior à segunda.

3.2.2. RESISTÊNCIA MECÂNICA AO CURTO CIRCUITO

Após a verificação da condição de aquecimento do condutor, procede-se à verificação da resistência mecânica do condutor ao curto-circuito, ou seja, se este é capaz de suportar os esforços eletrodinâmicos em caso de ocorrência de um curto-circuito[7][11][17][18]. Para isso, inicia-se o cálculo da corrente de choque ou de pico de um curto-circuito (CC) trifásico simétrico. Esta corrente de choque corresponde ao valor que ocorre na fase inicial do CC e na qual o barramento está sujeito a uma enorme força eletrodinâmica[7][11][17][18][13].

$$i_p = k\sqrt{2}i_k'' \quad (1)$$

Em que:

i_p representa a corrente de choque [A];

k representa o fator de impulso;

i_k'' representa a corrente de curto-circuito trifásico simétrico[A].

O valor de i_k'' é um dos dados de entrada da instalação. O fator k é obtido através do gráfico da figura 7, em função do fator X/R ou de acordo com a expressão (2).

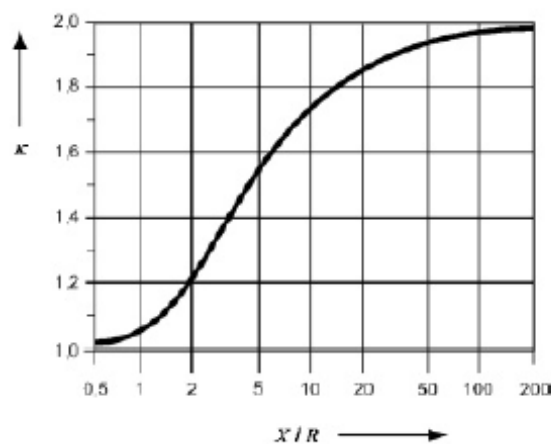


Figura 7 - Fator k em função de X/R [13]

$$k = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{R}{x}} \quad (2)$$

Seguidamente, calcula-se a força eletrodinâmica exercida entre os condutores percorridos pela corrente de choque quando ocorre um curto circuito [7][11][17][18]:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \frac{l}{a} = 0,2 i_p \frac{l}{a} \quad (3)$$

Em que:

F representa a força eletrodinâmica [kgf];

μ_0 representa a permeabilidade absoluta do vácuo[H/m];

$i_1 i_2$ representam valores instantâneos das correntes nos condutores[kA];

l representa a distância entre eixos dos suportes [m];

a representa a distância entre eixos dos condutores [m];

i_p representa a corrente de choque [kA].

Daqui resulta um determinado momento fletor. O momento fletor é originado pelas forças eletrodinâmicas exercidas sobre o condutor e depende do tipo de apoios [7][17][11].

$$M_f = \frac{F \cdot l}{16} \quad (4)$$

Em que:

M_f representa o momento fletor[kgf.cm];

F representa a força eletrodinâmica[kgf];

l representa a distância entre eixos dos suportes [cm].

O momento fletor máximo para um perfil com um determinado módulo de flexão é dado por:

$$M_f = W \cdot \sigma \quad (5)$$

Em que:

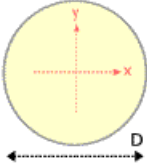
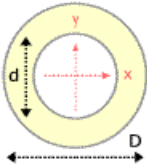
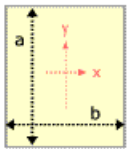
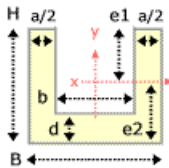
M_f representa o momento fletor[kgf.cm];

σ representa a carga de segurança à flexão[kgf/cm²];

W representa o módulo de flexão [cm³].

O módulo de flexão caracteriza a resistência da barra e pode ser obtido através da tabela 6, de acordo com o tipo de barramento utilizado. A carga de segurança à flexão varia consoante o seu material constituinte, ou seja, se o material for cobre varia entre 1000 e 1200 kg/cm², se for alumínio varia entre 400 e 600 kg/cm²[7][17][11][19].

Tabela 6 - Valores de W e J de acordo com o tipo de barramento usado [19]

| Tipo | Geometria | Módulo de Resistência | Momento de Inércia |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vergalhão |  | $W = \frac{\pi \times D^3}{32}$ | $J = \frac{\pi \times D^4}{64}$ |
| Tubo |  | $W = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32 \times D}$ | $J = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$ |
| Barra Chata |  | $W = \frac{h^2(a^2 + 4ab + b^2)}{12(2a + b)}$ | $J = \frac{Be_2^3 + bh^3 + ae_1^3}{3}$ $e_2 = \frac{aH^2 + bd^2}{2(aH + bd)} / e_1 = H - e_2$ |
| Perfil U |  | $W = \frac{ba^2}{6}$ | $J = \frac{ab^3}{12}$ |

O módulo de flexão, do condutor escolhido, deve ser tal que satisfaça a seguinte condição:

$$W > \frac{M_f}{\sigma} \quad (6)$$

Se a barra não resistir devido ao momento fletor, toma-se uma de três alternativas:

- Aumentar a distância entre eixos dos condutores;
- Diminuir a distância entre os suportes;
- Alterar a secção do condutor escolhido[17].

3.2.3. CAPACIDADE DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

O aquecimento de condutores devido à passagem de correntes de curto-circuito envolve uma série de fenómenos e para o cálculo destes esforços são desprezados alguns fatores, tais como: o efeito "pelicular" - que resulta da influência magnética de um condutor sobre si mesmo; o efeito de proximidade - que se define como sendo a influência magnética entre condutores paralelos próximos; a relação entre resistência e temperatura é assumida como sendo linear; o calor específico do condutor é suposto ser constante; o aquecimento é suposto ser adiabático [12].

O cálculo dos esforços térmicos é baseado no cálculo do tempo de fadiga térmica de um condutor, que é o tempo durante o qual o condutor pode suportar a corrente de curto-circuito. Um dos grandes problemas deste dimensionamento é o tempo de atuação das proteções que terão de atuar em caso de CC. Normalmente, existem duas proteções projetadas com diferentes tempo de atuação, onde, no caso da primeira não atuar, a segunda atua, sendo o tempo de fadiga térmica igual ao tempo de atuação da segunda proteção [11] [18] [19] .

Para além do já referido, procura-se que o condutor escolhido tenha uma secção mínima, que não entre em fadiga térmica antes da atuação da segunda proteção. Esta secção é obtida através seguinte expressão [24]:

$$\left(\frac{I_{th}}{S_{min}}\right)^2 \cdot T_K = K \cdot \ln \frac{1 + a_{20} \cdot (\theta_e - 20)}{1 + a_{20} \cdot (\theta_b - 20)} \quad (7)$$

Em que:

S_{min} representa a secção mínima do condutor [mm²];

I_{th} é a corrente térmica máxima equivalente do circuito [A];

T_K representa o tempo de atuação da proteção [s];

K é um fator adimensional em função do material do condutor;

a_{20} representa o coeficiente de variação da resistência com a temperatura [°C⁻¹];

θ_e representa a temperatura no final do curto-circuito [°C];

θ_b representa a temperatura no início do curto-circuito [°C].

O fator adimensional K e o coeficiente a_{20} podem tomar valores dependentes do material constituinte. K , pode tomar os valores 0,034 e 0,022, se o material constituinte do condutor for cobre e alumínio, respectivamente. No caso do a_{20} , se o material constituinte for cobre o valor é igual a 0,004, caso, seja alumínio o valor é igual a 0,0036.

A corrente térmica, I_{th} , é o valor de corrente instantânea que produz a mesma quantidade de calor que a corrente real de curto-circuito, ou seja, a corrente de CC termicamente equivalente. Este cálculo é realizado usando os fatores m e n , que quantificam o efeito térmico da corrente de CC. O fator m , traduz o efeito térmico da componente contínua da corrente de curto-circuito e do seu amortecimento e o fator n , o efeito da componente alternada e do seu amortecimento[11][18][19]. Estes valores, m e n , podem ser obtidos através das figuras 8 e 9 ou através das fórmulas 8, 9 e 10, presentes no Anexo A da norma [12][13], em função da frequência do sistema f , do tempo de atuação da proteção T_k , do fator de impulso k e da relação $\frac{i_k''}{i_k}$.

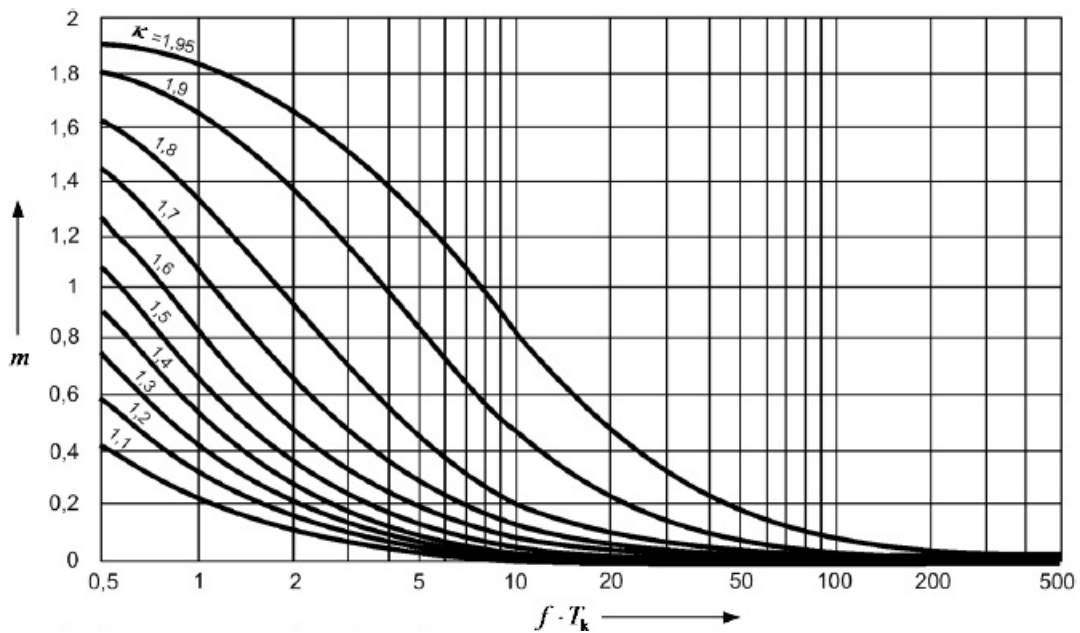


Figura 8 - Fator m [13]

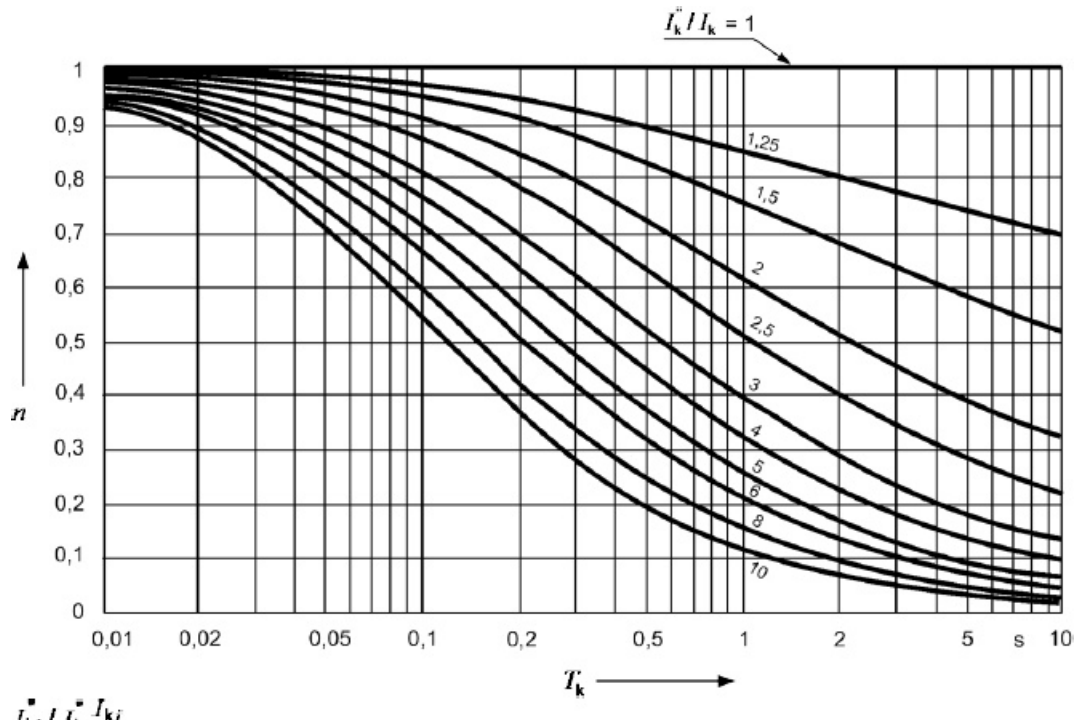


Figura 9 - Fator n [13]

$$m = \frac{1}{2fT_K \ln(k-1)} \cdot [e^{4fT_K \ln(k-1)} - 1] \quad (8)$$

Em que:

m representa o efeito térmico da componente contínua da corrente de curto-circuito e do seu amortecimento;

f representa a frequência do sistema [Hz];

T_K representa o tempo de atuação da proteção [s];

k representa o fator de impulso.

E se:

$$\frac{i_k''}{i_k} = 1 \quad \longrightarrow \quad n=1 \quad (9)$$

se

$$\frac{i_k''}{i_k} \geq 1,25 \quad \longrightarrow$$

$$n = \frac{1}{\left(\frac{i_k''}{i_k}\right)^2} \cdot \left[1 + \frac{T_d^i}{20T_k} \cdot \left(1 - e^{-20T_k/T_d^i}\right) \cdot \left(\frac{i_k''}{i_k} - \frac{i_k^i}{i_k}\right)^2 + \frac{T_d^i}{27T_k} \cdot \left(1 - e^{-27T_k/T_d^i}\right) \cdot \left(\frac{i_k^i}{i_k} - 1\right)^2 \right. \\ \left. + \frac{T_d^i}{5T_k} \cdot \left(1 - e^{-10T_k/T_d^i}\right) \cdot \left(\frac{i_k^i}{i_k} - \frac{i_k^i}{i_k}\right) + \frac{2T_d^i}{T_k} \cdot \left(1 - e^{-T_k/T_d^i}\right) \cdot \left(\frac{i_k^i}{i_k} - 1\right)^2 \right. \\ \left. + \frac{T_d^i}{5,5T_k} \cdot \left(1 - e^{-11T_k/T_d^i}\right) \cdot \left(\frac{i_k''}{i_k} - \frac{i_k^i}{i_k}\right) \cdot \left(\frac{i_k^i}{i_k} - 1\right) \right] \quad (10)$$

Onde:

n representa o efeito térmico da componente alternada da corrente de curto-circuito e do seu amortecimento

$$\frac{i_k'}{i_k} = \frac{i_k''}{i_k} \frac{1}{0,88 + 0,17 \frac{i_k''}{i_k}}, \text{ com } i_k \text{ a representar a corrente de curto-circuito em estado estacionário e}$$
$$T_d' = \frac{3,1s}{\frac{i_k'}{i_k}}.$$

Assim, basta obter o valor de corrente térmica, que é dado pela expressão:

$$I_{th} = i_k'' \cdot \sqrt{m + n} \quad (11)$$

Em que:

I_{th} representa a corrente térmica [A];

i_k'' representa a corrente de curto-circuito trifásico simétrico[A];

m representa o efeito térmico da componente contínua da corrente de curto-circuito e do seu amortecimento;

n representa o efeito térmico da componente alternada da corrente de curto-circuito e do seu amortecimento.

Finalizado o processo de cálculos dos esforços térmicos, basta validar se a secção escolhida pelo cliente é superior ao valor de S_{min} calculado anteriormente.

3.2.4. SOBRELEVAÇÃO DA TEMPERATURA

Quando ocorre a passagem de uma corrente de curto-circuito, a temperatura dos condutores sobe. Esta subida de temperatura tem de estar abaixo de um certo valor máximo. Caso isto não aconteça, a barra pode encurvar e ,para que isso não aconteça, é calculada a sobrelevação da temperatura, através da seguinte fórmula[7][17]:

$$\Delta\theta = Km \cdot \left(\frac{Ith}{A_S}\right)^2 \cdot T_K + (\theta_i - \theta_m) \quad (12)$$

Em que:

$\Delta\theta$ representa a sobrelevação da temperatura [°C];

Km representa a característica do material condutor;

Ith representa a corrente térmica [A];

A_S representa a secção transversal de um subcondutor [mm²].

A constante do material condutor pode tomar dois valores: 0,0058 ou 0,00135, se for cobre ou alumínio respetivamente.

Para condutores nus, as sobrelevações máximas admissíveis em caso de CC, são 200°C e 150°C para cobre e alumínio. Caso estes limites sejam ultrapassados, pode aumentar-se a secção do condutor ou, então, diminuir o tempo de disparo da proteção[17].

Para além do cálculo da sobrelevação da temperatura, é necessário realizar o cálculo da força sobre os pontos de fixação do condutor, F_{fi} , e a força crítica de encurvamento, F_{cr} [7][17]:

$$F_{fi} = A_S \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta\theta \quad (13)$$

Em que:

F_{fi} representa a força sobre os pontos de fixação do condutor [kgf]

A_S representa a área da secção transversal do condutor [mm²];

E representa o módulo de elasticidade do barramento ou de Young [N/m²];

$\Delta\theta$ representa a sobrelevação da temperatura [°C];

α representa o coeficiente de dilatação linear do material [°C⁻¹].

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{l} \quad (14)$$

Em que:

F_{cr} representa a força crítica de encurvamento [kgf];

E representa o módulo de elasticidade do barramento ou de Young [N/m²];

J representa o momento de inércia [m⁴];

l representa a distância entre eixos dos suportes [cm].

O fator α , pode ter dois valores, presentes na tabela 7:

Tabela 7 - Valor de α [7]

| Fator α | Valor | Unidades |
|----------------------------------|--------------|------------------|
| Cobre | 0.000017 | °C ⁻¹ |
| Alumínio | 0.000024 | °C ⁻¹ |

O módulo de *Young*, E, quantifica a rigidez do material sólido e depende do material utilizado para a sua construção. Os diferentes valores que E pode ter, estão presentes na tabela 8 [11][19].

Tabela 8 - Módulo de *Young* [17]

| Módulo de <i>Young</i> | Valor | Unidades |
|-------------------------------|------------------------|------------------|
| Cobre | 1,1 x 10 ¹¹ | N/m ² |
| Alumínio | 7x10 ¹¹ | N/m ² |

O momento de inércia é uma grandeza que mede a distribuição da massa de um dado corpo em torno do seu eixo de rotação, bem como a tendência do manter o movimento, ou a ausência dele[11][19].

O momento de inércia pode ser obtido através da seguinte expressão, ou através das expressões presentes na tabela 6 [19].

$$J = \frac{\pi(d^4 - d_i^4)}{64} \times 10^{-12} \quad (15)$$

Em que:

J representa o momento de inércia [m⁴];

d representa o diâmetro exterior de um condutor tubular [mm];

d_i representa o diâmetro interior de um condutor tubular [mm].

Por fim, basta apenas verificar se o condutor realmente encurva ou não. Para isso é necessário calcular se ocorre o alongamento do condutor por dilatação [24], dados pela expressão:

$$\Delta L = l \cdot \Delta\theta \cdot \alpha \quad (16)$$

Em que:

ΔL representa o alongamento por dilatação do condutor [m];

l representa a distância entre eixos dos suportes [m];

α representa o coeficiente de dilatação linear do material [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

$\Delta\theta$ representa a sobrelevação da temperatura [$^{\circ}\text{C}$];

Se ΔL for diferente de zero, indica que o condutor encurva e, nesse caso, a força de dilatação, F_{di} , é igual a F_{cr} . Caso o condutor não encurve, a F_{di} é aproximadamente igual a F_{fi} [7][17][24].

3.2.5. CONDIÇÃO DE RESSONÂNCIA

Um condutor rígido, quando está apoiado por dois suportes, está sempre sujeito a oscilações e vibrações que podem ser causadas devido a diversos fatores, entre os quais os esforços eletrodinâmicos, embora em regime permanente possam ser desprezados, na ocorrência de um curto-circuito não podem. Quando ocorre um CC estes esforços aumentam bastante, tendo de lhes ser dada a devida atenção. Se o valor da frequência de ressonância, for próximo à frequência do sistema, cerca de 10 % ou do seu dobro, as oscilações podem aumentar de forma perigosa, produzindo-se o chamado fenômeno de ressonância[7][17][18][19].

A expressão para o cálculo da frequência de ressonância é chamada de “expressão de *Biermanns*”, sendo dada por:

$$F_o = 112 \sqrt{\frac{E \cdot J}{m'_s \cdot l^4}} \quad (17)$$

Em que:

J representa o momento de inércia [cm^4];

E representa o módulo de elasticidade do barramento ou de *Young* [Kg/cm^2];

m_s' representa a massa por unidade de comprimento de um subcondutor [kg/cm];

l representa a distância entre eixos dos suportes [cm].

Se F_o não estiver compreendido no intervalo [45,55] U [90,110] Hz, o condutor estará fora de perigo [7][17][18]. Caso o seu valor esteja neste intervalo podem ser efetuadas duas alterações. Uma poderia ser definir um novo vão entre os suportes do condutor, ou seja, alterar o valor de l . Esta opção não é muito aconselhada, uma vez que a sua alteração implica fazer um novo layout da subestação e mais espaço o que, conseqüentemente, aumenta os custos. Por esta razão, a segunda opção é a mais indicada. Esta consiste na escolha de um novo tipo de barramento, ou seja, alterar os valores de J e m_s' [19].

3.2.6. EFEITO COROA

O efeito coroa é um fenómeno que resulta de uma descarga parcial de energia no ar provocada pela ionização desse meio, quando um condutor é percorrido pela corrente elétrica. Isto verifica-se quando o valor do gradiente do campo elétrico é suficiente para ionizar o meio, mas não para provocar a rutura dielétrica, ou em um arco elétrico entre os condutores. Este fenómeno também ocorre quando a distância entre os condutores é grande quando comparada com o seu diâmetro, ocorrendo com frequência em instalações de AT, junto às cadeias de isoladores dos pórticos de amarração de linha, em transformadores de tensão e descarregadores de tensão, em subestações[21].



Figura 10 - Efeito coroa [21]

Primeiramente, é necessário verificar se o número de subcondutores de um condutor principal (n) é igual ou maior que 1, ou seja, se a ligação é realizada em feixe ou não. Este passo é essencial, uma vez que a verificação das condições do efeito coroa é diferente para ambos os casos.

Para o caso em que o n é maior que 1, inicialmente, obtêm-se o valor de dois parâmetros importantes para a verificação do efeito coroa, o raio médio geométrico e a distância média geométrica, que podem ser obtidos através das expressões seguintes[22]:

$$r_{eq} = \sqrt[n]{r \cdot a_s^{n-1}} \quad (18)$$

$$d_{eq} = \sqrt[3]{D_{1,3} \cdot D_{1,2} \cdot D_{2,3}} \quad (19)$$

Em que:

r_{eq} representa o raio médio geométrico [cm];

r representa o raio exterior do condutor [cm], que é igual ao diâmetro exterior do condutor/2;

a_s representa a distância entre subcondutores [cm];

d_{eq} representa a distância média geométrica [cm];

$D_{1,3} \cdot D_{1,2} \cdot D_{2,3}$ representam as distâncias entre as fases 1 e 3, 1 e 2 e 2 e 3 [cm].

A tensão disruptiva crítica (U_C), define-se como o menor valor da tensão entre a fase e o neutro para o qual se verifica o efeito coroa. Para uma determinada pressão e uma determinada temperatura, a densidade do ar, δ , é dada por:

$$\delta = 3.92 \cdot \frac{P}{(273 + \theta)} \quad (20)$$

Em que:

P representa a pressão [Pa];

θ representa a temperatura[°C].

O valor de P é igual a 76 cmHg, já o valor da temperatura, θ , é introduzida nos dados de entrada da subestação.

Com isto, considerando um fator de irregularidade da superfície do condutor m_0 , temos que o valor crítico da tensão de disrupção, para tempo seco, é igual a:

$$U'_C = m_0 \cdot \delta \cdot r_{eq} \cdot \ln \frac{d_{eq}}{r_{eq}} \quad (21)$$

Em que:

U'_C representa o valor crítico da tensão de disrupção [kV/fase];

m_0 representa o fator de irregularidade da superfície do condutor;

δ representa o fator da densidade do ar;

r_{eq} é o raio médio geométrico [cm];

d_{eq} é a distância média geométrica [cm].

O valor da tensão de disrupção, para tempo húmido, corresponde a uma redução de 20% em relação ao valor da tensão de disrupção para tempo seco.

Os valores mais usuais de m_0 são os que constam na tabela 9.

Tabela 9 - Valores de m_0 [21]

| Valores de m_0 | Valor |
|-------------------------|-----------|
| Condutores polidos | 1 |
| Condutores contaminados | 0,92-098 |
| Condutores trefilados | 0.80-0.87 |

Para o caso em que $n=1$, em primeiro lugar, realiza-se o cálculo da densidade do ar, δ , utilizando a equação 20, apresentada anteriormente. De seguida é necessário proceder-se ao cálculo do valor eficaz de campo elétrico crítico para o aparecimento do efeito coroa:

$$E_{of} = \frac{30 \cdot m_0 \cdot \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta+r}}\right)}{\sqrt{2}} \quad (22)$$

Em que:

E_{of} valor eficaz de campo elétrico crítico para o aparecimento do efeito coroa [kV/cm];

m_0 representa o fator de irregularidade da superfície do condutor;

δ representa o fator da densidade do ar;

r representa o raio exterior do condutor [cm], que é igual ao diâmetro exterior do condutor/2.

Tendo o valor de E_{of} , resta calcular os valores da tensão de disrupção, U'_C , para tempo seco e húmido, da seguinte forma:

$$U'_C = m_0 \cdot \delta \cdot E_{of} \cdot r \cdot \ln \frac{a}{r} \quad (23)$$

Em que:

U'_C representa o valor crítico da tensão de disrupção [kV/fase];

m_0 representa o fator de irregularidade da superfície do condutor;

δ representa o fator da densidade do ar;

r representa o raio exterior do condutor [cm], que é igual ao diâmetro exterior do condutor/2;

a representa a distância entre eixos dos condutores [cm].

Por fim, depois de obtidos os valores da tensão de disrupção, basta validar se o condutor é capaz de suportar o efeito coroa que pode passar sobre ele, verificando se o valor da tensão de disrupção é superior ao valor da tensão máxima do sistema, introduzida inicialmente [24].

3.3. CÁLCULO DOS ESFORÇOS ESTÁTICOS

Após ser verificado que o condutor selecionado cumpre as condições necessárias de funcionamento, torna-se necessário proceder ao cálculo dos esforços estáticos. Este, compreende cálculos referentes ao peso próprio dos condutores, da ação do vento sobre eles e, também, do gelo que podem ter.

Tal como já foi referido, a SISINT, trabalha com empresas localizadas dentro e fora de Portugal, como com Inglaterra, existindo, então, dois métodos, o de Portugal e o de Inglaterra. Existem algumas diferenças entre o cálculo dos esforços estáticos utilizando o método de Portugal e o de Inglaterra, nomeadamente no estudo da ação do vento, sendo o restante processo de cálculo igual para os dois métodos. Em primeiro lugar, é apresentado o processo de cálculo de Inglaterra e de seguida de Portugal, sendo que no de Portugal, apenas é referido o processo de cálculo diferente (estudo da ação do vento).

3.3.1. INGLATERRA

3.3.1.1. AÇÃO DO VENTO

O cálculo dos esforços estáticos, relativos à ação do vento, inicia-se com o cálculo da velocidade básica do vento [15]:

$$V_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot V_{b,0} \quad (24)$$

Em que:

V_b representa a velocidade básica do vento [m/s];

C_{dir} representa o fator direção do vento;

C_{season} representa o fator de estação do ano;

$V_{b,0}$ representa o valor fundamental da velocidade básica do vento [m/s].

De seguida, calcula-se o valor médio da velocidade do vento, que varia em função de uma determinada altura (Z)[15]:

$$V_m(Z) = C_r(Z) \cdot C_0(Z) \cdot V_b \quad (25)$$

Em que:

V_m representa o valor médio da velocidade do vento[m/s];

V_b representa a velocidade básica do vento [m/s];

$C_r(Z)$ representa o fator de rugosidade do terreno

$C_0(Z)$ representa o fator orográfico

O fator $C_r(Z)$ pode ser obtido em função de uma altura máxima (Z_{max}), que deve ser tomada como 200, de uma determinada altura mínima(Z_{min}) e de um determinado comprimento de rugosidade(Z_0) e de um fator de terreno(K_r) que depende do fator Z_0 [15]:

$$C_r(Z) = K_r \cdot \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \text{ se } Z_{min} \leq Z \leq Z_{max} \quad (26)$$

$$C_r(Z) = C_r(Z_{min}) \text{ se } Z \leq Z_{min} \quad (27)$$

O fator K_r é obtido através da expressão:

$$K_r = 0,19 \cdot \left(\frac{Z_0}{Z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad (28)$$

Em que:

$Z_{0,II}$ representa o comprimento de rugosidade do terreno de categoria II[m].

Os valores de Z_0 e Z_{min} , são obtidos a partir da tabela 10, de categorias de terrenos e os seus parâmetros.

Tabela 10 - Categorias de terrenos e os seus parâmetros [15]

| Categorias de terrenos | Z_0 (m) | Z_{min}(m) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 0 Mar ou área de costa exposta ao mar aberto | 0,003 | 1 |
| I Lagos ou área plana e horizontal com vegetação insignificante e sem obstáculos | 0,01 | 1 |
| II Área com vegetação rasteira, como relva e obstáculos isolados (como árvores ou edifícios) | 0,05 | 2 |
| III Área com cobertura regular de vegetação, edifícios ou obstáculos isolados (como aldeias, terrenos suburbanos e florestas) | 0,3 | 5 |
| IV Área em que pelo menos 15% da superfície está coberta com edifícios e a sua altura média excede os 15 m | 1 | 10 |

Calculado o valor médio da velocidade do vento, procede-se ao cálculo da intensidade da turbulência do vento, que também varia em função da altura [15]:

$$I_V(Z) = \frac{\sigma_V}{v_m(Z)} \text{ se } Z_{min} \leq Z \leq Z_{max} \quad (29)$$

$$I_V(Z) = I_V(Z_{min}) \text{ se } Z \leq Z_{min} \quad (30)$$

Em que:

I_V representa a intensidade da turbulência do vento

σ_V representa o desvio standard da turbulência.

O desvio σ_v pode ser obtido pela equação 33[15]:

$$\sigma_v = K_r \cdot V_b \cdot K_t \quad (31)$$

Em que:

K_t representa o fator de turbulência;

V_b representa a velocidade básica do vento[m/s];

K_r representa o fator de terreno.

O próximo passo é o cálculo da pressão da velocidade do vento de pico(q_p)[15]:

$$q_p(Z) = [1 + 7 \cdot I_v(Z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_m^2(Z) = c_e(Z) \cdot q_b \quad (32)$$

Em que:

q_p representa a pressão da velocidade do vento de pico [Pa];

ρ representa a densidade do ar [Kg/m³];

$c_e(Z)$ representa o fator de espessura;

q_b representa pressão da velocidade básica [Pa].

O fator de espessura e a pressão da velocidade básica são dadas pelas expressões:

$$c_e(Z) = \frac{q_p(Z)}{q_b} \quad (33)$$

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_b^2 \quad (34)$$

Em que:

q_p representa a pressão da velocidade do vento de pico [Pa];

q_b representa pressão da velocidade básica [Pa].

ρ representa a densidade do ar [Kg/m³];

V_b representa a velocidade básica do vento[m/s];

Para condutores em forma circular cilíndrica, normalmente usados, é necessário fazer um estudo dos seus coeficientes de pressão externos. Este estudo começa com o cálculo dos números de *Reynolds*, definidos pela expressão 35[15]:

$$Re = \frac{d \cdot v(z_e)}{\nu} \quad (35)$$

Em que:

Re representa o número de *Reynolds*;

d representa o diâmetro exterior do condutor[mm];

ν representa a viscosidade cinemática do ar[m²/s];

$v(z_e)$ representa velocidade do vento de pico a uma dada altura de referência, Z_e [m/s].

O valor de $v(z_e)$ pode ser dado por:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p}{\rho}} \quad (36)$$

Em que

q_p representa a pressão da velocidade do vento de pico, dada na expressão 34;

ρ representa a densidade do ar [Kg/m³].

De seguida, calcula-se o coeficiente da força para cilindros circulares finitos (C_f):

$$C_f = C_{f,0} \cdot \psi_\lambda \quad (37)$$

Em que:

$C_{f,0}$ representa o coeficiente de força de um cilindro sem fluxo de extremidade livre;

ψ_λ representa o fator de efeito final.

O coeficiente $C_{f,0}$, pode ser obtido de acordo com a figura 11, ou então, através da equação 38.

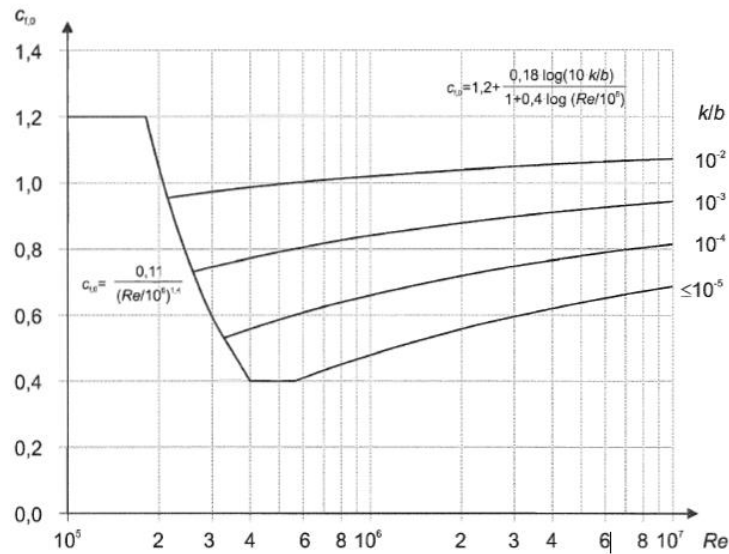


Figura 11 – Coeficiente $C_{f,0}$ para cilindros circulares sem fluxo de extremidade livre e para diferentes relações k/b [15]

$$C_{f,0} = 1,2 + \frac{0,18 \log\left(10 \cdot \frac{k}{b}\right)}{1 + 0,4 \log\left(\frac{Re}{10^6}\right)} \quad (38)$$

Em que:

k representa a rugosidade equivalente da superfície;

b representa o diâmetro externo do condutor igual a d [mm];

Re representa o número de *Reynolds*.

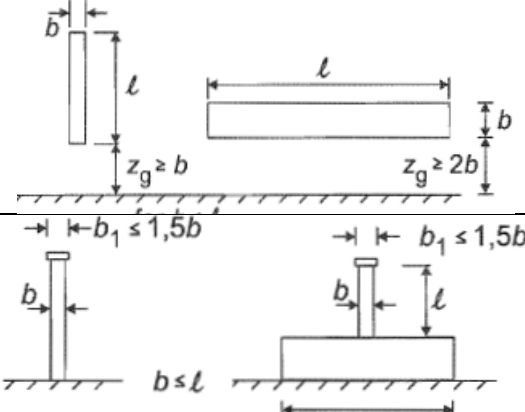
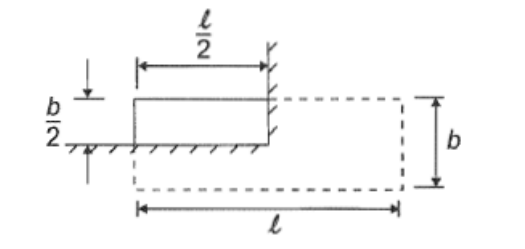
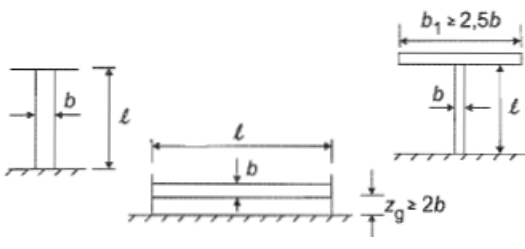
Os valores do fator k , podem ser obtidos com recurso à tabela 11.

Tabela 11 - Valores de k [15]

| Tipo de superfície | k (mm) | Tipo de superfície | k (mm) |
|--------------------|----------|--------------------------|----------|
| Vidro | 0,0015 | Betão liso | 0,2 |
| Metal polido | 0,002 | Madeira aplainada | 0,5 |
| Tinta fina | 0,006 | Betão bruto | 1 |
| Tinta <i>spray</i> | 0,02 | Madeira Serrada em Bruto | 2 |
| Aço brilhante | 0,05 | Ferrugem | 2 |
| Ferro Fundido | 0,2 | Alvenaria de Tijolo | 3 |
| Aço galvanizado | 0,2 | | |

Os valores de ψ_λ podem ser determinados recorrendo ao fator λ e ao chamado rácio de solidão ϕ . O fator λ , pode ser encontrado, na tabela 12, e visto que ocorrem mais esforços estáticos em condutores com maior comprimento e menor distância entre eles, interessa o cálculo deste fator apenas para o condutor da fase que tenha maior comprimento, ou seja, maior l .

Tabela 12 - Valores recomendados de λ para cilindros, secções poligonais, secções retangulares [15]

| Posição da estrutura | λ |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>Para estruturas poligonais, retangulares e secções afiadas e treliças:</p> <p>Para $l \geq 50 \text{ m} \rightarrow \lambda = 1,4 \frac{l}{b}$ ou $\lambda = 70$ (escolher o que for menor)</p> <p>Para $l < 15 \text{ m} \rightarrow \lambda = 2 \frac{l}{b}$ ou $\lambda = 70$ (escolher o que for menor)</p> |
|  | <p>Para $l \geq 50 \text{ m} \rightarrow \lambda = 0,7 \frac{l}{b}$ ou $\lambda = 70$ (escolher o que for menor)</p> <p>Para $l < 15 \text{ m} \rightarrow \lambda = \frac{l}{b}$ ou $\lambda = 70$ (escolher o que for menor)</p> <p>Para valores intermédios de l, o fator λ, pode ser obtido através de uma interpolação linear.</p> |
|  | <p>Para $l \geq 50 \text{ m} \rightarrow \lambda = 0,7 \frac{l}{b}$ ou $\lambda = 70$ (escolher o que for menor)</p> <p>Para $l < 15 \text{ m} \rightarrow \lambda = \frac{l}{b}$ ou $\lambda = 70$ (escolher o que for menor)</p> <p>Para valores intermédios de l, o fator λ, pode ser obtido através de uma interpolação linear.</p> |

O rácio φ pode ser obtido pela expressão 39 e pela figura 12 [15].

$$\varphi = \frac{A}{A_c} \quad (39)$$

Em que:

A representa a soma das áreas projetas [m^2];

A_c representa a área envolvente [m^2].

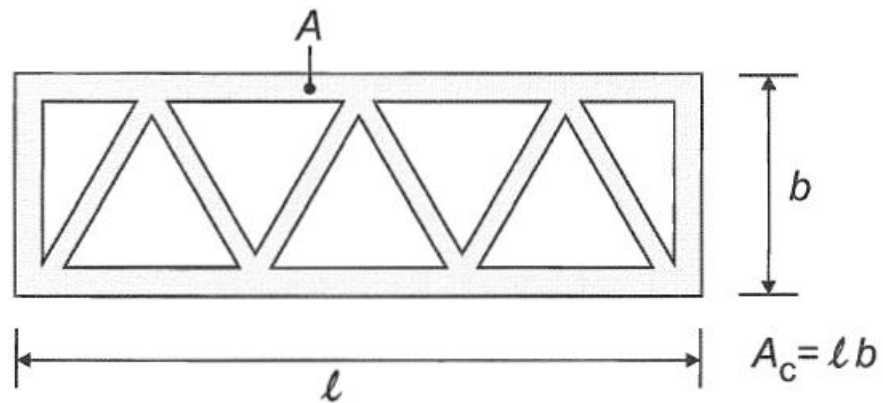


Figura 12 - Definição do rácio de solidão [15]

Este valor pode ser igual a 1 se considerarmos que A e A_c são iguais.

Tendo os valores de φ e λ , basta retirar o valor de ψ_λ da figura 13.

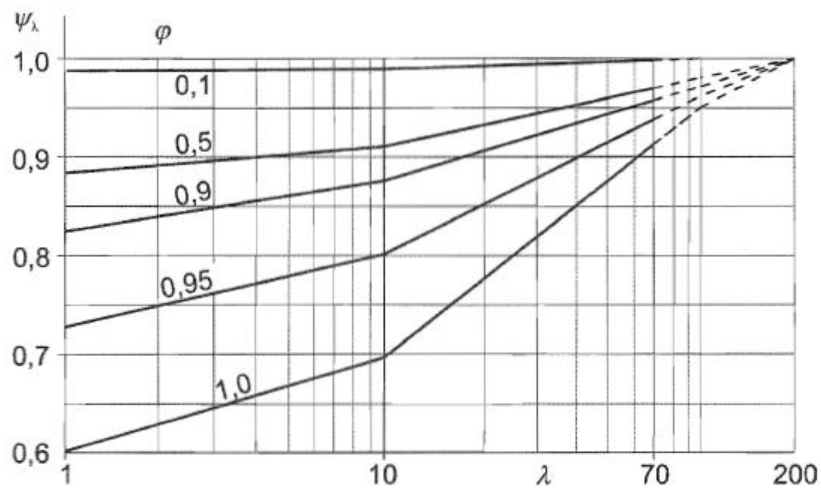


Figura 13 - Valores do fator de efeito final ψ_λ [15]

De seguida calcula-se a força do vento (F_W). Este cálculo necessita de alguns dados já obtidos anteriormente, tais como: a pressão à velocidade do vento de pico (q_p); a máxima distância entre suportes(l); o diâmetro do condutor(d) e o coeficiente da força para cilindros circulares finitos (C_f). Para este cálculo, pode ser considerada parte do condutor, mais propriamente, 50%, uma vez que é no seu centro onde ocorrem maiores esforços. Este cálculo deve ser efetuado para o caso onde existe gelo e para o caso onde este não existe, por isso é necessário termos também o raio da manga de gelo (r)[15][16].

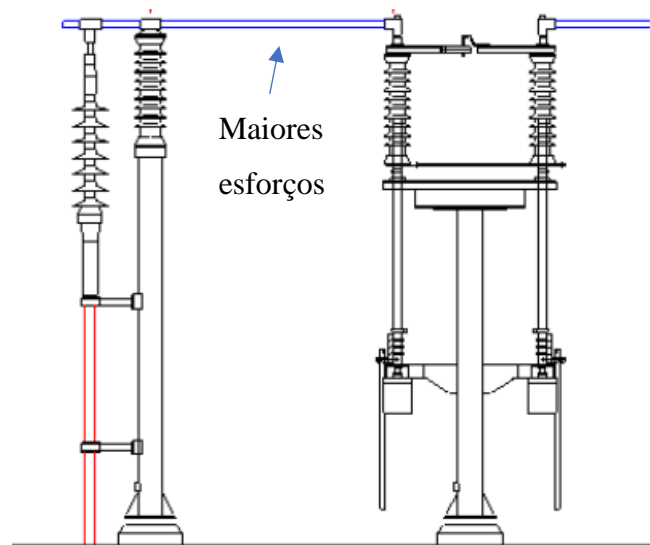


Figura 14 - Troço de subestação sujeita a maiores esforços [11]

$$F_W = C_f \cdot q_p \cdot S \quad (40)$$

Em que:

F_W representa a força do vento [N];

C_f representa o coeficiente da força para cilindros circulares finitos

q_p representa a pressão da velocidade do vento de pico [Pa];

S representa a área da superfície batida pelo vento [m²].

O valor desta área, S , depende da existência, ou não, de gelo. Nestas condições, temos duas alternativas de cálculo:

$$\text{Com gelo: } S = l \cdot (d + 2 \cdot r) \cdot 0,5 \quad (41)$$

$$\text{Sem gelo: } S = l \cdot d \cdot 0,5 \quad (42)$$

Por fim, calcula-se a força do vento de manutenção ($F_{W,M}$). O processo de cálculo efetua-se exatamente do mesmo modo, mas, ao invés de utilizarmos a velocidade básica do vento (V_b), utilizamos o valor da velocidade do vento de manutenção (V_M).

3.3.1.2. AÇÃO DO GELO

A ação do gelo sobre os condutores é um ponto bastante importante no cálculo dos esforços, uma vez que a existência deste pode provocar mais esforços nos condutores, nomeadamente aumentar os esforços estáticos relacionados com o seu próprio peso. O cálculo da força provocada devido ao gelo é conseguido através da expressão:

$$F_i = \rho_g \cdot \pi \cdot ((R + r)^2 - R^2) \cdot l \quad (43)$$

Em que:

F_i representa a força provocada devido ao gelo[N];

ρ_g representa a densidade do gelo [KN/m³];

R representa o raio do condutor[m];

r representa o raio da manga de gelo[m];

l representa a distância entre eixos dos suportes [m].

A densidade do gelo ρ_g pode tomar dois valores, segundo a tabela 13, que depende da existência ou não de vento.

Tabela 13 - Valores de ρ_g [16]

| Valores de ρ_g | Valor | Unidades |
|---------------------------------------|--------------|-------------------|
| Com vento | 9 | kN/m ³ |
| Sem vento | 5 | kN/m ³ |

Esta expressão é proveniente da diferença entre a área de gelo formada e a área do condutor.

$$A_{gelo} = \pi \cdot r^2 \quad (44)$$

$$A_{condutor} = \pi \cdot R^2 \quad (45)$$

Em que:

R representa o raio do condutor[mm];

r representa o raio da manga de gelo[mm].

3.3.1.3. AÇÃO DO PESO PRÓPRIO

O estudo dos esforços estáticos relativos ao peso próprio do condutor, tem por base a física. É chamado de força gravítica e consiste numa força que todos os objetos próximos da terra estão sujeitos constantemente. A terra puxa todos os objetos com uma determinada força gravítica de cima para baixo e dirigida para o seu centro. A magnitude desta força gravítica pode ser encontrada através da expressão[23]:

$$F_g = m'_s \cdot g \cdot l \quad (46)$$

Em que:

F_g representa a força gravítica [N];

m'_s representa a massa por unidade de comprimento de um subcondutor [Kg/m];

g representa o valor convencional da aceleração [m/s²];

l representa a distância entre eixos dos suportes [m].

O valor de F_g total é dado pela soma da força gravítica, relativa ao peso próprio do condutor (m'_s) e pela soma da força gravítica relativa ao peso dos separadores entre ligações (m'_{ss}), afetada de uma percentagem de 50%, tal como acontece no processo de cálculo da força do vento da equação 40.

$$F_D = F_{bb} + F_{cl} \text{ [N]} \quad (47)$$

Em que:

F_D representa o valor total da força gravítica[N];

F_{bb} representa a força gravítica relativa ao peso próprio do condutor [N];

F_{cl} representa a força gravítica relativa ao peso dos separadores entre ligações[N].

3.3.2. PORTUGAL

Tal como foi referido no início deste terceiro capítulo, o processo de cálculo dos esforços estáticos, difere de Portugal para Inglaterra, no estudo dos esforços estáticos, provenientes da ação do vento. Neste subcapítulo 3.3.2, para Portugal é apresentando, apenas, o processo de cálculo da ação do vento, uma vez que a ação do gelo e do peso próprio é igual à de Inglaterra.

3.3.2.1. AÇÃO DO VENTO

No estudo da ação do vento em condutores de uma subestação, considera-se que o vento atua numa direção horizontal e a força proveniente dessa atuação diz-se paralela a essa direção e pode ser determinada de acordo com a expressão[14]:

$$F_w = \alpha C q S \quad (48)$$

Em que:

F_w representa a força proveniente da ação do vento [N];

α representa o coeficiente de redução;

C representa o coeficiente de forma;

q representa a pressão dinâmica do vento [Pa];

S representa a área da superfície batida pelo vento [m²].

O coeficiente de redução, α , pode tomar dois valores :0,6 nos condutores e nos cabos de guarda e 1 nos apoios, travessas e isoladores.

Através da tabela 14, podemos ver os valores que o coeficiente de forma, C , pode tomar.

Tabela 14 - Valores do coeficiente de forma [14]

| Altura acima do solo (m) | Valor (Pa) | |
|--------------------------|-----------------------|----------------|
| | Vento máximo habitual | Vento Reduzido |
| Até 30 | 750 | 300 |
| De 30 a 50 | 900 | 360 |
| Acima de 50 | 1050 | 420 |

Os valores de pressão dinâmica do vento, q , varia em função da altura a que o condutor se encontra acima do solo. As alturas possíveis estão divididas em escalões e o valor que pode ter para cada escalão, consta na tabela 15.

Tabela 15 - Valores de pressão dinâmica do vento [14]

| Diâmetro (mm) | Valor |
|--------------------------|--------------|
| Até 12,5 | 1,2 |
| Acima de 12,5 e até 15,8 | 1,1 |
| Acima de 15,8 | 1,3 |

A área da superfície batida do vento, S , pode ser obtida através das equações 41 e 42, enunciadas anteriormente.

3.4. ESFORÇOS DINÂMICOS

Após o cálculo de todos os esforços estáticos que os condutores rígidos e flexíveis podem estar sujeitos, a fase seguinte é a do cálculo dos seus esforços dinâmicos. Primeiramente, é demonstrado o processo de cálculo para os condutores rígidos, que é igual para as posições verticais e horizontais. De seguida, é demonstrado o processo para os condutores flexíveis para cada uma das duas posições, vertical e horizontal, sendo que na posição vertical podemos ter os condutores em duas disposições diferentes, em *downdroppers* ou em feixe.

3.4.1. ESFORÇOS DINÂMICOS EM CONDUTORES RÍGIDOS

Os condutores rígidos podem ser suportados de diferentes maneiras, isto é, por suportes fixos, simples ou, então, uma combinação de ambos. Dependendo do número e tipo de suportes, podemos ter diferentes tensões mecânicas e diferentes forças para a mesma corrente de curto-circuito.

Para o correto dimensionamento dos condutores rígidos, relativamente aos esforços dinâmicos a que estes estão submetidos, é necessário ter em conta alguns aspetos, tais como: a elasticidade dos suportes e a relação entre a frequência do sistema e a frequência própria do sistema mecânico[12].

O algoritmo de cálculo dos esforços dinâmicos em condutores rígidos, inicia-se com a obtenção do valor de pico da força eletromagnética entre os condutores principais durante um curto-circuito trifásico[12]:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot ip^2 \cdot \frac{l}{a} \quad (49)$$

Em que:

F_{m3} representa valor de pico da força eletromagnética entre os condutores principais durante um curto-circuito trifásico [N];

μ_0 representa a permeabilidade absoluta do vácuo [H/m];

a representa a distância entre eixos dos condutores [m];

l representa a distância entre eixos dos suportes [m];

ip representa a corrente de choque ou de pico de um curto-circuito trifásico [A].

De seguida, procede-se ao cálculo da frequência própria do condutor, calculada a partir de[12]:

$$f_{cm} = \frac{\gamma}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m'_s}} \quad (50)$$

Em que:

f_{cm} representa a frequência própria do condutor [Hz];

γ representa um fator para a estimação da frequência própria;

E representa o módulo de elasticidade ou de *Young* [N/m²];




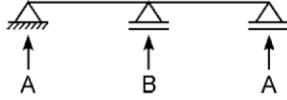
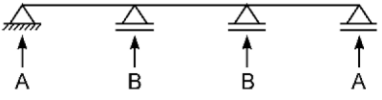
J representa o momento de inércia [m⁴];

m'_s representa a massa por unidade de comprimento de um subcondutor [Kg/m];

l representa a distância entre eixos dos suportes[m].

O valor de γ , pode ser obtido recorrendo-se a tabela 16.

Tabela 16 – Fatores α, β e γ para diferentes disposições de apoios de barramentos [12]

| Tipo de viga e de suporte | | Fator α | Fator β | Fator γ |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|----------------|
| Vigas de um vão só | A e B: Suportes simples  | A:0,5 B:0,5 | 1,0 | 1,57 |
| | A: Suporte embutido B: Suporte simples  | A:0,625 B:0,375 | $\frac{8}{11} = 0,73$ | 2,45 |
| | A e B: Suportes embutidos  | A:0,5 B:0,5 | $\frac{8}{16} = 0,5$ | 3,56 |
| Viga continua com suportes simples equidistantes | Dois vãos  | A:0,375 B:1,25 | $\frac{8}{11} = 0,73$ | 2,45 |
| | Três ou mais vãos  | A:0,4 B:1,1 | $\frac{8}{11} = 0,73$ | 3,56 |

Após o cálculo da frequência própria dos condutores, efetua-se o apuramento das tensões mecânicas[12]:

$$\sigma_{m,d} = V_{om} \cdot V_{rm} \cdot \beta \cdot \frac{F_m l}{8W} \quad (51)$$

Em que:

$\sigma_{m,d}$ representa a tensão mecânica [N/mm²];

V_{om} e V_{rm} representam fatores que têm em conta os fenómenos dinâmicos;

β representa um fator correspondente à tensão mecânica de um condutor principal;

F_m representa o valor de pico da força eletromagnética entre os condutores principais durante um curto-circuito trifásico[N];

W representa o módulo de flexão [cm³];

l representa a distância entre eixos dos suportes[m].

O fator β descreve a redução da tensão de flexão no local dos suportes dos condutores, tendo em conta a deformação plástica dos condutores [12] e pode ser obtido através da tabela 17.

Os fatores $V_{\sigma m}$ e $V_{r m}$ podem ser obtidos através das figuras 15 e 16 ou através das tabelas 17 e 18. Estes valores dependem da relação entre a frequência própria do sistema (f_{cm}) e a frequência do sistema (f) [12].

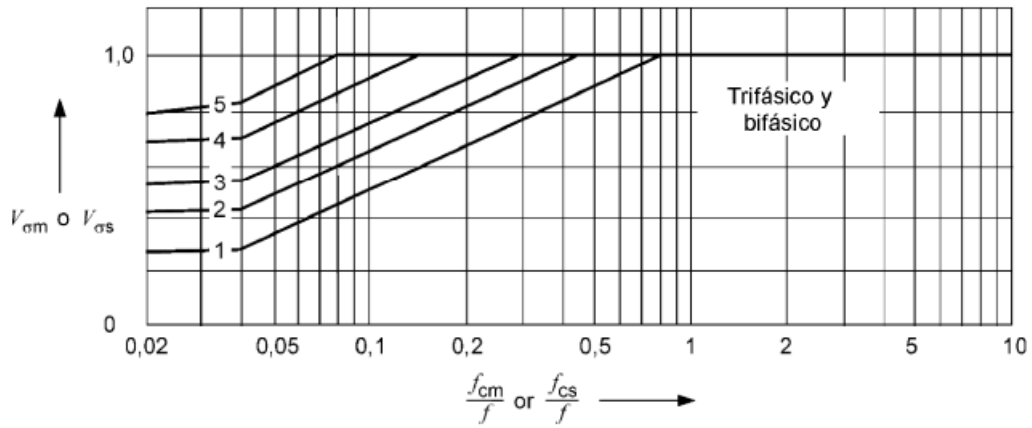


Figura 15 – Fator $V_{\sigma m}$ a usar em curto-circuito trifásicos [12]

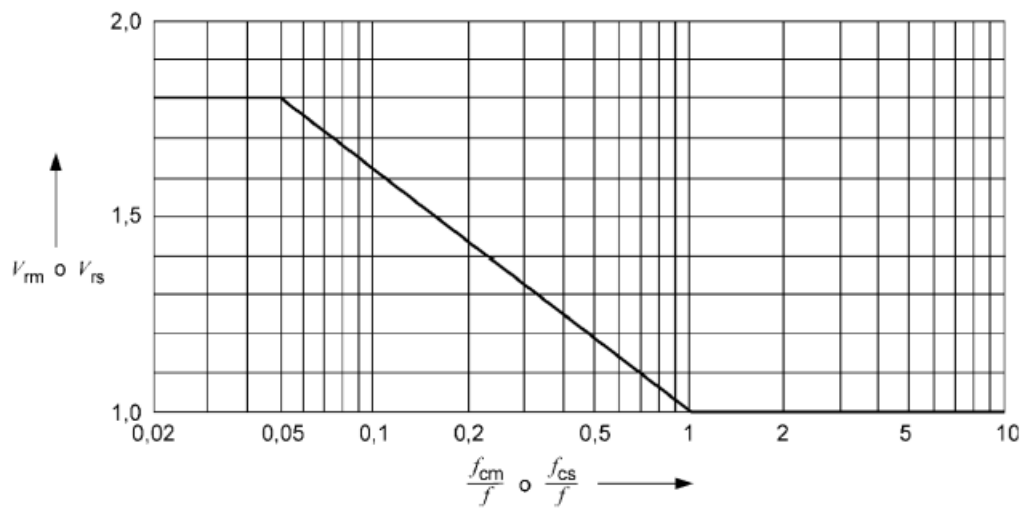


Figura 16 - Fator $V_{r m}$ a usar em curto-circuito trifásicos [12]

Tabela 17 Valor do fator $V_{\sigma m}$ [12]

| $\frac{fcm}{f}$ | Fator $V_{\sigma m}$ |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| < 0,04 | $0,0929 + 4,49e^{-1,68k} + 0,0664 \lg\left(\frac{fcm}{f}\right)$ |
| 0,04 – 0,8 | Máximo valor de $V_{\sigma 1}$ e $V_{\sigma 2}$ $V_{\sigma 1} = 0,756 + 4,49e^{-1,68k} + 0,54 \lg\left(\frac{fcm}{f}\right)$ $V_{\sigma 2} = 1$ |
| > 0,8 | 1 |

k = 1,6

Tabela 18 Valor do fator V_{rm} [12]

| $\frac{fcm}{f}$ | Fator V_{rm} |
|-----------------|-------------------------------------------|
| < 0,05 | 1,8 |
| 0,05 – 1 | $1 - 0,615 \lg\left(\frac{fcm}{f}\right)$ |
| > 1 | 1 |

Por fim, resta calcular a força estática equivalente [12]:

$$F_{r,d} = V_F \cdot V_{rm} \cdot \alpha \cdot F_m \quad (52)$$

Em que:

$F_{r,d}$ representa a força estática equivalente [N];

V_F e V_{rm} representam fatores que têm em conta os fenômenos dinâmicos;

α representa o fator relativo a força sobre um suporte;

F_m representa o valor de pico da força eletromagnética entre os condutores principais durante um curto-circuito trifásico[N].

O valor de α depende do tipo e do número de suportes e pode obter-se através da tabela 16. Quanto aos fatores V_F e V_{rm} , podem ser obtidos através da figura 17 e 16 e de acordo com a tabela 18 e 19, respectivamente.

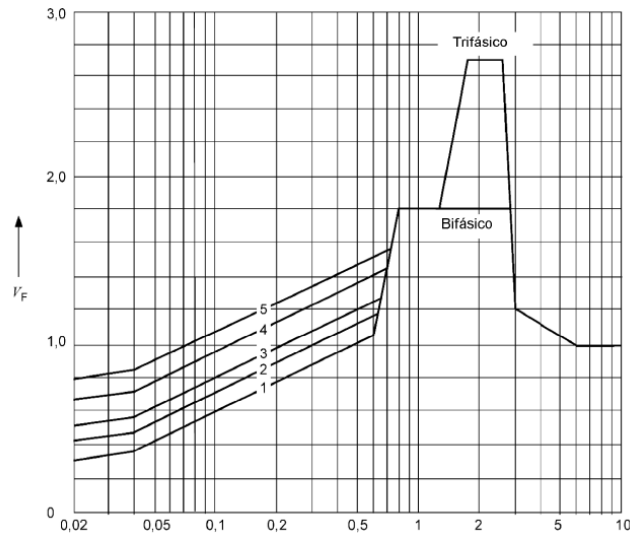


Figura 17 - Fator V_F a usar em curto-circuito trifásicos [12]

Tabela 19 - Valores de V_F [12]

| $\frac{f_{cm}}{f}$ | Fator V_F |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Curto-circuito trifásico |
| < 0,04 | $0,232 + 3,52e^{-1,45k} + 0,166 \lg\left(\frac{f_{cm}}{f}\right)$ |
| 0,04 – 0,8 | Máximo valor de V_{F1} e V_{F2} $V_{F1} = 0,839 + 3,52e^{-1,45k} + 0,6 \lg\left(\frac{f_{cm}}{f}\right)$ $V_{F2} = 2,38 + 6,00 \lg\left(\frac{f_{cm}}{f}\right)$ |
| 0,8 – 1,2 | 1,8 |
| 1,2 – 1,6 | $1,23 + 7,2 \lg\left(\frac{f_{cm}}{f}\right)$ |
| 1,6 – 2,4 | 2,7 |
| 2,4 – 2,74 | $8,59 - 15,5 \lg\left(\frac{f_{cm}}{f}\right)$ |
| 2,74-3,0 | $8,59 - 15,5 \lg\left(\frac{f_{cm}}{f}\right)$ |
| 3,0 – 6,0 | $1,50 - 0,646 \lg\left(\frac{f_{cm}}{f}\right)$ |
| > 6,0 | 1,0 |
| $k = 1,6$ | |

3.4.2. ESFORÇOS DINÂMICOS EM CONDUTORES FLEXÍVEIS

Em instalações com condutores flexíveis é possível observar uma diferença entre três forças de tração, a força de tração devida à oscilação do condutor durante o curto-circuito ($F_{t,d}$), a força de tração de um condutor após o curto-circuito ($F_{f,d}$) e a força de tração causada pelo efeito de *pinch* ou tensão sobre um feixe de condutores (F_{pi}) [12].

Neste tipo de instalações, as tensões mecânicas produzidas em curto-circuitos bifásicos e trifásicos equilibrados são aproximadamente iguais. Em CC bifásicos a oscilação dos condutores normalmente resulta na distância mínima entre eles. Já em CC trifásicos equilibrados, o condutor central move-se ligeiramente devido a sua inércia e às forças que atuam sobre ele. Por esta razão $F_{t,d}$, $F_{f,d}$ e o deslocamento horizontal máximo, b_h , são calculados para curto-circuito bifásicos [12].

Para o cálculo dos esforços dinâmicos, mais propriamente para a obtenção das forças de tração estáticas (F_{st}), são tidas em conta três hipóteses, sendo que cada uma possui uma temperatura de funcionamento diferente.

3.4.2.1. EFEITOS SOBRE CONDUTORES HORIZONTAIS

O primeiro passo é o cálculo da força eletromagnética, exercida por unidade de comprimento, sobre os condutores flexíveis em ligações horizontais trifásicas [12]:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 0,75 \cdot i_k''^2 \cdot \frac{l_c}{l} \quad (53)$$

Em que:

F' representa a força eletromagnética [N/m];

μ_0 representa a permeabilidade absoluta do vácuo [H/m];

l representa a distância entre eixos dos suportes [m];

l_c representa o comprimento de um condutor principal flexível no vão [m];

i_k'' representa a corrente de curto-circuito trifásico simétrico [A].

De seguida, obtém-se o valor da relação entre a força eletromagnética e a força gravítica sobre um condutor (r), é um parâmetro importante, do seguinte modo[12]:

$$r = \frac{F'}{n \cdot m'_s \cdot g} \quad (54)$$

Em que:

r representa a relação entre a força eletromagnética e a força gravítica;

F' representa a força eletromagnética sobre um condutor flexível [N];

n representa o número de subcondutores de um condutor principal;

m'_s representa a massa por unidade de comprimento de um subcondutor [Kg/m];

g representa o valor convencional da aceleração da gravidade [m/s²].

A direção da força resultante exercida sobre o condutor (δ_1) [12]:

$$\delta_1 = \arctan(r) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (55)$$

Em que:

δ_1 representa a direção da força resultante exercida sobre o condutor [°];

r representa a relação entre a força eletromagnética e a força gravítica.

A flecha estática equivalente define-se como a distância vertical entre a linha que liga os suportes do condutor e o ponto central do cabo com a paralela à linha que liga os seus suportes. Num condutor flexível a meio do vão esta flecha é dada pela expressão 56 [12].

$$f_{es} = \frac{n \cdot m'_s \cdot g \cdot l^2}{8 F_{St}} \quad (56)$$

Em que:

f_{es} representa a flecha estática equivalente[m];

n representa o número de subcondutores de um condutor principal;

m'_s representa a massa por unidade de comprimento de um subcondutor [Kg/m];

g representa o valor convencional da aceleração da gravidade, obtido da tabela[m/s²];

l representa a distância entre eixos dos suportes [m];

F_{St} representa a força de tração estática num condutor principal[N].

O valor de F_{st} pode ser obtido para um estado inicial, dito como normal, através da equação anterior, em ordem a esta variável. Tendo este valor, é necessário obter os valores de F_{st} para as restantes hipóteses, ou seja, para as restantes duas temperaturas, denominadas de temperaturas de inverno e verão, respetivamente. Estes valores de F_{st} podem ser obtidos através da equação de mudança de estado. Esta equação é uma equação de equilíbrio mecânico que relaciona a tensão mecânica nos condutores num determinado estado atmosférico a partir da tensão existente noutro estado atmosférico conhecido (estado inicial)[8].

$$\theta_i + \frac{t_i}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_i^2 \cdot w \cdot l_c^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_i^2} = \theta_k + \frac{t_k}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_k^2 \cdot w \cdot l_c^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_k^2} \quad (57)$$

Em que:

θ_i e θ_k representam a temperatura no estado atmosférico i e k, respetivamente [°C];

t_i e t_k representam a tensão mecânica do condutor no estado atmosférico i e k, respetivamente[N];

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

w representa o peso específico linear[daN/m];

l_c representa o comprimento de um condutor principal flexível no vão[m];

α_d representa o coeficiente de dilatação linear do material, que pode ser obtido através da tabela 8 [°C⁻¹];

σ representa a secção transversal do condutor [mm²].

O valor do peso específico linear, pode obter-se por:

$$w = \frac{m'_s \cdot n \cdot g}{10} \quad (58)$$

Em que:

w representa o peso específico linear[daN/m];

m'_s representa a massa por unidade de comprimento de um subcondutor [Kg/m];

n representa o número de subcondutores de um condutor principal;

g representa o valor convencional da aceleração da gravidade[m/s²].

Os valores de t_i e t_k , são equivalentes a F_{st1} e F_{st2} , que correspondem ao valor da força de tração estática num condutor principal no estado inicial e ao valor da força de tração estática num condutor principal no estado 2 ou 3. Com o valor de F_{st1} e resolvendo a equação de mudança de estado em ordem a F_{st2} obtemos o seu valor.

O coeficiente de sobrecarga nos estados atmosféricos i e k, m_i e m_k , conferem um aumento do peso próprio do condutor, traduzido pela ação do vento e do gelo existente, que representam o pior estado possível. Desta forma os seus valores podem ser obtido através de[8]:

$$m = \frac{\sqrt{w + \rho g \cdot \frac{\pi}{4} [(d + 2r)^2 - d^2] + F_w^2}}{w} \quad (59)$$

Em que:

w representa o peso específico linear[daN/m];

ρg representa a densidade do gelo [kg/dm³];

d representa o diâmetro exterior do condutor [mm];

F_w representa a força proveniente da ação do vento, que pode ser obtida com recurso à velocidade do vento com a ação do gelo das equações 40 e 48 [N].

Estes valores de flecha estática equivalente e de força de tração estática num condutor principal são obtidos, inicialmente, para todos os tipos de ligação que utilizem condutor flexíveis, sendo estes tratados nesta dissertação.

De seguida, procede-se ao cálculo do período de oscilação. Este aplica-se no caso de pequenos ângulos de oscilação, sem nenhuma corrente a passar pelo condutor[12].

$$T = 2\pi \sqrt{0,8 \frac{f_{es}}{g}} \quad (60)$$

Em que:

T representa o período de oscilação[s];

f_{es} representa a flecha estática equivalente[m];

g representa o valor convencional da aceleração da gravidade[m/s²].

O período resultante da oscilação do condutor durante a passagem de uma corrente de curto-circuito define-se por[12]:

$$T_{res} = \frac{T}{\sqrt[4]{1+r^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_1}{90^\circ}\right)^2\right]} \quad (61)$$

Em que:

T_{res} representa o período resultante da oscilação do condutor[s];

T representa o período de oscilação [s];

r representa a relação entre a força eletromagnética e a força gravítica [rad];

δ_1 representa a direção da força resultante exercida sobre o condutor [°].

Agora procede-se ao cálculo da norma de rigidez[12]:

$$N = \frac{1}{S \cdot l} + \frac{1}{n E_{eff} A_s} \quad (62)$$

Em que:

N representa a norma de rigidez [N⁻¹];

S representa a constante de elasticidade resultante dos dois suportes de um vão[N/m];

l representa a distância entre eixos dos suportes [m];

n representa o número de subcondutores de um condutor principal, obtida através da tabela;

E_{eff} representa o módulo de Young real [N/m²];

A_s representa a secção transversal de um subcondutor[m²];

O valor da constante de elasticidade resultante dos dois suportes de um vão, toma o valor 100x10³ N/m

O valor de E_{eff} , pode ser calculado através das expressões 63 e 64. Este depende do valor mais baixo da tensão mecânica no condutor, (σ_{fin}), igual a 50x10⁶ N/m², quando o modulo de *young* E é constante e da relação $\frac{F_{St}}{nA_s}$ [12].

$$E_{eff} = E \cdot [0,3 + 0,7sen\left(\frac{F_{St}}{nA_s \sigma_{fin}} 90^\circ\right)], se \frac{F_{St}}{nA_s} \leq \sigma_{fin} \quad (63)$$

$$E_{eff} = E, se \frac{F_{St}}{nA_s} > \sigma_{fin} \quad (64)$$

Em que:

E representa o módulo de elasticidade ou de *Young* [N/m²];

n representa o número de subcondutores de um condutor principal;

A_s representa a secção transversal de um subcondutor[m²];

F_{St} representa a força de tração estática num condutor principal[N];

σ_{fin} representa o valor mais baixo da tensão mecânica no condutor [N/m²].

A tensão mecânica de um condutor principal, obtem-se a partir de [12]:

$$\zeta = \frac{(n \cdot g \cdot m'_s \cdot l)^2}{24 \cdot F_{St}^3 \cdot N} \quad (65)$$

Em que:

ζ representa a tensão mecânica de um condutor principal;

n representa o número de subcondutores de um condutor principal;

g representa o valor convencional da aceleração da gravidade[m/s²];

m'_s representa a massa por unidade de comprimento de um subcondutor [Kg/m];

l representa a distância entre eixos dos suportes [m];

F_{St} representa a força de tração estática num condutor principal[N];

N representa a norma de rigidez [N⁻¹].

Durante a passagem da corrente de curto-circuito, ou no seu final, o vão terá oscilado um determinado ângulo em relação à sua posição estacionária. Esse ângulo é dado por:

$$\delta_{end} = \delta_1 \cdot \left[1 - \cos \left(360^\circ \frac{T_{k1}}{T_{res}} \right) \right], se \ 0 < \frac{T_{k1}}{T_{res}} \leq 0,5 \quad (66)$$

$$\delta_{end} = 2 \cdot \delta_1, se \ \frac{T_{k1}}{T_{res}} > 0,5 \quad (67)$$

Em que:

δ_{end} representa o angulo em relação à sua posição estacionária [°];

T_{k1} é igual a *T_k* e representa o tempo de duração do curto-circuito[s];

T_{res} representa o período resultante da oscilação do condutor durante a passagem de uma corrente de curto-circuito [s];

δ₁ representa a direção da força resultante exercida sobre o condutor [°].

Caso $T_{k1} > 0,4$, então T_{k1} é igual a 0,4 T.

Esta oscilação que ocorre durante o curto-circuito tem o chamado ângulo de oscilação máxima, δ_{max} . Este depende de um determinado ângulo χ , que depende do ângulo que existe no final da passagem do curto-circuito, δ_{end} , calculado anteriormente. O ângulo χ pode ser determinado através das equações 68 e 69. δ_{max} pode ser determinado a partir das expressões 70, 71 ou 72, ou através da figura 18.

$$\chi = 1 - r \cdot \text{sen} \delta_{end}, \text{ se } 0 < \delta_{end} \leq 90^\circ \quad (68)$$

$$\chi = 1 - r, \text{ se } \delta_{end} > 90^\circ \quad (69)$$

$$\delta_{max} = 1,25 \arccos \chi, \text{ se } 0,766 < \chi \leq 1 \quad (70)$$

$$\delta_{max} = 10^\circ + \arccos \chi, \text{ se } -0,985 < \chi \leq 0,766 \quad (71)$$

$$\delta_{max} = 180^\circ, \text{ se } \chi < -0,985 \quad (72)$$

Em que:

χ representa a magnitude do ângulo máximo de oscilação [°];

δ_{max} representa o do ângulo máximo de oscilação [°];

r representa a relação entre a força eletromagnética e a força gravítica [rad];

δ_{end} representa o ângulo que existe no final da passagem do curto-circuito [°].

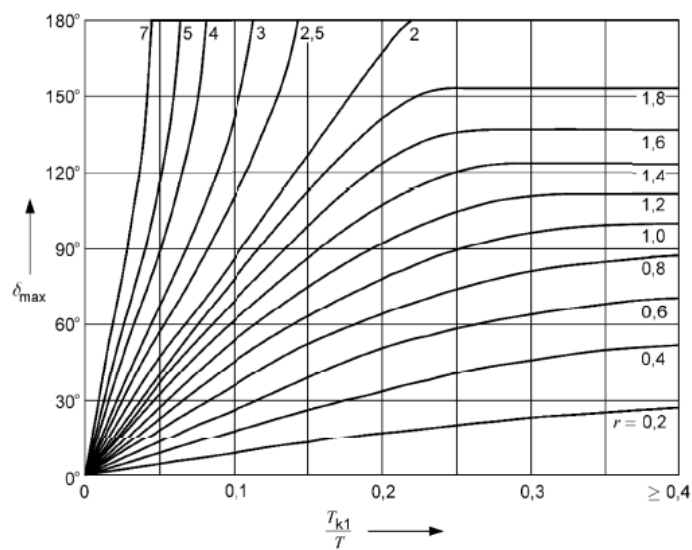


Figura 18 - Valores do ângulo máximo de oscilação δ_{max} [12]

Agora é a vez de realizar o cálculo da força de tração devido à oscilação durante um curto circuito[12]:

$$F_{t,d} = F_{st}(1 + \varphi\psi) \quad (73)$$

Em que:

$F_{t,d}$ representa a força de tração devido à oscilação durante um curto-circuito [N]

F_{st} representa a força de tração estática num condutor principal[N];

φ e ψ representam fatores relativos à força de tração de um condutor flexível

O fator φ pode ser obtido a partir das equações 74 e 75. Já o fator ψ pode ser obtido observando a figura 19, ou através da resolução da equação 76 em sua ordem.

$$\varphi = 3 \left(\sqrt{1 + r^2} - 1 \right), \text{ se } T_{k1} \geq \frac{T_{res}}{4} \quad (74)$$

$$\varphi = 3(r \text{ sen } \delta_{end} + \cos \delta_{end} - 1), \text{ se } T_{k1} < \frac{T_{res}}{4} \quad (75)$$

Em que:

r representa a relação entre a força eletromagnética e a força gravítica [rad];

δ_{end} representa o ângulo que existe no final da passagem do curto-circuito [°];

T_{k1} é igual a T_k e representa o tempo de duração do curto-circuito[s];

T_{res} representa o período resultante da oscilação do condutor durante a passagem de uma corrente de curto-circuito[s].

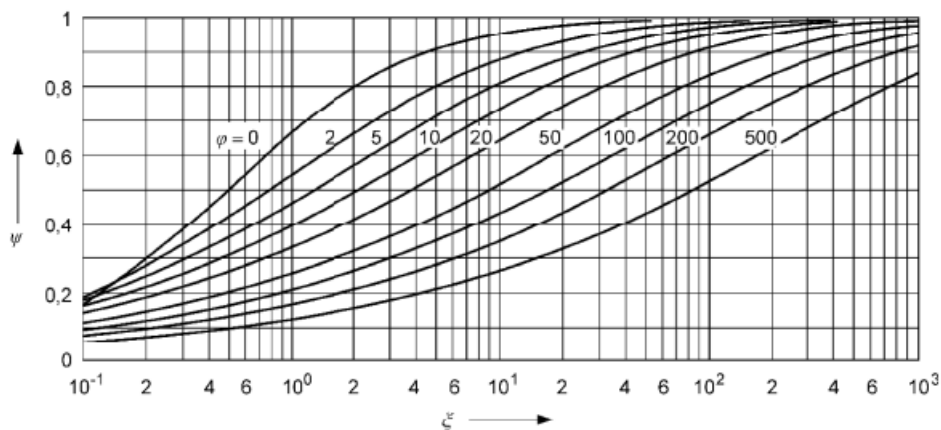


Figura 19 - Fator relativo à força de tração em condutores flexíveis [12]

$$\varphi^2 \psi^3 + \varphi(2 + \zeta) \psi^2 + (1 + 2\zeta) \psi - \zeta(2 + \varphi) = 0 \quad (76)$$

Em que:

φ e ψ representam fatores relativos à força de tração de um condutor flexível;

ζ representa a tensão mecânica de um condutor principal.

Com as alterações climáticas que o nosso mundo tem vindo a sofrer, a flecha também sofre alterações ao longo do tempo, sendo por isso muito importante que se proceda ao cálculo da flecha dinâmica[12].

Primeiramente calcula-se a expansão elástica:

$$\varepsilon_{ela} = N(F_{t,d} - F_{st}) \quad (77)$$

Em que:

ε_{ela} representa a expansão elástica;

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

$F_{t,d}$ representa a força de tração devido à oscilação durante um curto-circuito[N];

F_{st} representa a força de tração estática num condutor principal[N].

Depois a expansão térmica:

$$\varepsilon_{th} = C_{th} \cdot \left(\frac{i''_k}{nA_s}\right)^2 \cdot \frac{T_{res}}{4}, \text{ se } T_{k1} \geq \frac{T_{res}}{4} \quad (78)$$

$$\varepsilon_{th} = C_{th} \cdot \left(\frac{i''_k}{nA_s}\right)^2 \cdot T_{k1}, \text{ se } T_{k1} < \frac{T_{res}}{4} \quad (79)$$

Em que:

i''_k representa a corrente de curto-circuito trifásico simétrico[A];

T_{k1} é igual a T_k e representa o tempo de duração do curto-circuito[s];

T_{res} representa o período resultante da oscilação do condutor durante a passagem de uma corrente de curto-circuito[s];

n representa o número de subcondutores de um condutor principal;

A_s representa a secção transversal de um subcondutor[m²];

C_{th} representa a constante térmica do material [m⁴/A²s].

A constante térmica do material C_{th} , pode assumir o valor $0,88 \times 10^{-18}$ m⁴/A²s ou valor $0,27 \times 10^{-18}$ m⁴/A²s para o cobre ou alumínio, respetivamente.

O fator C_D , permite o incremento da flecha causado pelo alargamento elástico e térmico de um condutor[12]:

$$C_D = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \cdot \left[\frac{l}{f_{es}} \right]^2} \cdot (\varepsilon_{ela} + \varepsilon_{th}) \quad (80)$$

Em que:

l representa a distância entre eixos dos suportes [m];

f_{es} representa a flecha estática equivalente[m];

ε_{ela} representa a expansão elástica;

ε_{th} representa a expansão térmica.

O fator C_F permite um possível incremento da flecha dinâmica do condutor causado pela mudança de forma da curva do condutor[12]:

$$C_F = 1,05, \text{ se } r \leq 0,8 \quad (81)$$

$$C_F = 0,97 + 0,1 r, \text{ se } 0,8 < r < 1,8 \quad (82)$$

$$C_F = 1,15, \text{ se } r \geq 1,8 \quad (83)$$

Em que:

r representa a relação entre a força eletromagnética e a força gravítica.

Por fim a flecha dinâmica:

$$f_{ed} = C_F \cdot C_D \cdot f_{es} \quad (84)$$

Em que:

f_{ed} representa a flecha dinâmica [m];

C_D representa o fator que permite o incremento da flecha causado pelo alargamento elástico e térmico de um condutor;

C_F representa o fator que permite um possível incremento da flecha dinâmica do condutor causado pela mudança de forma da curva do condutor;

f_{es} representa a flecha estática equivalente[m].

Agora procede-se ao cálculo da força de tração de queda provocada após um curto-circuito[12]:

$$F_{f,d} = 1,2 \cdot F_{st} \cdot \sqrt{1 + 8 \cdot \zeta \cdot \frac{\delta_{max}}{180^\circ}} \quad (85)$$

Em que:

$F_{f,d}$ representa a força de tração de queda [N];

F_{st} representa a força de tração estática num condutor principal[N];

ζ representa a tensão mecânica de um condutor principal;

δ_{max} representa o ângulo de oscilação máxima [°].

O deslocamento horizontal máximo de um vão, pode definir-se por:

$$b_h = f_{ed}, \text{ se } \delta_{max} \geq 90^\circ \quad (86)$$

$$b_h = f_{ed} \cdot \text{sen} \delta_{max}, \text{ se } \delta_{max} < 90^\circ \quad (87)$$

Em que:

b_h representa o deslocamento horizontal máximo[m];

f_{ed} representa a flecha dinâmica [m];

δ_{max} representa o ângulo de oscilação máxima [°].

Com isto, a distância mínima entre os condutores é dada por:

$$a_{min} = a - 2b_h \quad (88)$$

Em que:

a representa a distância entre eixos dos condutores [m];

b_h representa o deslocamento horizontal máximo de um vão[m].

Se estivermos perante uma configuração de feixe simétrico, ou seja, que o número de subcondutores, n , é maior que 1 e menor ou igual a 4, procedemos ao cálculo da força de pinch, da seguinte forma[8][12]:

$$F_{pi,d} = 1,1 F_{t,d} \quad (89)$$

Em que

$F_{t,d}$ representa a força de tração devido à oscilação durante um curto-circuito

Quando as distâncias entre os subcondutores, a_s , e o espaçamento entre os separadores, l_s , satisfazem as equações seguintes, é seguro dizer que os subcondutores colidem:

$$\frac{a_s}{d} \leq 2,0 \text{ e } l_s \geq 50 a_s \quad (90)$$

$$\frac{a_s}{d} \leq 2,5 \text{ e } l_s \geq 70 a_s \quad (91)$$

Em que:

a_s representa a distância entre os subcondutores[m];

l_s representa o espaçamento entre os separadores [m];

d representa o diâmetro exterior de um condutor tubular[mm].

Caso as condições anteriores não forem satisfeitas, o cálculo de $F_{pi,d}$ desenvolve-se de outra forma[12].

Primeiramente é necessário calcular a força da corrente de curto-circuito, F_V , dada por:

$$F_V = (n - 1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{i_k''}{n}\right)^2 \cdot \frac{l_s}{a_s} \cdot \frac{V_2}{V_3} \quad (92)$$

Em que:

F_V representa a força da corrente de curto-circuito[N];

μ_0 representa a permeabilidade absoluta do vácuo [H/m];

n representa o número de subcondutores de um condutor principal;

i_k'' representa a corrente de curto-circuito trifásico simétrico[A];

a_s representa a distância entre os subcondutores [m];

l_s representa o espaçamento entre os separadores[m];

V_2 e V_3 representam fatores para o cálculo de $F_{pi,d}$.

O fator V_2 é dado em função do fator V_1 , obtido pela equação 93 e posteriormente da figura 20. O valor de V_2 também pode ser obtido com recurso à equação 94.

$$V_1 = f \cdot \frac{1}{\text{sen} \frac{180^\circ}{n}} \cdot \sqrt{\frac{(a_s - d) \cdot m'_s}{\frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{l'_k}{n}\right)^2 \cdot \frac{n-1}{a_s}}} \quad (93)$$

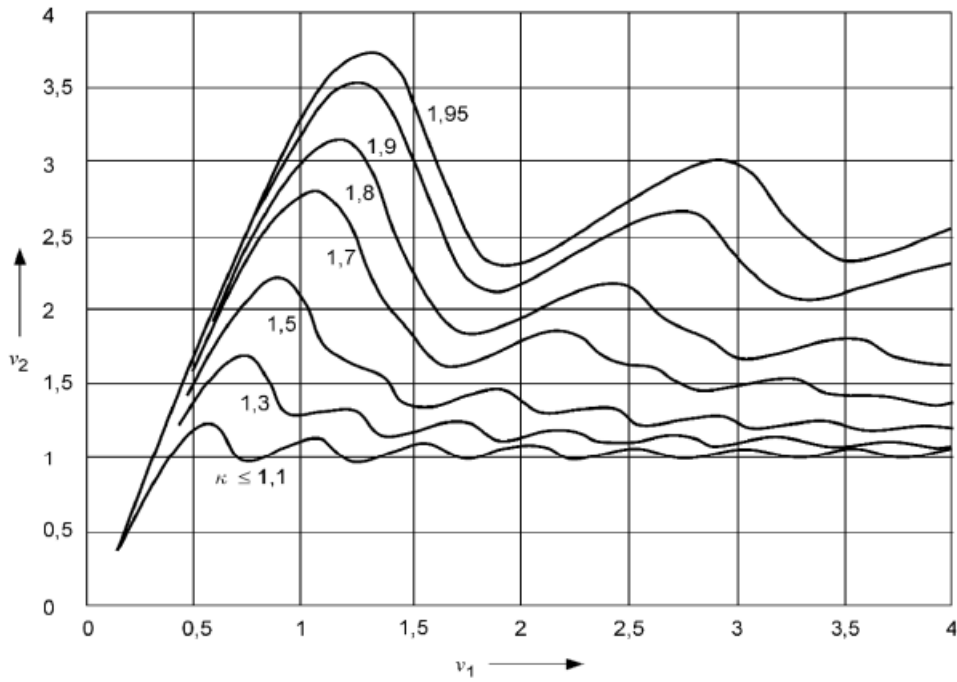


Figura 20 - V_2 em função de V_1 [12]

$$V_2 = 1 - \frac{\text{sen}(4\pi f T_{pi} - 2\gamma) + \text{sen}2\gamma}{4\pi f T_{pi}} + \frac{f\tau}{f T_{pi}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2f T_{pi}}{f\tau}}\right) \text{sen}^2 \gamma - \frac{8\pi f \tau \text{sen} \gamma}{1 + (2\pi f \tau)^2} \left\{ \left(2\pi f \tau \cdot \frac{\cos(2\pi f T_{pi} - \gamma)}{2\pi f T_{pi}} + \frac{\text{sen}(2\pi f T_{pi} - \gamma)}{2\pi f T_{pi}}\right) \cdot e^{-\frac{f T_{pi}}{f\tau}} + \frac{\text{sen} \gamma - 2\pi f \tau \cos \gamma}{2\pi f T_{pi}} \right\} \quad (94)$$

Em que:

τ representa a constante de tempo da rede.

O valor de τ pode ser obtido através da equação:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{2\pi f}{3} \cdot \ln \frac{k-1,02}{0,98}, \text{ com } k \geq 1,1 \text{ e } \gamma = \arctan(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau) \quad (95)$$

Se $k < 1,1$, deve utilizar-se $k=1,1$

Em que:

k representa o fator de impulso;

f representa a frequência do sistema [Hz].

O fator fT_{pi} , é dado como a solução da equação:

$$V_1 = fT_{pi}\sqrt{V_2} \quad (96)$$

O fator V_3 é dado pela figura é dado pela figura 21 e pela equação 97.

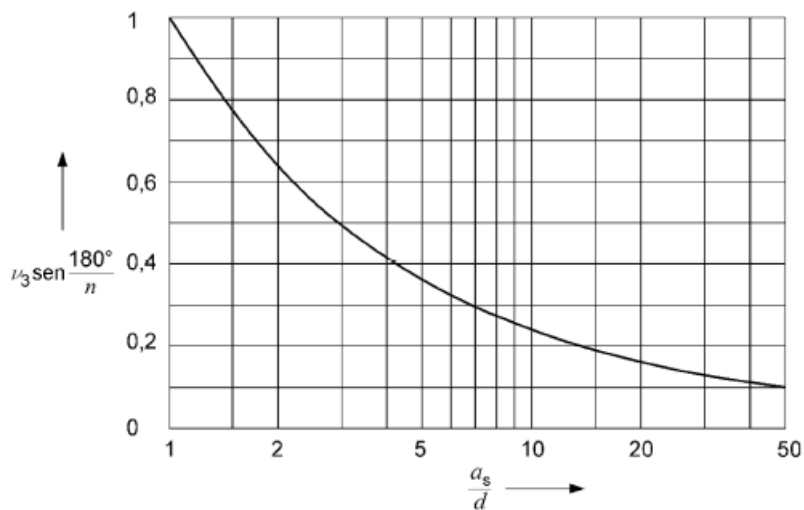


Figura 21 – $V_3 \cdot \text{sen} \left(\frac{180^\circ}{n} \right)$ em função de $\frac{a_s}{d}$ [12]

$$V_3 = \frac{\frac{d}{a_s}}{\text{sen} \left(\frac{180^\circ}{n} \right)} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{a_s}{d} \right) - 1}}{\arctan \sqrt{\left(\frac{a_s}{d} \right) - 1}} \quad (97)$$

Em que:

a_s representa a distância entre os subcondutores [m];

d representa o diâmetro exterior de um condutor tubular [mm];

n representa o número de subcondutores de um condutor principal.

Os fatores de deformação que caracterizam a contração do feixe são calculadas a partir de[12]:

$$\varepsilon_{st} = 1,5 \cdot \frac{F_{st} \cdot l_s^2 \cdot N}{(a_s - d)^2} \cdot \left(\text{sen} \frac{180^\circ}{n} \right)^2 \quad (98)$$

$$\varepsilon_{pi} = 0,375n \cdot \frac{F_V \cdot l_s^3 \cdot N}{(a_s - d)^3} \cdot \left(\text{sen} \frac{180^\circ}{n} \right)^3 \quad (99)$$

Em que:

F_{st} representa a força de tração estática num condutor principal[N];

F_V representa a força da corrente de curto-circuito[N];

l_s representa o espaçamento entre os separadores[m];

a_s representa a distância entre os subcondutores [m];

d representa o diâmetro exterior de um condutor tubular[mm];

n representa o número de subcondutores de um condutor principal;

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

Estes elementos são essenciais para o cálculo do parâmetro j , que determina a configuração da disposição de condutores durante a passagem da corrente de curto-circuito:

$$j = \sqrt{\frac{\varepsilon_{pi}}{1 + \varepsilon_{st}}} \quad (100)$$

Se $j \geq 1$, os subcondutores chocam e o cálculo da força de tração $F_{pi,d}$ é dado por:

$$F_{pi} = F_{st} \sqrt{1 + \frac{V_e}{\varepsilon_{st}} \cdot \xi} \quad (101)$$

Em que:

F_{pi} representa a força de *pinch* [N];

V_e representa um fator para o cálculo de $F_{pi,d}$;

ε_{st} representa o fator de deformação que caracterizam a contração do feixe;

ξ representa um fator para o cálculo de $F_{pi,d}$ se os subcondutores chocarem;

F_{st} representa a força de tração estática num condutor principal[N].

O valor de ξ pode ser obtido pela figura 22 ou através da resolução da equação 102, em função de ε_{st} .

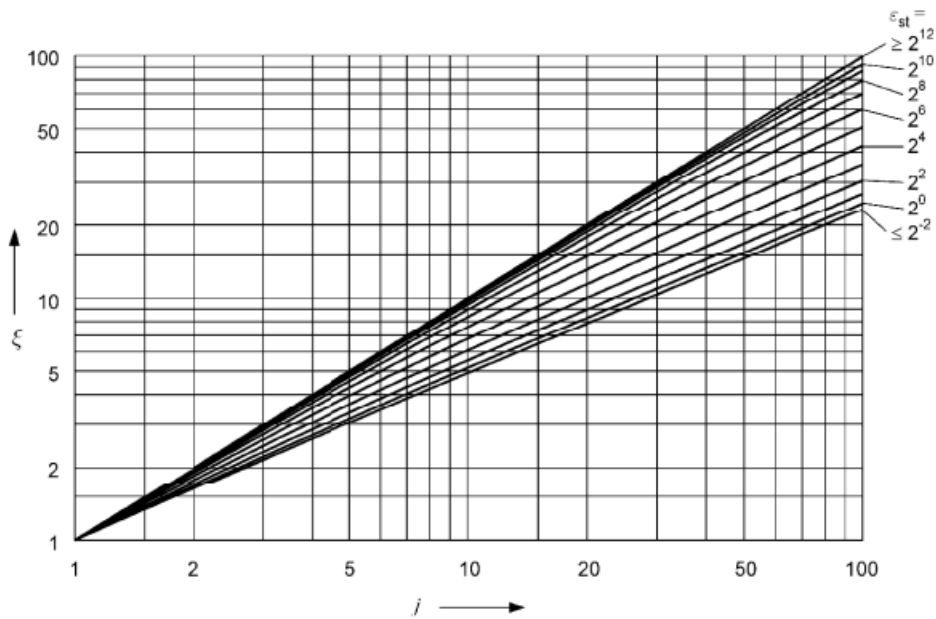


Figura 22 - ξ em função de ε_{st} [12]

$$\xi^3 + \varepsilon_{st} \xi^2 - j^2(1 + \varepsilon_{st}) = 0 \quad (102)$$

Em que:

ε_{st} representa o fator de deformação que caracterizam a contração do feixe;

j representa o parâmetro que determina a configuração da disposição de condutores durante a passagem da corrente de curto-circuito.

O valor de V_e , pode ser obtido de:

$$V_e = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} n(n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{i_k''}{n} \right)^2 NV_2 \left(\frac{l_s}{a_s - d} \right)^4 \frac{\left(\text{sen} \frac{180^\circ}{n} \right)^4}{\xi^3} \left\{ 1 - \frac{\arctan \sqrt{V_4}}{\sqrt{V_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (103)$$

Com:

$$V_4 = \frac{a_s - d}{d} \quad (104)$$

Em que:

n representa o número de subcondutores de um condutor principal;

a_s representa a distância entre os subcondutores [m];

d representa o diâmetro exterior de um condutor tubular[mm];

V_4 e V_2 representa um fator para o cálculo de $F_{pi,d}$;

μ_0 representa a permeabilidade absoluta do vácuo[H/m];

i_k'' representa a corrente de curto-circuito trifásico simétrico[A];

l_s representa o espaçamento entre os separadores[m];

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

ξ representa um fator para o cálculo de $F_{pi,d}$ se os subcondutores chocarem.

Se $j < 1$, os subcondutores reduzem a distância entre eles, mas não chocam e o cálculo da força de tração $F_{pi,d}$ é dado por:

$$F_{pi} = F_{st} \sqrt{1 + \frac{V_e}{\varepsilon_{st}} \cdot \eta^2} \quad (105)$$

Em que:

F_{pi} representa a força de *pinch* [N];

η representa um fator para o cálculo de $F_{pi,d}$;

V_e representa um fator para o cálculo de $F_{pi,d}$;

ε_{st} representa o fator de deformação que caracterizam a contração do feixe;

F_{st} representa a força de tração estática num condutor principal[N].

O valor de V_e pode ser obtido pela equação 103, e o valor de V_4 pode ser obtido pela equação 106:

$$V_4 = \eta \frac{a_s - d}{a_s - \eta(a_s - d)} \quad (106)$$

O valor de η pode ser obtido pelas figuras 23 ,24 e 25, ou através da resolução da equação 109, em função de $\frac{a_s}{d}$ e j .

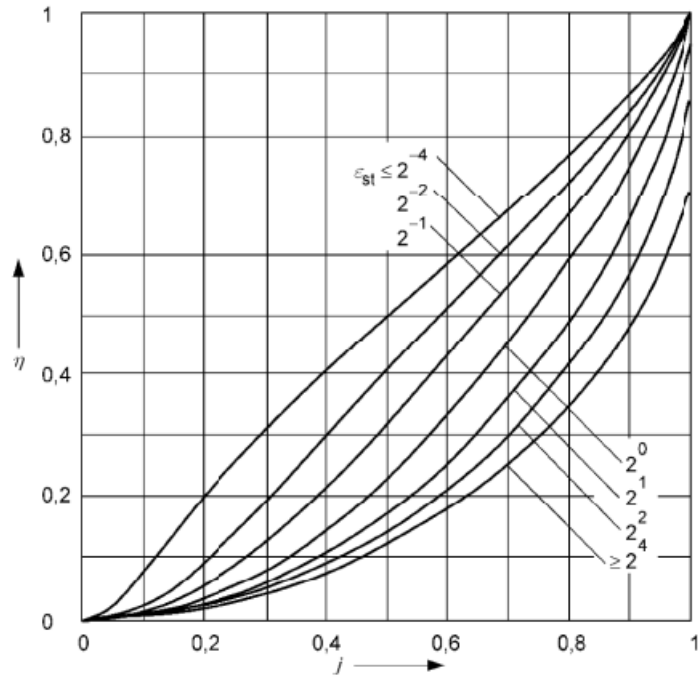


Figura 23 - η , se $2,5 < \frac{a_s}{d} \leq 5,0$ [12]

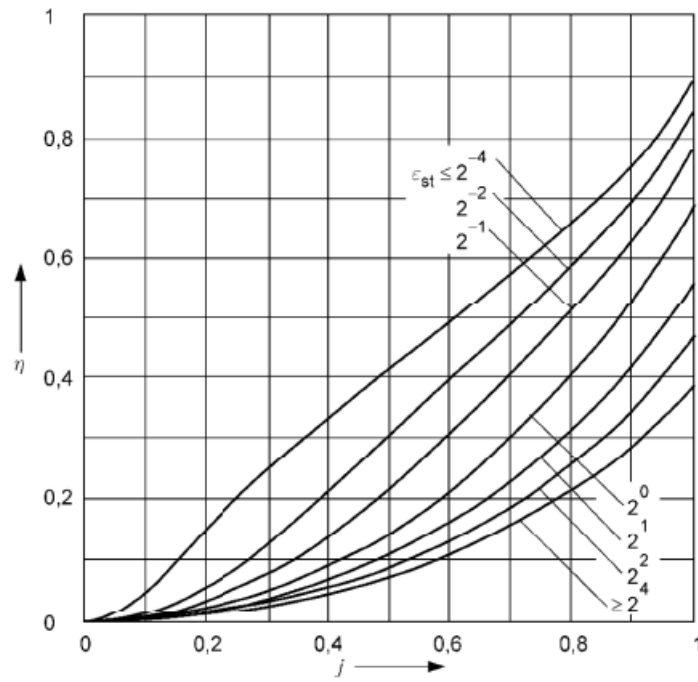


Figura 24 - η , se $5,0 < \frac{a_s}{d} \leq 10,0$ [12]

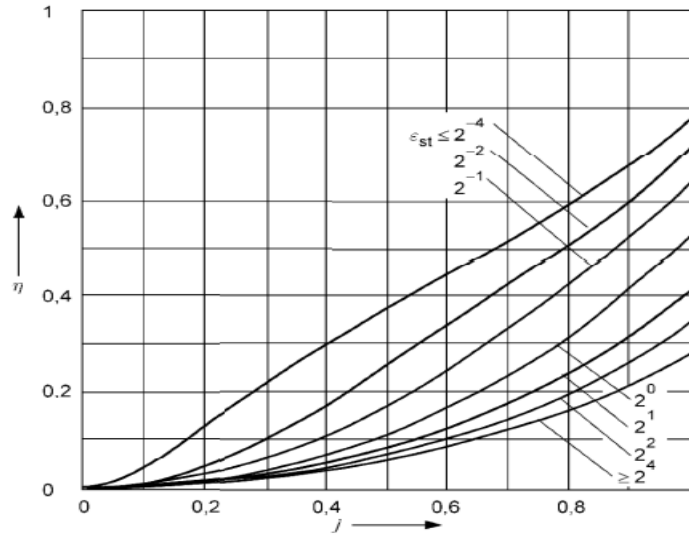


Figura 25 - η , se $10,0 < a_s/d \leq 15,0$ [12]

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

com $0 < \eta < 1$ $f_\eta = \frac{V_3}{\frac{a_{sw}}{a_s}}$ (107)

$$f_\eta = \frac{V_3}{\frac{a_{sw}}{a_s}} \quad (108)$$

$$\frac{a_{sw}}{a_s} = \frac{2 \cdot \frac{y_a}{a_s}}{\text{sen} \frac{180^\circ}{n}} \cdot \frac{\sqrt{\frac{1-2 \cdot \frac{y_a}{a_s}}{2 \cdot \frac{y_a}{a_s}}}}{\arctan \sqrt{\frac{1-2 \cdot \frac{y_a}{a_s}}{2 \cdot \frac{y_a}{a_s}}}} \quad (109)$$

$$2 \cdot \frac{y_a}{a_s} = 1 - \eta \left(1 - \frac{d}{a_s}\right) \quad (110)$$

Em que:

η representa um fator para o cálculo de $F_{pi,d}$;

ε_{st} representa o fator de deformação que caracterizam a contração do feixe;

j representa o parâmetro que determina a configuração da disposição de condutores durante a passagem da corrente de curto-circuito;

a_{sw} e y_a representa fatores para a resolução da equação 109;

a_s representa a distância entre os subcondutores [m];

d representa o diâmetro exterior de um condutor tubular[mm].

Se estivermos perante uma configuração em *downdropper*, disposta como apresentado na figura 26, esta está em contraste com o cálculo dos condutores dispostos horizontalmente, na magnitude da força máxima de curto-circuito no ponto mais baixo de fixação e na deflexão do cabo, que são independentes da massa do cabo da tensão estática do cabo e da duração do curto-circuito. Se estivermos durante o curto-circuito, só é relevante a geometria do cabo, mais propriamente, a largura e altura da ligação, bem como o comprimento do cabo, para o cálculo dos esforços dinâmicos do condutor. [12].

Para além da geometria, a força de flexão no ponto mais baixo de fixação, depende da corrente de curto-circuito i_k'' e da distância entre os condutores, que se calcula para comprimentos de cabo de $1,4w \leq l_v \leq 3,3w$ [12]:

$$F_{t,d} = \frac{5}{3} \cdot l_v \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{i_k''}{a} \right)^2 \cdot \frac{l_v}{w} \quad (111)$$

Em que:

$F_{t,d}$ representa a força de flexão no ponto mais baixo de fixação [N];

μ_0 representa a permeabilidade absoluta do vácuo [H/m];

a representa a distância entre eixos dos condutores[m];

l_v representa o comprimento do cabo[m];

w representa a largura do *dropper* [m];

i_k'' representa a corrente de curto-circuito trifásico simétrico[A].

Com as dimensões da figura 26.

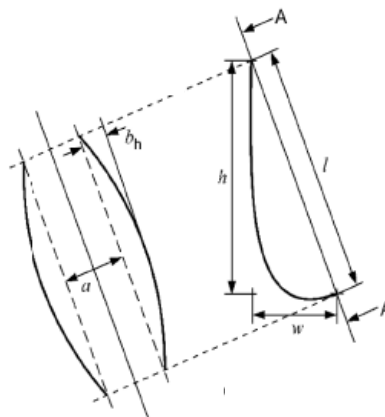


Figura 26 - Configuração em *downdropper* [12]

O deslocamento horizontal do vão depende da sua geometria e calcula-se para comprimento de cabo a $l_v \leq 2 l$ [12], a partir da seguinte equação:

$$b_h = \left[0,60 \cdot \sqrt{\frac{l_v}{l} - 1} + 0,44 \left(\frac{l_v}{l} - 1 \right) - 0,32 \ln \frac{l_v}{l} \right] \frac{l^2}{l_v} \quad (112)$$

Em que:

b_h representa o deslocamento horizontal [m];

l_v representa o comprimento do cabo[m];

l representa a distância entre eixos dos suportes[m].

Para concluir, depois de todos os cálculos efetuados têm de se comparar as diferentes forças ($F_{t,d}$, $F_{f,d}$, $F_{pi,d}$) nas três hipóteses e ver qual é a força máxima. É de notar que F_{pi} só é calculado se o número de subcondutores do condutor principal, n , for superior a 1.

4. DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA DE CÁLCULO DE ESFORÇOS ELETRODINÂMICOS

Nesta secção é descrito todo o processo de desenvolvimento da ferramenta computacional, iniciando-se 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 eletrodinâmicos sentidos nas ligações de uma subestação elétrica. Com esta ferramenta o projetista não tem de utilizar vários aplicativos para realizar o cálculo dos esforços, dispondo, assim, de uma só ferramenta capaz de obter resultados para o tipo de ligação a dimensionar. 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.

4.1. BOTÕES UTILIZADOS NA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Ao longo deste capítulo, vão ser referidos vários botões a serem usados para navegação pela aplicação. Por uma questão de clareza e para permitir um rápido conhecimento do funcionamento da ferramenta, optou-se por reunir todos os botões existentes e as suas respetivas funções na tabela 20.

Tabela 20 - Botões utilizados na ferramenta e suas respectivas funções

| Nome do Botão | Botão | Função |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Combo box Linguagem | | Permite realizar a escolha da linguagem em que aparecerão os textos da aplicação. Permite através deste fazer um <i>reset</i> do projeto até ao momento ou então continuar o que se encontra em curso |
| Combo box 1 | | Permite escolher qual o método a utilizar nos cálculos. Ao seleccionar o método, aparecerá de forma automática as variáveis constantes a utilizar nos cálculos |
| Combo box tipo de condutor Combo box material Combo box se flexível Combo box se vertical | | Permitem a introdução do tipo de condutor e de material a usar na ligação. Permite ainda introduzir a sua disposição, caso seja flexível e se esta for vertical o seu modo de ligação |
| Combo box Escolha Condutor | | Permite escolher qual o condutor a utilizar na ligação, de acordo com o tipo de condutor |
| Seta frente | | Direciona o utilizador para o próximo passo a realizar |
| Seta trás | | Direciona o utilizador para o passo imediatamente anterior, já realizado |
| RESET | | Elimina os dados introduzidos pelo utilizador de forma automática ou manual, no ecrã em que em pressionado |
| UTILIZAR OUTRO CABO | | Cria condições para que o utilizador possa introduzir um condutor que não esteja presente nas bases de dados da aplicação |
| GUADAR NA BD | | Guarda os dados do novo condutor introduzidos pelo utilizador na respetiva base de dados |
| ADICIONAR NOVO CONDUTOR ALUMÍNIO | | Permite adicionar um novo condutor de alumínio diretamente na respetiva base de dados |
| ADICIONAR NOVO CONDUTOR COBRE | | Permite adicionar um novo condutor de alumínio diretamente na respetiva base de dados |
| NOVA LIGAÇÃO | | Permite realizar o cálculo para uma nova ligação |

4.2. ARQUITETURA DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Para esquematizar, de forma generalizada, as etapas funcionais da ferramenta computacional desenvolvida, é apresentado na figura 27 um fluxograma do processo de cálculo de uma ligação da subestação.

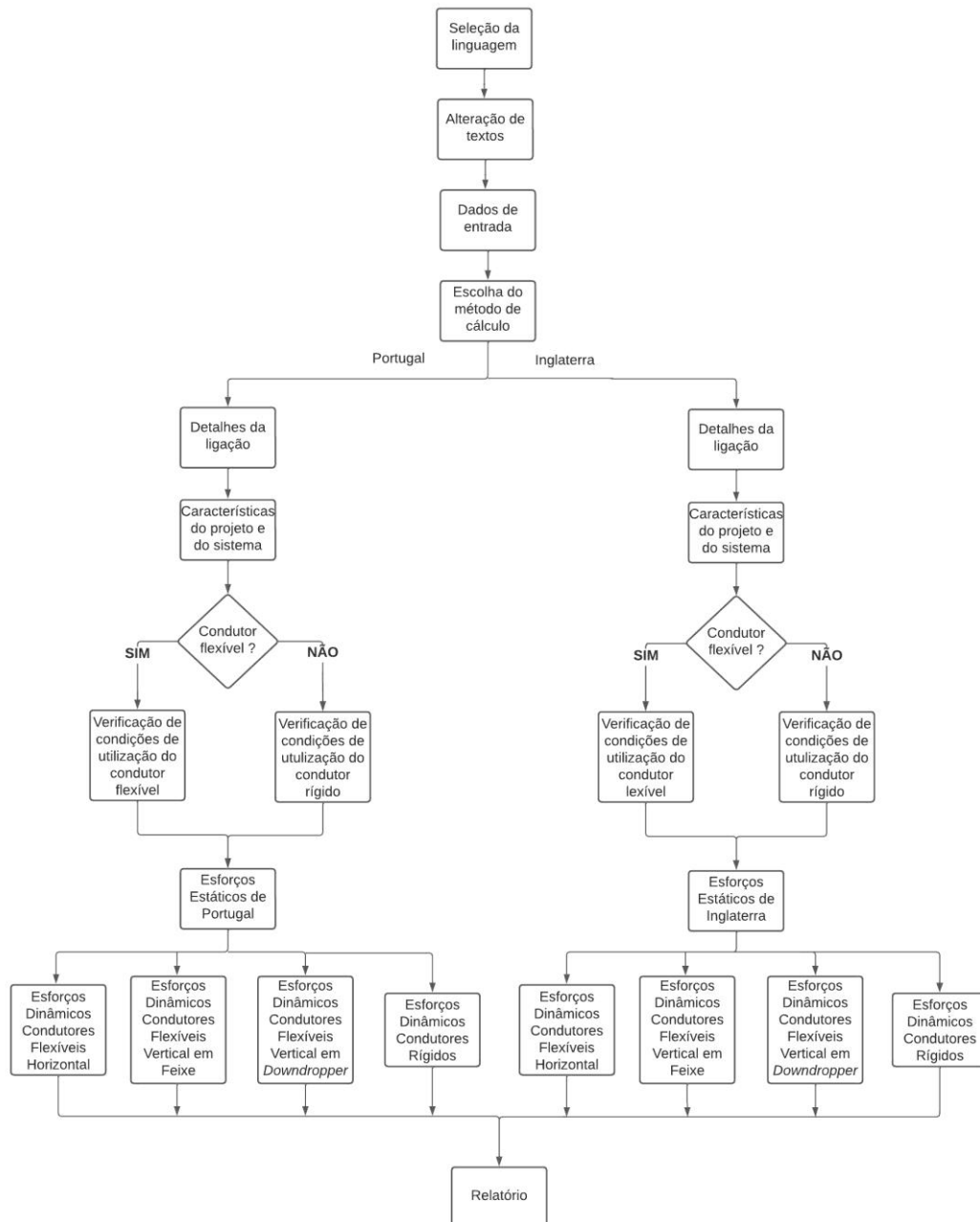


Figura 27 - Algoritmo utilizado na ferramenta computacional

4.3. FUNCIONALIDADES DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

A ferramenta computacional possui diversas funcionalidades, distribuídas pelos diferentes ecrãs existentes. Para que seja possível compreender melhor o seu funcionamento, neste subcapítulo, serão apresentadas as funcionalidades por cada ecrã presente na ferramenta.

4.3.1. ECRÃ ABERTURA

O ecrã abertura, tal como o nome indica, realiza a abertura, a página inicial da ferramenta computacional, como ilustrado na figura 28.



Figura 28 - Ecrã ABERTURA

Este ecrã contém uma *combo box* (*combo box Linguagem*), que permite fazer a seleção da linguagem apresentada nos textos da aplicação. As linguagens disponíveis são: português, alemão, espanhol, francês, inglês e italiano. Ao selecionar uma linguagem, aparecerá de forma automática, uma *msgbox* com a pergunta “Deseja iniciar um projeto novo?”. Se a resposta for “Sim”, inicia-se a substituição dos textos dos diversos ecrãs da aplicação por textos nessa linguagem. Os textos, nas diversas línguas, constam do ecrã denominado “Textos”, que permanece oculta. Para além de substituídos os textos, são eliminados todos os relatórios gerados anteriormente com a ajuda da ferramenta e ocultados todos os ecrãs. Caso a resposta seja “Não”, surgirá uma *msgbox* com a mensagem “Continuar projeto” e pressiona-se OK. Independentemente da resposta selecionada, aparece na ferramenta o ecrã denominado de “DADOS DE ENTRADA”.

4.3.2. ECRÃ DADOS DE ENTRADA

A fase inicial de um projeto de uma subestação elétrica é a definição manual das suas características gerais, entre as quais, o valor da corrente simétrica inicial de curto-circuito trifásico, a frequência do sistema e o valor fundamental da velocidade básica do vento, expressos na tabela 2. Inseridas as características, é efetuada a escolha do método de cálculo. Este método é selecionado através de uma *combo box* (*combo box 1*) e possui dois sistemas disponíveis: Portugal ou Inglaterra. A existência destes dois métodos é essencial, uma vez que no cálculo dos esforços estáticos, nomeadamente no cálculo dos esforços decorrentes da ação do vento e do gelo, é diferente, na medida que depende da localização do cliente. Após a seleção do método, aparecem de forma automática todas as variáveis cujo valor é constante nos cálculos, conforme esse mesmo método. Estas variáveis podem ser encontradas nas tabelas 4 e 5. Ainda neste ecrã, pode encontrar-se um *botão de RESET*, que ao ser pressionado, faz com que os valores dos diferentes campos fiquem a zero e sejam apagadas as constantes de cálculo. Por fim, existem duas setas denominada de *seta frente* e *seta trás*, que permitem avançar para o ecrã seguinte ou, então, retroceder para o ecrã anterior. Caso exista alguma característica da subestação por preencher, ao carregar na *seta frente*, aparecerá uma mensagem de aviso que existem dados por preencher, não deixando o utilizador avançar para o ecrã seguinte. O aspeto deste ecrã pode ser visualizado na figura 29.

DADOS DE ENTRADA

Características Subestação:

| | | | |
|--------------------------------------------------------|-----------|------|-----|
| Corrente simétrica inicial de curto-circuito trifásico | i''_k | 0 | A |
| Tempo de atuação das proteções | t_k | 0,5 | s |
| Tensão nominal do sistema | U_n | 150 | kV |
| Tensão máxima do sistema | U_m | 170 | kV |
| Corrente nominal do sistema | I_n | 135 | A |
| Frequência do sistema | f | 50 | Hz |
| Fator X/R do sistema | X/R | 10,5 | - |
| Temperatura no início do curto-circuito | e_b | 85 | °C |
| Temperatura no final do curto-circuito | e_e | 150 | °C |
| Temperatura normal | e_n | 30 | °C |
| Temperatura Inverno | e_i | -25 | °C |
| Temperatura Verão | e_v | 40 | °C |
| Valor da velocidade manutenção do vento | V_M | 10 | m/s |
| Valor fundamental da velocidade básica do vento | $V_{b,0}$ | 50 | m/s |

Escolha o método de cálculo:

CONSTANTES PORTUGAL

| | | | |
|----------------------------------|----------|----------|--------------------|
| Permeabilidade absoluta do vácuo | μ_0 | 1,26E-06 | H/m |
| Valor convencional da aceleração | g | 9,8067 | m/s ² |
| Espessura da manga de gelo | r | 10 | mm |
| Densidade do gelo | ρ_g | 0,9 | kg/dm ³ |
| Coefficiente de redução | α | 0,6 | - |

Artigo 16 - N°41- 18-02-92 Diário da República
 Artigo 16 - N°41- 18-02-92 Diário da República
 Artigo 14 - N°41- 18-02-92 Diário da República

Figura 29 - Ecrã DADOS DE ENTRADA

4.3.3. ECRÃ DE DETALHES DA LIGAÇÃO E ESCOLHA DO CONDUTOR

Após a introdução dos dados de entrada da subestação e escolhido o método de cálculo a utilizar, inicia-se a fase de inserção dos detalhes da ligação a dimensionar. Primeiramente, através da *combo box tipo de condutor*, seleciona-se o condutor, escolhendo entre o flexível e o rígido. Normalmente são utilizados condutores do tipo flexível, uma vez que são mais económicos e requerem um número reduzido de estruturas metálicas. Depois daquela decisão, seleciona-se o material, na *combo box material*, conforme se trate de alumínio ou cobre, embora o mais usado seja o de alumínio, pois resiste de forma mais eficaz à deformação e tem metade do peso do cobre. Caso a ligação seja realizada com recurso a um condutor flexível, torna-se possível escolher, através da *combo box se flexível*, qual a sua disposição relativa, isto é, se é vertical ou horizontal. Por fim, se a ligação for vertical é possível escolher, na *combo box se vertical*, se a ligação é em feixe ou em *downdropper*. As escolhas destes detalhes da ligação podem ser realizadas no ecrã de “DETALHES DA LIGAÇÃO”, como mostra a figura 30.

The screenshot shows a software interface titled "DETALHES DA LIGAÇÃO". At the top, there are two blue arrows pointing left and right. Below the title bar, there are four rows of configuration options, each with a label, a dropdown menu, and a preview box:

- Tipo de condutor:** Dropdown menu with "Flexível" selected.
- Material:** Dropdown menu with "Aluminio" selected.
- Se flexível:** A slider control with "Vertical" selected on both ends.
- Se vertical:** Dropdown menu with "DownDropper" selected.

Figura 30 - Ecrã de DETALHES DA LIGAÇÃO

Pressionando a *seta frente*, o utilizador é diretamente direcionado para o ecrã seguinte denominado de “ESCOLHA DO CONDUTOR”. Neste ecrã, é realizada a escolha do condutor, tal como o nome indica, através da *combo box Escolha Condutor*. Esta *combo box* está ligada a duas bases de dados de condutor, a BD-F e a BD-R, que são, respetivamente, uma base de dados de condutores flexíveis e uma base de dados de condutores rígidos, que se encontram ocultas. De acordo com o tipo de condutor e do material selecionados na folha anterior, esta *combo box* será preenchida com as designações dos condutores existentes na

respetiva base de dados, isto é, se o condutor for flexível, as designações de condutores que aparecerão serão aquelas que constam na base de condutores flexíveis, contudo, caso seja rígido, aparecerão as da base de dados de condutores rígidos. Normalmente, o cliente refere quais os condutores que devem ser utilizados nas ligações da sua subestação, sendo apenas necessário seleccionar esse condutor. Se o condutor a utilizar não existir na base de dados, ao pressionar-se o **botão UTILIZAR OUTRO CONDUTOR**, aparece no ecrã uma tabela limpa, onde podem ser preenchidos os dados do novo condutor. Preenchidos todos os campos relativamente ao novo condutor, ao pressionar o **botão GUARDAR NA BD**, verifica-se que o novo condutor é guardado na base de dados e, depois de termos o condutor a utilizar na base de dados, basta seleccionar esse condutor na **combo box Escolha Condutor**, aparecendo uma tabela com todos os dados do condutor. Este ecrã contém, também, um **botão de RESET** que, ao ser pressionado, limpa todo o ecrã. Por fim, existem duas setas, a **seta frente** e **seta trás**, que permitem avançar para o ecrã seguinte ou, então, retroceder para o ecrã anterior. Este ecrã, para o caso de termos um condutor flexível de alumínio, com designação “34-AL 4”, apresenta-se como na figura 31.

| Designação | As | | d | | m _s ' Massa por unidade de comprimento de um subcondutor (kg/km) | Tr Carga de rutura nominal (kN) | R Resistência elétrica máxima a 20°C (Ω/km) | E Módulo de Young (N/mm ²) | α Coeficiente de dilatação linear (1/°K) | In max Corrente máxima admissível pelo condutor A |
|------------|-------------------------|--------|------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| | Área mm ² | NºFios | Diâmetro | | | | | | | |
| | | | Condutores | Fios | | | | | | |
| 34-AL 4 | 34,40 | 7 | 2,50 | 7,50 | 0,09 | 11,17 | 0,9593 | 62,00 | 2,30E-05 | 165 |

Figura 31 - Ecrã ESCOLHA DO CONDUTOR

4.3.4. BASES DE DADOS

Tal como referido no ponto anterior, existem duas bases de dados, uma de condutores flexíveis e uma de condutores rígidos. Cada base de dados está dividida em duas, ou seja, em cada uma existe uma base de dados de condutores de alumínio e uma de cobre. Estas têm o aspeto das figuras 32 e 33.

seu cálculo aparecerão vazias, prontas a introduzir valores, caso contrário aparecerá uma sigla “NP” que significa não preencher. Após a introdução das características do sistema, verifica-se que o tipo de condutor e a referência do condutor são preenchidas automaticamente através dos dados selecionado anteriormente. Já os campos relativos aos esforços estáticos e dinâmicos são preenchidos de forma automática, após os respectivos cálculos e a criação de um relatório final onde constam todos os dados e cálculos daquela ligação. Cada coluna daquela tabela resumo, contém as características do sistema e os esforços estáticos e dinâmicos, correspondendo a uma ligação. Caso pretendamos adicionar uma nova ligação, pode utilizar-se o **botão NOVA LIGAÇÃO** e é adicionada uma nova coluna para essa mesma ligação, onde o processo de inserção de dados se volta a repetir. Para além disto, são ocultados todos os restantes ecrãs com exceção do “ABERTURA”, do “DADOS DE ENTRADA” e dos relatórios já criados até aquele momento. Aqueles ecrãs dispõem de um **botão de RESET** que elimina todas as colunas com dados e as informações do cliente, deixando o ecrã pronto a iniciar o cálculo de novas ligações. Por fim, existem duas **setas, frente e trás**, que permitem à semelhança de outros ecrãs, avançar para o ecrã seguinte ou retroceder para o ecrã anterior. Caso exista alguma característica do sistema por preencher, ao carregar na **seta frente**, aparecerá uma mensagem de aviso de dados por preencher, não deixando o utilizador avançar para o ecrã seguinte. O preenchimento deste ecrã permite ao utilizador tratar as ligações como um todo e não individualmente, como indicado na figura 34.

← →
NOVA LIGAÇÃO
RESET

SUMÁRIO

Nome do projeto:

Método de cálculo:

Nome do Cliente:

Tabela Resumo- Esforços Eletrodinâmicos

Ligação:

Características do sistema:

| | | | |
|--------------------------------------------------|-------|---|----|
| Distância entre eixos dos suportes | l | m | |
| Distância entre eixos dos condutores | a | m | |
| Número de subcondutores de um condutor principal | n | - | |
| Número de separadores | n_s | - | |
| Distância entre subcondutores | a_s | m | |
| Espaçamento entre separadores | l_s | m | |
| Comprimento do cabo | l_c | m | NP |
| Largura do obndropper | w | m | NP |
| Altura do dropper | h | m | NP |

Tipo condutor:

Referência do condutor:

Dados a preencher pelo utilizador

Dados a preenchidos automaticamente

Forças aplicadas por fase:

| Esforços Estáticos | Força do vento (com gelo)(reduzido) | $F_{w,r}$ | N |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------|---|
| | Força do vento (com gelo)(máximo habitual) | $F_{w,h}$ | N |
| | Força do vento (sem gelo)(reduzido) | $F_{w,r}$ | N |
| | Força do vento (sem gelo)(máximo habitual) | $F_{w,h}$ | N |
| | Força do vento (sem gelo) | F_{w} | N |
| | Força do vento (sem gelo) | F_{w} | N |
| | Força provocada devido ao gelo (com vento) | F_i | N |
| | Força provocada devido ao gelo (sem vento) | F_i | N |
| | Força gravítica tendo em conta o peso próprio do condutor | F_{g0} | N |
| | Força gravítica tendo em conta o peso dos separadores entre ligações | F_{g1} | N |
| Valor total da força gravítica | F_D | N | |
| Esforços Dinâmicos | Força estática equivalente suporte (A) | $F_{1,d}$ | N |
| | Força estática equivalente suporte (B) | $F_{2,d}$ | N |
| | Força de tração estática num condutor principal | $F_{1,d}$ | N |
| | Força de tração de queda | $F_{1,d}$ | N |
| | Força de flexão no ponto mais baixo de fixação | $F_{1,d}$ | N |
| | Força de pinch | $F_{1,d}$ | N |

Figura 34 - Ecrã SUMÁRIO

4.3.6. ECRÃS VERIFICAÇÃO CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO CONDUTOR

Após o preenchimento dos dados do ecrã “SUMÁRIO” e pressionada a [seta frente](#), o utilizador é redirecionado para um dos ecrãs de verificação das condições de utilização do condutor. Estes ecrãs contêm as condições de validação, ou seja, se um condutor é adequado à ligação que está a ser dimensionada e se está conforme o descrito no capítulo 3.2.

Naquelas circunstâncias existem duas possibilidades de ecrãs de verificação, sendo um ecrã para condutores rígidos e outro para condutores flexíveis, apesar de no dos condutores rígidos termos mais condições para validar do que nos flexíveis, como referido anteriormente no capítulo 3. Neste ecrã também existem duas [setas, frente e trás](#), que permitem avançar para o ecrã seguinte ou retroceder para o ecrã anterior, conforme demonstra a figura 35.

← →

VERIFICAÇÃO CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO CONDUTOR

1. CONDIÇÃO DE AQUECIMENTO

| | | | |
|------------------------------------------|-------------|---|---|
| Corrente máxima admissível pelo condutor | $I_{n\max}$ | 0 | A |
| Corrente de serviço da instalação | I_n | 0 | A |
| Validação se $I_{n\max} > I_n$ | Validado | | |

2. RESISTÊNCIA MECÂNICA

| | | | |
|------------------------------------------------|------------|-------|---------------------|
| Fator de impulso | k | 0,000 | |
| Corrente de curto-circuito trifásico simétrico | i_{sc}^3 | 0,000 | kA |
| Corrente de choque | i_p | 0,000 | kA |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 0,000 | m |
| Distância entre eixos dos condutores | a | 0,000 | m |
| Força eletrodinâmica | F | 0,000 | kgf |
| Momento fletor | M_f | 0,000 | kgf.cm |
| Carga de segurança à flexão | σ | 0,000 | kgf/cm ² |
| Diâmetro dos fios | d_i | 0,00 | mm |
| Diâmetro do exterior do condutor | d | 0,00 | mm |
| Módulo de Flexão | W | 0,000 | cm ³ |
| Momento fletor máximo | M_{fmax} | 0,000 | kgf.cm |
| Validação se $W > \frac{M_f}{\sigma}$ | Validado | | |

Figura 35 - Ecrãs VERIFICAÇÃO CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO CONDUTOR

4.3.7. ECRÃS ESFORÇOS ESTÁTICOS

Verificadas as condições de utilização dos condutores, inicia-se o cálculo dos esforços estáticos da ligação, de acordo com o demonstrado no capítulo 3.3. Dependendo do método de cálculo selecionado no ecrã “DADOS DE ENTRADA”, ao carregar-se na [seta frente](#) do ecrã anterior, podemos visualizar na tela o cálculo dos esforços estáticos, segundo o método

de Portugal ou o método de Inglaterra. Como já referido anteriormente, existem estes dois métodos, pois nestes cálculos, nomeadamente no cálculo dos esforços decorrentes da ação do vento e do gelo, o cálculo é diferente, pois depende da localização do cliente. Com este ecrã é possível obter diversas informações e valores como a força do vento no condutor, conforme tenha ou não gelo, na sua velocidade básica ou na sua velocidade de manutenção, a força provocada devido ao gelo no condutor e, ainda, a força exercida pelo seu próprio peso. Também se pode ver nestes ecrãs duas [setas, frente e trás](#), em que pressionando a [seta trás](#), regressamos a um dos ecrãs “VERIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO CONDUTOR”, pressionando a [seta frente](#), avançamos para o cálculo dos esforços dinâmicos da ligação. Podemos ver exemplares dos ecrãs nas figuras 36 e 37.

CALCULOS ESFORÇOS ESTÁTICOS

1. PORTUGAL

1.1. AÇÃO DO VENTO

| | | | |
|-------------------------------------------------|----------|---------|----------------|
| Coefficiente de redução | α | 0,600 | |
| Dilâmetro exterior do condutor | d | 2,500 | mm |
| Coefficiente de forma | c | 1,200 | |
| Área da superfície batida pelo vento (com gelo) | S | 0,070 | m ² |
| Área da superfície batida pelo vento (sem gelo) | S | 0,008 | m ² |
| Altura do condutor | z | 3,900 | m |
| Pressão dinâmica do vento (reduzido) | q | 300,000 | Pa |
| Pressão dinâmica do vento (máximo habitual) | q | 750,000 | Pa |
| Força do vento (com gelo) (reduzido) | F_W | 15,049 | N |
| Força do vento (com gelo) (máximo habitual) | F_W | 37,622 | N |
| Força do vento (sem gelo) (reduzido) | F_W | 1,672 | N |
| Força do vento (sem gelo) (máximo habitual) | F_W | 8,000 | N |

1.2. AÇÃO DO GELO

| | | | |
|--------------------------------------------------|----------|-------|------------------|
| Densidade do gelo | ρ_i | 0,900 | N/m ³ |
| Raio do condutor | R | 0,001 | m |
| Raio da manga de gelo | r | 0,010 | m |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 6,193 | m |
| Número de subcondutores de um condutor principal | n | 1,000 | - |
| Força provocada devido ao gelo | F_i | 0,002 | N |

1.3. AÇÃO DO PESO PRÓPRIO

| | | | |
|----------------------------------------------------------------------|----------|-------|------------------|
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor | m_j | 0,000 | Kg/m |
| Valor convencional da aceleração | g | 9,810 | m/s ² |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 6,193 | m |
| Força gravítica tendo em conta o peso próprio do condutor | F_{sa} | 0,006 | N |
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor (com separador) | m_{j2} | 0,000 | Kg/m |
| Força gravítica tendo em conta o peso dos separadores entre ligações | F_{s2} | 0,000 | N |
| Valor total da força gravítica | F_s | 0,003 | N |

Dados preenchidos automaticamente

Dados preenchidos manualmente

**Figura 36 - Ecrã ESFORÇOS ESTÁTICOS
PORTUGAL**

CÁLCULOS ESFORÇOS ESTÁTICOS

1. INGLATERRA

11. AÇÃO DO VENTO

| | | | |
|--------------------------------------------------------------------|----------------|----------|-------------------|
| Fator direção do vento | C_{dir} | 1,000 | |
| Fator de actuação do ano | C_{tmax} | 1,000 | |
| Valor fundamental da velocidade básica do vento | V_{b0} | 50,000 | m/s |
| Velocidade básica do vento | V_b | 50,000 | m/s |
| Altura máxima do condutor | Z_{max} | 200,000 | m |
| Altura mínima do condutor | Z_{min} | 2,000 | m |
| Comprimento da rugosidade | Z_0 | 0,050 | m |
| Comprimento da rugosidade categoria II | Z_{0II} | 0,050 | m |
| Fator do terreno | K_t | 0,190 | |
| Altura do condutor | Z | 5,000 | m |
| Fator rugosidade do terreno (Altura Z) | $C_s(Z)$ | 0,875 | |
| Fator rugosidade do terreno (Altura Zmin) | $C_s(Z_{min})$ | 0,701 | |
| Fator orográfico | $C_o(Z)$ | 1,000 | |
| Valor médio da velocidade do vento | $V_m(Z)$ | 43,749 | m/s |
| Fator de turbulência | K_z | 1,000 | |
| Desvio standard da turbulência | σ | 3,500 | |
| Intensidade da turbulência do vento (Altura Z) | $I_t(Z)$ | 0,217 | |
| Intensidade da turbulência do vento (Altura Zmin) | $I_t(Z_{min})$ | 0,271 | |
| Valor da densidade do ar | ρ | 1,250 | Kg/m ³ |
| Pressão da velocidade básica | q_b | 1562,500 | Pa |
| Pressão da velocidade do vento de pico | q_p | 3014,563 | Pa |
| Fator da espessura | $e_p(Z)$ | 1,929 | |
| Diâmetro exterior do condutor | d | 0,003 | m |
| Viscosidade cinemática do ar | ν | 0,000 | m ² /s |
| Velocidade do vento de pico a uma dada altura de referência | $v(z_r)$ | 63,450 | m/s |
| Número de Reynolds | Re | 1174,339 | |
| Risco de soldão | σ | 1,000 | |
| Fator λ | λ | 70,000 | |
| Fator efeito final (Consultar figura no lado) | ψ | 0,855 | |
| Rugosidade equivalente da superfície | k | 0,002 | mm |
| Coefficiente de força para cilindros com furo de extremidade livre | C_{FD} | 1,921 | |
| Coefficiente de força para cilindros circulares finitos | C_F | 1,643 | |
| Área da superfície batida pelo vento (com gelo) | S | 0,070 | m ² |
| Área da superfície batida pelo vento (sem gelo) | S | 0,008 | m ² |
| Força do vento (com gelo) | F_{Wc} | 344,391 | N |
| Força do vento (sem gelo) | F_{Ws} | 38,332 | N |
| Valor da velocidade manutenção do vento | V_{M1} | 10,000 | m/s |
| Força do vento de manutenção (com gelo) | F_{Wm} | 13,800 | N |
| Força do vento de manutenção (sem gelo) | F_{Wm} | 1,533 | N |

12. AÇÃO DO GELO

| | | | |
|--------------------------------------------------|----------|-------|-------------------|
| Densidade do gelo (com vento) | ρ_i | 9,000 | kN/m ³ |
| Densidade do gelo (sem vento) | ρ_i | 5,000 | kN/m ³ |
| Raio do condutor | R | 0,001 | m |
| Raio da mancha de gelo | r | 0,010 | m |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 6,193 | m |
| Número de subcondutores de um condutor principal | n | 1,000 | - |
| Força provocada devido ao gelo (com vento) | F_i | 0,011 | N |
| Força provocada devido ao gelo (sem vento) | F_i | 0,006 | N |

13. AÇÃO DO PESO PRÓPRIO

| | | | |
|----------------------------------------------------------------------|----------|-------|------------------|
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor | m_c | 0,000 | Kg/m |
| Valor convencional da aceleração | q | 3,810 | m/s ² |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 6,193 | m |
| Força gravítica teado em conta o peso próprio do condutor | F_{Gc} | 0,006 | N |
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor (com separador) | m_{cs} | 0,000 | Kg/m |
| Força gravítica teado em conta o peso dos separadores entre lixações | F_{Gc} | 0,000 | N |
| Valor total da força gravítica | F_G | 0,003 | N |

Dados preenchidos automaticamente
 Dados preenchidos manualmente

Apêndice 4.2 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 4.2 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 4.2 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 4.3 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 4.3 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 4.3 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 4.2 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 4.3 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 4.3 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 4.4 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 4.4 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 4.4 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 4.5 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 4.5 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 4.5 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 7.3 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 7.3 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 7.10 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 7.3 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 5.3 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 5.3 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 5.3 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 5.3 - BS EN 1991-1-4:2005+A1
 Apêndice 3.7 - TS 3,0104
 Apêndice 3.7 - TS 3,0104
 Apêndice 3.7 - TS 3,0104

**Figura 37 - Ecrã ESFORÇOS ESTÁTICOS
INGLATERRA**

4.3.8. ECRÃS ESFORÇOS DINÂMICOS

Posteriormente ao cálculo dos esforços estáticos, o utilizador tem à sua frente um dos quatro ecrãs relativos ao cálculo dos esforços dinâmicos sentidos pela ligação, como foi apresentado no capítulo 3.4. O ecrã visualizado pelo utilizador depende dos detalhes de ligação inseridos no ecrã “DETALHES DA LIGAÇÃO”, existindo um ecrã para os condutores rígidos, um para os condutores flexíveis com disposição horizontal, um para os condutores flexíveis com disposição vertical em feixe e, ainda, um para os condutores flexíveis com disposição vertical em *downdropper*. Estes ecrãs, como os anteriores possuem duas setas, sendo que ao carregar na **seta frente**, se gera um relatório com todos os dados da ligação e os resultados obtidos nos cálculos dos esforços dinâmicos e estáticos. Um exemplar de cada ecrã pode ser encontrado nas figuras 38, 39, 40,41,42 e 43.

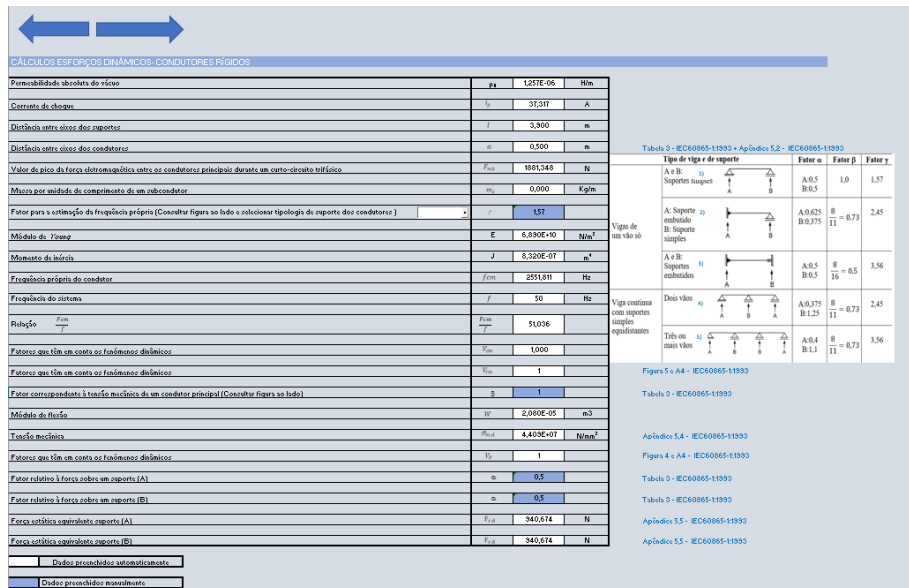
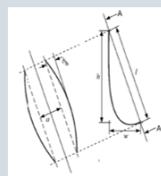


Figura 38 - Ecrã ESFORÇOS DINÂMICOS CONDUTORES RÍGIDOS



CALCULOS ESFORÇOS DINÂMICOS - CONDUTORES FLEXÍVEIS - VERTICAIS - DOWNDROPPERS

| | | | |
|----------------------------------------------------|-----------------|------------|------------------|
| Valor convencional da aceleração | g | 9,807 | m/s ² |
| Número de subcondutores de um condutor principal | n | 1 | - |
| Diâmetro exterior do condutor | d | 0,003 | mm |
| Secção transversal de um subcondutor | A _s | 34,400 | mm ² |
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor | m _s | 0,000 | Kg/m |
| Permeabilidade absoluta do vácuo | μ ₀ | 1,257E-06 | H/m |
| Corrente de curto-circuito trifásico simétrico | I _{cc} | 15 023,000 | A |
| Comprimento do cabo | L _c | 7,220 | m |
| Distância entre eixos dos condutores | a | 2,000 | m |
| Largura do downdropper | w | 2,300 | m |
| Altura do dropper | h | 5,750 | m |
| Distância entre dois suportes | j | 6,193 | m |



ESTADOS DE CALCULO

| | | | |
|------------------------|----------------|-----|----|
| 1) Temperatura normal | e _n | 30 | °C |
| 2) Temperatura inverno | e _i | -25 | °C |
| 3) Temperatura verão | e _v | 40 | °C |

1) CALCULO FORÇA DE TRAÇÃO ESTATICA - ESTADO NORMAL

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------|-------|---|
| Flecha estática equivalente (estado normal) | f _{st} | 0,619 | m |
| Força de tração estática num condutor principal (estado normal) | F _{st} | 0,007 | N |
| Coefficiente de sobrecarga no estado normal | m _n | 1 | |

Apêndice 6.2 - IEC60865-1:1933

Apêndice 6.2 - IEC60865-1:1933

2) CALCULO FORÇA DE TRAÇÃO ESTATICA - ESTADO INVERNO

| | | | |
|------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------|---------------------|
| Força do vento (com gelo) | F _w | 37,622 | N |
| Coefficiente de dilatação do material | α _g | 0,000024 | °C ⁻¹ |
| Secção transversal do condutor | α | 34,400 | mm ² |
| Peso específico linear | w | 0,000 | daN/m |
| Densidade do gelo | ρ _g | 0,300 | kg/dm ³ |
| Diâmetro exterior do condutor | d | 0,003 | mm |
| Espessura da manga de gelo | r | 10,000 | mm |
| Módulo de Young | E | 0,000 | daN/mm ² |
| Coefficiente de sobrecarga no estado Inverno | m _i | 6 605,205 | |
| Força de tração estática num condutor principal (estado normal) | F _{st} | 0,001 | daN |
| Força de tração estática num condutor principal (estado inverno) | F _{st} | 16 551 165 5104 | daN |
| Flecha estática equivalente | f _{st} | 0,000 | m |

Artigo 16 - N°41- 18-02-92 Diário da Repú

Artigo 16 - N°41- 18-02-92 Diário da Repú

Apêndice 6.2 - IEC60865-1:1933

Equação mudança de estado

Apêndice 6.2 - IEC60865-1:1933

3) CALCULO FORÇA DE TRAÇÃO ESTATICA - ESTADO VERAO

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| Força do vento (com gelo) | F _w | 37,622 | N |
| Coefficiente de dilatação do material | α _g | 0,000024 | °C ⁻¹ |
| Secção transversal do condutor | α | 34,400 | mm ² |
| Peso específico linear | w | 0,000 | daN/m |
| Densidade do gelo | ρ _g | 0,300 | kg/dm ³ |
| Diâmetro exterior do condutor | d | 0,003 | mm |
| Espessura da manga de gelo | r | 10,000 | mm |
| Módulo de Young | E | 0,000 | daN/mm ² |
| Coefficiente de sobrecarga no estado verão | m _v | ***** | |
| Força de tração estática num condutor principal (estado normal) | F _{st} | 0,001 | daN |
| Força de tração estática num condutor principal (estado verão) | F _{st} | 3,843 98,430 | daN |
| Flecha estática equivalente | f _{st} | 0,000 | m |

Artigo 16 - N°41- 18-02-92 Diário da Repú

Artigo 16 - N°41- 18-02-92 Diário da Repú

Apêndice 6.2 - IEC60865-1:1933

Equação mudança de estado

Apêndice 6.2 - IEC60865-1:1933

4) CALCULO RESTANTES PARAMETROS NOS TRES ESTADOS

| | 1) | 2) | 3) | | |
|-------------------------------------------------|-----------------|---------|---------|----------|---|
| Flecha estática equivalente | f _{st} | 0,619 | 0,000 | 0,000 | m |
| Força de tração estática num condutor principal | F _{st} | 0,007 | 165 510 | 98 430 | N |
| Validação da condição $1,4w \leq f_s \leq 3,3w$ | | | | Validado | |
| Força de flexão no ponto mais baixo de fixação | F _{fl} | 852 528 | 852 528 | 852 528 | N |
| Validação da condição $f_s \leq 2l$ | | | | Validado | |
| Distância entre eixos dos suportes | b _s | 1,425 | 1,425 | 1,425 | m |

Apêndice 6.3 - IEC60865-1:193

Apêndice 6.3 - IEC60865-1:193

Apêndice 6.3 - IEC60865-1:193

Apêndice 6.3 - IEC60865-1:193

Figura 39 - Ecrã ESFORÇOS DINÂMICOS CONDUTORES FLEXÍVEIS VERTICAIS- DOWNDROPPER



CÁLCULOS ESFORÇOS DINÂMICOS - CONDUTORES FLEXÍVEIS - HORIZONTAL

| | | | |
|-----------------------------------------------------------|------------|-----------|------------------|
| Permeabilidade absoluta do vácuo | μ_0 | 1,257E-06 | H/m |
| Corrente de curto-circuito trifásico simétrico | I_{sc}^3 | 15023,000 | A |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 6,193 | m |
| Comprimento de um condutor principal flexível no vão | l_c | 6,193 | m |
| Força eletromagnética | F^2 | 16,327 | N/m |
| Número de subcondutores de um condutor principal | n | 1 | - |
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor | m_u | 0,000 | Kg/m |
| Valor convencional da aceleração | g | 9,807 | m/s ² |
| Relação entre a força eletromagnética e a força gravítica | r | 18401,315 | |
| Direção da força resultante exercida sobre um condutor | δ_1 | 83,3963 | ° |

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1933

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1933

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1933

ESTADOS DE CÁLCULO

| | | | |
|------------------------|------------|-----|----|
| 1) Temperatura normal | θ_n | 30 | °C |
| 2) Temperatura inverno | θ_i | -25 | °C |
| 3) Temperatura verão | θ_v | 40 | °C |

1) CÁLCULO FORÇA DE TRACÇÃO ESTÁTICA - ESTADO NORMAL

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|-------|---|
| Flecha estática equivalente (estado normal) | f_{st} | 0,619 | m |
| Força de tração estática num condutor principal (estado normal) | F_{st1} | 0,007 | N |
| Coefficiente de sobrecarga no estado normal | m_1 | 1,000 | |

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1933

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1933

2) CÁLCULO FORÇA DE TRACÇÃO ESTÁTICA - ESTADO INVERNO

| | | | |
|---------------------------------------|------------|----------|--------------------|
| Força do vento (com gelo) | F_W | 37,622 | N |
| Coefficiente de dilatação do material | α_s | 0,000024 | °C ⁻¹ |
| Secção transversal do condutor | σ | 34,400 | mm ² |
| Peso específico linear | w | 0,000 | dsN/m |
| Densidade do gelo | ρ_g | 0,300 | kg/dm ³ |
| Diâmetro exterior do condutor | d | 0,0025 | mm |

Artigo 16 - NF41-18-02-32 Diário

2) CÁLCULO FORÇA DE TRACÇÃO ESTÁTICA - ESTADO INVERNO

| | | | |
|------------------------------------------------------------------|------------|----------|---------------------|
| Força do vento (com gelo) | F_W | 37,622 | N |
| Coefficiente de dilatação do material | α_s | 0,000024 | °C ⁻¹ |
| Secção transversal do condutor | σ | 34,400 | mm ² |
| Peso específico linear | w | 0,000 | dsN/m |
| Densidade do gelo | ρ_g | 0,300 | kg/dm ³ |
| Diâmetro exterior do condutor | d | 0,0025 | mm |
| Espessura da manga de gelo | r | 10,000 | mm |
| Módulo de Young | E | 0,000 | dsN/mm ² |
| Coefficiente de sobrecarga no estado inverno | m_2 | 6605,205 | |
| Força de tração estática num condutor principal (estado normal) | F_{st1} | 0,001 | dsN |
| Força de tração estática num condutor principal (estado inverno) | F_{st2} | 18,632 | dsN |
| | | 186,3161 | |
| Flecha estática equivalente | f_{st} | 0,000 | m |

Artigo 16 - NF41-18-02-32 Diário

Artigo 16 - NF41-18-02-32 Diário

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1933

***** Equação mudança de estado

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1933

3) CÁLCULO FORÇA DE TRACÇÃO ESTÁTICA - ESTADO VERÃO

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------|------------|----------|---------------------|
| Força do vento (com gelo) | F_W | 37,622 | N |
| Coefficiente de dilatação do material | α_s | 0,000024 | °C ⁻¹ |
| Secção transversal do condutor | σ | 34,400 | mm ² |
| Peso específico linear | w | 0,0001 | dsN/m |
| Densidade do gelo | ρ_g | 0,300 | kg/dm ³ |
| Diâmetro exterior do condutor | d | 0,0025 | mm |
| Espessura da manga de gelo | r | 10,000 | mm |
| Módulo de Young | E | 0,000 | dsN/mm ² |
| Coefficiente de sobrecarga no estado verão | m_3 | 6605,205 | |
| Força de tração estática num condutor principal (estado normal) | F_{st1} | 0,001 | dsN |
| Força de tração estática num condutor principal (estado verão) | F_{st2} | 12,537 | dsN |
| | | 125,3661 | |
| Flecha estática equivalente | f_{st} | 0,000 | m |

Artigo 16 - NF41-18-02-32 Diário

Artigo 16 - NF41-18-02-32 Diário

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1933

***** Equação mudança de estado

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1933

Figura 40 -Ecrã ESFORÇOS DINÂMICOS CONDUTORES FLEXÍVEIS HORIZONTAL

| 4) CÁLCULO RESTANTES PARÂMETROS NOS TRÊS ESTADOS | | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|------------------|
| | | 1) | 2) | 3) | |
| Flecha estática equivalente | f_{es} | 0,613 | 0,000 | 0,000 | m |
| Força de tração estática num condutor principal | F_{st} | 0,007 | 186,316 | 125,366 | N |
| Período de oscilação | T | 1,412 | 0,009 | 0,011 | s |
| Período resultante da oscilação do condutor | T_{res} | 0,012 | 0,000 | 0,000 | s |
| Constante de elasticidade resultante dos dois suportes de um vão | S | 1,000E+05 | 1,000E+05 | 1,000E+05 | N/m |
| Valor mais baixo da tensão mecânica no condutor | σ_{m} | 5,000E+07 | 5,000E+07 | 5,000E+07 | N/m ² |
| Módulo de Young | E | 6,200E+01 | 6,200E+01 | 6,200E+01 | N/m ² |
| Relação $\frac{F_{st}}{m_{st}}$ | $\frac{F_{st}}{m_{st}}$ | 207,004 | 5433606,873 | 3644362,248 | |
| Módulo de Young real | E_{eff} | 1,860E+01 | 2,537E+01 | 2,356E+01 | N/m ² |
| Norma de rigidez | N | 1,563E+03 | 1,119E+03 | 1,234E+03 | N ⁴ |
| Tensão mecânica de um condutor principal | ζ | 0,002 | 0,000 | 0,000 | |
| Tempo de atuação da protecção | T_k | 0,500 | 0,003 | 0,004 | s |
| Relação $\frac{T_k}{T_{res}}$ | $\frac{T_k}{T_{res}}$ | 40,621 | 45,893 | 45,893 | |
| Ângulo em relação à sua posição estacionária | θ_{est} | 173,394 | 173,394 | 173,394 | ° |
| Magnitude do ângulo máximo de oscilação | γ | -18400,315 | -18400,315 | -18400,315 | ° |
| Ângulo máximo de oscilação | θ_{max} | 180,000 | 180,000 | 180,000 | ° |
| Fator relativo à força de tração de um condutor flexível | φ | 55200,346 | 55200,346 | 55200,346 | |
| Fator relativo à força de tração de um condutor flexível | ψ | 0,394 | 0,725 | 0,861 | |
| | | 2,391E+03 | 1,160E+03 | 2,083E+03 | |
| Força de tração estática num condutor principal | F_{st} | 390,664 | 7478692,732 | 6035930,838 | N |
| Constante térmica do material | C_m | 2,700E-19 | 2,700E-19 | 2,700E-19 | m4/(A2g) |
| Expansão elástica | ϵ_{el} | 610545,4651 | ##### | ##### | |
| Expansão térmica | ϵ_{th} | 1,585E-04 | 3,781E-07 | 1,194E-06 | |
| Fator que permite o incremento da flecha causado pelo alargamento elástico e térmico de um condutor | C_p | 4784,320 | ##### | ##### | |
| Fator que permite o incremento da flecha dinâmica causado pela mudança de forma da curva do condutor | C_f | 1,150 | 1,150 | 1,150 | |
| Flecha dinâmica | f_{ed} | 3407,796 | 393011,687 | 378251,889 | m |
| Força de tração de queda | F_{fd} | 0,009 | 224,293 | 150,439 | N |
| Deslocamento horizontal máximo de um vão | b_h | 3407,796 | 393011,687 | 378251,889 | m |
| Distância mínima entre condutores | a_{min} | #REF! | #REF! | #REF! | m |
| RESUMO | | | | | |
| | | f_{ed} | F_{fd} | f_{ed} | |
| 1) | | 0,009 | 390,664 | 0 | |
| 2) | | 224,293 | ##### | 0 | |
| 3) | | 150,439 | ##### | 0 | |
| Máximo | | 224,293 | ##### | 0 | 7478692,732 |
| Dados preenchidos automaticamente | | | | | |

Figura 41-Ecrã ESFORÇOS DINÂMICOS CONDUTORES FLEXÍVEIS
HORIZONTAL(Continuação)

| CÁLCULOS ESFORÇOS DINÂMICOS - CONDUTORES FLEXÍVEIS - VERTICAIS - FEIXE | | | | | |
|------------------------------------------------------------------------|------------|-------------|------------------|-------------|----|
| Distância entre eixos dos suportes | l | 6,193 | m | | |
| Número de subcondutores de um condutor principal | n | 1,000 | - | | |
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor | m_s | 0,000 | Kg/m | | |
| Valor convencional da aceleração | g | 9,807 | m/s^2 | | |
| ESTADOS DE CÁLCULO | | | | | |
| 1) Temperatura normal | θ_n | 30 | °C | | |
| 2) Temperatura inverno | θ_i | -25 | °C | | |
| 3) Temperatura verão | θ_v | 40 | °C | | |
| 1) CÁLCULO FORÇA DE TRAÇÃO ESTÁTICA - ESTADO NORMAL | | | | | |
| Flecha estática equivalente (estado normal) | f_{st} | 0,619 | m | | |
| Força de tração estática num condutor principal (estado normal) | F_{st} | 0,007 | N | | |
| Coefficiente de sobrecarga no estado normal | m_0 | 1,000 | | | |
| 2) CÁLCULO FORÇA DE TRAÇÃO ESTÁTICA - ESTADO INVERNO | | | | | |
| Força do vento (com gelo) | F_{wv} | 37,622 | N | | |
| Coefficiente de dilatação do material | α_t | 0,000024 | $^{\circ}C^{-1}$ | | |
| Secção transversal do condutor | σ | 34,400 | mm^2 | | |
| Peso específico linear | w | 0,000 | dsN/m | | |
| Densidade do gelo | ρ_g | 0,900 | kg/dm^3 | | |
| Diâmetro exterior do condutor | d | 0,003 | mm | | |
| Espessura da manga de gelo | r | 10,000 | mm | | |
| Módulo de Young | E | 0,000 | dsN/mm^2 | | |
| Coefficiente de sobrecarga no estado inverno | m_0 | 6605,205 | | | |
| Força de tração estática num condutor principal (estado normal) | F_{st} | 0,001 | dsN | | |
| Força de tração estática num condutor principal (estado inverno) | F_{st} | 23,020 | dsN | | |
| | | 230,204 | $1,55E+11$ | | |
| Flecha estática equivalente | f_{st} | 0,000 | m | | |
| 3) CÁLCULO FORÇA DE TRAÇÃO ESTÁTICA - ESTADO VERÃO | | | | | |
| Força do vento (com gelo) | F_{wv} | 37,622 | N | | |
| Coefficiente de dilatação do material | α_t | 0,000024 | $^{\circ}C^{-1}$ | | |
| Secção transversal do condutor | σ | 34,400 | mm^2 | | |
| Peso específico linear | w | 0,000 | dsN/m | | |
| Densidade do gelo | ρ_g | 0,900 | kg/dm^3 | | |
| Diâmetro exterior do condutor | d | 0,003 | mm | | |
| Espessura da manga de gelo | r | 10,000 | mm | | |
| Módulo de Young | E | 0,000 | dsN/mm^2 | | |
| Coefficiente de sobrecarga no estado verão | m_0 | 6605,205 | | | |
| Força de tração estática num condutor principal (estado normal) | F_{st} | 0,001 | dsN | | |
| Força de tração estática num condutor principal (estado verão) | F_{st} | 16,865 | dsN | | |
| | | 168,648 | $1,19E+11$ | | |
| Flecha estática equivalente | f_{st} | 0,000 | m | | |
| 4) CÁLCULO RESTANTES PARÂMETROS NOS TRÊS ESTADOS | | | | | |
| | | 1) | 2) | 3) | |
| Flecha estática equivalente | f_{st} | 0,619 | 0,000 | 0,000 | m |
| Força de tração estática num condutor principal | F_{st} | 0,007 | 230,204 | 168,648 | N |
| Distância entre os subcondutores | a_s | 1,000 | 1,000 | 1,000 | m |
| Espaçamento entre separadores | l_p | NP | NP | NP | m |
| Diâmetro exterior do condutor | d | 0,003 | 0,003 | 0,003 | mm |
| Validação se existe colisão entre subcondutores: | | | | | |
| $\frac{a_s}{d} \leq 20 \text{ e } l_p \geq 50 a_s$ | | Não Colidem | Não Colidem | Não Colidem | |
| $\frac{a_s}{d} \leq 25 \text{ e } l_p \geq 70 a_s$ | | | | | |

Figura 42 - Ecrã ESFORÇOS DINÂMICOS CONDUTORES FLEXÍVEIS VERTICAL-FEIXE

| Se as condições anteriores não forem satisfeitas, ou seja, se não existir colisão, o cálculo de F _{pi} desenvolve-se de outro modo: | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| Permeabilidade absoluta do vócuo | μ_0 | 1,257E-06 | 1,257E-06 | 1,257E-06 | H/m |
| Corrente de curto-circuito trifásico simétrico | I_k | 15023 | 15023 | 15023 | A |
| Número de subcondutores de um condutor principal | n | 1 | 1 | 1 | - |
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor | m_b | 0,000 | 0,000 | 0,000 | Kg/m |
| Fator para o cálculo de F_{piA} | V_1 | #DIV/0! | #DIV/0! | #DIV/0! | |
| Fator de impulso | k | 1,756 | 1,756 | 1,756 | |
| Frequência do sistema | f | 50 | 50 | 50 | Hz |
| Constante de tempo da rede | τ | 0,033 | 0,033 | 0,033 | |
| Fator para o cálculo de F_{piB} | V_2 | 1,117 | 1,117 | 1,117 | |
| Fator para o cálculo de F_{piC} | V_3 | 2,680E+14 | 2,680E+14 | 2,680E+14 | |
| Força da corrente de curto-circuito | F_p | #VALOR! | #VALOR! | #VALOR! | |
| Força de tração estática num condutor principal | F_{st} | 0,007 | 230,204 | 168,646 | N |
| Constante de elasticidade resultante dos dois suportes de um vóo | S | 1,000E+05 | 1,00E+05 | 1,00E+05 | N/m |
| Valor mais baixo da tensão mecânica no condutor | σ_{m1} | 5,000E+07 | 5,000E+07 | 5,000E+07 | N/m ² |
| Módulo de γ_{swng} | E | 6,200E+01 | 6,200E+01 | 6,200E+01 | N/m ² |
| Relação $\frac{F_{st}}{m_b n}$ | $\frac{F_{st}}{m_b n}$ | 207,004 | ##### | ##### | |
| Módulo de γ_{swng} real | E_{rff} | 1,860E+01 | 2,766E+01 | 2,526E+01 | N/m ² |
| Norma de rigidez | N | 1,563E+03 | 1,051E+03 | 1,151E+03 | N ³ |
| Fator de deformação do feixe | η_1 | #VALOR! | #VALOR! | #VALOR! | |
| Fator de deformação do feixe | η_2 | #VALOR! | #VALOR! | #VALOR! | |
| Parâmetro que determina a configuração da disposição de condutores durante a passagem da corrente de curto-circuito | j | #VALOR! | #VALOR! | #VALOR! | |
| Se $j \geq 1$: | | | | | |
| Fator para o cálculo de F_{piA} | z | 0,000 | 0,000 | 0,000 | |
| Fator para o cálculo de F_{piB} | V_4 | 339,000 | 339,000 | 339,000 | |
| Fator para o cálculo de F_{piC} | V_5 | #VALOR! | #VALOR! | #VALOR! | |
| Força de pinch | F_{piD} | #VALOR! | #VALOR! | #VALOR! | N |
| Se $j < 1$: | | | | | |
| Fator para o cálculo de F_{piA} | η | 1000,000 | 100,000 | 100,000 | |
| Fator para o cálculo de F_{piB} | V_6 | -1,001 | -1,010 | -1,010 | |
| Fator para o cálculo de F_{piC} | V_7 | #VALOR! | #VALOR! | #VALOR! | |
| Força de pinch | F_{piE} | #VALOR! | #VALOR! | #VALOR! | N |
| RESUMO | | | | | |
| | F_{piA} | F_{piB} | F_{piC} | | |
| 1) | 0,000 | 330,664 | #VALOR! | | |
| 2) | 224,239 | ##### | 0,000 | | |
| 3) | 150,433 | ##### | 0,000 | | |
| Máximo | 224,239 | ##### | #VALOR! | | #VALOR! |
| Dados preenchidos automaticamente | | | | | |


Figura 43 - Ecrã ESFORÇOS DINÂMICOS CONDUTORES FLEXÍVEIS VERTICAL-FEIXE (Continuação)

4.3.9. RELATÓRIO DO CÁLCULO

Depois de realizado o cálculo dos esforços eletrodinâmicos das ligações, o utilizador já tem os resultados pretendidos. Para que o utilizador consiga ver os resultados com um aspeto mais profissional, ao carregar na seta frente de um dos ecrãs de cálculo dos esforços dinâmicos, é gerado um relatório final da ligação, sendo que a primeira folha contém informações como o nome do cliente, o título do projeto, o título da ligação que está a ser

dimensionada e, ainda, todos os cálculos efetuados para aquela ligação. A segunda folha contém os dados mais importantes que podem ser retirados do processo de cálculo e, também, alguns anexos que permitem obter o valor de algumas variáveis do processo. Gerado o relatório, como referido anteriormente, na folha sumário são preenchidos automaticamente os valores dos esforços estáticos e dinâmicos da ligação a dimensionar. Para se proceder ao cálculo de uma nova ligação basta selecionar o ecrã “SUMÁRIO” e carregar no [botão NOVA LIGAÇÃO](#).

Exemplos de excertos de um desses relatórios são apresentados nas figuras 44 e 45.



| | | | |
|-------------------|------------|--|--|
| PROJETO | | | |
| ENGENHEIRO | DP | | |
| DATA | 30/10/2020 | | |
| CLIENTE | | | |
| TÍTULO | 1 | | |

| | | | | | |
|------------|----------|--------------------------------------------------------|------------------|------|-----|
| REF | 1 | Descrição do cálculo | | | |
| | | | | | |
| 2 | | Dados de entrada | | | |
| | | Corrente simétrica inicial de curto-circuito trifásico | ik'' | 7470 | A |
| | | Tempo de atuação das proteções | Tk | 0,5 | s |
| | | Tensão nominal do sistema | Un | 30 | kV |
| | | Tensão máxima do sistema | Um | 36 | kV |
| | | Corrente nominal do sistema | In | 1250 | A |
| | | Frequência do sistema | f | 50 | Hz |
| | | Fator X/R do sistema | X/R | 10,5 | - |
| | | Temperatura no início do curto-circuito | θb | 85 | °C |
| | | Temperatura no final do curto-circuito | θc | 200 | °C |
| | | Temperatura normal | θn | 30 | °C |
| | | Temperatura de Inverno | θi | -25 | °C |
| | | Temperatura de Verão | θv | 30 | °C |
| | | Valor da velocidade de manutenção do vento | V _M | 10 | m/s |
| | | Valor fundamental da velocidade básica do vento | V _{b,0} | 50 | m/s |

Figura 44 - Excerto do relatório (Folha 1)

| | | | | |
|-------|----------------------------------------------------------------------|----------|----------|---|
| 8.1 | Zustand der Heizung | | | |
| | Validação se $I_n \max > I_n$ | | Validado | |
| 8.2 | Mechanischer Widerstand | | | |
| | Validação se $w > \frac{M}{\sigma}$ | | Validado | |
| 8.3 | Kurzschlussstromkapazität | | | |
| | Validação se $A_s > S_{min}$ | | Validado | |
| 8.4 | Krona-Effekt | | | |
| | Validação se $U'_c > U_m$ | | Validado | |
| 8.5 | Statische Bemühungen-Windwirkung | | | |
| | Força do vento (com gelo) (reduzido) | F_{w1} | 15,049 | N |
| | Força do vento (com gelo) (máximo habitual) | F_{w2} | 37,622 | N |
| | Força do vento (sem gelo) (reduzido) | F_{w3} | 1,672 | N |
| | Força do vento (sem gelo) (máximo habitual) | F_{w4} | 8,000 | N |
| 8.6 | Statische Bemühungen-Eis-Aktion | | | |
| | Força provocada devido ao gelo | F_i | 0,002 | N |
| 8.7 | Statische Bemühungen-Aktion Eigengewicht | | | |
| | Força gravítica tendo em conta o peso próprio do condutor | F_{sb} | 0,006 | N |
| | Força gravítica tendo em conta o peso dos separadores entre ligações | F_{st} | 0,000 | N |
| | Valor total da força gravítica | F_D | 0,003 | N |
| 8.8 | Dynamische Kräfte | | | |
| 8.8.1 | Statische Zugkraftberechnung - Normalzustand | | | |

Figura 45 - Excerto do relatório (folha2)

5. CASO DE ESTUDO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo é apresentado um exemplo prático do processo de cálculo dos esforços eletrodinâmicos de uma subestação elétrica, utilizando a ferramenta de cálculo desenvolvida e apresentada nesta dissertação. A subestação utilizada como exemplo é uma subestação de 150/30 kV para ligação de um parque fotovoltaico. Este é um projeto que se encontra a decorrer e que tem, entre outras referências, a norma IEC 60865-1 e a norma IEC 60909-0. Serão apresentados dois casos de estudo, um para um condutor rígido e outra para um condutor flexível com disposição horizontal.

5.1. ECRÃ DE ABERTURA

Após abrir a ferramenta computacional, os projetistas têm de escolher, em primeiro lugar, qual a sua linguagem. Como se trata de um projeto novo, quando aparecer uma *msgbox* com a pergunta “Deseja iniciar um projeto novo?”, deve pressionar “SIM” para que se possa então iniciar o projeto. Ao visualizar as figuras que se apresentam neste capítulo, os números a vermelho representam a ordem pela qual devem ser realizadas as escolhas do projetista.

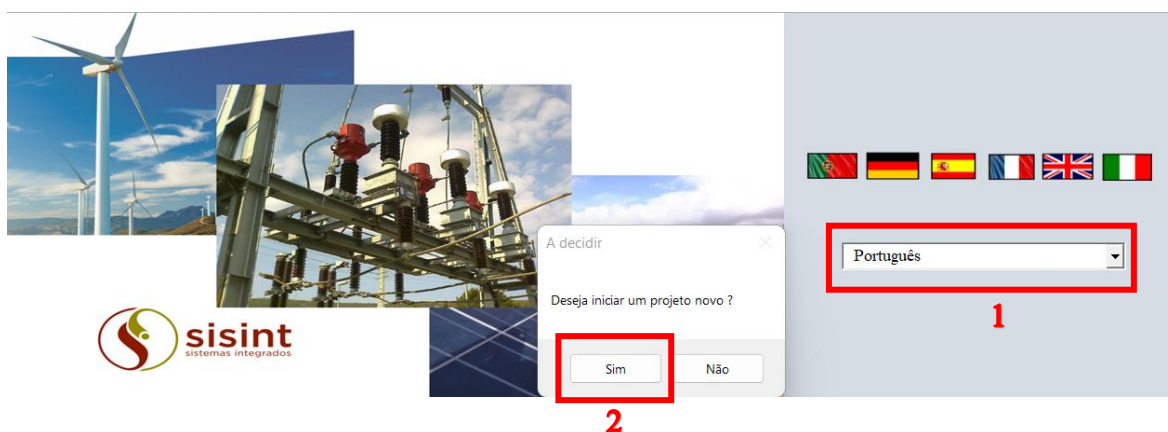


Figura 46 - Ecrã de abertura

5.2. ECRÃ DADOS DE ENTRADA

No ecrã de entrada, o passo inicial a realizar por um projetista quando pretende realizar um projeto novo, é analisar o que é pedido pelo cliente e todas as suas exigências. Assim, o utilizador introduz os dados de entrada, que são as características da subestação, contemplando dados como as temperaturas de funcionamento, correntes de curto-circuito, frequência, entre outros. Para além disto, deve escolher qual o método de cálculo a ser utilizado e ver as variáveis constantes deste a aparecer no ecrã de forma automática. Depois de tudo preenchido deve carregar na **seta frente**, de forma a averiguar se todos os dados estão preenchidos e que o projetista se encontra em condições de ir para o ecrã seguinte. No caso da subestação em estudo, os dados introduzidos são os apresentados nas figuras 47 e 48, utilizando, nestes casos de estudo o método de cálculo Portugal.

| DADOS DE ENTRADA | | | |
|--------------------------------------------------------|------------|----------|--------------------|
| Características Subestação: | | | |
| Corrente simétrica inicial de curto-circuito trifásico | I_{sc}^3 | 7470 | A |
| Tempo de atuação das proteções | T_R | 0,5 | s |
| Tensão nominal do sistema | U_n | 30 | kV |
| Tensão máxima do sistema | U_m | 36 | kV |
| Corrente nominal do sistema | I_n | 1250 | A |
| Frequência do sistema | f | 50 | Hz |
| Fator X/R do sistema | X/R | 10,5 | - |
| Temperatura no início do curto-circuito | θ_b | 85 | °C |
| Temperatura no final do curto-circuito | θ_e | 200 | °C |
| Temperatura normal | θ_n | 30 | °C |
| Temperatura Inverno | θ_i | -25 | °C |
| Temperatura Verão | θ_v | 30 | °C |
| Valor da velocidade manutenção do vento | V_M | 10 | m/s |
| Valor fundamental da velocidade básica do vento | $V_{0,9}$ | 50 | m/s |
| Escolha o método de cálculo: | | | |
| CONSTANTES PORTUGAL | | | |
| Permeabilidade absoluta do vácuo | μ_0 | 1,26E-06 | H/m |
| Valor convencional da aceleração | g | 9,8067 | m/s ² |
| Espessura da manga de gelo | r | 10 | mm |
| Densidade do gelo | ρ_g | 0,9 | kg/dm ³ |
| Coefficiente de redução | α | 0,6 | - |

Artigo 16 - N°41-16-02-92 Diário da República
 Artigo 16 - N°41-16-02-92 Diário da República
 Artigo 14 - N°41-16-02-92 Diário da República

Figura 47 - Ecrã DADOS DE ENTRADA para o caso de estudo de um condutor rígido

DADOS DE ENTRADA

Características Subestação:

| | | | |
|--------------------------------------------------------|------------|-------|-----|
| Corrente simétrica inicial de curto-circuito trifásico | i_k^s | 15023 | A |
| Tempo de atuação das proteções | T_R | 0,5 | s |
| Tensão nominal do sistema | U_n | 150 | kV |
| Tensão máxima do sistema | U_m | 170 | kV |
| Corrente nominal do sistema | I_n | 135 | A |
| Frequência do sistema | f | 50 | Hz |
| Fator X/R do sistema | X/R | 10,5 | - |
| Temperatura no início do curto-circuito | θ_b | 85 | °C |
| Temperatura no final do curto-circuito | θ_e | 150 | °C |
| Temperatura normal | θ_n | 20 | °C |
| Temperatura Inverno | θ_i | -25 | °C |
| Temperatura Verão | θ_v | 80 | °C |
| Valor da velocidade manutenção do vento | V_M | 10 | m/s |
| Valor fundamental da velocidade básica do vento | $V_{b,0}$ | 50 | m/s |

Escolha o método de cálculo:

CONSTANTES PORTUGAL

| | | | |
|----------------------------------|----------|----------|--------------------|
| Permeabilidade absoluta do vácuo | μ_0 | 1,26E-06 | H/m |
| Valor convencional da aceleração | g | 9,8067 | m/s ² |
| Espessura da manga de gelo | r | 10 | mm |
| Densidade do gelo | ρ_g | 0,9 | kg/dm ³ |
| Coefficiente de redução | α | 0,6 | - |

Artigo 16 - Nº41- 18-02-32 Diário da República
 Artigo 16 - Nº41- 18-02-32 Diário da República
 Artigo 14 - Nº41- 18-02-32 Diário da República

Figura 48 - Ecrã DADOS DE ENTRADA para o caso de estudo de um condutor flexível com disposição horizontal

5.3. ECRÃ DETALHES DA LIGAÇÃO E ESCOLHA DO CONDUTOR

Após a inserção das características da subestação e a seleção do método de cálculo a utilizar, o profissional insere os detalhes da ligação e procede à escolha do condutor. Como foi referido anteriormente, os casos de estudo apresentados neste capítulo são referentes a um condutor rígido e a um condutor flexível com disposição horizontal, sendo os detalhes relativamente a cada ligação apresentados nas figuras 49 e 50, verificando-se que o processo é muito simples e rápido.

DETALHES DA LIGAÇÃO 5

| | | | |
|-------------------|---|---------------------------------------|----------|
| Tipo de condutor: | 1 | <input type="text" value="Rígido"/> | Rígido |
| Material: | 2 | <input type="text" value="Alumínio"/> | Alumínio |
| Se flexível: | 3 | <input type="text"/> | |
| Se vertical: | 4 | <input type="text"/> | |

Figura 49 - Ecrã DETALHES DA LIGAÇÃO para o caso de estudo de um condutor rígido

DETALHES DA LIGAÇÃO 5

| | | | |
|-------------------|---|-----------------------------------------|------------|
| Tipo de condutor: | 1 | <input type="text" value="Flexível"/> | Flexível |
| Material: | 2 | <input type="text" value="Alumínio"/> | Alumínio |
| Se flexível: | 3 | <input type="text" value="Horizontal"/> | Horizontal |
| Se vertical: | 4 | <input type="text"/> | |

Figura 50 - Ecrã DETALHES DA LIGAÇÃO para o caso de estudo de um conduto flexível com disposição horizontal

Como é visível nas figuras, o projetista, terá de tomar um conjunto de decisões para ambos os casos: o tipo de condutor, ou seja, se este é flexível ou rígido; o material usado nessa ligação, ou seja, se em alumínio ou em cobre (sendo nestes dois casos de alumínio); saber, no caso do condutor ser flexível, se ele se encontra disposto na vertical ou na horizontal (no caso em estudo é selecionada a disposição horizontal). Verifica-se, ainda, que a última *combo box* não é selecionada, uma vez que nenhum dos condutores em estudo está disposto na vertical.

Após a introdução dos detalhes da ligação para cada caso de estudo, é, também, necessário seleccionar, no ecrã “ESCOLHA DO CONDUTOR”, os condutores desejados. No caso do condutor flexível com disposição horizontal, o condutor escolhido é o “366 - AL 22” e no do condutor rígido é o “80x70 mm Tube”. Uma vez que os condutores já pertencem às bases de dados existentes, as variáveis necessárias para o cálculo já se encontram preenchidas, conforme se pode verificar no ecrã como apresentam as figuras 51 e 52.

| Designação | d Diâmetro exterior (mm) | d _i Diâmetro interior (mm) | A _s Área mm ² | m _s ^c Massa por unidade de comprimento de um subcondutor (kg/m) | t Espessura da parede do condutor tubular (mm) | I _{n max} Corrente máxima admissível pelo condutor A |
|---------------|--------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 80x70 mm Tube | 80 | 70 | 1178 | 3,18 | 5,00 | 2070 |

Figura 51 - Ecrã ESCOLHA DO CONDUTOR para o caso de estudo de um condutor rígido

| Designação | Área mm ² | NºFios | d | | m _s ^c Massa por unidade de comprimento de um subcondutor (kg/km) | Tr Carga de rutura nominal (kN) | R Resistência elétrica máxima a 20°C (Ω/km) | E Módulo de Young (N/mm ²) | α Coeficiente dilatação linear 1°K | I _{n max} Corrente máxima admissível pelo condutor A |
|------------|-------------------------|--------|------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| | | | Condutores | Fios | | | | | | |
| 366 - AL 2 | 366,20 | 0 | 24,90 | 0,00 | 1008,90 | 115,36 | 0,0908 | 5,70E+10 | 23*10 ⁻⁶ | 765 |

Figura 52 - Ecrã ESCOLHA DO CONDUTOR para o caso de estudo de um condutor flexível com disposição horizontal

5.4. ECRÃ SUMÁRIO

Continuando na exploração dos ecrãs, chegamos ao ecrã “SUMÁRIO”. O utilizador terá de introduzir, em primeiro lugar, o nome do projeto e o nome do cliente, verificando que o método de cálculo já se encontra preenchido, com proveniência da escolha efetuada no ecrã “DADOS DE ENTRADA”. Depois destas ações, torna-se necessário inserir algumas das características do sistema, que são essenciais para efetuar os cálculos, o nome da ligação a dimensionar e as características de acordo com o tipo de ligação a dimensionar. É de notar, que o tipo e a referência do condutor escolhido aparecem automaticamente preenchidos. Todavia, as forças aplicadas por fase, aparecem somente no final do processo de cálculo de forma automática, como já foi referido. Contudo, para um melhor entendimento, foi realizado o estudo de cada ligação separadamente, apesar de que podíamos ter pressionado o botão nova ligação e apresentar todos os dados lado a lado. Como se pode ver na figura 53 e 54, o ecrã “SUMÁRIO” está preenchido para cada caso.

NOVA LIGAÇÃO RESET

SUMÁRIO 5

Nome do projeto: Albispark 150/30 kV 1

Método de cálculo: Portugal

Nome do Cliente: - 2

Tabela Resumo- Esforços Eletrodinâmicos

Ligação: 1 3

| Características do sistema: | | | |
|--------------------------------------------------|-------|---|-------|
| Distância entre eixos dos suportes | l | m | 3,900 |
| Distância entre eixos dos condutores | a | m | 0,500 |
| Número de subcondutores de um condutor principal | n | - | 1 |
| Número de separadores | n_s | - | NP |
| Distância entre subcondutores | a_s | m | NP |
| Espaçamento entre separadores | l_s | m | NP |
| Comprimento do cabo | l_p | m | NP |
| Largura do alçapão | w | m | NP |
| Altura do dropper | h | m | NP |

Tipo condutor: Rígido

Referência do condutor: 80x70 mm Tube

Figura 53 - Ecrã SUMÁRIO para um caso de estudo de um condutor rígido

NOVA LIGAÇÃO RESET

SUMÁRIO

Nome do projeto: Albispark 150/30 kV 1

Método de cálculo: Portugal

Nome do Cliente: - 2

Tabela Resumo- Esforços Eletrodinâmicos

Ligação: 1 3

Características do sistema:

| | | | |
|--------------------------------------------------|-------|---|-------|
| Distância entre eixos dos suportes | l | m | 3,500 |
| Distância entre eixos dos condutores | a | m | 3,000 |
| Número de subcondutores de um condutor principal | n | - | 1 |
| Número de separadores | n_s | - | 0 |
| Distância entre subcondutores | a_s | m | 1,000 |
| Espaçamento entre separadores | l_s | m | 3,500 |
| Comprimento do cabo | l_c | m | NP |
| Largura do <i>downrigger</i> | w | m | NP |
| Altura do dropper | h | m | NP |

Tipo condutor: Flexível

Referência do condutor: 366 - AL 2

Figura 54 -Ecrã SUMÁRIO para um caso de estudo de um condutor flexível com disposição horizontal

5.5. CÁLCULO ESFORÇOS PARA UM CONDUTOR RÍGIDO

5.5.1. ECRÃ VERIFICAÇÃO CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO CONDUTOR

Neste momento, o projetista tem reunidas todas as condições para efetuar o cálculo dos esforços eletrodinâmicos das ligações a verificar da subestação em estudo, mas, antes disso, tem de ser realizada, em primeiro lugar, a verificação das suas condições de utilização. Como se pode constatar nas figuras 55 e 56, são avaliadas diversas condições de utilização como a de aquecimento, em que é comparada a corrente de serviço da instalação e a corrente máxima admissível pelo condutor, a sua resistência mecânica ao curto circuito, se o condutor possui uma secção superior a secção mínima capaz de aguentar o esforço térmico em caso de curto circuito, se o condutor encurva, a condição de ressonância e, ainda, o efeito coroa, em que se obtém a tensão de disrupção em tempo seco e húmido, sendo que estes têm de ser superiores à tensão máxima do sistema.

No ecrã em apreço, para que o cálculo seja realizado corretamente, tem de se efetuar a escolha do fator de irregularidade da superfície do condutor, como mostrado a vermelho. Este pode tomar valores como 1, 0,85 e 0,95, consoante o condutor for cilíndrico de superfície lisa ou cabos ou um condutor cilíndrico oxidado e rugoso.

VERIFICAÇÃO CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO CONDUTOR

1. CONDIÇÃO DE AQUECIMENTO

| | | | |
|------------------------------------------|-------------------|------|----------|
| Corrente máxima admissível pelo condutor | $I_n \text{ max}$ | 2070 | A |
| Corrente de serviço da instalação | I_n | 1250 | A |
| Validação se $I_n \text{ max} > I_n$ | | | Validado |

2. RESISTÊNCIA MECÂNICA

| | | | |
|------------------------------------------------|------------|----------|--------------------|
| Fator de impulso | k | 1,756 | |
| Corrente de curto-circuito trifásico simétrico | I_c'' | 7,470 | kA |
| Corrente de choque | I_p | 18,555 | kA |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 3,900 | m |
| Distância entre eixos dos condutores | a | 0,500 | m |
| Força eletrodinâmica | F | 53711,37 | kgf |
| Momento fletor | M_f | 1,E+04 | kgf.m |
| Carga de segurança à flexão | σ | 6000000 | kgf/m ² |
| Diâmetro exterior de um condutor tubular | d | 80 | mm |
| Diâmetro interior de um condutor tubular | d_i | 70 | mm |
| Módulo de Flexão | W | 2,08E-05 | m ³ |
| Momento fletor máximo | M_{fmax} | 124,805 | kgf.m |
| Validação se $W > \frac{M_f}{\sigma}$ | | | Validado |

3. CAPACIDADE DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

| | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------|------------------|
| Tempo de atuação da proteção | T_R | 0,5 | s |
| Frequência do sistema | f | 50 | Hz |
| Efeito térmico da componente contínua da corrente de curto-circuito e do seu amortecimento | m | 0,07 | |
| Efeito térmico da componente alternada da corrente de curto-circuito e do seu amortecimento | n | 1 | |
| Corrente de curto-circuito trifásico simétrico | I_c'' | 7,47 | kA |
| Corrente térmica | I_{th} | 7,733 | kA |
| Secção mínima | S_{min} | 68,54 | mm ² |
| Secção do condutor escolhido | A_s | 1178,00 | mm ² |
| Fator adimensional | K | 0,022 | |
| Temperatura no início do curto-circuito | θ_b | 85 | °C |
| Temperatura no final do curto-circuito | θ_e | 200 | °C |
| Coefficiente de variação da resistência com a temperatura | α_{20} | 0,0036 | °C ⁻¹ |
| Validação se $A_s > S_{min}$ | | | Validado |

Figura 55 – Ecrã VERIFICAÇÃO CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO CONDUTOR

4. SOBREELEVAÇÃO DE TEMPERATURA

| | | | |
|----------------------------------------------|----------------|-----------|------------------|
| Característica do material condutor | K_{im} | 0,00135 | |
| Corrente térmica | I_{th} | 7,733 | kA |
| Secção transversal de um subcondutor | A_s | 1178,000 | m ² |
| Temperatura inicial de funcionamento | θ_i | 65 | °C |
| Temperatura de montagem | θ_m | 20 | °C |
| Sobre elevação da temperatura | $\Delta\theta$ | 45 | °C |
| Módulo de Young | E | 6,890E+10 | N/m ² |
| Coefficiente de dilatação linear do material | α | 0,000024 | °C ⁻¹ |
| Força sobre os pontos de fixação do condutor | F_{F1} | 8,766E+10 | kgf |
| Momento de inércia | J | 8,320E-07 | m ⁴ |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 3,900 | m |
| Força crítica de encurvamento | F_{cr} | 1,451E+05 | kgf |
| Elongamento por dilatação do tubo | Δl | 0,00421 | m |

Dado o alongamento obtido devem ser instaladas peças de ligação especiais que permitam absorver esta dilatação

| | | | | | |
|--------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------|----------|-----------|-----|
| Força de dilatação | - Se condutor encurva - Se condutor não encurva | $F_{d1} = F_{cr}$ $F_{d1} = F_{F1}$ | F_{d1} | 1,451E+05 | kgf |
|--------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------|----------|-----------|-----|

5. CONDIÇÃO DE RESSONÂNCIA

| | | | |
|---------------------------------------------------------------------------|-------|-----------|--------------------|
| Módulo de Young | E | 7,026E+05 | Kg/cm ² |
| Momento de inércia | J | 8,320E+01 | cm ⁴ |
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor | m_0 | 0,03181 | Kg/cm |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 390,000 | cm |
| Frequência de ressonância | f_0 | 32 | Hz |
| Validação para ver se esta fora do intervalo de perigo [45,55] U [30,110] | | | Validado |

6. EFEITO COROIA

| | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------|-------------------------------------|
| Distância entre eixos dos condutores | a | 50,000 | cm |
| Raio exterior do condutor | r | 4,000 | cm |
| Tensão nominal do sistema | U_n | 30 | kV |
| Pressão | p | 76 | cmHg |
| Temperatura | θ | 30 | °C |
| Densidade do ar | ρ | 0,383 | |
| Fator de irregularidade da superfície do condutor | m_s | 1 | Condutor cilíndrico superfície lisa |
| Valor eficaz de campo eléctrico crítico para o aparecimento do efeito corona | E_k | 34,653 | kV/cm |
| Valor eficaz de campo eléctrico crítico para o aparecimento do efeito corona para condutores par | E_{kr} | 24,508 | kV/cm |
| Tensão de disrupção (tempo seco) | U_C^s | 243,443 | kV/fase |
| Tensão de disrupção (tempo húmido) | U_C^h | 134,753 | kV/fase |
| Tensão máxima do sistema | U_m | 20,785 | kV |
| Validação se $U_C^s > U_m$ | | | Validado |

Dados preenchidos automaticamente

Dados preenchidos manualmente

Figura 56– Ecrã VERIFICAÇÃO CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO CONDUTOR(Continuação)

5.5.2. ECRÃ ESFORÇOS ESTÁTICOS

Na análise ao ecrã esforços estáticos e quando selecionada a **seta frente** do ecrã “VERIFICAÇÃO CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO CONDUTOR”, o utilizador está perante o ecrã que permite realizar o cálculo dos esforços estáticos, aos quais o condutor se encontra sujeito. Dado que o método de cálculo é o de Portugal, o ecrã apresentado abaixo é o relativo aos esforços estáticos de Portugal. No caso de existirem separadores entre as diferentes ligações, o seu peso influencia o condutor e, se for o caso, neste ecrã tem de ser introduzido o valor da sua massa em Kg/m de forma manual. Para este caso, os valores obtidos podem ser vistos na figura 57.

CÁLCULOS ESFORÇOS ESTÁTICOS

1. PORTUGAL

1.1. AÇÃO DO VENTO

| | | | | |
|-------------------------------------------------|----------|---------|----------------|------------------------------------------------|
| Coefficiente de redução | α | 0,600 | | Artigo 14 - N°41- 18-02-92 Diário da República |
| Diâmetro exterior do condutor | d | 80,000 | mm | |
| Coefficiente de forma | C | 1,000 | | Artigo 15 - N°41- 18-02-92 Diário da República |
| Área da superfície batida pelo vento (com gelo) | S | 0,195 | m ² | |
| Área da superfície batida pelo vento (sem gelo) | S | 0,156 | m ² | |
| Pressão dinâmica do vento (reduzido) | q | 300,000 | Pa | Artigo 13 - N°41- 18-02-92 Diário da República |
| Pressão dinâmica do vento (máximo habitual) | q | 750,000 | Pa | Artigo 13 - N°41- 18-02-92 Diário da República |
| Força do vento (com gelo) (reduzido) | F_W | 35,100 | N | Artigo 10 - N°41- 18-02-92 Diário da República |
| Força do vento (com gelo) (máximo habitual) | F_W | 87,750 | N | Artigo 10 - N°41- 18-02-92 Diário da República |
| Força do vento (sem gelo) (reduzido) | F_W | 28,080 | N | Artigo 10 - N°41- 18-02-92 Diário da República |
| Força do vento (sem gelo) (máximo habitual) | F_W | 70,200 | N | Artigo 10 - N°41- 18-02-92 Diário da República |

1.2. AÇÃO DO GELO

| | | | | |
|--------------------------------------------------|----------|-------|------------------|---------------------------|
| Densidade do gelo | ρ_i | 0,900 | N/m ³ | Apêndice 3.7 - TS 3,01,04 |
| Raio do condutor | R | 0,040 | m | |
| Raio da manga de gelo | r | 0,010 | m | Apêndice 3.7 - TS 3,01,04 |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 3,900 | m | |
| Número de subcondutores de um condutor principal | n | 1 | - | |
| Força provocada devido ao gelo | F_i | 0,010 | N | |

1.3. AÇÃO DO PESO PRÓPRIO

| | | | | |
|----------------------------------------------------------------------|----------|---------|------------------|--|
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor | m_{12} | 3,181 | Kg/m | |
| Valor convencional da aceleração | g | 9,807 | m/s ² | |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 3,900 | m | |
| Força gravítica tendo em conta o peso próprio do condutor | F_{10} | 121,661 | N | |
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor (com separador) | m_{12} | 0,000 | Kg/m | |
| Força gravítica tendo em conta o peso dos separadores entre ligações | F_{11} | 0,000 | N | |

Figura 57 - Ecrã ESFORÇOS ESTÁTICOS

5.5.3. ECRÃ ESFORÇOS DINÂMICOS

Neste nosso estudo chegou o momento de se apreciar os movimentos possíveis no ecrã esforços dinâmicos. Assim, quando o utilizador clica na **seta frente** do ecrã “ESFORÇOS ESTÁTICOS”, aparece o ecrã que permite realizar o cálculo dos esforços dinâmicos para o condutor rígido. O processo de cálculo dos esforços dinâmicos para os condutores rígido é um processo simples, mas, que se remete para a tabela apresentada no capítulo 3 com o número 17. Aquela tabela apresenta alguns fatores que permitem realizar o cálculo da força estática equivalente, $F_{r,d}$, α , β e γ , de acordo com o tipo de viga e de suporte utilizado na ligação. Os valores das células correspondentes a estes fatores são preenchidos de forma automática, mas, para que isso aconteça, é necessário realizar a escolha do tipo de viga e suporte na *combo box*, presente no lado direito da célula do fator γ . Os valores resultantes do cálculo dos esforços dinâmicos para condutores rígidos são os que se podem observar na figura 58.

CALCULOS ESFORÇOS DINÂMICOS- CONDUTORES RÍGIDOS

| | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------|-------------------|
| Permeabilidade absoluta do vácuo | μ_0 | 1,257E-06 | H/m |
| Corrente de choque | I_p | 10,555 | A |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 3,900 | m |
| Distância entre eixos dos condutores | a | 0,500 | m |
| Valor de pico da força eletromagnética entre os condutores principais durante um curto-circuito trifásico | F_{m3} | 465,754 | N |
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor | m_s | 3,181 | Kg/m |
| Fator para a estimação da frequência própria (Consultar figura ao lado e selecionar tipologia de suporte dos condutores) | γ | 1,57 | |
| Módulo de Young | E | 6,890E+10 | N/m ² |
| Momento de inércia | J | 8,320E-07 | m ⁴ |
| Frequência própria do condutor | f_{cm} | 13,857 | Hz |
| Frequência do sistema | f | 50 | Hz |
| Relação $\frac{F_{cm}}{f}$ | $\frac{F_{cm}}{f}$ | 0,277 | |
| Fatores que têm em conta os fenómenos dinâmicos | V_{dm} | 0,760 | |
| Fatores que têm em conta os fenómenos dinâmicos | V_{dm} | 1,342740723 | |
| Fator correspondente à tensão mecânica de um condutor principal (Consultar figura ao lado) | β | 1 | |
| Módulo de flexão | W | 2,080E-05 | m ³ |
| Tensão mecânica | $\sigma_{m,d}$ | 1,113E+07 | N/mm ² |
| Fatores que têm em conta os fenómenos dinâmicos | V_p | 0,850541828 | |
| Fator relativo à força sobre um suporte (A) | α | 0,5 | |
| Fator relativo à força sobre um suporte (B) | α | 0,5 | |
| Força estática equivalente suporte (A) | $F_{r,A}$ | 265,616 | N |
| Força estática equivalente suporte (B) | $F_{r,B}$ | 265,616 | N |

| Tipo de viga e de suporte | | Fator α | Fator β | Fator γ |
|-------------------------------------------------------|--|--------------------|-----------------------|----------------|
| A e B: Suportes simples | | A:0,5 B:0,5 | 1,0 | 1,57 |
| A: Suporte embutido B: Suporte simples | | A:0,625 B:0,375 | $\frac{8}{11} = 0,73$ | 2,45 |
| A e B: Suportes embutidos | | A:0,5 B:0,5 | $\frac{8}{16} = 0,5$ | 3,56 |
| Dois vãos com suportes simples equidistantes | | A:0,375 B:1,25 | $\frac{8}{11} = 0,73$ | 2,45 |
| Três ou mais vãos | | A:0,4 B:1,1 | $\frac{8}{11} = 0,73$ | 3,56 |

Figura 5 e A4 - IEC60865-1:1993
Tabela 3 - IEC60865-1:1993
Apêndice 5.4 - IEC60865-1:1993
Figura 4 e A4 - IEC60865-1:1993
Tabela 3 - IEC60865-1:1993
Tabela 3 - IEC60865-1:1993
Apêndice 5.5 - IEC60865-1:1993
Apêndice 5.5 - IEC60865-1:1993

Figura 58 – Ecrã ESFORÇOS DINÂMICOS CONDUTORES RÍGIDOS

5.5.4. RELATÓRIO DO CÁLCULO

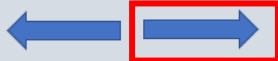
Concluído o processo de cálculo, o último passo para ultimar os cálculos é gerar um relatório do processo, bem como o preenchimento dos dados relativos as forças aplicadas por fase no ecrã “SUMÁRIO”. Um exemplar deste relatório encontra-se em anexo a esta dissertação.

Como se pode perceber, com apenas alguns cliques e com a introdução manual de pouco dados, o utilizador terá os resultados dos esforços eletrodinâmicos pretendidos. Nos ficheiros Excel que a empresa utiliza atualmente, dado não existir uma folha de cálculo com todas as ligações, os resultados de uma ligação não aparecem de forma automática no ecrã “SUMÁRIO”.

5.6. CÁLCULO DE ESFORÇOS PARA UM CONDUTOR FLEXÍVEL COM DISPOSIÇÃO HORIZONTAL

5.6.1. ECRÃ VERIFICAÇÃO CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO CONDUTOR

Tal como para o caso de estudo de um condutor rígido, depois do utilizador selecionar e preencher todos os dados de entrada, os detalhes da ligação, escolher qual o condutor a utilizar e introduzir as características do sistema é realizada a verificação das condições de utilização do condutor. Uma vez que os dados introduzidos são diferentes, os resultados também serão diferentes, sendo estes apresentados na figura 59.


2

VERIFICAÇÃO CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO CONDUTOR

1. CONDIÇÃO DE AQUECIMENTO

| | | | |
|------------------------------------------|-----------|-----|---|
| Corrente máxima admissível pelo condutor | I_n max | 765 | A |
| Corrente de serviço da instalação | I_n | 135 | A |
| Validação se $I_n \text{ max} > I_n$ | Validado | | |

2. RESISTÊNCIA MECÂNICA

| | | | |
|------------------------------------------------|-----------|---------------|---------------------|
| Fator de impulso | k | 1,756 | |
| Corrente de curto-circuito trifásico simétrico | I'' | 15,023 | kA |
| Corrente de choque | I_p | 37,317 | kA |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 3,500 | m |
| Distância entre eixos dos condutores | a | 3,000 | m |
| Força eletrodinâmica | F | 32493,058 | kgf |
| Momento fletor | M_f | 710785,641 | kgf.cm |
| Carga de segurança à flexão | σ | 600,000 | kgf/cm ² |
| Diâmetro dos fios | d_i | 0,00 | mm |
| Diâmetro do exterior do condutor | d | 24,30 | mm |
| Módulo de Flexão | W | 962263,203 | cm ³ |
| Momento fletor máximo | M_{max} | 577361521,633 | kgf.cm |
| Validação se $W > \frac{M_f}{\sigma}$ | Validado | | |

3. CAPACIDADE DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

| | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------|------------------|
| Tempo de atuação da proteção | t_R | 0,500 | s |
| Frequência do sistema | f | 50,000 | Hz |
| Efeito térmico da componente contínua da corrente de curto-circuito e do seu amortecimento | m | 0,072 | |
| Efeito térmico da componente alternada da corrente de curto-circuito e do seu amortecimento | n | 1,000 | |
| Corrente de curto-circuito trifásico simétrico | I'' | 15,023 | kA |
| Corrente térmica | I_{th} | 15,552 | kA |
| Secção mínima | S_{min} | 177,923 | mm ² |
| Secção do condutor escolhido | S_c | 366,20 | mm ² |
| Fator adimensional | K | 0,022 | |
| Temperatura no início do curto-circuito | θ_0 | 85,000 | °C |
| Temperatura no final do curto-circuito | θ_f | 150,000 | °C |
| Coefficiente de variação da resistência com a temperatura | α_{20} | 0,004 | °C ⁻¹ |
| Validação se $S_c > S_{min}$ | Validado | | |

4. EFEITO COROA

| | | | |
|--------------------------------------------------------------------|--------------|---------|---------|
| Distância entre subcondutores/Distância entre eixos dos condutores | a | 3,000 | m |
| Raio exterior do condutor | r | 1,245 | cm |
| Número de subcondutores de um condutor principal | n | 1 | |
| Raio médio geométrico | r_{eq} | 1,245 | cm |
| Distância entre fases 1 e 3 | $D_{1,3}$ | 150,000 | cm |
| Distância entre fases 1 e 2 | $D_{1,2}$ | 300,000 | |
| Distância entre fases 2 e 3 | $D_{2,3}$ | 150,000 | cm |
| Distância média geométrica | d_{eq} | 188,368 | cm |
| Tensão nominal do sistema | U_n | 150,000 | kV |
| Pressão | p | 76,000 | cmHg |
| Temperatura | θ | 80,000 | °C |
| Densidade do ar | ρ | 0,844 | |
| Fator de irregularidade da superfície do condutor | m_s | 0,850 | Cabos |
| Tensão de ruptura (tempo seco) | U'_0 | 114,865 | kV/fase |
| Tensão de ruptura (tempo húmido) | U''_0 | 91,892 | kV/fase |
| Tensão máxima do sistema | U_m | 98,150 | kV |
| Validação se $U'_0 > U_m$ | Não Validado | | |

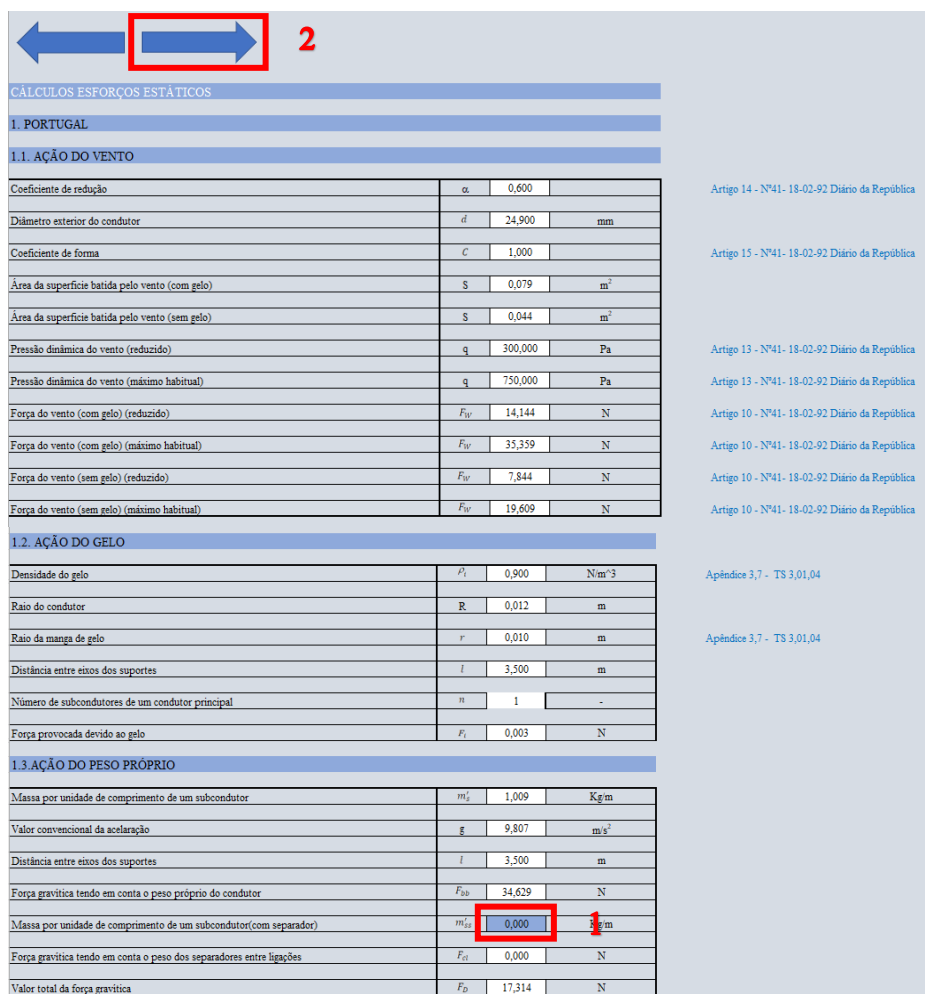
| |
|-------------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Dados preenchidos automaticamente |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dados preenchidos manualmente |

Figura 59 - Ecrã VERIFICAÇÃO CONDIÇÕES UTILIZAÇÃO DO CONDUTOR

A tensão máxima do sistema é de 98,15kV, que está abaixo da tensão crítica disruptiva calculada para tempo seco, mas ligeiramente acima da tensão crítica disruptiva calculada para tempo húmido, embora este valor esteja acima do valor crítico, podemos dizer que é quase insignificante (cerca de 2,5%). Tomando toda esta informação em consideração, dizemos que o condutor está verificado relativamente ao efeito corona.

5.6.2. ECRÃ ESFORÇOS ESTÁTICOS

O ecrã seguinte, ao ecrã “VERIFICAÇÃO CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO CONDUTOR”, refere-se ao cálculo dos esforços estáticos. Visto que o método de cálculo utilizado para o caso de estudo anterior é o mesmo deste, ou seja, o Portugal, os valores obtidos no ecrã “ESFORÇOS ESTÁTICOS”, são os mesmos, mas, para um condutor diferente, uma vez, que este caso de estudo é para um condutor flexível com disposição horizontal. Os valores conseguidos com o cálculo dos esforços estáticos foram exibidos como na figura 60.




| CÁLCULOS ESFORÇOS ESTÁTICOS | | | |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|---------|------------------|
| 1. PORTUGAL | | | |
| 1.1. AÇÃO DO VENTO | | | |
| Coefficiente de redução | α | 0,600 | |
| Dímetro exterior do condutor | d | 24,900 | mm |
| Coefficiente de forma | C | 1,000 | |
| Área da superfície batida pelo vento (com gelo) | S | 0,079 | m ² |
| Área da superfície batida pelo vento (sem gelo) | S | 0,044 | m ² |
| Pressão dinâmica do vento (reduzido) | q | 300,000 | Pa |
| Pressão dinâmica do vento (máximo habitual) | q | 750,000 | Pa |
| Força do vento (com gelo) (reduzido) | F_{WV} | 14,144 | N |
| Força do vento (com gelo) (máximo habitual) | F_{WV} | 35,359 | N |
| Força do vento (sem gelo) (reduzido) | F_{WV} | 7,844 | N |
| Força do vento (sem gelo) (máximo habitual) | F_{WV} | 19,609 | N |
| 1.2. AÇÃO DO GELO | | | |
| Densidade do gelo | ρ_l | 0,900 | Nm ⁻³ |
| Raio do condutor | R | 0,012 | m |
| Raio da manga de gelo | r | 0,010 | m |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 3,500 | m |
| Número de subcondutores de um condutor principal | n | 1 | - |
| Força provocada devido ao gelo | F_i | 0,003 | N |
| 1.3. AÇÃO DO PESO PRÓPRIO | | | |
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor | m'_s | 1,009 | Kg/m |
| Valor convencional da aceleração | g | 9,807 | m/s ² |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 3,500 | m |
| Força gravítica tendo em conta o peso próprio do condutor | F_{D0} | 34,629 | N |
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor (com separador) | m'_{s2} | 0,000 | kg/m |
| Força gravítica tendo em conta o peso dos separadores entre ligações | F_{D1} | 0,000 | N |
| Valor total da força gravítica | F_D | 17,314 | N |

Figura 60 - Ecrã ESFORÇOS ESTÁTICOS

5.6.3. ECRÃ ESFORÇOS DINÂMICOS

Na apreciação do ecrã “ESFORÇOS DINÂMICOS” e após o cálculo dos esforços estáticos, seguiu-se o processo de cálculo dos esforços dinâmicos sentidos pelo condutor. Este processo é mais extenso que o caso de estudo anterior, uma vez que neste é necessário realizar o cálculo para o estado normal, de verão e de inverno, sendo que a cada estado corresponde uma determinada temperatura. Neste processo, é, ainda, possível obter os dados relativos à força de tração de queda e de tração estática, bem como o valor de deslocamento máximo horizontal que o vão pode ter e a distância mínima entre condutores, como é verificável nas figuras 61 e 62.



CÁLCULOS ESFORÇOS DINÂMICOS - CONDUTORES FLEXÍVEIS - HORIZONTAL

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------|------------|-----------|---------|--------------------------------|
| Permesbilidade absoluta do vácuo | μ_0 | 1,257E-06 | H/m | |
| Corrente de curto-circuito trifásico simétrico | I_k'' | 15023,000 | A | |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 3,500 | m | |
| Comprimento de um condutor principal flexível no vão | l_c | 3,500 | m | |
| Força eletromagnética | F | 11,285 | N/m | Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993 |
| Número de subcondutores de um condutor principal | n | 1 | - | |
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor | m_s | 1,009 | Kg/m | |
| Valor convencional da aceleração | g | 9,807 | m/s^2 | |
| Relação entre a força eletromagnética e a força gravítica | r | 1,141 | | Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993 |
| Direção da força resultante exercida sobre um condutor | δ_1 | 48,7566 | ° | Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993 |

ESTADOS DE CÁLCULO

| | | | | |
|----|---------------------|------------|-----|----|
| 1) | Temperatura normal | Θ_n | 20 | °C |
| 2) | Temperatura inverno | Θ_i | -25 | °C |
| 3) | Temperatura verão | Θ_v | 80 | °C |

1) CÁLCULO FORÇA DE TRAÇÃO ESTÁTICA - ESTADO NORMAL

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|--------|---|--------------------------------|
| Flèche estática equivalente(estado normal) | f_{ex} | 0,350 | m | Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993 |
| Força de tração estática num condutor principal (estado normal) | F_{est} | 43,286 | N | Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993 |
| Coefficiente de sobrecarga no estado normal | m_1 | 1,000 | | |

2) CÁLCULO FORÇA DE TRAÇÃO ESTÁTICA - ESTADO INVERNO

| | | | | |
|------------------------------------------------------------------|------------|----------|---------------------|------------------------------------------------|
| Força do vento (com gelo) | F_W | 33,359 | N | |
| Coefficiente de dilatação do material | α_d | 0,000024 | $^{\circ}C^{-1}$ | |
| Secção transversal do condutor | σ | 366,200 | mm^2 | |
| Peso específico linear | W | 0,989 | daN/m | |
| Densidade do gelo | ρ_g | 0,900 | kg/dm ³ | Artigo 16 - N°41- 18-02-92 Diário da República |
| Diâmetro exterior do condutor | d | 0,0249 | mm | |
| Espessura da manga de gelo | r | 10,000 | mm | Artigo 16 - N°41- 18-02-92 Diário da República |
| Módulo de Young | E | 5700,000 | daN/mm ² | |
| Coefficiente de sobrecarga no estado Inverno | m_k | 2,021 | | |
| Força de tração estática num condutor principal (estado normal) | F_{est} | 4,329 | daN | Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993 |
| Força de tração estática num condutor principal (estado inverno) | F_{est} | 18,692 | daN | -0,001 Equação mudança de estado |
| Flèche estática equivalente | f_{ex} | 0,081 | m | Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993 |

Figura 61 - Ecrã ESFORÇOS DINÂMICOS CONDUTORES FLEXÍVEIS HORIZONTAL

3) CÁLCULO FORÇA DE TRAÇÃO ESTÁTICA - ESTADO VERÃO

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------|------------|----------|------------------|
| Força do vento (com gelo) | F_W | 35,359 | N |
| Coefficiente de dilatação do material | α_a | 0,000024 | $^{\circ}C^{-1}$ |
| Secção transversal do condutor | σ | 366,200 | mm^2 |
| Peso específico linear | w | 0,9894 | daN/m |
| Densidade do gelo | ρ_g | 0,900 | kg/dm^3 |
| Diâmetro exterior do condutor | d | 0,0249 | mm |
| Espessura da manga de gelo | r | 10,000 | mm |
| Módulo de Young | E | 5700,000 | daN/mm^2 |
| Coefficiente de sobrecarga no estado verão | m_a | 2,021 | |
| Força de tração estática num condutor principal (estado normal) | F_{s1} | 4,329 | daN |
| Força de tração estática num condutor principal (estado verão) | F_{s2} | 12,537 | daN |
| | | 125,3661 | |
| Flecha estática equivalente | f_{es} | 0,121 | m |

Artigo 16 - N°41 - 18-02-92 Diário da República

Artigo 16 - N°41 - 18-02-92 Diário da República

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Equação mudança de estado

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

4) CÁLCULO RESTANTES PARÂMETROS NOS TRÊS ESTADOS

| | | 1) | 2) | 3) | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Flecha estática equivalente | f_{es} | 0,350 | 0,081 | 0,121 | m |
| Força de tração estática num condutor principal | F_{s1} | 43,286 | 186,916 | 125,366 | N |
| Período de oscilação | T | 1,062 | 0,511 | 0,624 | s |
| Período resultante da oscilação do condutor | T_{res} | 0,903 | 0,435 | 0,531 | s |
| Constante de elasticidade resultante dos dois suportes de um vão | S | 1,000E+05 | 1,000E+05 | 1,000E+05 | N/m |
| Valor mais baixo da tensão mecânica no condutor | σ_{tm} | 5,000E+07 | 5,000E+07 | 5,000E+07 | N/m^2 |
| Módulo de Young | E | 5,700E+10 | 5,700E+10 | 5,700E+10 | N/m^2 |
| Relação $\frac{F_{st}}{nA\sigma}$ | $\frac{F_{st}}{nA\sigma}$ | 118203,607 | 510420,745 | 342343,149 | |
| Módulo de Young real | E_{eff} | 1,725E+10 | 1,774E+10 | 1,753E+10 | N/m^2 |
| Norma de rigidez | N | 3,015E-06 | 3,011E-06 | 3,013E-06 | N^{-1} |
| Tensão mecânica de um condutor principal | ξ | 204,299 | 2,541 | 8,417 | |
| Tempo de atuação da proteção | T_p | 0,425 | 0,204 | 0,250 | s |
| Relação $\frac{T_k}{T_{res}}$ | $\frac{T_k}{T_{res}}$ | 0,470 | 0,470 | 0,470 | |
| Ângulo em relação à sua posição estacionária | α_{ind} | 97,513 | 97,513 | 97,513 | $^{\circ}$ |
| Magnitude do ângulo máximo de oscilação | γ | -0,141 | -0,141 | -0,141 | $^{\circ}$ |
| Ângulo máximo de oscilação | δ_{max} | 108,079 | 108,079 | 108,079 | $^{\circ}$ |
| Fator relativo à força de tração de um condutor flexível | φ | 1,551 | 1,551 | 1,551 | |
| Fator relativo à força de tração de um condutor flexível | ψ | 0,994 | 0,725 | 0,881 | |
| | | 8,476E-05 | 7,486E-04 | 1,029E-04 | |
| Força de tração estática num condutor principal | $F_{t,d}$ | 109,990 | 396,982 | 296,593 | N |
| Constante térmica do material | C_{ts} | 2,700E-19 | 2,700E-19 | 2,700E-19 | $m4/(A2s)$ |
| Expansão elástica | ϵ_{el} | 0,0002 | 0,0006 | 0,0005 | |
| Expansão térmica | ϵ_{th} | 1,026E-04 | 4,936E-05 | 6,027E-05 | |
| Fator que permite o incremento da flecha causado pelo alargamento elástico e térmico de um condutor | C_{10} | 1,006 | 1,215 | 1,087 | |
| Fator que permite o incremento da flecha dinâmica causado pela mudança de forma da curva do condutor | C_F | 1,084 | 1,084 | 1,084 | |
| Flecha dinâmica | f_{ed} | 0,382 | 0,107 | 0,142 | m |
| Força de tração de queda | $F_{f,d}$ | 1628,037 | 815,098 | 968,314 | N |
| Deslocamento horizontal máximo de um vão | b_h | 0,382 | 0,107 | 0,142 | m |
| Distância mínima entre condutores | a_{min} | 2,237 | 2,786 | 2,715 | m |

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Figura 7 e A6 - IEC60865-1:1993

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

Apêndice 6,2 - IEC60865-1:1993

RESUMO

| | $F_{f,d}$ | $F_{t,d}$ | $F_{p,d}$ |
|----|-----------|-----------|-----------|
| 1) | 1628,037 | 109,990 | 0 |
| 2) | 815,098 | 396,982 | 0 |
| 3) | 968,314 | 296,593 | 0 |

| | | | | |
|--------|----------|---------|---|----------|
| Máximo | 1628,037 | 396,982 | 0 | 1628,037 |
|--------|----------|---------|---|----------|

Dados preenchidos automaticamente

Figura 62 – Ecrã ESFORÇOS DINÂMICOS CONDUTORES FLEXÍVEIS HORIZONTAL(Continuação)

5.6.4. RELATÓRIO DO CÁLCULO

À semelhança do descrito para os ecrãs anteriores, depois de finalizados os cálculos, é gerado um relatório final, em que os valores obtidos das diferentes forças aplicadas por fase são introduzidos automaticamente no ecrã “SUMÁRIO”, conforme pode observar-se no relatório em anexo.

Como se pode perceber, com apenas alguns cliques e com a introdução manual de poucos dados, o projetista tem os resultados dos esforços eletrodinâmicos pretendidos de forma simples, eficaz e rápida.

6. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

6.1. CONCLUSÕES

Nesta dissertação foi apresentado o processo de cálculo de esforços eletrodinâmicos em ligações com condutores rígidos, com condutores flexíveis com disposição horizontal, com condutores flexíveis com disposição vertical em feixe e ainda condutores flexíveis com disposição vertical em *downdropper*, com o objetivo final de criar e desenvolver uma ferramenta que pudesse substituir as aplicações Excel usadas, atualmente, pela empresa SISINT, por uma só aplicação que fosse o mais automatizada possível e que permitisse poupar tempo neste processo.

Numa primeira fase foi apresentada uma síntese acerca das subestações elétricas, onde são introduzidos alguns dos seus equipamentos, bem como as diferentes formas como podem ser inseridas no sistema elétrico de energia. Depois, foi formalizado o algoritmo de cálculo utilizado para o cálculo dos esforços eletrodinâmicos, com base nas normas IEC aplicáveis, assim como decretos-lei e algumas normas britânicas.

No capítulo 4, foi descrito, pormenorizadamente, a aplicação computacional desenvolvida com recurso ao aplicativo Excel. O desenvolvimento desta ferramenta resulta da necessidade de melhorar o *software* até agora existente na empresa, tornando-o mais simples de manusear pelo utilizador, colocando-o disponível em outras linguagens, para poder chegar a mais pessoas e, assim, poupar tempo de cálculo e traduções. A empresa, por cada tipo de ligação dispunha de um ficheiro Excel, assim, com esta aplicação consegue realizar todos os cálculos para qualquer ligação sem ter de a fechar. Também pode definir inicialmente os seus detalhes e direccionar o utilizador facilmente para o cálculo pretendido. A introdução de bases de dados de condutores e a capacidade de as poder alterar com um simples clique é um procedimento que se mostrou bastante pertinente, uma vez que permite, sempre que se queira utilizar um dado condutor, basta clicar na *combo box Escolha Condutor*, para que fique

selecionado automaticamente, ao passo que as aplicações usadas até então não podiam realizar este último procedimento.

Uma das mais-valias e, talvez, a principal e mais evidente diferença entre as ferramentas utilizadas pela SISINT e a agora criada, reside na facilidade com que o utilizador executa os cálculos pretendidos. Outra diferença notável está no facto de existir um ecrã “SUMÁRIO”, o qual nos permite perceber os esforços estáticos e dinâmicos de todas as ligações e, ainda, o facto de ser possível gerar um relatório completo de todo o processo de cálculo.

A ferramenta desenvolvida foi testada em dois casos de estudo de uma subestação projetada pela empresa, como forma de demonstrar todas as possibilidades de cálculo da aplicação e toda a sua dinâmica. Este exemplo prático, permitiu verificar o rigor dos resultados obtidos e a rapidez com que eles são obtidos.

6.2. TRABALHOS FUTUROS

Chegados aqui e projetados para possíveis investigações, estamos certos de que a criação da base de dados, apresenta-se, com segurança uma grande melhoria em relação às ferramentas existentes. Um objetivo futuro será alargar a base de dados, adicionado mais e mais condutores, o que permite poupar ainda mais tempo ao utilizador no cálculo dos esforços eletrodinâmicos, pois eliminaria a adição de novos condutores durante o procedimento.

Como objetivo com potencial de desenvolvimento futuro, existe o projeto de melhoria da dinâmica daquela ferramenta, tornando-a mais robusta e profissional, por forma a ser possível a sua comercialização para outras empresas do mesmo ramo.

Outra possibilidade de investigação que se abre, pode ser o desenvolvimento de mais aplicações daquele género, em outras linguagens de programação e que facilitem os trabalhos não só de um engenheiro eletrotécnico, mas, de todas as pessoas que pretendam automatizar os seus processos de cálculo.

Referências Bibliográficas

- [1] F. Tavares — *Aplicação Informática para Dimensionamento de Barramentos em Subestações*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores orientada pela Prof^a Cristina Inês Camus e apresentada no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, na especialidade de energia em 2015.
- [2] D. n.º 42895 — *Regulamento de Segurança de Subestações e Postos de Transformação e de Seccionamento*. <https://dre.pt/home/-/dre/282328/details/maximized>, 1960.
- [3] P. Duailibe — *Subestações : Tipos , Equipamentos e Proteção Consult. para Uso Efic. Energ.* 1999, pp. 1–85.
- [4] M. Bolotinha — *Subestações - Projeto, Construção, Fiscalização*. 2^a edição. Porto, 2019.
- [5] D.-A. e C. Educacional — *Subestação*. <https://www.drb-m.org/subt1/substacao.htm>.
- [6] J. M. Filho — *Subestações de potência: tudo o que você precisa saber*. Gen//Exatas, <https://genexatas.com.br/subestacoes-de-potencia-tudo-o-que-voce-precisa-saber/> 2020.
- [7] T. A. Nogueira — *As subestações no sistema elétrico*. Instituto Superior Engenharia do Porto, 2019.
- [8] P. Costa — *Cálculo de Esforços Eletromecânicos em ligações horizontais e verticais de Subestações Elétricas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores orientada pela Prof José Eduardo Neves dos Santos e apresentada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, na especialidade de energia em 2021.
- [9] M. P. Azevedo — *Arranjos De Subestações De Alta Tensão*. Projeto conclusão de curso orientada pelo Prof José Pereira da Silva Neto e apresentada na Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Brasil, em 2015.
- [10] Eletro Energia — *Condutor de cobre ou alumínio: Qual a diferença e como escolher?*. <https://eletroenergia.com.br/materiais-eletricos/condutor-de-cobre-ou-aluminio-qual-a-diferenca-e-como-escolher/>.

- [11] H. Jorge and D. Faria — *Cálculo de Barramentos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores orientada pela Prof^a António Machado e Moura e apresentada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, na especialidade de energia em 2009
- [12] International Electrotechnical Commission (IEC)— *IEC 60865-1*.
<http://myslide.es/download/link/iec-60071-1-en-espanol-aislamiento,2011>.
- [13] International Electrotechnical Commission (IEC) — *IEC 60909-0*.
<https://webstore.iec.ch/publication/24100>, 2016.
- [14] D. da República — *Decreto regulamentar n.º 1/92*. 1992.
- [15] European committee for standardization — *BS EN 1991-1-4-2005*. 2005.
- [16] T. O. F. Contents and L. Gantries — *Busbar systems for ais substations - TS_3.01.04*. 2012.
- [17] S. Ramos — *Dimensionamento de Barramentos*. Instituto Superior Engenharia do Porto, 2019.
- [18] T. A. Nogueira and A. P. Cunha — *Informação Técnica para o dimensionamento de barramentos*. Instituto Superior Engenharia do Porto, 2019.
- [19] A. Tissot — *Projeto de diplomação estudo do uso de barramentos rígidos em subestações*. Projeto de diplomação orientada pelo Prof Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro e apresentada na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, em 2011.
- [20] Diário da República — *Decreto regulamentar n.º 90/84*. 1984.
- [21] M. Bolotinha — *Efeito de Coroa em alta tensão*. Ed. ENERGIA ELÉTRICA, 2016, <https://universolambda.com.br/efeito-de-coroa-em-alta-tensao/>.
- [22] S. Domingos, M. Lazarin, and L. B. Martinho — *PEA2410 – Sistemas de Potência I Cálculo de Parâmetros de Linhas de Transmissão*. 2005, pp. 1–7.
- [23] K. Academy — *O que é o peso?*. <https://pt-pt.khanacademy.org/science/physics/forces-newtons-laws/normal-contact-force/a/what-is-weight>.
- [24] Documentos fornecidos pela empresa.

Anexo A. Relatório cálculo esforços eletrodinâmicos em condutores rígidos



| | |
|-------------------|---------------------|
| PROJETO | Albizpark 150/30 kV |
| ENGENHEIRO | DP |
| DATA | 30/10/2020 |
| CLIENTE | - |
| TÍTULO | 1 |

REF

1

Descrição do cálculo

| |
|--|
| |
|--|

2

Dados de entrada

| | | | |
|--------------------------------------------------------|-----------|------|-----|
| Corrente simétrica inicial de curto-circuito trifásico | ik'' | 7470 | A |
| Tempo de atuação das proteções | T_k | 0,5 | s |
| Tensão nominal do sistema | U_n | 30 | kV |
| Tensão máxima do sistema | U_m | 36 | kV |
| Corrente nominal do sistema | I_n | 1250 | A |
| Frequência do sistema | f | 50 | Hz |
| Fator X/R do sistema | X/R | 10,5 | - |
| Temperatura no início do curto-circuito | e_b | 85 | °C |
| Temperatura no final do curto-circuito | e_e | 200 | °C |
| Temperatura normal | e_n | 30 | °C |
| Temperatura de Inverno | e_i | -25 | °C |
| Temperatura de Verão | e_k | 30 | °C |
| Valor da velocidade de manutenção do vento | V_M | 10 | m/s |
| Valor fundamental da velocidade básica do vento | $V_{b,0}$ | 50 | m/s |

3

Constantes de Portugal

| | | | |
|----------------------------------|----------|----------|--------------------|
| Permeabilidade absoluta do vácuo | μ_0 | 1,26E-06 | H/m |
| Valor convencional da aceleração | g | 9,8067 | m/s ² |
| Espessura da manga de gelo | r | 10 | mm |
| Densidade do gelo | ρ_g | 0,9 | kg/dm ³ |
| Coefficiente de redução | α | 0,6 | - |

4

Detalhes de ligação

| | | |
|-------------------|-----------------------------------------------------------|---------------|
| Tipo de condutor: | Rígido | |
| Material: | Alumínio | |
| | Designação | 80x70 mm Tube |
| d | Diâmetro exterior (mm) | 80 |
| d_i | Diâmetro interior (mm) | 70 |
| A_s | Área (mm ²) | 1178 |
| m_s' | Massa por unidade de comprimento de um subcondutor (kg/m) | 3,18 |

| | | | |
|--------|------------------------------------------|------|------|
| t | Espessura da parede do condutor tubular | (mm) | 5,00 |
| In max | Corrente máxima admissível pelo condutor | A | 2070 |

5 **Verificação condições utilização do condutor.**

5.1 **Condição de aquecimento**

| | | | |
|------------------------------------------|--------|----------|---|
| Corrente máxima admissível pelo condutor | In max | 2070 | A |
| Corrente de serviço da instalação | In | 1250 | A |
| Validação se In max > In | | Validado | |

5.2 **Resistência mecânica**

| | | | |
|------------------------------------------------|------------|-------------|--------|
| Fator de impulso | k | 1,756 | |
| Corrente de curto-circuito trifásico simétrico | i''_k | 7,470 | kA |
| Corrente de choque | i_p | 18,555 | kA |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 3,900 | m |
| Distância entre eixos dos condutores | a | 0,500 | m |
| Força eletrodinâmica | F | 53711,37453 | kgf |
| Momento fletor | M_f | 1,E+04 | kgf.m |
| Carga de segurança à flexão | σ | 6000000 | kgf/m2 |
| Diâmetro exterior de um condutor tubular | d | 80 | mm |
| Diâmetro interior de um condutor tubular | di | 70 | mm |
| Módulo de Flexão | w | 2,08008E-05 | m3 |
| Momento fletor máximo | M_{fmax} | 124,805 | kgf.m |
| Validação se $w > \frac{M_f}{\sigma}$ | | Validado | |

5.3 **Capacidade da corrente de curto-circuito**

| | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------|------|
| Tempo de atuação da proteção | T_k | 0,5 | s |
| Frequência do sistema | f | 50 | Hz |
| Efeito térmico da componente contínua da corrente de curto-circuito e do seu amortecimento | m | 0,07 | |
| Efeito térmico da componente alternada da corrente de curto-circuito e do seu amortecimento | n | 1 | |
| Corrente de curto-circuito trifásico simétrico | i''_k | 7,47 | kA |
| Corrente térmica | I_{th} | 7,733 | kA |
| Secção mínima | Smin | 68,54 | mm2 |
| Secção do condutor escolhido | As | 1178,00 | mm2 |
| Fator adimensional | K | 0,022 | |
| Temperatura no início do curto-circuito | θ_b | 85 | °C |
| Temperatura no final do curto-circuito | θ_e | 200 | °C |
| Coefficiente de variação da resistência com a temperatura | α_{20} | 0,0036 | °C-1 |
| Validação se As > Smin | | Validado | |

5.4

Sobreelevação da temperatura

| | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------|
| Característica do material condutor | Km | 0,00135 | |
| Corrente térmica | I_{th} | 7,733 | kA |
| Secção transversal de um subcondutor | A_s | 1178,000 | m ² |
| Temperatura inicial de funcionamento | θ_i | 65 | °C |
| Temperatura de montagem | θ_m | 20 | °C |
| Sobre elevação da temperatura | $\Delta\theta$ | 45,00000003 | °C |
| Módulo de Young | E | 6,890E+10 | N/m ² |
| Coefficiente de dilatação linear do material | α | 0,000024 | °C ⁻¹ |
| Força sobre os pontos de fixação do condutor | F_{f1} | 8,766E+10 | kgf |
| Momento de inércia | J | 8,320E-07 | m ⁴ |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 3,900 | m |
| Força crítica de encurvamento | F_{cr} | 1,451E+05 | kgf |
| Elongamento por dilatação do tubo | ΔL | 0,00421 | m |
| Dado o alongamento obtido devem ser instaladas peças de ligação especiais que permitam absorver esta dilatação | | | |
| Força de dilatação | - Se condutor encurva - Se condutor não encurva | $F_{dl} \approx F_{cr}$ $F_{dl} \approx F_{f1}$ | F_{dl} 1,451E+05 kgf |

5.5

Condição de ressonância

| | | | |
|---------------------------------------------------------------------------|--------|-----------|--------------------|
| Módulo de Young | E | 7,026E+05 | Kg/cm ² |
| Momento de inércia | J | 8,320E+01 | cm ⁴ |
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor | m'_s | 0,03181 | Kg/cm |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 390,000 | cm |
| Frequência de ressonancia | F_o | 32 | Hz |
| Validação para ver se esta fora do intervalo de perigo [45,55] U [90,110] | | Validado | |

5.6

Efeito corona

| | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------|-------------------------------------|
| Distância entre eixos dos condutores | a | 50,000 | cm |
| Raio exterior do condutor | r | 4,000 | cm |
| Tensão nominal do sistema | U_n | 30 | kV |
| Pressão | P | 76 | cmHg |
| Temperatura | θ | 30 | °C |
| Densidade do ar | δ | 0,983 | |
| Fator de irregularidade da superfície do condutor | m_s | 1 | Condutor cilíndrico superfície lisa |
| Valor eficaz de campo eléctrico crítico para o aparecimento do efeito corona | E_0 | 34,659 | kV/cm |
| Valor eficaz de campo eléctrico crítico para o aparecimento do efeito corona para condutores paralelos | E_0f | 24,508 | kV/cm |
| Tensão de disrupção (tempo seco) | U'_c | 243,449 | kV/fase |

| | | | |
|------------------------------------|-------|----------|----------|
| Tensão de disrupção (tempo húmido) | U_c | 194,759 | kV/phase |
| Tensão máxima do sistema | U_m | 20,785 | kV |
| Validação se $U_c > U_m$ | | Validado | |

6

Esforços Estáticos - Portugal

6.1

Ação do vento

| | | | |
|-------------------------------------------------|----------|---------|----------------|
| Coefficiente de redução | α | 0,600 | |
| Diâmetro exterior do condutor | d | 80,000 | mm |
| Coefficiente de forma | C | 1,000 | |
| Área da superfície batida pelo vento (com gelo) | S | 0,195 | m ² |
| Área da superfície batida pelo vento (sem gelo) | S | 0,156 | m ² |
| Pressão dinâmica do vento (reduzido) | q | 300,000 | Pa |
| Pressão dinâmica do vento (máximo habitual) | q | 750,000 | Pa |
| Força do vento (com gelo) (reduzido) | F_{wv} | 35,100 | N |
| Força do vento (com gelo) (máximo habitual) | F_{wv} | 87,750 | N |
| Força do vento (sem gelo) (reduzido) | F_{wv} | 28,080 | N |
| Força do vento (sem gelo) (máximo habitual) | F_{wv} | 70,200 | N |

6.2

Ação do gelo

| | | | |
|--------------------------------------------------|----------|-------|------------------|
| Densidade do gelo | ρ_i | 0,900 | N/m ³ |
| Raio do condutor | R | 0,040 | m |
| Raio da manga de gelo | r | 0,010 | m |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 3,900 | m |
| Número de subcondutores de um condutor principal | n | 1 | - |
| Força provocada devido ao gelo | F_i | 0,010 | N |

6.3

Ação do peso próprio

| | | | |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|---------|------------------|
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor | m_s' | 3,181 | Kg/m |
| Valor convencional da aceleração | g | 9,807 | m/s ² |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 3,900 | m |
| Força gravítica tendo em conta o peso próprio do condutor | F_{gp} | 121,661 | N |
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor (com separador) | m_{sa}' | 0,000 | Kg/m |
| Força gravítica tendo em conta o peso dos separadores entre ligações | F_{cl} | 0,000 | N |
| Valor total da força gravítica | F_D | 60,830 | N |

7

Cálculos Esforços dinâmicos

| | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------|------|
| Permeabilidade absoluta do vácuo | μ_0 | 1,257E-06 | H/m |
| Corrente de choque | i_p | 18,555 | A |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 3,900 | m |
| Distância entre eixos dos condutores | a | 0,500 | m |
| Valor de pico da força eletromagnética entre os condutores principais durante um curto-circuito trifásico | F_{m3} | 465,154 | N |
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor | m_s' | 3,181 | Kg/m |
| Fator para a estimação da frequência própria (Consultar figura ao lado e selecionar tipologia de suporte dos condutores) | γ | 1,57 | |

| | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------|-------------------|
| Módulo de Young | E | 6,890E+10 | N/m ² |
| Momento de inércia | J | 8,320E-07 | m ⁴ |
| Frequência própria do condutor | f_{cm} | 13,857 | Hz |
| Frequência do sistema | f | 50 | Hz |
| Relação $\frac{f_{cm}}{f}$ | $\frac{f_{cm}}{f}$ | 0,277 | |
| Fatores que têm em conta os fenómenos dinâmicos | V_{cm} | 0,760 | |
| Fatores que têm em conta os fenómenos dinâmicos | V_{m} | 1,342740723 | |
| Fator correspondente à tensão mecânica de um condutor principal (Consultar figura ao lado) | β | 1 | |
| Módulo de flexão | W | 2,080E-05 | m ³ |
| Tensão mecânica | $\sigma_{m,d}$ | 1,113E+07 | N/mm ² |
| Fatores que têm em conta os fenómenos dinâmicos | V_f | 0,850541828 | |
| Fator relativo à força sobre um suporte (A) | α | 0,5 | |
| Fator relativo à força sobre um suporte (B) | α | 0,5 | |
| Força estática equivalente suporte (A) | $F_{r,d}$ | 265,616 | N |
| Força estática equivalente suporte (B) | $F_{r,d}$ | 265,616 | N |

Sumário dos cálculos

Descrição do cálculo

8

Resultados sumário dos cálculos

8.1

Condição de aquecimento

| | |
|------------------------------|----------|
| Validação se $ln_{max} > ln$ | Validado |
|------------------------------|----------|

8.2

Resistência mecânica

| | |
|---------------------------------------|----------|
| Validação se $W > \frac{M_f}{\sigma}$ | Validado |
|---------------------------------------|----------|

8.3

Capacidade da corrente de curto-circuito

| | |
|-----------------------------|----------|
| Validação se $As > S_{min}$ | Validado |
|-----------------------------|----------|

8.4

Sobrelevação da temperatura

| | | | |
|-----------------------------------|------------|---------|---|
| Elongamento por dilatação do tubo | Δt | 0,00000 | m |
|-----------------------------------|------------|---------|---|

Dado o alongamento obtido devem ser instaladas peças de ligação especiais que permitam absorver esta dilatação

8.5

Condição de ressonância

| | |
|---------------------------------------------------------------------------|----------|
| Validação para ver se esta fora do intervalo de perigo [45,55] U [90,110] | Validado |
|---------------------------------------------------------------------------|----------|

8.6

Efeito coroa

| | |
|---------------------------|----------|
| Validação se $U'_c > U_m$ | Validado |
|---------------------------|----------|

8.7

Esforços Estáticos - Ação do vento

| | | | |
|--------------------------------------|-------|--------|---|
| Força do vento (com gelo) (reduzido) | F_W | 35,100 | N |
|--------------------------------------|-------|--------|---|

| | | | |
|---------------------------------------------|-------|--------|---|
| Força do vento (com gelo) (máximo habitual) | F_W | 87,750 | N |
|---------------------------------------------|-------|--------|---|

| | | | |
|---------------------------------------------|-----------|--------|---|
| Força do vento (sem gelo) (reduzido) | $F_{w,r}$ | 28,080 | N |
| Força do vento (sem gelo) (máximo habitual) | $F_{w,h}$ | 70,200 | N |

8.8 Esforços Estáticos - Ação do gelo

| | | | |
|--------------------------------|-------|-------|---|
| Força provocada devido ao gelo | F_i | 0,010 | N |
|--------------------------------|-------|-------|---|

8.9 Esforços Estáticos - Ação do peso próprio






| | | | |
|----------------------------------------------------------------------|----------|---------|---|
| Força gravítica tendo em conta o peso próprio do condutor | F_{gp} | 121,661 | N |
| Força gravítica tendo em conta o peso dos separadores entre ligações | F_{cl} | 0,000 | N |
| Valor total da força gravítica | F_D | 60,830 | N |

8.10 Esforços dinâmicos

| | | | |
|----------------------------------------|-----------|---------|---|
| Força estática equivalente suporte (A) | $F_{e,d}$ | 265,616 | N |
| Força estática equivalente suporte (B) | $F_{e,d}$ | 265,616 | N |

3 Anexos

9.1 Tabela 3 (IEC 60865-1:1993)

| Tipo de viga e de suporte | | Fator α | Fator β | Fator γ |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|----------------|
| Vigas de um vão só | A e B: Suportes simples  | A:0,5 B:0,5 | 1,0 | 1,57 |
| | A: Suporte embutido B: Suporte simples  | A:0,625 B:0,375 | $\frac{8}{11} = 0,73$ | 2,45 |
| | A e B: Suportes embutidos  | A:0,5 B:0,5 | $\frac{8}{16} = 0,5$ | 3,56 |
| Viga continua com suportes simples equidistantes | Dois vãos  | A:0,375 B:1,25 | $\frac{8}{11} = 0,73$ | 2,45 |
| | Três ou mais vãos  | A:0,4 B:1,1 | $\frac{8}{11} = 0,73$ | 3,56 |

Anexo B. Relatório cálculo esforços eletrodinâmicos em condutores flexíveis horizontais



| | |
|-------------------|---------------------|
| PROJETO | Albispark 150/30 kV |
| ENGENHEIRO | DP |
| DATA | 30/10/2020 |
| CLIENTE | - |
| TÍTULO | 1 |

REF

1

Descrição de cálculo

| |
|--|
| |
|--|

2

Dados de entrada

| | | | |
|--------------------------------------------------------|-----------|-------|-----|
| Corrente simétrica inicial de curto-circuito trifásico | i_k'' | 15023 | A |
| Tempo de atuação das proteções | T_k | 0,5 | s |
| Tensão nominal do sistema | U_n | 150 | kV |
| Tensão máxima do sistema | U_m | 170 | kV |
| Corrente nominal do sistema | I_n | 135 | A |
| Frequência do sistema | f | 50 | Hz |
| Fator X/R do sistema | X/R | 10,5 | - |
| Temperatura no início do curto-circuito | e_b | 85 | °C |
| Temperatura no final do curto-circuito | e_e | 150 | °C |
| Temperatura normal | e_n | 20 | °C |
| Temperatura no final do curto-circuito | e_e | 150 | °C |
| Temperatura normal | e_n | 20 | °C |
| Temperatura de Inverno | e_i | -25 | °C |
| Temperatura de Verão | e_v | 80 | °C |
| Valor da velocidade de manutenção do vento | V_M | 10 | m/s |
| Valor fundamental da velocidade básica do vento | $V_{b,0}$ | 50 | m/s |

3

Constantes de Portugal

| | | | |
|----------------------------------|----------|----------|--------------------|
| Permeabilidade absoluta do vácuo | μ_0 | 1,26E-06 | H/m |
| Valor convencional da aceleração | g | 9,8067 | m/s ² |
| Espessura da manga de gelo | r | 10 | mm |
| Densidade do gelo | ρ_g | 0,9 | kg/dm ³ |
| Coefficiente de redução | α | 0,6 | - |

4

Detalhes de ligação

| | |
|-------------------|------------|
| Tipo de condutor: | Flexível |
| Material: | Alumínio |
| Se flexível: | Horizontal |

| | | | |
|--------|----------------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| A_s | Designação | | 366 - AL 2 |
| | Área | mm ² | 366,20 |
| | NºFios | | 0 |
| d | Diâmetro | Condutores | 24,90 |
| | | Fios | 0,00 |
| m_s' | Massa por unidade de comprimento de um subcondutor | | (kg/km) 1008,90 |
| T_r | Carga de rutura nominal | | (kN) 115,36 |

| ms | massa por unidade de comprimento de um subconductor | (kg/km) | 1000,00 |
|-------------------|-----------------------------------------------------|----------------------|---------------------|
| T_r | Carga de rutura nominal | (kN) | 115,36 |
| R | Resistência elétrica máxima a 20°C | (Ω /km) | 0,0908 |
| E | Módulo de Young | (N/mm ²) | 5,70E+10 |
| α | Coefficiente de dilatação linear | 1/K | 23*10 ⁻⁶ |
| $I_n \text{ max}$ | Corrente máxima admissível pelo condutor | A | 765 |

5 **Verificação condições utilização do condutor.**

5.1 **Condição de aquecimento**

| | | | |
|------------------------------------------|-------------------|----------|---|
| Corrente máxima admissível pelo condutor | $I_n \text{ max}$ | 765 | A |
| Corrente de serviço da instalação | I_n | 135 | A |
| Validação se $I_n \text{ max} > I_n$ | | Validado | |

5.2 **Resistência mecânica**

| | | | |
|------------------------------------------------|---------------------|---------------|---------------------|
| Fator de impulso | k | 1,756 | |
| Corrente de curto-circuito trifásico simétrico | i''_k | 15,023 | kA |
| Corrente de choque | i_p | 37,317 | kA |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 3,500 | m |
| Distância entre eixos dos condutores | a | 3,000 | m |
| Força eletrodinâmica | F | 32493,058 | kgf |
| Momento fletor | M_f | 710785,641 | kgf.cm |
| Carga de segurança à flexão | σ | 600,000 | kgf/cm ² |
| Diâmetro dos fios | d_i | 0,00 | mm |
| Diâmetro do exterior do condutor | d | 24,90 | mm |
| Módulo de Flexão | w | 962269,203 | cm ³ |
| Momento fletor máximo | $M_{f \text{ max}}$ | 577361521,639 | kgf.cm |
| Validação se $w > \frac{M_f}{\sigma}$ | | Validado | |

5.3 **Capacidade da corrente de curto-circuito**

| | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------|------------------|
| Tempo de atuação da proteção | T_k | 0,500 | s |
| Frequência do sistema | f | 50,000 | Hz |
| Efeito térmico da componente contínua da corrente de curto-circuito e do seu amortecimento | m | 0,072 | |
| Efeito térmico da componente alternada da corrente de curto-circuito e do seu amortecimento | n | 1,000 | |
| Corrente de curto-circuito trifásico simétrico | i''_k | 15,023 | kA |
| Corrente térmica | i_{th} | 15,552 | kA |
| Secção mínima | S_{min} | 177,923 | mm ² |
| Secção do condutor escolhido | A_s | 366,20 | mm ² |
| Fator adimensional | K | 0,022 | |
| Temperatura no início do curto-circuito | θ_b | 85,000 | °C |
| Temperatura no final do curto-circuito | θ_e | 150,000 | °C |
| Coefficiente de variação da resistência com a temperatura | α_{20} | 0,004 | °C ⁻¹ |
| Validação se $A_s > S_{\text{min}}$ | | Validado | |

5.4 **Efeito coroa**

5.4

Efeito corona

| | | | |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|---------|--------------|
| Distância entre subcondutores/Distância entre eixos dos condutores | a | 3,000 | m |
| | | 1,000 | |
| Raio exterior do condutor | r | 1,245 | cm |
| Número de subcondutores de um condutor principal | n | 1 | |
| Raio médio geométrico | r_{eq} | 1,245 | cm |
| Distância entre fases 1 e 3 | $D_{1,3}$ | 150,000 | cm |
| Distância entre fases 1 e 2 | $D_{1,2}$ | 300,000 | |
| Distância entre fases 2 e 3 | $D_{2,3}$ | 150,000 | cm |
| Distância média geométrica | d_{eq} | 188,388 | cm |
| Tensão nominal do sistema | U_n | 150,000 | kV |
| Pressão | P | 76,000 | cmHg |
| Temperatura | θ | 80,000 | °C |
| Densidade do ar | δ | 0,844 | |
| Fator de irregularidade da superfície do condutor | m_0 | 0,850 | Cabos |
| Tensão de ruptura (tempo seco) | U'_c | 114,865 | kV/fase |
| Tensão de ruptura (tempo húmido) | U''_c | 91,832 | kV/fase |
| Tensão máxima do sistema | U_m | 98,150 | kV |
| Validação se $U'_c > U_m$ | | | Não Validado |

6

Esforços Estáticos - Portugal

6.1

Ação do vento

| | | | |
|-------------------------------------------------|----------|---------|----------------|
| Coefficiente de redução | α | 0,600 | |
| Diâmetro exterior do condutor | d | 24,900 | mm |
| Coefficiente de forma | c | 1,000 | |
| Área da superfície batida pelo vento (com gelo) | S | 0,079 | m ² |
| Área da superfície batida pelo vento (sem gelo) | S | 0,044 | m ² |
| Pressão dinâmica do vento (reduzido) | q | 300,000 | Pa |
| Pressão dinâmica do vento (máximo habitual) | q | 750,000 | Pa |
| Força do vento (com gelo) (reduzido) | F_W | 14,144 | N |
| Força do vento (com gelo) (máximo habitual) | F_W | 35,359 | N |
| Força do vento (sem gelo) (reduzido) | F_W | 7,844 | N |
| Força do vento (sem gelo) (máximo habitual) | F_W | 19,609 | N |

6.2

Ação do gelo

| | | | |
|--------------------------------------------------|----------|-------|------------------|
| Densidade do gelo | ρ_i | 0,900 | N/m ³ |
| Raio do condutor | R | 0,012 | m |
| Raio da manga de gelo | r | 0,010 | m |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 3,500 | m |
| Número de subcondutores de um condutor principal | n | 1 | - |
| Força provocada devido ao gelo | F_i | 0,003 | N |

6.3

Ação do peso próprio.

| | | | |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|--------|------------------|
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor | m'_s | 1,009 | Kg/m |
| Valor convencional da aceleração | g | 9,807 | m/s ² |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 3,500 | m |
| Força gravítica tendo em conta o peso próprio do condutor | F_{pb} | 34,629 | N |
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor (com separador) | m'_{ss} | 0,000 | Kg/m |
| Força gravítica tendo em conta o peso dos separadores entre ligações | F_{st} | 0,000 | N |
| Valor total da força gravítica | F_D | 17,314 | N |

7

Cálculos Esforços dinâmicos.

| | | | |
|-----------------------------------------------------------|------------|-----------|------------------|
| Permeabilidade absoluta do vácuo | μ_0 | 1,257E-06 | H/m |
| Corrente de curto-circuito trifásico simétrico | i''_c | 15023,000 | A |
| Distância entre eixos dos suportes | l | 3,500 | m |
| Comprimento de um condutor principal flexível no vão | l_c | 3,500 | m |
| Força eletromagnética | F' | 11,285 | N/m |
| Número de subcondutores de um condutor principal | n | 1 | - |
| Massa por unidade de comprimento de um subcondutor | m'_s | 1,009 | Kg/m |
| Valor convencional da aceleração | g | 9,807 | m/s ² |
| Relação entre a força eletromagnética e a força gravítica | r | 1,141 | |
| Direção da força resultante exercida sobre um condutor | δ_y | 48,7566 | ° |

Estados de cálculo

| | | | | |
|----|---------------------|-------|-----|----|
| 1) | Temperatura normal | e_n | 20 | °C |
| 1) | Temperatura normal | e_n | 20 | °C |
| 2) | Temperatura inverno | e_i | -25 | °C |
| 3) | Temperatura verão | e_k | 80 | °C |

7.1

Cálculo força tração estática - Estado normal.

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|--------|---|
| Flecha estática equivalente (estado normal) | f_{es} | 0,350 | m |
| Força de tração estática num condutor principal (estado normal) | F_{st1} | 43,286 | N |
| Coefficiente de sobrecarga no estado normal | m_1 | 1,000 | |

7.2

Cálculo força tração estática - Estado inverno.

| | | | |
|------------------------------------------------------------------|------------|----------|---------------------|
| Força do vento (com gelo) | F_W | 35,359 | N |
| Coefficiente de dilatação do material | α_d | 0,000024 | °C ⁻¹ |
| Secção transversal do condutor | σ | 366,200 | mm ² |
| Peso específico linear | w | 0,389 | daN/m |
| Densidade do gelo | ρ_g | 0,900 | kg/dm ³ |
| <hr/> | | | |
| Diâmetro exterior do condutor | d | 0,0249 | mm |
| Espessura da manga de gelo | r | 10,000 | mm |
| Módulo de Young | E | 5,70E+10 | daN/mm ² |
| Coefficiente de sobrecarga no estado Inverno | m_k | 2,021 | |
| Força de tração estática num condutor principal (estado normal) | F_{st1} | 4,329 | daN |
| Força de tração estática num condutor principal (estado inverno) | F_{st2} | 18,692 | daN |
| | | 186,9161 | |
| Flecha estática equivalente | f_{es} | 0,081 | m |
| | | | -0,001 |

7.3

Cálculo força tração estática - Estado verão

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------|------------|--------------------|---------------------|
| Força do vento (com gelo) | F_w | 35,359 | N |
| Coefficiente de dilatação do material | α_d | 0,000024 | $^{\circ}C^{-1}$ |
| Secção transversal do condutor | σ | 366,200 | mm^2 |
| Peso específico linear | w | 0,3894 | daNm |
| Densidade do gelo | ρ_g | 0,900 | kg/dm ³ |
| Diâmetro exterior do condutor | d | 0,0249 | mm |
| Espessura da manga de gelo | r | 10,000 | mm |
| Módulo de Young | E | 5700,000 | daN/mm ² |
| Coefficiente de sobrecarga no estado verão | m_k | 2,021 | |
| Força de tração estática num condutor principal (estado normal) | F_{st1} | 4,329 | daN |
| Força de tração estática num condutor principal (estado verão) | F_{st2} | 12,537 125,3661 | daN 0,000 |
| Flecha estática equivalente | f_{st} | 0,121 | m |

7.4

Cálculo resultantes parâmetros nos três estados

| | | 1) | 2) | 3) | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| Flecha estática equivalente | f_{st} | 0,350 | 0,061 | 0,121 | m |
| Força de tração estática num condutor principal | F_{st} | 43,286 | 186,316 | 125,366 | N |
| Período de oscilação | T | 1,062 | 0,511 | 0,624 | s |
| Período resultante da oscilação do condutor | T_{res} | 0,903 | 0,435 | 0,531 | s |
| Constante de elasticidade resultante dos dois suportes de um vão | S | 1,000E+05 | 1,000E+05 | 1,000E+05 | N/m |
| Valor mais baixo da tensão mecânica no condutor | σ_{m1} | 5,000E+07 | 5,000E+07 | 5,000E+07 | N/m ² |
| Valor mais baixo da tensão mecânica no condutor | σ_{m2} | 5,000E+07 | 5,000E+07 | 5,000E+07 | N/m ² |
| Módulo de Young | E | 5,700E+10 | 5,700E+10 | 5,700E+10 | N/m ² |
| Relação $\frac{F_{st}}{nA_s}$ | $\frac{F_{st}}{nA_s}$ | 118203,607 | 510420,745 | ***** | |
| Módulo de Young real | E_{eff} | 1,725E+10 | 1,774E+10 | 1,753E+10 | N/m ² |
| Norma de rigidez | N | 3,015E-06 | 3,011E-06 | 3,013E-06 | N ⁻¹ |
| Tensão mecânica de um condutor principal | ξ | 204,299 | 2,541 | 8,417 | |
| Tempo de atuação da proteção | T_k | 0,425 | 0,204 | 0,250 | s |
| Relação $\frac{T_k}{T_{res}}$ | $\frac{T_k}{T_{res}}$ | 0,470 | 0,470 | 0,470 | |
| Ângulo em relação à sua posição estacionária | δ_{ind} | 97,513 | 97,513 | 97,513 | ° |
| Magnitude do ângulo máximo de oscilação | γ | -0,141 | -0,141 | -0,141 | ° |
| Ângulo máximo de oscilação | δ_{max} | 108,079 | 108,079 | 108,079 | ° |
| Fator relativo à força de tração de um condutor flexível | ϕ | 1,551 | 1,551 | 1,551 | |
| Fator relativo à força de tração de um condutor flexível | ψ | 0,994 8,476E-05 | 0,725 7,486E-04 | 0,881 1,023E-04 | |
| Força de tração estática num condutor principal | $F_{s,d}$ | 109,990 | 396,982 | 296,593 | N |
| Constante térmica do material | c_{th} | 2,700E-19 | 2,700E-19 | 2,700E-19 | m4/(A2s) |
| Expansão elástica | ϵ_{el} | 0,0002 | 0,0006 | 0,0005 | |
| Expansão térmica | ϵ_{th} | 1,026E-04 | 4,936E-05 | 6,027E-05 | |
| Fator que permite o incremento da flecha causado pelo alargamento elástico e térmico de um condutor | C_D | 1,006 | 1,215 | 1,087 | |
| Fator que permite o incremento da flecha dinâmica causado pela mudança de forma da curva do condutor | C_F | 1,084 | 1,084 | 1,084 | |
| Flecha dinâmica | f_{ed} | 0,382 | 0,107 | 0,142 | m |
| Força de tração de queda | $F_{F,d}$ | 1628,037 | 815,098 | 968,314 | N |
| Deslocamento horizontal máximo de um vão | b_h | 0,382 | 0,107 | 0,142 | m |
| Distância mínima entre condutores | a_{min} | 2,237 | 2,786 | 2,715 | m |

Sumário dos cálculos

Descrição do cálculo

| |
|--|
| |
|--|

8 Resultados sumário dos cálculos

8.1 Condição de aquecimento

| | |
|-------------------------------|----------|
| Validação se $I_n \max > I_n$ | Validado |
|-------------------------------|----------|

8.2 Resistência mecânica

| | |
|-------------------------------------|----------|
| Validação se $W > \frac{M}{\sigma}$ | Validado |
|-------------------------------------|----------|

8.3 Capacidade da corrente de curto-circuito

| | |
|------------------------------|----------|
| Validação se $A_s > S_{min}$ | Validado |
|------------------------------|----------|

8.4 Efeito coroa

| | |
|---------------------------|--------------|
| Validação se $U'_c > U_m$ | Não Validado |
|---------------------------|--------------|

8.5 Esforços Estáticos - Ação do vento

| | | | |
|--------------------------------------|----------|--------|---|
| Força do vento (com gelo) (reduzido) | F_{W1} | 14,144 | N |
|--------------------------------------|----------|--------|---|

| | | | |
|---------------------------------------------|----------|--------|---|
| Força do vento (com gelo) (máximo habitual) | F_{W2} | 35,359 | N |
|---------------------------------------------|----------|--------|---|

| | | | |
|--------------------------------------|----------|-------|---|
| Força do vento (sem gelo) (reduzido) | F_{W3} | 7,844 | N |
|--------------------------------------|----------|-------|---|

| | | | |
|---------------------------------------------|----------|--------|---|
| Força do vento (sem gelo) (máximo habitual) | F_{W4} | 19,609 | N |
|---------------------------------------------|----------|--------|---|

8.6 Esforços Estáticos - Ação do gelo

| | | | |
|--------------------------------|-------|-------|---|
| Força provocada devido ao gelo | F_i | 0,003 | N |
|--------------------------------|-------|-------|---|

8.7 Esforços Estáticos - Ação do peso próprio

| | | | |
|-----------------------------------------------------------|----------|--------|---|
| Força gravítica tendo em conta o peso próprio do condutor | F_{D1} | 34,629 | N |
|-----------------------------------------------------------|----------|--------|---|

| | | | |
|----------------------------------------------------------------------|----------|-------|---|
| Força gravítica tendo em conta o peso dos separadores entre ligações | F_{D2} | 0,000 | N |
|----------------------------------------------------------------------|----------|-------|---|

| | | | |
|--------------------------------|-------|--------|---|
| Valor total da força gravítica | F_D | 17,314 | N |
|--------------------------------|-------|--------|---|

8.8 Esforços dinâmicos

8.8.1 Cálculo força tração estática - Estado normal

| | | | |
|---------------------------------------------|----------|-------|---|
| Flecha estática equivalente (estado normal) | f_{es} | 0,350 | m |
|---------------------------------------------|----------|-------|---|

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------|----------|--------|---|
| Força de tração estática num condutor principal (estado normal) | F_{T1} | 43,286 | N |
|-----------------------------------------------------------------|----------|--------|---|

8.8.2 Cálculo força tração estática - Estado inverno

| | | | |
|------------------------------------------------------------------|----------|--------|-----|
| Força de tração estática num condutor principal (estado inverno) | F_{T2} | 18,692 | daN |
|------------------------------------------------------------------|----------|--------|-----|

| | | | |
|-----------------------------|----------|-------|---|
| Flecha estática equivalente | f_{es} | 0,081 | m |
|-----------------------------|----------|-------|---|

8.8.3 Cálculo força tração estática - Estado verão

| | | | |
|----------------------------------------------------------------|----------|--------|-----|
| Força de tração estática num condutor principal (estado verão) | F_{T2} | 12,537 | daN |
|----------------------------------------------------------------|----------|--------|-----|

| | | | |
|-----------------------------|----------|-------|---|
| Flecha estática equivalente | f_{es} | 0,121 | m |
|-----------------------------|----------|-------|---|

8.8.4 Cálculo restantes parâmetros nos três estados

| | | | | | |
|-------------------------------------------------|-----------|---------|---------|---------|---|
| | | 1) | 2) | 3) | |
| Força de tração estática num condutor principal | $F_{T,d}$ | 109,990 | 396,982 | 296,593 | N |

| | | | | | |
|-----------------|----------|-------|-------|-------|---|
| Flecha dinâmica | f_{ed} | 0,382 | 0,107 | 0,142 | m |
|-----------------|----------|-------|-------|-------|---|

| | | | | | |
|--------------------------|-----------|----------|---------|---------|---|
| Força de tração de queda | $F_{T,d}$ | 1628,037 | 815,098 | 968,314 | N |
|--------------------------|-----------|----------|---------|---------|---|

| | | | | | |
|------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|---|
| Deslocamento horizontal máximo de um vão | b_h | 0,382 | 0,107 | 0,142 | m |
|------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|---|

| | | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-------|-------|-------|---|
| Distância mínima entre condutores | a_{min} | 2,237 | 2,786 | 2,715 | m |
|-----------------------------------|-----------|-------|-------|-------|---|

8.9 Resumo

| | | | |
|----|-----------|-----------|-----------|
| | $F_{T,d}$ | $F_{T,d}$ | $F_{T,d}$ |
| 1) | 1628,037 | 109,990 | 0 |
| 2) | 815,098 | 396,982 | 0 |
| 3) | 968,314 | 296,593 | 0 |

| | | | | |
|---------------|----------|---------|---|----------|
| Máximo | 1628,037 | 396,982 | 0 | 1628,037 |
|---------------|----------|---------|---|----------|