



IMPACTO DOS ESFORÇOS ELETROMECAÑICOS NOS EQUIPAMENTOS DE UMA SUBESTAÇÃO ELÉTRICA

ALEXANDRE MORAES DA MOTA

setembro de 2025

IMPACTO DOS ESFORÇOS ELETROMECHANICOS NOS EQUIPAMENTOS DE UMA SUBESTAÇÃO ELÉTRICA

Alexandre Moraes da Mota

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Eléctricos de Energia**

Orientador: Professor Doutor Fernando Maurício Teixeira de Sousa Dias

Supervisor: Eng^o Márcio Miguel Couto de Sousa

Júri:

Presidente:

Professor Doutor Rui Miguel Monteiro de Brito, Professor Adjunto, ISEP

Vogais:

Professor Doutor Fernando Maurício Teixeira de Sousa Dias, Professor Adjunto ISEP

Professor António Augusto Araújo Gomes, Professor Adjunto ISEP

Dedicatória

Dedico esta dissertação aos meus pais, **Manuel da Mota e Célia Moraes da Mota** (*in memoriam*), que, com seus exemplos de amor, integridade, dedicação, coragem e responsabilidade, me ensinaram a cultivar a perseverança, a disciplina e a resiliência. Esses valores, aliados à força do esforço e à fé em nunca desistir, foram essenciais para que eu enfrentasse os desafios e concluísse esta dissertação.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de automatizar os cálculos dos esforços eletromecânicos em condutores utilizados em subestações elétricas, atendendo aos critérios técnicos estabelecidos pelas normas IEC 60865-1:2011, IEC 60865-2:2015, IEEE 605:2008 e Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão - RSLEAT:1992. A ferramenta foi desenvolvida utilizando a linguagem de programação *Python*, com foco na modularidade, clareza na estrutura de processamento e facilidade de atualização, permitindo que seja aplicada em diferentes contextos e projetos com exigências variadas.

A metodologia adotada baseia-se na separação do sistema em três blocos principais: entrada de dados, processamento dos cálculos e saída de resultados. O projetista insere as informações relevantes do sistema, tais como tensão, corrente de curto-circuito, frequência e características dos condutores, selecionados a partir de uma base de dados previamente estruturada. Essa base de dados, por sua vez, permite o armazenamento e a recuperação automática de propriedades físicas e geométricas dos cabos, promovendo agilidade e precisão na etapa inicial do processo.

O módulo de processamento realiza a combinação das informações fornecidas com as fórmulas de cálculo normativas, previamente adaptadas do Excel para o ambiente Python, garantindo a conformidade com as normas/regulamentos nacionais e internacionais. O sistema automatiza equações complexas e elimina a necessidade de consultas manuais a gráficos normativos, contribuindo para a redução do tempo de execução e a diminuição de erros humanos.

Para validar a funcionalidade da aplicação, foi utilizado um caso real de projeto de subestação elétrica, cujos dados foram parcialmente apresentados, em cumprimento ao acordo de confidencialidade firmado entre a Quadrante Compass Group – QDE e a empresa parceira. A ferramenta demonstrou resultados consistentes e maior precisão em relação aos métodos tradicionais, além de proporcionar benefícios como a padronização dos cálculos e a organização sistemática das saídas em planilhas de Excel.

Os resultados obtidos demonstram o potencial da ferramenta como apoio técnico ao desenvolvimento de projetos de subestações elétricas, especialmente naquelas que envolvem condutores rígidos e flexíveis em diferentes orientações. A abordagem proposta contribui significativamente para a modernização do processo de projeto eletromecânico, aliando rigor técnico à eficiência operacional, ajustando-se assim às necessidades atuais do setor elétrico.

Palavras-chave: Esforços eletromecânicos. Subestações elétricas. *Python*.

Abstract

The objective of this work is to develop a computational tool capable of automating the calculations of electromechanical stresses in conductors used in electrical substations, meeting the technical criteria established by standards IEC 60865-1:2011, IEC 60865-2:2015, IEEE 605:2008 and *Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão* - RSLEAT:1992. The tool was developed using the Python programming language, with a focus on modularity, clarity in the processing structure and ease of updating, allowing it to be applied in different contexts and projects with varying requirements.

The methodology adopted is based on separating the system into three main blocks: data input, calculation processing and output of results. The designer enters the relevant system information, such as voltage, short-circuit current, frequency, and conductor characteristics, selected from a previously structured database. This database, in turn, allows for the storage and automatic retrieval of the physical and geometric properties of the cables, promoting agility and precision in the initial stage of the process.

The processing module combines the information provided with standard calculation formulas, previously adapted from Excel to the Python environment, ensuring compliance with national and international standards/regulations. The system automates complex equations and eliminates the need for manual consultation of standard charts, contributing to reduced execution time and fewer human errors.

To validate the application's functionality, a real substation design case was used, whose data was partially presented, in compliance with the confidentiality agreement signed between Quadrante Compass Group – QDE and its partner company. The tool demonstrated consistent results and greater accuracy compared to traditional methods, in addition to providing benefits such as standardisation of calculations and systematic organisation of outputs in Excel spreadsheets.

The results obtained demonstrate the tool's potential as technical support for the development of electrical substation projects, especially those involving rigid and flexible conductors in different orientations. The proposed approach contributes significantly to the modernisation of the electromechanical design process, combining technical rigour with operational efficiency, thus adapting to the current needs of the electrical sector

Keywords: Electromechanical stresses, substations and Python

Agradecimentos

Meus agradecimentos vão a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação.

À minha esposa, Lídia, e aos meus filhos, Bianca e Bruno, pela paciência, apoio e incentivo constantes, bem como pelos comentários e palavras de encorajamento ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, Professor Doutor Fernando Maurício Teixeira de Sousa Dias, pela valiosa orientação na escolha do tema desta dissertação, pela atenção dedicada sempre que solicitado, pelos ensinamentos transmitidos e pela generosa disponibilidade em partilhar seus conhecimentos, fundamentais para a definição e aprofundamento deste estudo.

À Quadrante Compass Group - QDE, pela disponibilização dos recursos necessários para a realização deste trabalho, em especial ao Engenheiro Márcio Sousa e a todos os seus associados, sempre prestativos, com destaque para os Engenheiros André Santos e Michel Goulart, que não mediram esforços em se colocar à disposição para discutir os assuntos relacionados a esta dissertação.

Muito obrigado.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Motivação e objetivos	2
1.3	Estrutura da dissertação	3
2	Subestações Elétricas: Equipamentos e Esforços Mecânicos e Eletromecânicos	5
2.1	Transformadores de Tensão	7
2.2	Descarregadores de Sobretensão.....	8
2.3	Transformadores de Intensidade	9
2.4	Disjuntores	10
2.5	Seccionadores.....	11
2.6	Isoladores.....	13
2.7	Transformadores de Potência	14
2.8	Cabos.....	16
3	Normas Técnicas e Metodologia de Cálculo dos Esforços Eletromecânicos .	19
3.1	Condutores Rígidos.....	20
3.2	Condutores Flexíveis.....	30
3.2.1	Condutores flexíveis horizontais	30
3.2.2	Condutores flexíveis verticais (baixadas)	41
4	Desenvolvimento da Ferramenta Computacional em <i>Python</i>	51
5	Aplicação da Ferramenta Python em um Estudo de Caso Real	61
5.1	Cálculo dos Condutores Flexíveis Verticais	62
5.2	Cálculo dos Condutores Rígidos	68
5.3	Cálculo dos Condutores Flexíveis Horizontais	72
6	Conclusões e Perspetivas Futuras	81
7	Referências	83

Lista de Figuras

Figura 1 – Principais equipamentos de uma subestação elétrica (Ramos, 2015).....	6
Figura 2 – Transformadores de Tensão 150 kV (base de dados da QDE)	7
Figura 3 – Descarregador de Sobretensão (base de dados da QDE).....	8
Figura 4 – Transformador de Intensidade 150 kV (base de dados da QDE).....	9
Figura 5 – Disjuntores de 150 kV (base de dados da QDE)	11
Figura 6 – Seccionador de 150 kV (base de dados da QDE)	12
Figura 7 – Isolador de 150 kV (base de dados da QDE).....	14
Figura 8 – Transformador de Potência 150 kV (base de dados da QDE).....	15
Figura 9 – Cabos de Média Tensão (base de dados da QDE)	17
Figura 10 – Arranjo de dois vãos com condutores tubulares (IEC 60865-2:2015).....	20
Figura 11 – Fator $V_{\sigma m}$ a ser usado em curto-circuito.	23
Figura 12 – Fator $V_{r m}$ a ser usado em curto-circuito.	24
Figura 13 – Fator $V_{r m}$ a ser usado em curto-circuito (IEC 60865-1:2011).	26
Figura 14 – Arranjo com condutores flexíveis horizontais (IEC 60865-2:2015)	30
Figura 15 – Fluxograma para determinação do pior estado atmosférico (Magalhães, 2013)...	33
Figura 16 – Ângulo máximo de oscilação δ_{max} para um determinado tempo de duração de curto-circuito T_{k1}	38
Figura 17 – Fator (Ψ) relativo à força de tração em condutores flexíveis	39
Figura 18 – Arranjo com condutores flexíveis verticais (IEC 60865-2:2015).....	41
Figura 19 – Geometria de uma descida.....	42
Figura 20 – Determinação gráfica do fator v_2 como função do fator v_1	46
Figura 21 – Determinação gráfica do fator v_3 como função do fator de a_s/d	47
Figura 22 – Determinação gráfica do fator ξ como função do fator de j_e de est.	49
Figura 23 – Determinação gráfica do fator η	50
Figura 24 – Fluxograma simplificado do programa em <i>Python</i>	52
Figura 25 – Determinação gráfica do fator v_2 como função do fator v_1	63
Figura 26 – Determinação gráfica do fator ξ como função do fator de j_e de est.	64
Figura 27 – Conductor flexível vertical entre o transformador de medida de corrente e o seccionador com chave de aterramento.....	66
Figura 28 – Resultados apresentados pelo <i>Python</i> dos parâmetros dos esforços eletromecânicos dos condutores flexíveis verticais.....	67
Figura 29 – Fator $V_{\sigma m}$ a ser usado em curto-circuito.	68
Figura 30 – Fator $V_{r m}$ a ser usado em curto-circuito (IEC 60865-1:2011).	68
Figura 31 – Conductor rígido tubular entre o seccionador com chave de aterramento e o isolador.....	69
Figura 32 – Resultados apresentados pelo <i>Python</i> dos parâmetros dos esforços eletromecânicos dos condutores rígidos tubulares (dados principais)	70
Figura 33 – Resultados apresentados pelo <i>Python</i> dos parâmetros dos esforços eletromecânicos dos condutores rígidos tubulares (dados de entrada)	71

Figura 34 – Resultados apresentados pelo <i>Python</i> dos parâmetros dos esforços eletromecânicos dos condutores rígidos tubulares (cálculos).....	72
Figura 35 – Fator (Ψ) relativo à força de tração em condutores flexíveis	73
Figura 36 – Conductor flexível horizontal entre o descarregador de sobretensão e o transformador de intensidade	74
Figura 37 – Resultados apresentados pelo <i>Python</i> dos parâmetros dos esforços estáticos dos condutores flexíveis horizontais (dados de entrada).....	75
Figura 38 – Resultados apresentados pelo <i>Python</i> dos parâmetros dos esforços estáticos dos condutores flexíveis horizontais (cálculos)	76
Figura 39 – Resultados apresentados pelo <i>Python</i> dos parâmetros dos esforços dinâmicos dos condutores flexíveis horizontais (dados de entrada).....	77
Figura 40 – Resultados apresentados pelo <i>Python</i> dos parâmetros dos esforços dinâmicos dos condutores flexíveis horizontais (cálculos)	78

Lista de Tabelas

Tabela 1 — Descrição dos equipamentos (Ramos, 2015).....	6
Tabela 2 — Fatores α , β e γ para diferentes disposições de apoios de barramento (IEC 60865-1:2011)	21
Tabela 3 — Valor do Fator $V_{\sigma m}$ (IEC 60865-1:2011).....	24
Tabela 4 — Valor do Fator V_{rm} (IEC 60865-1:2011)	24
Tabela 5 — Valor do Fator V_F (IEC 60865-1:2011)	26
Tabela 6 — Fator da altura e exposição K_z (IEEE 605:2008)	29
Tabela 7 — Fator da altura e exposição K_z (IEEE 605:2008)	29
Tabela 8 — Determinação do coeficiente de forma	32
Tabela 9 — Determinação da pressão dinâmica do vento	32
Tabela 10 — Coeficiente (C_{th}) (60865-1:2011)	40
Tabela 11 — Características dos cabos flexíveis (base de dados da QDE).....	53
Tabela 12 — Dados inseridos antes do <i>Python</i> , para o cálculo do condutor flexível vertical. ..	62
Tabela 13 — Dados inseridos com a utilização do <i>Python</i> , para o cálculo do condutor flexível vertical.....	65

Siglas, Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

BIM	<i>Building Information Modeling;</i>
DPS	Dispositivo de proteção contra surtos;
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> valiação;
IEEE	<i>The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.;</i>
QDE	Quadrante <i>Compass Group;</i>
RSLEAT	Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão;
SF6	Gás hexafluoreto de enxofre;
TC	Transformador de corrente;
TT	Transformador de tensão;
XLPE	<i>Cross-Linked Polyethylene</i> – Isolamento do cabo de energia eléctrica em polietileno reticulado.

Lista de Símbolos

A_s	Secção transversal de um subcondutor, em mm ² ;
C	Constante que toma o valor de 0,613;
C_D	Fator de dilatação;
C_F	Fator de forma;
C_f	Coefficiente de força, segundo a norma IEEE 605:2008 para condutores tubulares rígidos;
D	Diâmetro externo do condutor tubular, em m;
E	Módulo de elasticidade ou módulo de Young, em N/m ² ;
E_{eff}	Módulo de Young real, em N/m ² ;

F'	Força eletromagnética característica por unidade de comprimento sobre condutores flexíveis, em N;
F_1	Incremento de peso provocado pela camada de gelo no condutor, em N;
F_{m3}	Força máxima sobre o condutor central principal durante um curto-circuito trifásico, em N;
$F_{r,d(A)}, F_{r,d(B)}$	Força estática equivalente, exercida respectivamente sobre os suportes A e B dos condutores rígidos, em N;
$F_{r,d máx}$	Carga de rutura à flexão dos isoladores, em N;
$F_{r,d res}$	Força estática máxima resultante considerando a altura do ligador, em N;
F_{st}	Força de tensão estática média na baixada, em N;
$F_{t,d}$	Força de tensão durante o curto-circuito, em N;
F_v	Força entre os subcondutores de um feixe devido à corrente de curto-circuito, em N;
F_{vi}	Força de ação do vento sobre o condutor, em N, calculado para o estado de Inverno;
F_{vp}	Força de ação do vento sobre o condutor, em N, calculado para o estado de Primavera;
F_w	Força do vento por unidade de comprimento, em N/m;
F_{wI}	Força do vento com a presença do gelo, por unidade de comprimento, em N/m;
G_f	Fator de resposta à rajada de vento, que segundo a norma IEEE 605:2008;
H_s	Componente horizontal causada por um subcondutor no ponto inferior da baixada, em N;
I_k''	Corrente inicial de curto-circuito trifásico simétrico (valor eficaz), em A;
J_m	Momento de inércia da seção de um condutor, em m ⁴ ;
L	Comprimento total do condutor, em m;
L_{cr}	Vão crítico, em m;
K_z	Fator de altura e exposição;
P_{cond}	Peso do condutor, em N;

<i>S</i>	Constante de elasticidade resultante dos suportes, em N/m;
<i>T</i>	Período de oscilação do condutor, em s;
<i>T_{k1}</i>	Duração do primeiro fluxo de curto-circuito, em s;
<i>T_{res}</i>	Período resultante de oscilação durante o curto-circuito, em s;
<i>V</i>	Velocidade extrema do vento sem a existência de gelo, em m/s;
<i>V_I</i>	Velocidade extrema do vento com a existência de gelo, em m/s;
<i>V_{σm}</i> e <i>V_{rm}</i>	Fatores que contabilizam os fenômenos dinâmicos;
<i>V_F</i> e <i>V_{rm}</i>	Fatores que contabilizam os fenômenos dinâmicos;
<i>V_s</i>	Componente horizontal causada por um subcondutor no ponto superior da baixada, em N;
<i>X</i>	Magnitude do ângulo máximo de oscilação;
<i>W_c</i>	Força devida à ação do peso do próprio cabo, em N/m;
<i>W_g</i>	Força devida à ação do gelo, N/m;
<i>W_m</i>	Módulo de flexão, ou momento de resistência à torção do condutor tubular, em m ³ ;
<i>Z_g</i>	Altura do gradiente em função da exposição da instalação, em m;
<i>a</i>	Distância equivalente entre condutores, em m;
<i>a_{min}</i>	Distância mínima no ar entre condutores (fase-fase) durante o curto-circuito, em m;
<i>a_s</i>	Distância entre subcondutores, em m;
<i>a_z</i>	Coefficiente da lei de potência para rajadas de vento;
<i>bh</i>	Deslocamento horizontal máximo, em m;
<i>c</i>	Representa o coeficiente de forma;
<i>d</i>	Diâmetro interno do condutor tubular, em m;
<i>d</i>	Diâmetro do condutor, em m;
<i>d</i>	Diâmetro dos subcondutores, em mm;
<i>e_{gelo}</i>	Espessura da camada de gelo, em mm;

f	Frequência elétrica da instalação, em Hz;
f_{cm}	Frequência de ressonância/própria de vibração do condutor, em Hz;
g	Valor convencional da aceleração gravitacional, em m/s^2 ;
h	Altura do condutor acima do solo, em m;
h	Altura da baixada, em m;
h_a e h_b	Altura dos apoios dos condutores, em m.
h_i	Altura do isolador, em m;
h_l	Altura do ligador, em m;
i_p	Valor de pico da corrente de curto-circuito, em A;
k	Fator de correção para impedâncias;
l	Distância entre eixos dos suportes, em m;
l	Fator de importância da estrutura, que segundo a norma IEEE 605:2008, para estruturas de subestações elétricas que requeiram um nível mais alto de confiabilidade, adota o valor de 1,15;
l_c	Comprimento do condutor principal flexível do vão, em m;
l_k''	Distância entre eixos dos condutores, em m.
l_v	Comprimento do total do condutor da baixada, em m;
m_i e m_k	Coefficientes de sobrecarga dos estados atmosféricos i e k , respectivamente;
m_m'	Massa por unidade de comprimento, em kg/m;
m_{ri}	Coefficiente de sobrecarga no estado de Inverno, em N/m;
m_{rp}	Coefficiente de sobrecarga no estado de Primavera, em N/m;
m_s'	Massa por unidade de comprimento, em kg/m.
n	Número de subcondutores;
q	Fator de plasticidade do condutor tubular;
q_i	Pressão dinâmica do vento no estado de Inverno, em Pa, dependente da altura acima do solo do ponto de ligação;
q_p	Pressão dinâmica do vento no estado de Inverno, em Pa;

r	Relação entre a força eletromagnética em condições de curto-circuito e a força da gravidade sobre um condutor;
r_I	Espessura radial uniforme de gelo devido à chuva congelante, em m;
t	Espessura do condutor tubular, em m;
t_i e t_k	Tensão de mecânica do condutor no estado atmosférico i e k , respetivamente, em daN/mm ² ;
t_{max}	Tensão de montagem máxima ou força estática de tração máxima admissível, fornecida pelo fabricante, em N;
v_1, v_2 e v_3	Fatores para o cálculo de $F_{pi,d}$;
w	Largura da baixada, em m;
α	Representa o coeficiente de redução (0,6 para condutores e 1 para isoladores), em °C-1;
α_A, α_B	Fatores relativos à força exercida sobre o suporte A e B;
α_d	Coeficiente de dilatação térmica do material condutor, em (°C)-1;
β	Fator correspondente à tensão mecânica de um condutor principal, que varia de acordo com o tipo e número de apoios;
γ	Fator para determinação da frequência de ressonância/própria de vibração do condutor;
δ_1	Direção da força resultante exercida sobre o condutor, em °(graus).
δ_{end}	Ângulo de oscilação do condutor no final do curto-circuito, em °(graus);
δ_{max}	Ângulo máximo de oscilação, em °(graus);
θ_i	Temperatura no estado de Inverno, em °C;
θ_i e θ_k	Temperatura no estado atmosférico i e k , respetivamente, em °C;
θ_p	Temperatura no estado de Primavera, em °C;
μ_0	Constante magnética, permeabilidade do vácuo = $4\pi \times 10^{-7}$, em H/m;
σ	Secção do conductor, em mm ² ;
σ_{fin}	Tensão mecânica mais baixa no condutor quando o módulo de Young atinge um valor constante, em N/m ² ;

$\sigma_{m,d}$	Tensão mecânica de flexão causada pelas forças entre condutores principais, em N/m ² ;
ρ_{gelo}	Densidade do gelo, em kg/dm ³ .

1 Introdução

Nos sistemas elétricos, as subestações elétricas desempenham um papel essencial na infraestrutura de transmissão e distribuição de energia elétrica, atuando como nós de interligação, conversão e proteção entre diferentes níveis de tensão. Logo, o correto dimensionamento eletromecânico de seus componentes estruturais, especialmente os equipamentos que sofrem os esforços, é crucial para garantir a integridade física, a confiabilidade operacional e a segurança de todo o sistema elétrico (Kozarek et al., 2023), evitando problemas sociais e econômicos na região abrangida pela subestação elétrica.

O dimensionamento eletromecânico é realizado em função dos esforços mais significativos a serem considerados no projeto, os quais são provocados por curtos-circuitos trifásicos e bifásicos, que geram forças eletrodinâmicas intensas, efeitos secundários como aquecimento súbito, vibração mecânica e dilatação térmica. Essas forças podem causar deslocamentos críticos em condutores e estruturas de suporte, como barramentos, isoladores e bases metálicas (Frene et al., 2021). Por esta razão, os cálculos são realizados para que os equipamentos a serem utilizados não se danifiquem e mantenham a integridade do sistema elétrico.

1.1 Contextualização

A avaliação dos esforços eletromecânicos é um requisito técnico indispensável para assegurar a conformidade com as normas de projeto e segurança aplicáveis a subestações elétricas.

Esses esforços são regulamentados por normas técnicas internacionais, como a IEC 60865-1:2011, que define os métodos de cálculo dos efeitos eletrodinâmicos sobre condutores e estruturas de suportes dos equipamentos, e a IEC 60865-2:2015, que complementa a norma anterior por meio de exemplos aplicados a casos práticos. Tais normas estabelecem, ainda, critérios relacionados à distância entre fases, suportabilidade estrutural e integridade térmica dos equipamentos (IEC 60865-1, 2011).

A não observância das diretrizes normativas pode resultar em falhas catastróficas, como a ruptura de cabos e das barras condutoras, deformações permanentes ou mesmo colapsos estruturais dos equipamentos das subestações elétricas, interrompendo o fornecimento de energia elétrica.

1.2 Motivação e objetivos

Um dos principais desafios enfrentados é a significativa distância entre os locais de geração de energia elétrica, frequentemente localizados em áreas remotas, e os centros consumidores (centros de carga), majoritariamente concentrados em áreas urbanas e industriais. Essa distância acarreta perdas no transporte de energia elétrica e demanda uma rede robusta de subestações elétricas, essenciais para garantir a eficiência, a confiabilidade e a qualidade no fornecimento.

As subestações elétricas representam pontos estratégicos do sistema de transmissão e distribuição, sendo responsáveis pela transformação dos níveis de tensão, bem como pelo controle, proteção e encaminhamento da energia elétrica até os consumidores finais.

Diante do crescimento da demanda energética e da necessidade de mitigar perdas e sobrecargas na rede, a construção de novas subestações elétricas torna-se fundamental para assegurar o abastecimento contínuo e seguro de energia elétrica. Neste contexto, cresce a procura por projetos de subestações elétricas, exigindo soluções computacionais mais otimizadas.

Mediante essa contextualização, esta dissertação propõe o desenvolvimento de uma ferramenta computacional, escrita na linguagem *Python*, voltada à automação e simplificação dos estudos eletromecânicos aplicados ao projeto de subestações elétricas.

A aplicação contará com uma base de dados dinâmica, contendo informações técnicas dos condutores rígidos e flexíveis mais utilizados nos projetos desenvolvidos pela empresa Quadrante Compass Group - QDE, permitindo ainda a inserção de novos condutores, conforme as exigências específicas de cada projeto.

Busca-se, com isso, aumentar a produtividade e garantir maior uniformidade nos processos de engenharia, contribuindo para a expansão eficiente e segura da infraestrutura elétrica nacional. A ferramenta proposta também tem como objetivo reduzir o tempo de elaboração dos estudos, promovendo a reutilização de dados técnicos, assegurando maior consistência entre os diferentes empreendimentos.

Com o intuito de cumprir com os objetivos apresentados, esta dissertação abordará os seguintes tópicos:

- Descrição dos principais equipamentos das subestações elétricas, sujeitos a esforços eletromecânicos;

- Apresentação dos fundamentos teóricos dos cálculos aplicados à análise dos esforços eletromecânicos, com base nas normas técnicas pertinentes;
- Desenvolvimento de uma ferramenta computacional em linguagem *Python* que integre uma base de dados dinâmica com informações técnicas de componentes elétricos;
- Validação da ferramenta desenvolvida, por meio de sua aplicação a um caso real disponibilizado pela empresa Quadrante Compass Group.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em seis capítulos, estruturados de forma a conduzir o leitor desde o contexto inicial à aplicação prática e às conclusões obtidas.

O Capítulo 1, que corresponde ao presente capítulo, aborda a relevância do tema, a motivação que impulsionou o desenvolvimento do trabalho e os objetivos definidos para a pesquisa.

No Capítulo 2 são apresentados os principais equipamentos que compõem uma subestação elétrica, com ênfase para os pontos de maior vulnerabilidade frente aos esforços eletromecânicos a que podem estar sujeitos.

O Capítulo 3 é dedicado à exposição das normas técnicas aplicáveis e à fundamentação dos cálculos utilizados para a determinação dos esforços eletromecânicos.

O Capítulo 4 descreve o desenvolvimento da estrutura de dados e da lógica computacional, implementada em linguagem *Python*, com base nas normas IEC 60865-1:2011 e IEC 60865-2:2015, que regulamentam o dimensionamento mecânico de componentes em subestações elétricas.

No Capítulo 5, é apresentado um estudo de caso real que demonstra as vantagens da utilização da linguagem *Python* na execução dos cálculos eletromecânicos aplicados a uma subestação elétrica, evidenciando sua eficiência e aplicabilidade prática.

Por fim, o Capítulo 6 reúne a síntese dos resultados obtidos, as contribuições da pesquisa para a área de engenharia eletrotécnica e as sugestões para trabalhos futuros que possam aprofundar ou expandir os estudos aqui desenvolvidos.

2 Subestações Elétricas: Equipamentos e Esforços Mecânicos e Eletromecânicos

O projeto de uma subestação elétrica envolve múltiplas etapas e exige uma análise criteriosa por parte dos profissionais envolvidos. Um projeto bem elaborado contribui significativamente para a redução de custos, a facilidade de operação e manutenção, bem como para o planejamento de futuras ampliações. Por outro lado, a ausência de um dimensionamento adequado pode resultar em falhas estruturais, interrupções no fornecimento de energia elétrica e custos elevados de correção (Frontin, 2013).

Entre os aspetos mais relevantes a serem considerados em um projeto de uma subestação elétrica estão a definição do tipo de barramento, a seleção adequada dos equipamentos, os estudos de curto-circuito, a coordenação do isolamento e, especialmente, a análise dos esforços mecânicos e eletromecânicos atuantes sobre os componentes da subestação elétrica.

Neste contexto, este capítulo aborda os principais esforços mecânicos e eletromecânicos que incidem sobre os equipamentos e estruturas de uma subestação elétrica, tanto em condições normais de operação quanto em situações de contingência, como curtos-circuitos. Tais eventos podem gerar intensas correntes de defeito, que, por sua vez, geram forças eletrodinâmicas significativas, capazes de causar deslocamentos críticos ou, até mesmo, danos a barramentos, isoladores e estruturas metálicas de suporte. Diante desse cenário, torna-se essencial que o dimensionamento estrutural dos equipamentos seja realizado com base nas normas técnicas vigentes, de modo a assegurar a integridade física dos componentes, a estabilidade da instalação e a continuidade operacional do sistema elétrico (Frontin, 2013).

É importante destacar que os esforços eletromecânicos impactam não apenas a especificação dos equipamentos, mas também sua disposição física dentro da subestação elétrica. Um posicionamento inadequado pode amplificar os efeitos desses esforços e comprometer o desempenho e a confiabilidade do sistema.

Os equipamentos em uma subestação elétrica são organizados conforme os painéis a que estão vinculados, os quais desempenham funções distintas dentro da instalação. Entre os principais tipos destacam-se: os painéis de linha de entrada, responsáveis pela conexão da subestação elétrica à rede de transmissão ou distribuição; os painéis de interbarras, que possibilitam a ligação entre diferentes barramentos; os painéis de interbarras de seção, utilizados para seccionar e manobrar partes do barramento de forma a garantir maior flexibilidade operacional; os painéis de transformador, que integram o equipamento responsável pela transformação de níveis de tensões; e os painéis de linhas de saída, encarregados de distribuir a energia elétrica aos circuitos alimentadores ou a outras instalações.

A Figura 1 apresenta os principais equipamentos de uma subestação elétrica.

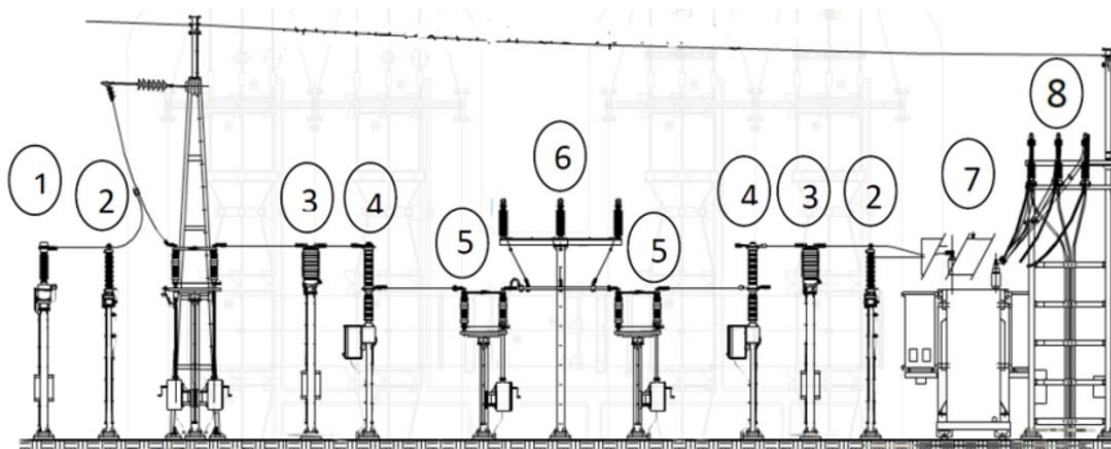


Figura 1 – Principais equipamentos de uma subestação elétrica (Ramos, 2015)

A Tabela 1 descreve os equipamentos principais mostrados na Figura 1:

Tabela 1 — Descrição dos equipamentos (Ramos, 2015)

Item	Descrição
1	Transformadores de Tensão
2	Descarregadores de Sobretensão
3	Transformadores de Intensidade
4	Disjuntores
5	Seccionadores
6	Isolador
7	Transformador de Potência
8	Cabos de Média Tensão

Nos tópicos a seguir, cada um desses equipamentos será detalhado individualmente, incluindo os valores médios dos esforços mecânicos a que estão sujeitos, considerando os níveis de tensão das subestações elétricas e as características técnicas fornecidas pelos seus fabricantes.

2.1 Transformadores de Tensão

O transformador de tensão – TT, apresentado na Figura 2, é um equipamento fundamental nas subestações elétricas. Sua principal função é reduzir tensões elevadas a níveis seguros e padronizados, compatíveis com instrumentos de medição e sistemas de proteção. O transformador de tensão assegura, portanto, a reprodução fiel da tensão da rede, porém em escala reduzida ou aumentada, além de proporcionar isolamento galvânico entre o sistema de alta tensão e os equipamentos de baixa tensão.

Durante eventos de curto-circuito, embora os transformadores de tensão operem, predominantemente, com correntes baixas, podem ocorrer sobretensões transitórias e efeitos eletrodinâmicos indiretos, principalmente nos terminais e conexões com os barramentos. Essas condições podem resultar em:

- Danos aos isoladores externos;
- Deformações ou ruturas de suportes;
- Riscos de descarga disruptiva (*flashover*);
- Comprometimento do isolamento interno.

O dimensionamento mecânico adequado e o correto projeto estrutural dos suportes e ligações são essenciais para garantir a integridade do equipamento durante as condições transitórias.

Como exemplo, para sistemas operando a 150 kV, os terminais devem ser projetados para suportar até 2 000 N.

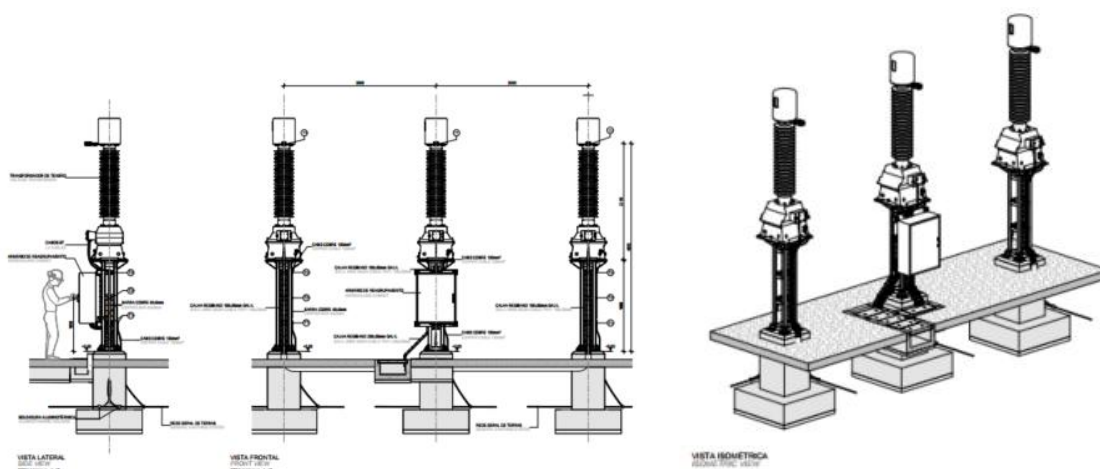


Figura 2 – Transformadores de Tensão 150 kV (base de dados da QDE)

2.2 Descarregadores de Sobretensão

Os Descarregadores de Sobretensão, também conhecidos como dispositivo de proteção contra surtos – DPS, são dispositivos essenciais em subestações elétricas e sistemas elétricos de potência, projetados para proteger equipamentos contra sobretensões transitórias causadas por descargas atmosféricas ou manobras na rede que estão inseridos. A sua função principal é limitar a tensão a níveis seguros, desviando para o solo os surtos de alta energia elétrica antes que atinjam os equipamentos sensíveis, como transformadores, disjuntores e sistemas de medição, apresentados na Figura 3.

Apesar da sua operação normalmente ocorrer de forma passiva, os DPS estão sujeitos a esforços eletromecânicos intensos durante a atuação. Em eventos de curto-circuito ou surtos de alta energia elétrica, ocorrem correntes muito elevadas que geram forças eletrodinâmicas e térmicas significativas sobre os componentes internos e a estrutura de fixação do equipamento.

Assim como nos transformadores de tensão, os DPS podem sofrer:

- Danos em isoladores externos;
- Deformações nos suportes de montagem;
- Deslocamentos por forças de repulsão;
- Riscos de *flashover* e comprometimento do isolamento interno.

Dessa forma, o cálculo preciso dos esforços mecânicos — incluindo forças axiais e radiais sobre suportes, ligações e isoladores — é fundamental para garantir a integridade do descarregador durante condições anormais. O correto dimensionamento estrutural previne falhas catastróficas, amplia a vida útil do equipamento e assegura o funcionamento contínuo do sistema elétrico com segurança e confiabilidade.

Para sistemas de 150 kV, por exemplo, os terminais devem suportar até 2 000 N.

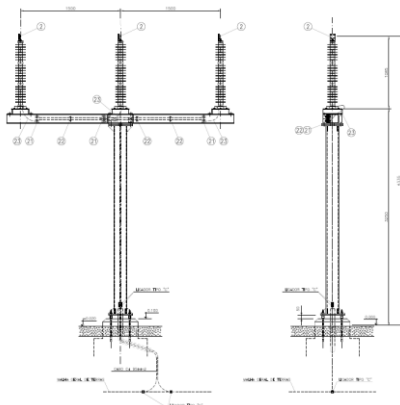


Figura 3 – Descarregador de Sobretensão (base de dados da QDE)

2.3 Transformadores de Intensidade

O transformador de intensidade, também conhecido como transformador de corrente – TC, é um equipamento utilizado em subestações elétricas para reduzir correntes elétricas elevadas a níveis compatíveis com instrumentos de medição e sistemas de proteção. Ele fornece uma representação proporcional da corrente da linha, isolando os equipamentos de medição das correntes elevadas da rede, apresentado na Figura 4.

Durante uma falha (curto-circuito), circulam correntes extremamente elevadas que geram forças eletrodinâmicas significativas sobre os terminais e partes internas do TC. Essas forças podem causar:

- Deslocamento dos terminais;
- Dano aos enrolamentos internos;
- Rompimento de suportes isolantes;
- Falha mecânica estrutural.

O cálculo dos esforços mecânicos é crucial para garantir a robustez do equipamento e sua continuidade operacional em cenários de altas tensões e sobretensões transitórias.

Para sistemas de 150 kV, por exemplo, os terminais devem suportar até 3 000 N.

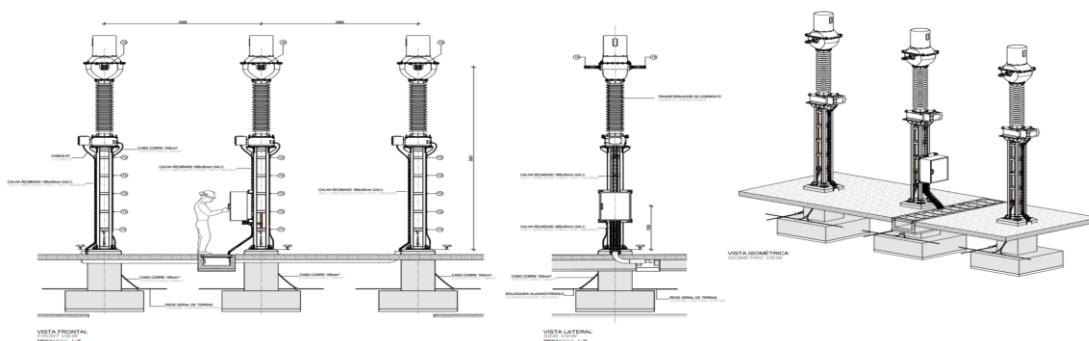


Figura 4 – Transformador de Intensidade 150 kV (base de dados da QDE)

2.4 Disjuntores

Os disjuntores de alta tensão são componentes fundamentais nas subestações elétricas e sistemas de transmissão de energia elétrica, responsáveis pela proteção, manobra e abertura de circuitos em condições normais e de falha. Sua principal função é interromper correntes elétricas elevadas de forma segura e controlada em caso de curto-circuito, falhas de equipamentos ou operações programadas.

Durante sua operação, especialmente na abertura de circuitos sob condições de falha, os disjuntores estão sujeitos a esforços eletromecânicos e térmicos extremos. A interrupção de correntes de curto-circuito envolve a rápida abertura de contatos sob arco elétrico, o que demanda materiais e mecanismos altamente resistentes e projetados para suportar:

- Altas correntes de interrupção (tipicamente dezenas de kA);
- Efeitos térmicos intensos no meio de interrupção (ar, gás SF₆, vácuo ou óleo);
- Forças dinâmicas geradas pelas correntes de curto-circuito;
- Vibrações e impactos mecânicos associados à movimentação rápida dos contatos.

Assim como os DPS e TT, os disjuntores podem apresentar:

- Fadiga ou desgaste nos mecanismos de atuação;
- Danos nos isoladores externos ou internos;
- Deformações estruturais em suportes ou bases de montagem;
- Deslocamentos devido a forças de repulsão entre fases;
- Riscos de falhas de isolamento, especialmente em ambientes contaminados.

Portanto, o dimensionamento mecânico dos disjuntores deve considerar as forças eletrodinâmicas máximas durante curtos-circuitos, tanto nas direções axial quanto radial. Esses esforços afetam diretamente a integridade dos suportes, conexões, isoladores e estruturas metálicas de fixação.

Para sistemas de 150 kV, por exemplo, os terminais do disjuntor devem ser capazes de suportar esforços mecânicos de até 2 000 N, conforme demonstrado na Figura 5, garantindo estabilidade e confiabilidade mesmo sob condições operacionais críticas.

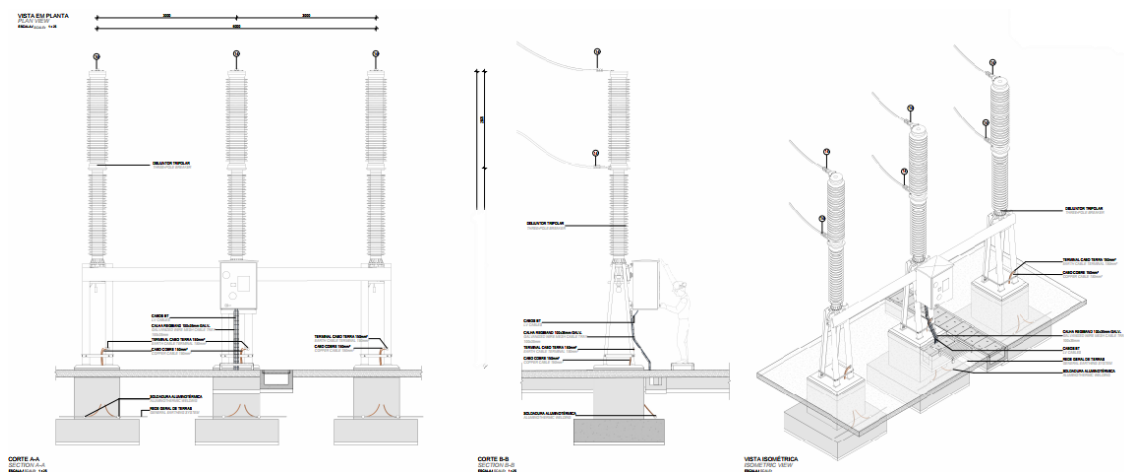


Figura 5 – Disjuntores de 150 kV (base de dados da QDE)

2.5 Seccionadores

Os seccionadores são dispositivos essenciais nas subestações elétricas e nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, responsáveis por fechar ou abrir circuitos elétricos em condição de ausência de carga. Eles garantem o isolamento visível de trechos da instalação, permitindo intervenções seguras em manutenções e operações.

Embora operem em regime aberto ou fechado sem corrente de carga significativa, os seccionadores estão expostos a esforços eletromecânicos consideráveis em situações anormais do sistema, como durante a ocorrência de curto-circuitos. Mesmo sem realizar a interrupção de corrente de carga, o equipamento está sujeito à passagem de correntes de curto-circuito quando se encontra em série com disjuntores ou através de conexões estruturais.

Nessas situações, surgem forças eletrodinâmicas e térmicas de grande magnitude que podem comprometer a integridade mecânica do equipamento. Os seccionadores podem apresentar:

- Danos nos isoladores externos, especialmente em condições de poluição e alta umidade;
- Deformações nos suportes de montagem devido a forças mecânicas excessivas;
- Deslocamentos por repulsão eletromagnética entre condutores e fases adjacentes;
- Riscos de *flashover* e comprometimento do nível de isolamento, afetando a confiabilidade operacional.

2.6 Isoladores

Os isoladores são componentes indispensáveis nas subestações elétricas, com a função principal de sustentar e isolar condutores elétricos das estruturas metálicas, impedindo o fechamento de circuitos indesejados. Estão presentes em equipamentos como seccionadores, disjuntores, transformadores e barramentos aéreos.

Durante o funcionamento normal do sistema, os isoladores operam de forma passiva, mas são frequentemente submetidos a esforços eletromecânicos intensos em situações de curto-circuito ou durante manobras de energização. Nessas condições, as correntes elevadas geram forças eletrodinâmicas que se transmitem às estruturas e pelos isoladores, exigindo grande resistência mecânica e dielétrica desses componentes.

Em decorrência desses esforços, os isoladores podem apresentar:

- Danos mecânicos, como trincas ou quebras, devido a vibrações e impactos repentinos;
- Deformações ou deslocamentos em sua base ou estrutura de fixação;
- Riscos de *flashover*, especialmente em ambientes contaminados ou com acúmulo de umidade;
- Comprometimento do nível de isolamento, com possíveis descargas parciais (redução do isolamento) ou falhas totais.

O projeto dos isoladores deve levar em conta os esforços mecânicos atuantes — tanto axiais quanto radiais — sobre sua estrutura, considerando também o peso dos condutores, forças de tração, efeitos térmicos e ações do vento. O correto dimensionamento assegura a integridade do sistema de isolamento mesmo sob condições anormais.

Para sistemas de 150 kV, por exemplo, os isoladores devem ser dimensionados para suportar esforços mecânicos de até 12 500 N, conforme ilustrado na Figura 7, garantindo desempenho estável e seguro em todas as condições operacionais.

A robustez e o dimensionamento adequado dos isoladores são fatores essenciais para evitar falhas, manter a segurança das instalações e garantir a confiabilidade do sistema elétrico de potência.

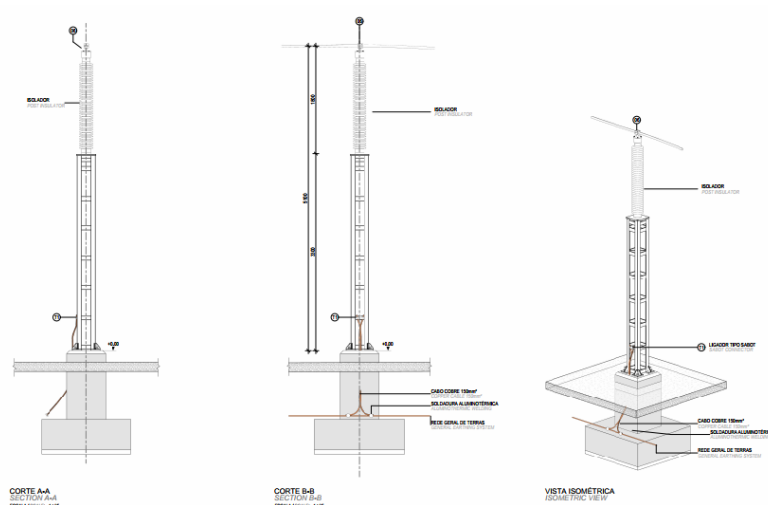


Figura 7 – Isolador de 150 kV (base de dados da QDE)

2.7 Transformadores de Potência

O transformador de potência é um dos equipamentos mais importantes de uma subestação elétrica, responsável por realizar a transformação dos níveis de tensão entre os circuitos de transmissão, subtransmissão e distribuição, adequando-os às necessidades operacionais do sistema. É considerado o coração da subestação elétrica, pois sua operação confiável garante o suprimento contínuo de energia elétrica a consumidores industriais, comerciais e residenciais.

Devido à sua robustez e à complexidade de sua construção, o transformador de potência está sujeito a diversos esforços mecânicos e eletromecânicos, tanto em regime normal de operação quanto em situações anormais, como curtos-circuitos. Esses esforços incidem de forma significativa sobre os terminais, enrolamentos, isoladores, tanque e estruturas de fixação, podendo comprometer a integridade do equipamento caso o dimensionamento estrutural e o projeto não estejam adequados.

Durante eventos de curto-circuito, as correntes transitórias atingem valores extremamente elevados, o que gera forças eletrodinâmicas intensas sobre os condutores e enrolamentos internos do transformador. Tais forças podem ser de natureza axial ou radial.

Forças axiais tendem a comprimir ou tracionar os enrolamentos ao longo de seu eixo, podendo causar deslocamentos, deformações plásticas ou até ruptura mecânica.

Forças radiais, por sua vez, pressionam os enrolamentos em direção ao núcleo ou para fora dele, podendo provocar ovalização, deslocamento relativo entre espiras e redução da rigidez dielétrica do isolamento.

2.8 Cabos

Os cabos de média tensão são responsáveis pela interligação entre transformadores, disjuntores, seccionadores, barramentos e quadros metálicos de média tensão. Em particular, nos transformadores de potência, os cabos de média tensão se conectam aos seus terminais por meio de barramentos rígidos tubulares, conforme ilustrado na Figura 9, os quais, além de conduzir a energia elétrica, estão sujeitos a esforços eletromecânicos significativos.

Projetados para operar tipicamente em níveis de tensão entre 1 kV e 33 kV, os cabos de média tensão desempenham papel essencial na condução segura da energia elétrica até os circuitos alimentadores e demais equipamentos da instalação. A confiabilidade desse sistema depende tanto da qualidade construtiva dos cabos (condutor de cobre ou alumínio, isolamento em XLPE, blindagens e revestimentos) quanto do correto dimensionamento mecânico dos barramentos e suportes associados.

Durante eventos de curto-circuito, os cabos e barramentos rígidos sofrem correntes extremamente elevadas que geram esforços eletrodinâmicos capazes de causar deslocamentos, vibrações e deformações estruturais. Tais esforços podem resultar em:

- Forças radiais, que tendem a expandir o condutor, afetando o isolamento;
- Forças longitudinais (axiais), que podem provocar deslocamento das conexões e terminais;
- Esforços de torção e repulsão entre fases, transmitidos diretamente aos suportes e isoladores.

Além dos esforços eletrodinâmicos, há também os efeitos térmicos decorrentes da circulação de correntes de falha, que podem degradar o isolamento polimérico dos cabos e provocar sobreaquecimento nos pontos de conexão.

Por esse motivo, é imprescindível que a secção transversal dos cabos seja corretamente dimensionada, levando em conta não apenas a corrente nominal, mas também os esforços eletromecânicos impostos aos barramentos rígidos durante a ocorrência de curtos-circuitos trifásicos. O sistema de fixação e ancoragem deve ser projetado para resistir às forças de repulsão entre fases e para evitar deslocamentos bruscos que possam comprometer a integridade da instalação.

Para sistemas de 150 kV, por exemplo, os terminais e suportes mecânicos associados aos cabos de média tensão e aos barramentos tubulares devem ser projetados para resistir a esforços da ordem de 2 000 a 3 000 N por fase, dependendo da bitola, configuração geométrica e especificações do fabricante.

Assim, os cabos de média tensão, devem ser considerados não apenas como condutores elétricos, mas como componentes estruturais sujeitos a esforços mecânicos e eletromecânicos

significativos, cuja correta especificação e dimensionamento são determinantes para a segurança, a confiabilidade e a longevidade da subestação elétrica.

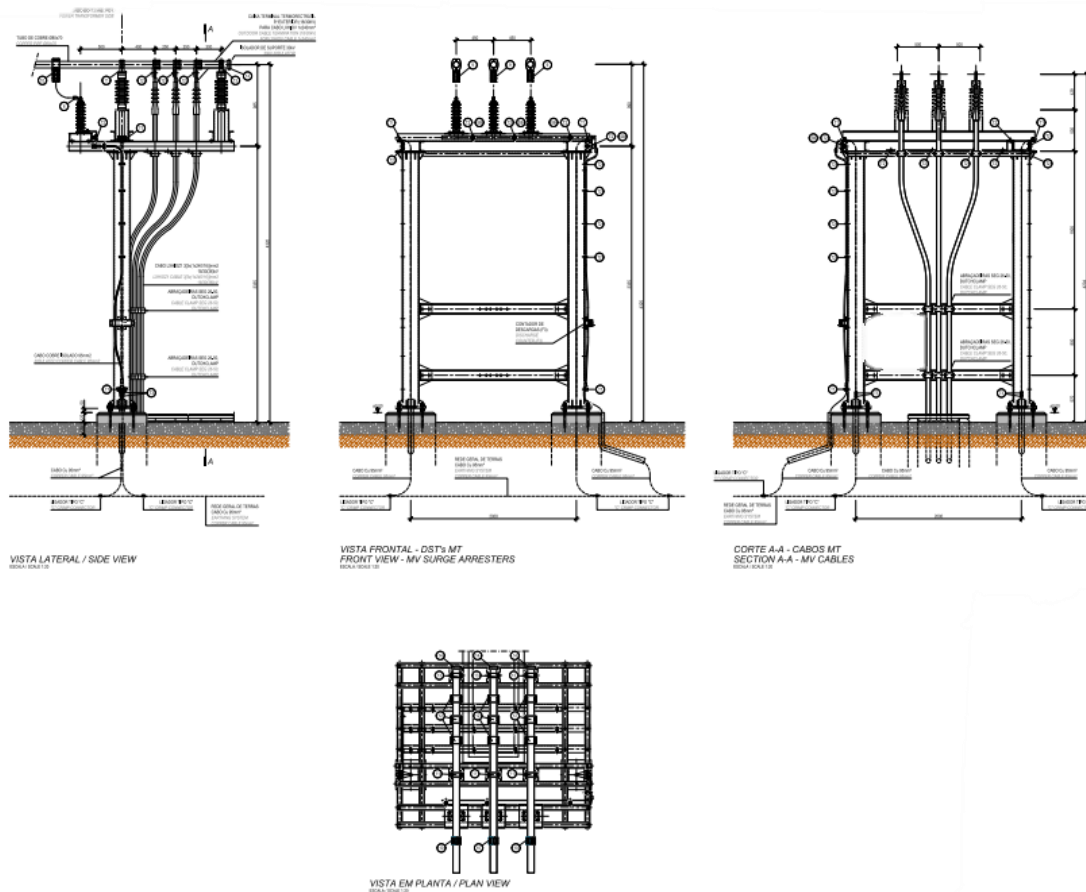


Figura 9 – Cabos de Média Tensão (base de dados da QDE)

O Capítulo 2 apresentou os riscos e problemas que podem ocorrer em subestações elétricas quando os esforços eletromecânicos não são devidamente calculados, como deslocamentos, deformações, falhas de isolamento e danos a equipamentos e estruturas. No Capítulo 3, serão mostrados os cálculos desses esforços nas ligações entre equipamentos, abrangendo condutores flexíveis e rígidos, com base nas normas IEC 60865-1:2011, IEC 60865-2:2015, IEC 60909-0:2016, IEEE 605:2008 RSLEAT, e nas condições atmosféricas.

3 Normas Técnicas e Metodologia de Cálculo dos Esforços Eletromecânicos

A análise dos esforços eletromecânicos em sistemas elétricos de energia elétrica requer o entendimento dos princípios físicos que regem o comportamento das correntes de curto-circuito e seus efeitos sobre condutores e estruturas mecânicas. Quando ocorrem falhas no sistema, resultando em forças de origem eletromagnética capazes de comprometer a integridade física dos componentes da instalação (Grainger & Stevenson, 1994).

Além do fundamento teórico, o correto dimensionamento e verificação das estruturas submetidas a tais esforços dependem da aplicação rigorosa de normas técnicas consolidadas. As normas mais relevantes sobre os cálculos dos esforços eletromecânicos são a IEC 60865-1:2011 e a IEC 60865-2:2015, as quais fornecem métodos de cálculo para condutores rígidos e flexíveis, incluindo exemplos práticos que orientam a sua aplicação em contextos reais.

Em subestações elétricas de grande porte, é comum a utilização de cabos nus (condutores flexíveis). Por sua vez, os barramentos rígidos são aplicados principalmente quando a otimização do espaço ou aspectos estéticos se tornam fatores relevantes, sendo que as formas mais utilizadas em subestações elétricas são as barras e os tubos.

O uso de condutores flexíveis apresenta algumas desvantagens, pois, por serem feitos de material maleável, estão mais sujeitos a oscilações causadas pelo vento, pelo gelo e pela temperatura do ar. Ainda assim, em comparação com os condutores rígidos, os flexíveis são economicamente mais vantajosos, uma vez que exigem um número menor de estruturas metálicas de suporte (Tisott, 2011).

3.1 Condutores Rígidos

Os métodos de cálculo dos condutores rígidos são realizados de acordo com as normas IEC 60865-1:2011, IEC 60865-2:2015 e a IEEE 605:2008. Os condutores rígidos mais utilizados são os tubulares apoiados sobre isoladores, representados na Figura 10.

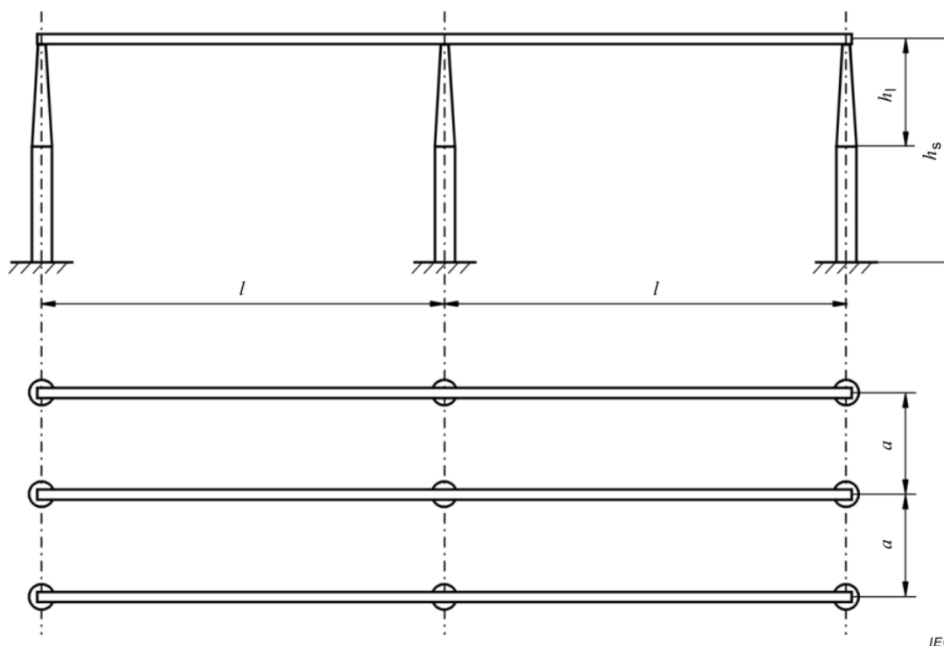


Figura 10 – Arranjo de dois vãos com condutores tubulares (IEC 60865-2:2015)

Um barramento deste tipo possui um momento de inércia (J_m), equação (1), e um módulo de flexão (W_m), equação 2 (Ribeiro, 2022).

$$J_m = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) \quad (1)$$

$$W_m = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D} \quad (2)$$

, onde:

- J_m Momento de inércia da seção de um condutor, em m^4 ;
- D Diâmetro externo do condutor tubular, em m;
- d Diâmetro interno do condutor tubular, em m;
- W_m Módulo de flexão, ou momento de resistência à torção do condutor tubular, em m^3 .




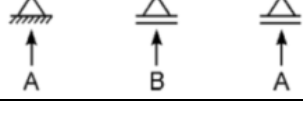
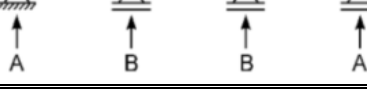
Em seguida, é calculada a frequência própria do condutor, ou de ressonância, a qual deve ser evitada, pois pode gerar vibrações excessivas, causando danos indesejáveis.

$$f_{cm} = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{E \cdot J_m}{m'_m}} \quad (3)$$

, onde:

f_{cm}	Frequência de ressonância/própria de vibração do condutor, em Hz;
γ	Fator para determinação da frequência de ressonância/própria de vibração do condutor, de acordo com a Tabela 1;
E	Módulo de elasticidade ou módulo de <i>Young</i> , em N/m ² ;
m'_m	Massa por unidade de comprimento, em kg/m.

Tabela 2 — Fatores α , β e γ para diferentes disposições de apoios de barramento (IEC 60865-1:2011)

		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

Com o cálculo da frequência de ressonância/própria de vibração do condutor (f_{cm}) deve ser verificada a relação com a frequência da instalação (f), equação (4).

$$\frac{f_{cm}}{f} \quad (4)$$

A verificação da frequência de ressonância tem como objetivo garantir que, em caso de ocorrência de um curto-circuito, a frequência natural de vibração do condutor (f_{cm}) não esteja perigosamente próxima da frequência elétrica da instalação (f).

Um condutor rígido apoiado entre isoladores, espaçados entre si, pode estar sujeito a oscilações e vibrações resultantes de diferentes fatores, como condições atmosféricas ou atividade sísmica. Esses efeitos geram esforços sobre os equipamentos e estruturas metálicas da subestação elétrica, incluindo esforços mecânicos estáticos e esforços eletrodinâmicos de curto-circuito, transmitidos pelos condutores.

No caso de um curto-circuito, os esforços dinâmicos são absorvidos pela viga de suporte dos isoladores, não sendo transferidos para a estrutura principal ou para as fundações. Entretanto, se a frequência de ressonância do condutor estiver próxima da frequência elétrica da instalação ou de seus múltiplos, considerando-se “próxima” uma diferença inferior a 10%, as oscilações podem se intensificar de forma perigosa (IEEE 605:2008c).

Para evitar esse problema, deve-se garantir que o valor calculado de (f_{cm}), obtido pela equação (3) apresentada anteriormente, esteja fora do intervalo:

$$[0,9f; 1,1, f] \cup [1,8f; 2,2f]$$

Assim, considerando que a frequência elétrica da instalação é de 50 Hz, a frequência de ressonância do condutor deve situar-se fora dos intervalos:

$$[45; 55] \cup [90; 110]$$

Com o intuito de calcular as tensões mecânicas de flexão causadas por forças entre os condutores principais ($\sigma_{m,d}$), devemos calcular o valor de pico da força eletromagnética entre os condutores principais durante um curto-circuito trifásico (F_{m3}), equação (5).

$$F_{m3} = \frac{\mu_0 \sqrt{3}}{2\pi} \frac{i_p^2 l}{a} \quad (5)$$

onde:

F_{m3}	Força máxima sobre o condutor central principal durante um curto-circuito trifásico, em N;
μ_0	Constante magnética, permeabilidade do vácuo = $4\pi \times 10^{-7}$, em H/m;
i_p	Valor de pico da corrente de curto-circuito, em A;
l	Distância entre eixos dos suportes, em m;
a	Distância equivalente entre condutores, em m.

Na norma IEC 60909-0:2016, que trata do cálculo de correntes de curto-circuito, são apresentadas fórmulas que indicam como determinar a corrente de pico do curto-circuito (i_p), equação (6). Esse valor é fundamental para o cálculo do pico da força exercida entre os condutores principais durante um curto-circuito trifásico.

$$i_p = k\sqrt{2}I_k'' \quad (6)$$

onde:

- k Fator de correção para impedâncias;
- I_k'' Corrente de curto-circuito simétrica inicial (r.m.s.).

O fator K deve ser obtido para relação R/X, equação (7).

$$k = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3R}{X}} \quad (7)$$

As tensões de flexão causadas por forças entre condutores durante o curto-circuito ($\sigma_{m,d}$) são calculadas a seguir na equação (8).

$$\sigma_{m,d} = V_{\sigma m} V_{r m} \beta \frac{F_{m3} l}{8 W_m} \quad (8)$$

onde:

- $\sigma_{m,d}$ Tensão mecânica de flexão causada pelas forças entre condutores principais, em N/m²;
- $V_{\sigma m} V_{r m}$ Fatores que contabilizam os fenômenos dinâmicos;
- β Fator correspondente à tensão mecânica de um condutor principal, que varia de acordo com o tipo e número de apoios, conforme a Tabela 2.

Os valores de $V_{\sigma m}$ e $V_{r m}$ dependem da relação entre a frequência de ressonância/própria de vibração do condutor (f_{cm}) e a frequência da instalação (f) e podem ser obtidos pelas figuras 5 e 6, ou pelas tabelas 3 e 4.

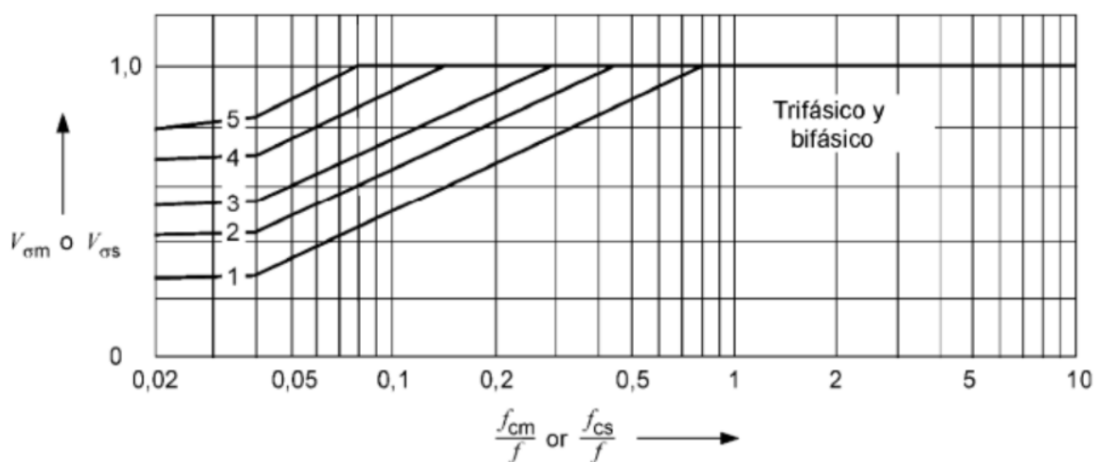


Figura 11 – Fator $V_{\sigma m}$ a ser usado em curto-circuito.

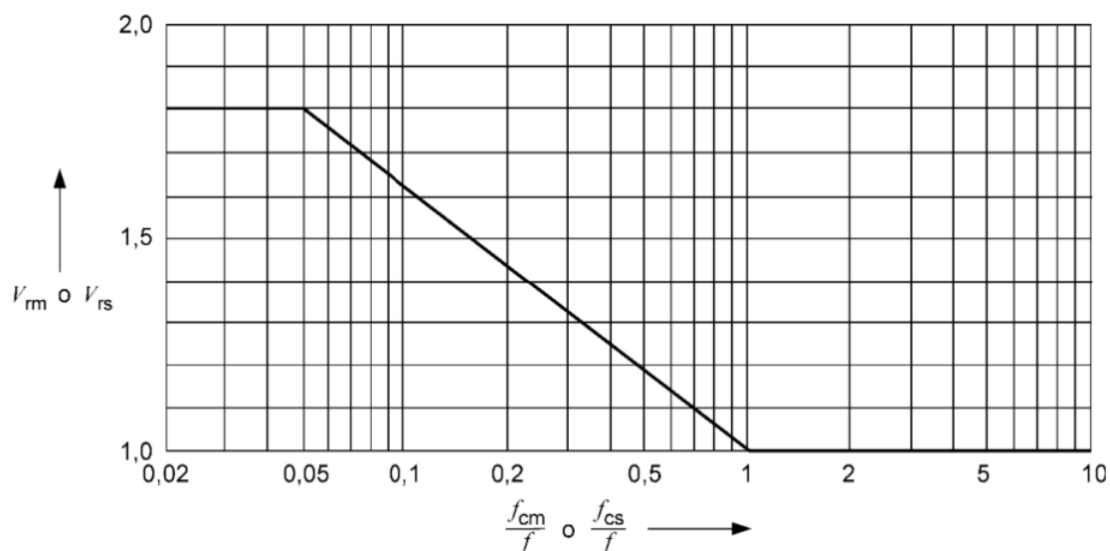


Figura 12 – Fator V_{rm} a ser usado em curto-circuito.

Tabela 3 — Valor do Fator $V_{\sigma m}$ (IEC 60865-1:2011)

$\frac{f_{cm}}{f}$	Fator $V_{\sigma m}$
$< 0,04$	$0,09 + 4,49e^{-1,68} + 0,0664 \log\left(\frac{f_{cm}}{f}\right)$
$0,04 - 0,8$	Valor máximo de $V_{\sigma 1}$ ou $V_{\sigma 2}$ $V_{\sigma 1} = 0,756 + 4,49e^{-1,68} + 0,54 \log\left(\frac{f_{cm}}{f}\right)$ $V_{\sigma 2} = 1,0$
$> 0,8$	1,0
Se $k > 1,6$ deve utilizar $k = 1,6$	

Tabela 4 — Valor do Fator V_{rm} (IEC 60865-1:2011)

$\frac{f_{cm}}{f}$	Fator V_{rm}
$< 0,05$	1,8
$0,05 - 18$	$1,0 - 0,615 \log\left(\frac{f_{cm}}{f}\right)$
> 1	1,0

O fator de plasticidade do condutor tubular (q) é calculado pela equação (9).

$$q = 1,7 \frac{1 - \left(1 - \frac{2t}{D}\right)^3}{1 - \left(1 - \frac{2t}{D}\right)^4} \quad (9)$$

onde:

q	Fator de plasticidade do condutor tubular;
t	Espessura do condutor tubular, em m;
D	Diâmetro externo do condutor tubular, em m.

Com o fator de plasticidade do condutor tubular (q), multiplicado pela tensão mecânica correspondente ao limite elástico (f_y) se obtém o valor capaz de suportar as forças de curto-circuito. Logo, este valor deve ser maior do que a tensão mecânica de flexão causada pelas forças entre condutores principais ($\sigma_{m,d}$), conforme a equação (10), pois atendendo a esta condição, não ocorrerá deformação.

$$\sigma_{m,d} < q f_y \quad (10)$$

O valor da tensão mecânica correspondente ao limite elástico (f_y) varia de acordo com o fabricante do condutor tubular, com a unidade N/m².

O cálculo da força estática equivalente ($F_{r,d}$) sobre os suportes dos condutores rígidos, considerando-se dois suportes A e B, para o condutor rígido é descrito pelas equações (11) e (12) a seguir.

$$F_{r,d(A)} = V_F V_{rm} \alpha_A F_m^3 \quad (11)$$

$$F_{r,d(B)} = V_F V_{rm} \alpha_B F_m^3 \quad (12)$$

onde:

$F_{r,d(A)}, F_{r,d(B)}$	Força estática equivalente, exercida respectivamente sobre os suportes A e B dos condutores rígidos, em N;
V_F e V_{rm}	Fatores que contabilizam os fenômenos dinâmicos;
α_A, α_B	Fatores relativos à força exercida sobre o suporte A e B, respectivamente, de acordo com a Tabela 2.

O valor de V_{rm} é dado na Tabela 4. O valor de V_F é encontrado na Tabela 5 ou na Figura 13.

Tabela 5 — Valor do Fator V_F (IEC 60865-1:2011)

$\frac{f_{cm}}{f}$	Curto-circuito trifásico	Curto-circuito bifásico
< 0,04	$0,232 + 3,52e^{-1,45k} + 0,166 \lg\left(\frac{f_{cm}}{f}\right)$	
0,04 ... 0,8	Valor máximo de V_{F1} ou V_{F2}	
	$V_{F1} = 0,839 + 3,52 e^{-1,45k} + 0,6 \lg\left(\frac{f_{cm}}{f}\right)$ $V_{F2} = 2,38 + 6,00 \lg\left(\frac{f_{cm}}{f}\right)$	
0,8 ... 1,2	1,8	
1,2 ... 1,6	$1,23 + 7,2 \lg\left(\frac{f_{cm}}{f}\right)$	1,8
1,6 ... 2,4	2,7	1,8
2,4 ... 2,74	$8,59 - 15,5 \lg\left(\frac{f_{cm}}{f}\right)$	1,8
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	
Se $k > 1,6$ deve se utilizar $k = 1,6$		

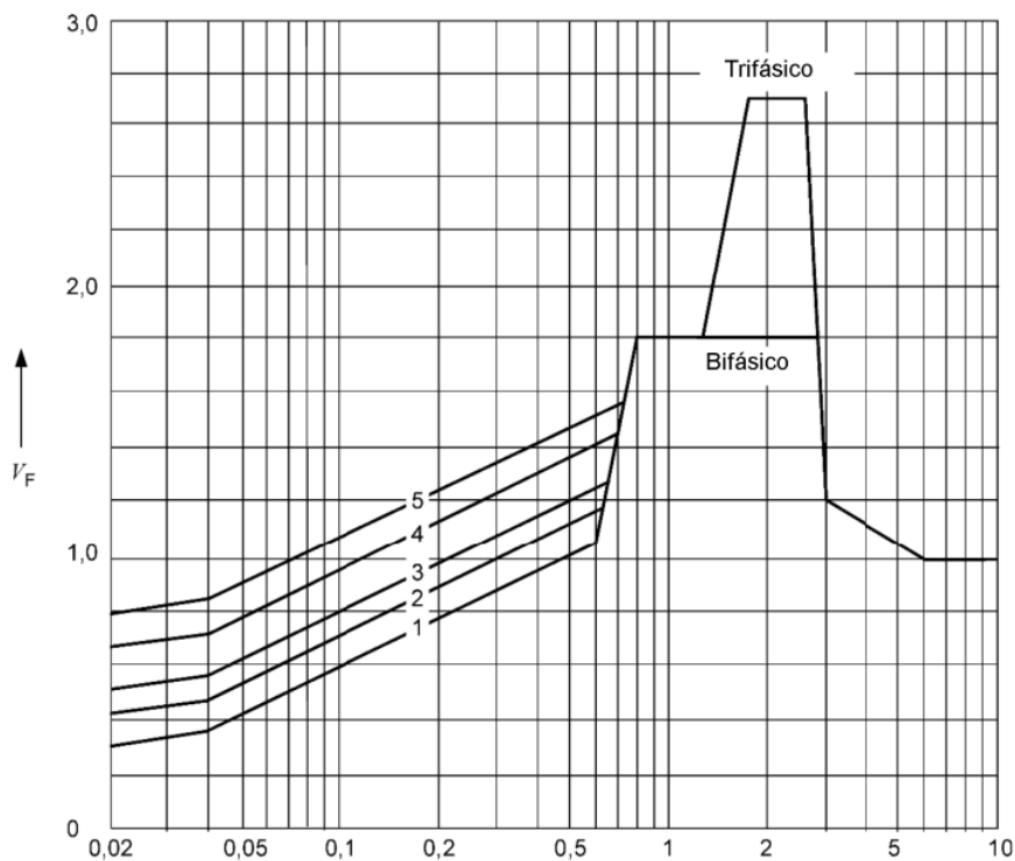


Figura 13 – Fator V_{rm} a ser usado em curto-circuito (IEC 60865-1:2011).

Com a informação da altura do terminal do isolador obtêm-se a força estática resultante ($F_{r,d\ res}$), através da equação (13), que não deve exceder o momento na base do isolador e a força de flexão, fornecida pelo fabricante, que atua na cabeça do isolador. Desta forma, os suportes/isoladores são adequados quando a condição da equação (14) é atendida, na qual a rutura à flexão dos isoladores ($F_{r,d\ máx}$) deve ser superior à força estática máxima equivalente.

$$F_{r,d\ res} = \left(\frac{h_i+h_l}{h_i}\right) \max(F_{r,d\ (A)}, F_{r,d\ (B)}) \quad (13)$$

$$F_{r,d\ máx} > F_{r,d\ res} \quad (14)$$

onde:

$F_{r,d\ res}$	Força estática máxima resultante considerando a altura do ligador, em N;
h_i	Altura do isolador, em m;
h_l	Altura do ligador, em m;
$F_{r,d\ máx}$	Carga de rutura à flexão dos isoladores, em N.

O peso do condutor (P_{cond}) é obtido através da sua massa por metro (m'_m), pela equação (15).

$$P_{cond} = m'_m g L \quad (15)$$

onde:

P_{cond}	Peso do condutor, em N;
m'_m	Massa por unidade de comprimento, em kg/m;
g	Valor convencional da aceleração gravitacional, em m/s ² ;
L	Comprimento total do condutor, em m.

Ao considerar o gelo sobre o condutor, deve ser calculado o incremento deste peso (F_1), em função da espessura de gelo (e_{gelo}), da sua densidade (ρ_{gelo}) e do diâmetro externo do condutor (D), pela equação (16).

$$F_1 = \rho_{gelo} g \pi \left(\left(\frac{D}{2} + e_{gelo}\right)^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2 \right) L \quad (16)$$

onde:

F_1	Incremento de peso provocado pela camada de gelo no condutor, em N;
ρ_{gelo}	Densidade do gelo, em kg/dm ³ ;
e_{gelo}	Espessura da camada de gelo, em mm.

A força máxima do vento pode ocorrer em duas situações: em condições extremas de vento sem formação de gelo ou em situações de vento intenso acompanhado pela presença de gelo. Normalmente, a primeira condição gera esforços mais elevados que a segunda. Ainda assim, recomenda-se calcular a força do vento para ambos os cenários, a fim de identificar o caso mais crítico.

Os principais fatores que influenciam a força do vento são: a velocidade média e as rajadas, as dimensões e a geometria do condutor, sua altura e exposição, além da espessura radial do gelo. A avaliação deve considerar a direção horizontal que resulta na maior carga.

Quando há velocidade extrema de vento sem acúmulo de gelo, a força do vento por unidade de comprimento de condutor é obtida pela equação (17).

$$F_w = C V^2 D C_f K_z G_f l \quad (17)$$

onde:

F_w	Força do vento por unidade de comprimento, em N/m;
C	Constante que toma o valor de 0,613;
V	Velocidade extrema do vento sem a existência de gelo, em m/s;
D	Diâmetro externo do condutor ou altura do perfil usado como condutor, em m;
C_f	Coefficiente de força, que segundo a norma IEEE 605:2008 para condutores tubulares rígidos adota o valor de 1,0 e para os restantes formatos adota o valor de 2,0;
K_z	Fator de altura e exposição, de acordo com a Tabela 6 ou com a equação (19);
G_f	Fator de resposta à rajada de vento, que segundo a norma IEEE 605:2008, para condutores rígidos adota o valor de 0,85;
l	Fator de importância da estrutura, que segundo a norma IEEE 605:2008, para estruturas de subestações elétricas que requeiram um nível mais alto de confiabilidade, adota o valor de 1,15.

Com a força máxima do vento e presença de gelo, a força do vento por unidade de comprimento de condutor é obtida pela equação (18).

$$F_{wI} = C V_I^2 (D + 2 r_I) C_f K_z G_f l \quad (18)$$

onde:

F_{wI}	Força do vento com a presença do gelo, por unidade de comprimento, em N/m;
V_I	Velocidade extrema do vento com a existência de gelo, em m/s;
r_I	Espessura radial uniforme de gelo devido à chuva congelante, em m;
G_f	Fator de resposta à rajada de vento, que segundo a norma IEEE 605:2008, para gelo e vento em simultâneo, adota o valor de 1,0.

O fator de altura e exposição K_z é um parâmetro definido em função da altura do condutor em relação ao solo (h) e do grau de exposição da instalação. Esse fator deve ser escolhido conforme a Tabela 6, que por sua vez está relacionada ao tipo de superfície onde o sistema está inserido, as categorias de exposição podem ser resumidas da seguinte forma (IEEE 605:2008):

- Exposição B: áreas urbanas ou suburbanas com obstáculos próximos entre si; regiões florestais;
- Exposição C: terrenos abertos, com poucos obstáculos cuja altura seja inferior a 9,1 m; campos e superfícies de água localizadas em corredores de tornados;

- Exposição D: regiões planas sem obstáculos; superfícies de água fora de corredores de tornados; planícies de sal ou lama; áreas cobertas por gelo.

Tabela 6 — Fator da altura e exposição K_z (IEEE 605:2008)

Altura do condutor acima do solo, h (m)	Exposição B	Exposição C	Exposição D
0 – 4,6	0,57	0,85	1,03
6,1	0,62	0,90	1,08
7,6	0,66	0,94	1,12
9,1	0,70	0,98	1,16
12,2	0,76	1,04	1,22
15,2	0,81	1,09	1,27
18	0,85	1,13	1,31
21,3	0,89	1,17	1,34
24,4	0,93	1,21	1,38
27,4	0,96	1,24	1,40
30,5	0,99	1,26	1,43

Os valores do fator K_z apresentados na Tabela 6 são válidos para alturas de até 30,5 m em relação ao solo. Como alternativa, esse fator pode ser calculado para qualquer valor de altura h , utilizando a equação (19).

$$\begin{aligned} \text{Para } 4,6 < h < Z_{gwl} \quad K_z &= 2,01 \left(\frac{h}{Z_g}\right)^{a_z} \\ \text{Para } h < 4,6 \quad K_z &= 2,01 \left(\frac{4,6}{Z_g}\right)^{a_z} \end{aligned} \quad (19)$$

onde:

K_z	Fator de altura e exposição;
h	Altura do condutor acima do solo, em m;
Z_g	Altura do gradiente em função da exposição da instalação, em m, de acordo com a;
a_z	Coefficiente da lei de potência para rajadas de vento, de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7 — Fator da altura e exposição K_z (IEEE 605:2008)

Exposição	Z_g (m)	a_z
B	366	7
C	274	9,5
D	213	11,5

3.2 Condutores Flexíveis

Os cálculos relativos aos condutores flexíveis podem ser classificados em dois grupos distintos:

- Condutores flexíveis horizontais;
- Condutores flexíveis verticais (baixadas).

De acordo com a norma IEC 60865-1:2011, um condutor flexível deve ser considerado como vertical sempre que a diferença de altura entre os pontos de fixação ultrapasse 25% do vão. Quando essa diferença for inferior a esse valor, o condutor é tratado como horizontal.

3.2.1 Condutores flexíveis horizontais

Os cálculos dos condutores flexíveis horizontais são realizados de acordo com as normas IEC 60865-1:2011, IEC 60865-2:2015 e a RSLEAT:1992. Na Figura 14 temos um arranjo de condutores flexíveis horizontais.

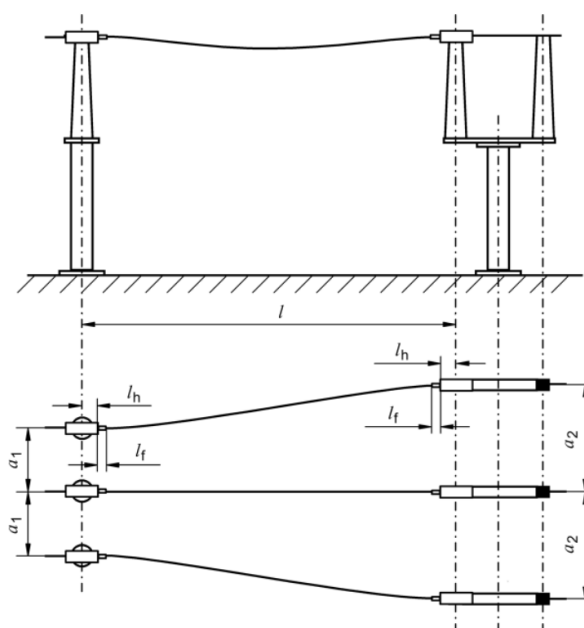


Figura 14 – Arranjo com condutores flexíveis horizontais (IEC 60865-2:2015)

De acordo com o RSLEAT:1992, nos artigos 21.º e 22.º, os cálculos de resistência mecânica devem considerar os efeitos do vento, da temperatura e do gelo. Estes fatores variam em função da região onde a subestação elétrica será implantada, influenciando diretamente o dimensionamento e a segurança da instalação.

Para cumprir o estabelecido no RSLEAT:1992, serão consideradas três estações do ano, uma vez que cada estação apresenta condições atmosféricas distintas:

- Inverno: caracteriza-se por temperaturas reduzidas, vento de menor intensidade e possibilidade de ocorrência de gelo;
- Primavera: apresenta temperaturas médias, vento máximo habitual e ausência de gelo;
- Verão: corresponde a temperaturas elevadas, sem sobrecarga de vento e sem presença de gelo.

Desta forma, verifica-se que o condutor ficará sujeito a diferentes esforços mecânicos estáticos ao longo do ano. No inverno, estará exposto simultaneamente à ação do vento e à formação de gelo, o que aumenta os esforços transmitidos aos suportes. Com a elevação da temperatura, ocorre a dilatação do condutor, que também modifica os esforços e provoca o aumento da sua flecha.

O cálculo da ação do vento nas ligações entre os equipamentos, de acordo com o RSLEAT:1992, será efetuado para as estações de inverno e primavera. No inverno, apesar da presença de gelo, o vento apresenta intensidade reduzida; enquanto na primavera, verifica-se a ocorrência do vento mais forte, sem formação de gelo. Assim, a força resultante da ação do vento no inverno (F_{vi}) será determinada pela equação (20), enquanto a força correspondente à primavera (F_{vp}) será obtida pela equação (21).

$$F_{vi} = \alpha c q_i (d + 2 e_{gelo}) \quad (20)$$

onde:

F_{vi}	Força de ação do vento sobre o condutor, calculado para o estado de Inverno, em N;
α	Representa o coeficiente de redução (0,6 para condutores e 1 para isoladores), de acordo com o disposto no RSLEAT:1992 -Artigo 14º, em °C ⁻¹ .
c	Representa o coeficiente de forma;
q_i	Pressão dinâmica do vento no estado de Inverno, em Pa, dependente da altura acima do solo do ponto de ligação, de acordo com a Figura 14, proveniente do RSLEAT:1992 - Artigo 13º;
d	Diâmetro do condutor, em m;
e_{gelo}	Espessura da camada de gelo, em mm, geralmente considera-se que esta camada é uniforme e igual a 10mm, de acordo com o disposto no RSLEAT:1992 - Artigo 14º.

$$F_{vp} = \alpha c q_p d \quad (21)$$

onde:

F_{vp}	Força de ação do vento sobre o condutor, em N, calculado para o estado de Primavera;
q_p	Pressão dinâmica do vento no estado de Inverno, em Pa, dependente da altura acima do solo do ponto de ligação, de acordo com a Figura 14, proveniente do RSLEAT - Artigo 13º.

Tabela 8 — Determinação do coeficiente de forma

Diâmetro (mm)	Coeficiente de forma c
< 12,5	1,2
De 12,5 a 15,8	1,1
> 15,8	1,0

Tabela 9 — Determinação da pressão dinâmica do vento

Altura acima do solo (m)	Pressão dinâmica do vento, q (Pa)	
	Vento máximo habitual (q_p)	Vento reduzido (q_i)
< 30	750	300
De 30 a 50	900	360
> 50	1050	420

Com o intuito de determinar os esforços atuantes sobre os apoios, torna-se necessário comparar o peso do condutor agravado pela ação do vento e pela formação de gelo. Para esse efeito, as equações (22) e (23) permite calcular o coeficiente de sobrecarga (m) para os estados de Primavera e de Inverno.

$$m_{ri} = \frac{\sqrt{(W_c + W_g)^2 + F_{vi}^2}}{W_c} \quad (22)$$

$$m_{rp} = \frac{\sqrt{W_c^2 + F_{vp}^2}}{W_c} \quad (23)$$

$$W_c = n m'_s g \quad (24)$$

$$W_g = \rho_{gelo} \frac{\pi}{4} [(d + 2 e_{gelo})^2 - d^2] \quad (25)$$

onde:

m_{ri}	Coeficiente de sobrecarga no estado de Inverno, em N/m;
m_{rp}	Coeficiente de sobrecarga no estado de Primavera, em N/m;
W_c	Força devida à ação do peso do próprio cabo, em N/m;
W_g	Força devida à ação do gelo, N/m;
n	Número de subcondutores;
m'_s	Massa por unidade de comprimento, em kg/m.

O cálculo do vão crítico (L_{cr}) corresponde ao vão teórico no qual os condutores ficam sujeitos à mesma tensão máxima nos dois estados mais desfavoráveis: seja na condição de temperatura

mínima (Inverno), seja sob a ação do vento máximo (Primavera). O cálculo do vão crítico é dado pela equação (26).

$$L_{cr} = \frac{\sigma t_{max}}{W_c} \sqrt{\frac{24 \alpha (\theta_p - \theta_i)}{m_{rp}^2 - m_{ri}^2}} \quad (26)$$

onde:

L_{cr}	Vão crítico, em m;
σ	Secção do condutor, em mm ² ;
t_{max}	Tensão de montagem máxima ou Força estática de tração máxima admissível, fornecida pelo fabricante, em N;
θ_p	Temperatura no estado de Primavera, em °C;
θ_i	Temperatura no estado de Inverno, em °C.

Com os valores do coeficiente de sobrecarga (m_{rp} e m_{ri}) e do vão crítico (L_{cr}) obtidos para os estados de Primavera e Inverno, utiliza-se o fluxograma apresentado na Figura 15 para determinar qual desses estados atmosféricos representa a condição mais desfavorável. A partir dessa identificação, avalia-se também a necessidade de cálculo do vão e, quando aplicável, define-se a sua natureza, crítico, infinito ou imaginário, conforme os critérios estabelecidos no diagrama (Magalhães, 2013).

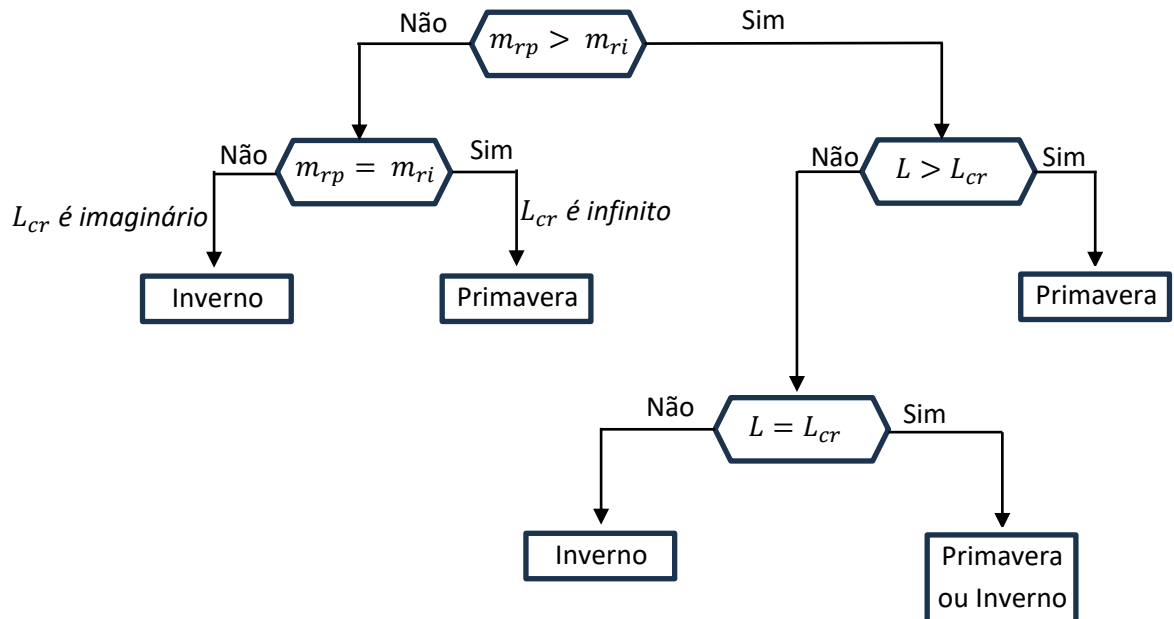


Figura 15 – Fluxograma para determinação do pior estado atmosférico (Magalhães, 2013).

No fluxograma, o $L = L_{eff}$, que representa o comprimento efetivo do vão, em m.

Para avaliar o equilíbrio mecânico dos condutores em uma linha aérea, é necessário relacionar a tensão atuante em um estado atmosférico específico com a tensão correspondente em um

estado de referência. Essa verificação considera o comprimento do vão e as propriedades mecânicas do condutor, sendo realizada por meio da equação dos estados (27).

$$\theta_i + \frac{t_i}{\alpha_d E} - \frac{m_i^2 w^2 L^2}{24 \alpha_d \sigma^2 t_i^2} = \theta_k + \frac{t_k}{\alpha_d E} - \frac{m_k^2 w^2 L^2}{24 \alpha_d \sigma^2 t_k^2} \quad (27)$$

onde:

θ_i e θ_k	Temperatura no estado atmosférico i e k , respetivamente, em °C;
t_i e t_k	Tensão de mecânica do condutor no estado atmosférico i e k , respetivamente, em daN/mm ² ;
m_i e m_k	Coefficientes de sobrecarga dos estados atmosféricos i e k , respetivamente;
L	Comprimento efetivo do vão, em m;
α_d	Coefficiente de dilatação térmica do material condutor, em (°C) ⁻¹ ;
E	Módulo de elasticidade ou módulo de Young, em N/m ² ;
σ	Secção do condutor, em mm ² .

O vão crítico corresponde ao vão em que os condutores, em um dos dois estados atmosféricos mais desfavoráveis, temperatura mínima (Inverno) ou vento máximo (Primavera), estão sujeitos à mesma tensão máxima (t_{max}).

Assim, recorrendo à equação de estados (27), é possível determinar o valor do vão crítico quando esta é aplicada simultaneamente aos estados de Inverno e de Primavera, considerando que ambos se encontram definidos para a mesma tração máxima ($t_i = t_k = t_{max}$) e que $L = L_{cr}$, de acordo com a igualdade da equação (27).

Com as informações apresentadas, torna-se possível calcular a flecha do condutor para os diferentes estados atmosféricos ao longo do ano. A equação (28) corresponde à fórmula geral da flecha (f), enquanto a equação (29) permite determinar a flecha considerando a diferença de altura entre os apoios dos condutores ($l_{eff} \sqrt{l_{eff}^2 + (h_a - h_b)^2}$), bem como os fatores de majoração do peso dos condutores (m_{rx}), resultantes das variações de temperatura nos diferentes estados atmosféricos.

$$f_x = \frac{W L^2}{8 T} \quad (28)$$

$$f_x = \frac{m_{rx} W_c l_{eff} \sqrt{l_{eff}^2 + (h_a - h_b)^2}}{8 T_x} \quad (29)$$

onde:

h_a e h_b	Altura dos apoios dos condutores, em m.
---------------	-----------------------------------------

De acordo com as normas IEC 60865-1:2011 e IEC 60865-2:2015, os cálculos dos esforços eletrodinâmicos de curto-circuito em condutores flexíveis horizontais podem ser realizados de forma padronizada. A equação (30) permite determinar a força eletromagnética atuante entre condutores dispostos no mesmo plano, representando um parâmetro fundamental para a avaliação da estabilidade mecânica desses sistemas.

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I_k'')^2 l_c}{a l} \quad (30)$$

onde:

F'	Força eletromagnética característica por unidade de comprimento sobre condutores flexíveis, em N;
μ_0	Constante magnética, permeabilidade do vácuo = $4\pi \times 10^{-7}$, em H/m;
I_k''	Corrente inicial de curto-circuito trifásico simétrico (valor eficaz), em A;
a	Distância equivalente entre condutores, em m;
l_c	Comprimento do condutor principal flexível do vão, em m;
l	Distância entre eixos dos suportes, em m.

A distância equivalente (a) é dada pela equação (31), sendo a_1 e a_2 distância entre condutores de cada lado do condutor sobre os apoios, conforme a Figura 14.

$$a = \frac{a_1 + a_2}{2} \quad (31)$$

A relação entre a força da gravidade e a força eletromagnética obtida pelo parâmetro (r), calculada na equação (32).

$$r = \frac{F'}{n m_s' g} \quad (32)$$

onde:

r	Relação entre a força eletromagnética em condições de curto-circuito e a força da gravidade sobre um condutor;
n	Número de subcondutores;
m_s'	Massa por unidade de comprimento dos subcondutores, em kg/m.

Com a equação (33) encontra-se a direção da força resultante (δ_1) exercida sobre o condutor.

$$\delta_1 = \arctan(r) \quad (33)$$

onde:

δ_1	Direção da força resultante exercida sobre o condutor, em °(graus).
------------	---------------------------------------------------------------------

A força estática de tração ($F_{st} = t_i, t_k$) calculada anteriormente através da equação de estados (27) permite determinar a flecha estática equivalente do condutor no ponto intermédio do vão (f_{es}). Esse valor é obtido na equação (34).

$$f_{es} = \frac{n m'_s g l^2}{8 F_{st}} \quad (34)$$

O período de oscilação do condutor (T) é determinado pela equação (35) considerando pequenos ângulos de oscilação e a ausência de corrente a circular no condutor. Já o cálculo da flecha estática equivalente do condutor deve ser realizado para o estado atmosférico mais desfavorável ($f_{es,Tw}$), correspondente ao Inverno ou à Primavera, consoante o caso em análise, e também para o estado de montagem, no Verão, onde a flecha atinge o seu valor máximo ($f_{es,Tmax}$).

$$T = 2\pi \sqrt{0,8 \frac{f_{es}}{g}} \quad (35)$$

Deste modo, o período de oscilação resultante durante o curto-circuito (T_{res}) é determinado pela equação (36).

$$T_{res} = \frac{T}{\sqrt[4]{1 + r^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad (36)$$

onde:

T	Período de oscilação do condutor, em s;
T_{res}	Período resultante de oscilação durante o curto-circuito, em s.

A constante de elasticidade resultante dos suportes (S) é definida em função do tipo de ligação. Para ligações entre equipamentos, que exercem forças de torção sobre os isoladores, o seu valor é de 100×10^3 N/m. No caso das ligações tendidas, são consideradas as seguintes possibilidades:

- Para tensões nominais até 123 kV: 150×10^3 N/m a 300×10^3 N/m;
- Para tensões nominais até 245 kV: 400×10^3 N/m a 2000×10^3 N/m;
- Para tensões nominais até 420 kV: 600×10^3 N/m a 3000×10^3 N/m.

A norma de rigidez (N) é estabelecida pela equação (37).

$$N = \frac{1}{S \cdot l} + \frac{1}{n \cdot E_{eff} \cdot A_s} \quad (37)$$

onde:

S	Constante de elasticidade resultante dos suportes, em N/m;
E_{eff}	Módulo de <i>Young</i> real, em N/m ² ;
A_s	Secção transversal de um subcondutor, em mm ² .

De acordo com o sistema de equações (38), o módulo de *Young* real (E_{eff}) é obtido a partir do ponto mais baixo de esforço. Nessa condição, o módulo de *Young* mantém-se constante, considerando $\sigma_{fin} = 50 \times 10^3 \text{ N/m}^2$.

$$E_{eff} = \begin{cases} E \left[0,30,7 \sin \left(\frac{F_{st}}{n \cdot A_s \cdot \sigma_{fin}} 90^\circ \right) \right] & \text{para } \frac{F_{st}}{w \cdot A_s} \leq \sigma_{fin} \\ E & \text{para } \frac{F_{st}}{w \cdot A_s} > \sigma_{fin} \end{cases} \quad (38)$$

onde:

E Módulo de elasticidade ou módulo de *Young*, em N/m^2 ;
 σ_{fin} Tensão mecânica mais baixa no condutor quando o módulo de *Young* atinge um valor constante, em N/m^2 .

O fator de tensão mecânica (ζ) do condutor principal é definido pela equação (39).

$$\zeta = \frac{(n \cdot g \cdot m'_s \cdot l)^2}{24 \cdot F_{st}^3 \cdot N} \quad (39)$$

De acordo com a norma IEC 60865-1, quando a duração do primeiro fluxo de curto-circuito (T_{k1}) excede $0,4 \cdot T$, deve considerar-se $T_{k1} = 0,4 \cdot T$ para a determinação das equações (40), (41) e (42).

$$\delta_{end} = \begin{cases} \left\{ \delta_1 \left[1 - \cos \left(360^\circ \frac{T_{k1}}{T_{res}} \right) \right] \right\} & \text{para } 0 \leq \frac{T_{k1}}{T_{res}} \leq 0,5 \\ 2 \delta_1 & \text{para } \frac{T_{k1}}{T_{res}} > 0,5 \end{cases} \quad (40)$$

onde:

δ_{end} Ângulo de oscilação do condutor no final do curto-circuito, em $^\circ$ (graus);
 T_{k1} Duração do primeiro fluxo de curto-circuito, em s.

O ângulo máximo de oscilação (δ_{max}) pode ser obtido graficamente na Figura 16 ou, em alternativa, calculado a partir das equações (41) e (42), durante ou após o curto-circuito.

$$X = \begin{cases} 1 - r \cdot \sin \delta_{end} & \text{para } 0 \leq \delta_{end} < 90^\circ \\ 1 - r & \text{para } \delta_{end} > 90^\circ \end{cases} \quad (41)$$

$$\delta_{max} = \begin{cases} 1,25 \cdot \arcsin X & \text{para } 0,766 \leq X \leq 1 \\ 10^\circ + \arcsin X & \text{para } -0,985 \leq X \leq 0,766 \\ 180^\circ & \text{para } X < -0,985 \end{cases} \quad (42)$$

onde:

X Magnitude do ângulo máximo de oscilação;
 δ_{max} Ângulo máximo de oscilação, em °(graus).

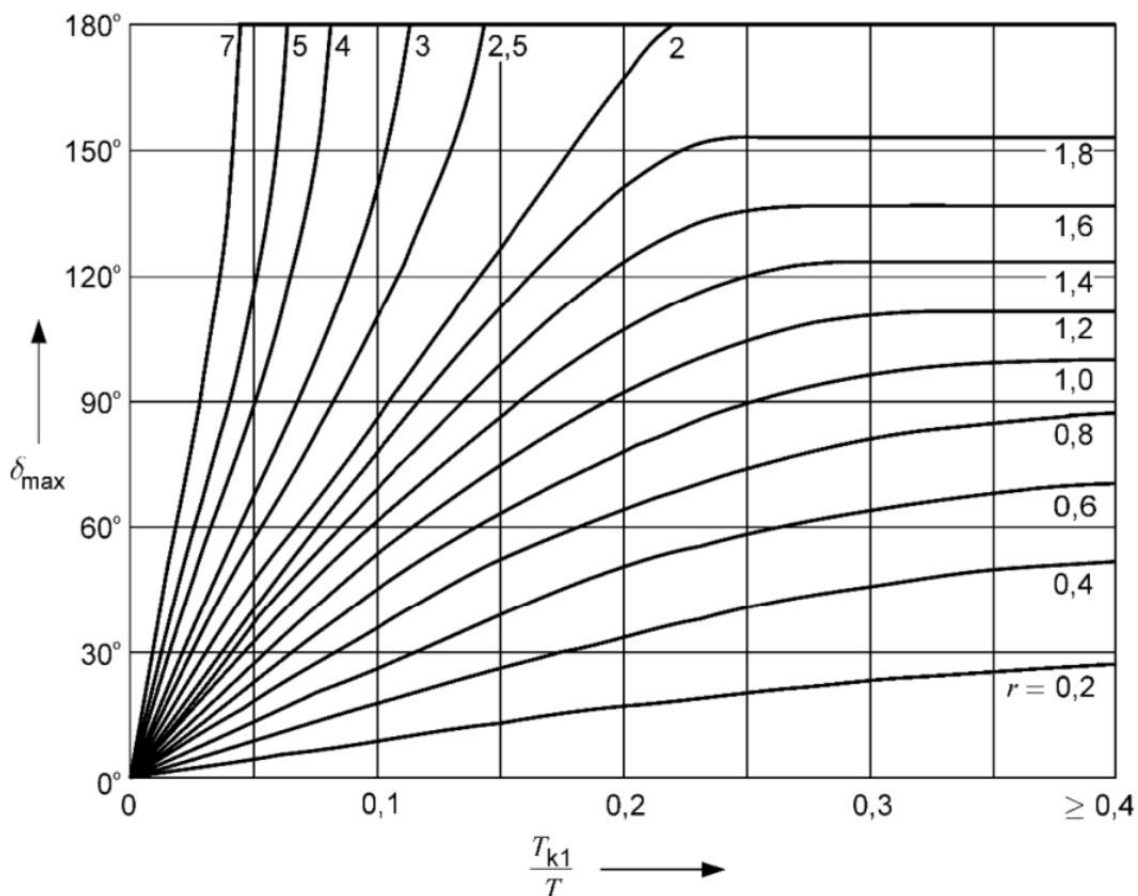


Figura 16 – Ângulo máximo de oscilação δ_{max} para um determinado tempo de duração de curto-circuito T_{k1} .

De acordo com a equação (43), a força de tensão durante o curto-circuito ($F_{t,d}$) depende do parâmetro de carga (φ), do fator de força de tensão (Ψ) e da força estática de tração (F_{st}).

$$F_{t,d} = F_{st}(1 + \varphi \cdot \Psi) \quad (43)$$

De acordo com a condição (44), a força de tensão durante o curto-circuito é caracterizada como a força de tensão máxima obtida pela equação (43), considerando a comparação entre o estado de Verão e o estado atmosférico mais desfavorável.

$$F_{t,d} = \max(F_{t,d,Tw}; F_{t,d,Tmax}) \quad (44)$$

O fator (Ψ) pode ser obtido numericamente através da equação (43) ou, em alternativa, de forma gráfica pela Figura 17. Por sua vez, a determinação do parâmetro (φ) é realizada com recurso à equação (45).

$$\varphi = \begin{cases} 3(\sqrt{1+r^2}-1) & \text{para } T_{k1} \geq \frac{T_{res}}{4} \\ 3(r \cdot \sin \delta_{end} + \cos \delta_{end} - 1) & \text{para } T_{k1} < \frac{T_{res}}{4} \end{cases} \quad (45)$$

$$\varphi^2 \cdot \Psi^3 + \varphi(2 + \zeta)\Psi^2 + (1 + 2 \cdot \zeta)\Psi - \zeta(2 + \varphi) = 0 \quad (46)$$

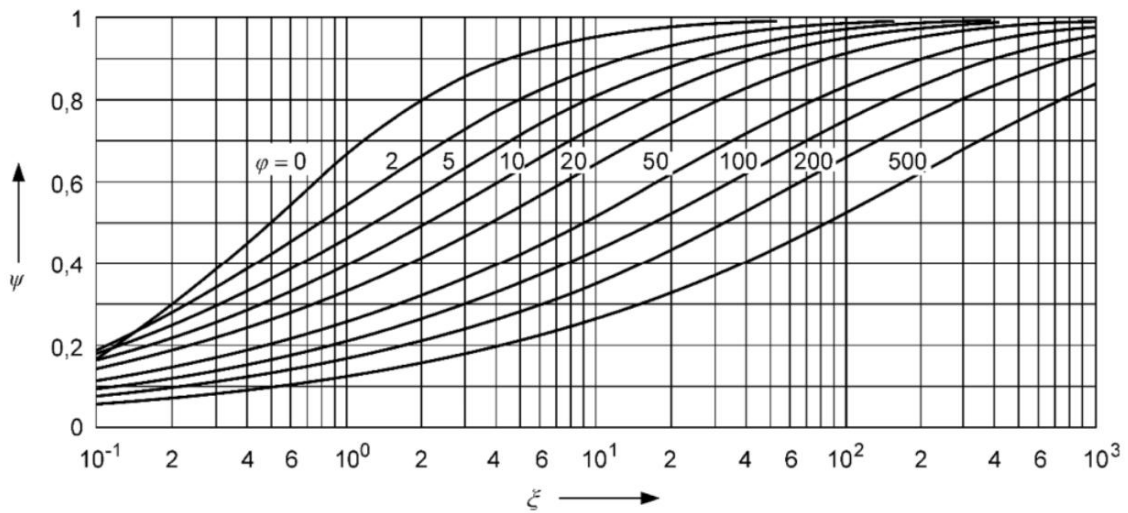


Figura 17 – Fator (Ψ) relativo à força de tração em condutores flexíveis

Considerando as variações das condições climáticas, a flecha do condutor está sujeita a alterações ao longo do tempo. Por este motivo, torna-se necessária a determinação da flecha dinâmica. Para efeitos de cálculo, adota-se a temperatura de Verão (T_{max}) uma vez que a ação térmica apresenta maior influência sobre o comprimento da flecha do que os efeitos provocados pelo frio ou pelo vento.

A expansão elástica (ε_{ela}) é definida pela equação (47):

$$\varepsilon_{ela} = N_{Tmax}(F_{t,d,Tmax} - F_{st,Tmax}) \quad (47)$$

A expansão térmica do vão pode ser determinada através do respetivo sistema de equações (48).

$$\varepsilon_{th} = \begin{cases} C_{th} \left(\frac{I_k''}{n \cdot A_s} \right)^2 \cdot \frac{T_{res}}{4} & \text{para } T_{k1} \geq \frac{T_{res}}{4} \\ C_{th} \left(\frac{I_k''}{n \cdot A_s} \right)^2 \cdot T_{k1} & \text{para } T_{k1} < \frac{T_{res}}{4} \end{cases} \quad (48)$$

onde:

ε_{th} Expansão térmica;
 C_{th} Constante de material do condutor, em $m^4/(A^2 \cdot s)$, de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10 — Coeficiente (C_{th}) (60865-1:2011)

Material	Coeficiente de forma c
Condutores de alumínio, ligas de alumínio e alumínio/aço com relação de seção transversal Al/St > 6	$0,27 \times 10^{-18} m^4/(A^2 \cdot s)$
Condutores de alumínio/aço com relação de seção transversal Al/St \leq 6;	$0,17 \times 10^{-18} m^4/(A^2 \cdot s)$
Condutores de cobre	$0,088 \times 10^{-18} m^4/(A^2 \cdot s)$

Segundo a norma IEC 60865-1, o fator (C_F) da equação (49) considera as deflexões dinâmicas resultantes da alteração da forma da curva do condutor. Por conseguinte, o fator (C_D) da equação (50) permite contabilizar as deflexões devidas ao alongamento elástico e térmico do condutor.

$$C_D = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{l}{f_{es}} \right)^2 \cdot (\varepsilon_{wla} + \varepsilon_{th})} \quad (49)$$

$$C_F = \begin{cases} 1,05 & \text{para } r \leq 0,8 \\ 0,97 + 0,1 \cdot r & \text{para } 0,8 \leq r \leq 1,8 \\ 1,15 & \text{para } r \geq 1,8 \end{cases} \quad (50)$$

onde:

C_D Fator de dilatação;
 C_F Fator de forma.

A flecha dinâmica resultante (f_{ed}) é obtida pelo produto de (C_F), (C_D) e a flecha estática equivalente ($f_{es,Tmax}$) pela equação (51).

$$f_{ed} = C_F \cdot C_D \cdot f_{es,Tmax} \quad (51)$$

O deslocamento horizontal máximo de um vão (b_h) durante um curto-circuito é calculado através do sistema de equações (52).

$$b_h = \begin{cases} f_{ed} & \text{para } \delta_{max} \geq 90^\circ \\ f_{ed} \cdot \sin \delta_{max} & \text{para } \delta_{max} < 90^\circ \end{cases} \quad (52)$$

Sob a ação de um curto-circuito, os condutores são deslocados das suas posições originais. No caso mais desfavorável, a distância entre os pontos médios de dois condutores principais é determinada pela equação (53).

$$a_{min} = a - 2 \cdot b_h \quad (53)$$

No final a força resultante, designada força de tensão após o curto-circuito ($F_{f,d}$) pode assumir valores significativos em função do ângulo final descrito pelo movimento da ligação. Quando essa força é relevante, é determinada pela equação (54).

$$F_{f,d} = 1,2 \cdot F_{st} \sqrt{1 + 8 \cdot \zeta \cdot \frac{\delta_{max}}{180^\circ}} \quad (54)$$

Após a extinção do curto-circuito, o cabo oscila ou descai, dependendo do movimento que descreveu durante o fenómeno. Assim, a força de tensão após o curto-circuito ($F_{f,d}$) definida como a força de tensão máxima obtida pela equação (55), considerando a comparação entre o estado atmosférico mais desfavorável e o estado de Verão, de acordo com a equação (52).

$$F_{f,d} = \max(F_{f,d,Tw}; F_{f,d,Tmax}) \quad (55)$$

3.2.2 Condutores flexíveis verticais (baixadas)

As ligações verticais, frequentemente utilizadas entre barramentos e equipamentos como transformadores e disjuntores, devem suportar o peso próprio do condutor, além das forças dinâmicas verticais e transversais geradas por curto-circuito, na Figura 18 da norma IEC 60865-2:2015 temos um arranjo de condutores flexíveis verticais.

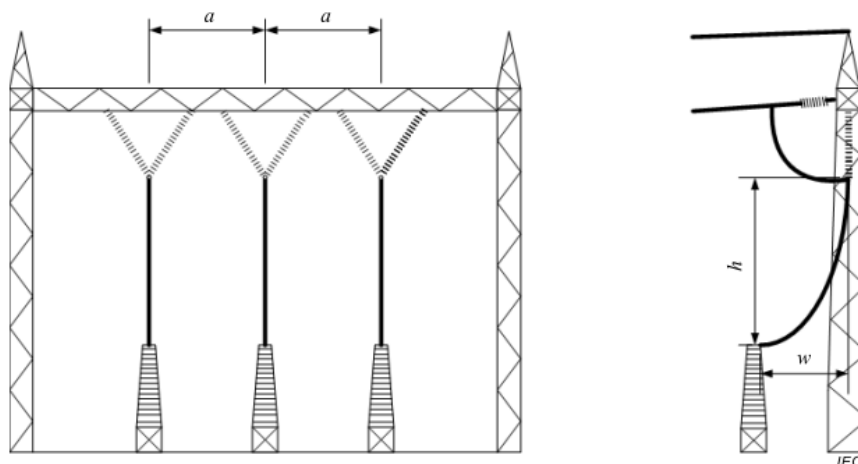


Figura 18 – Arranjo com condutores flexíveis verticais (IEC 60865-2:2015)

De acordo com a norma IEC 60865-1:2011, uma ligação é considerada uma baixada quando a diferença de altura entre os pontos de fixação ultrapassa 25% do comprimento do vão. Esse valor representa o desnível máximo permitido para a aplicação do método de cálculo descrito nesta seção.

O processo de dimensionamento é baseado no modelo ilustrado na Figura 19.

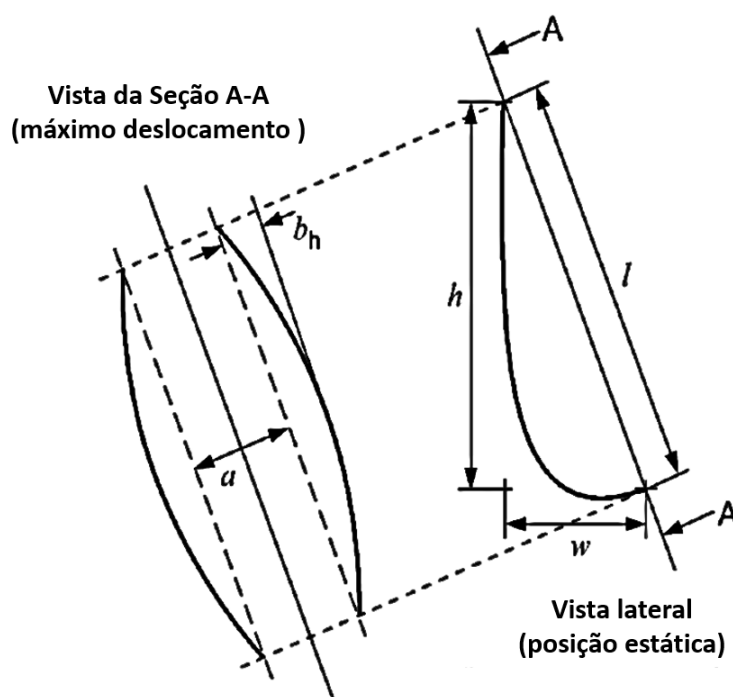


Figura 19 – Geometria de uma descida

A Figura 19 mostra a vista lateral com a baixada em repouso e a vista da Seção A-A apresenta o maior deslocamento no momento do curto-circuito.

Na vista lateral temos quatro variáveis:

- h Altura, em m;
- w Largura, em m;
- l_v Comprimento total do condutor, em m;
- l Distância entre os pontos de fixação, que pode ser obtida pelo Teorema de Pitágoras ($l = \sqrt{(h^2 + w^2)}$), em m.

Na vista da Seção A-A temos duas variáveis:

- a Distância entre eixos dos condutores altura, em m;
- b_h Deslocamento horizontal máximo, em m.

O deslocamento horizontal máximo é calculado de acordo a equação (56)

$$b_h = \left[0,60 \sqrt{\frac{l_v}{l} - 1} + 0,44 \left(\frac{l_v}{l} - 1 \right) - 0,32 \ln \frac{l_v}{l} \right] \frac{l^2}{l_v} \quad (56)$$

O deslocamento mais desfavorável sob o curto-circuito, em termo da distância entre os condutores é calculado pela equação (57).

$$a_{min} = a - 2b_h \quad (57)$$

onde:

a_{min} Distância mínima no ar entre condutores (fase-fase) durante o curto-circuito, em m.

No ponto inferior da baixada pode-se calcular a componente horizontal da força causada por um subcondutor, de acordo com a equação (58).

$$H_s = \sqrt{\frac{1}{24} \frac{(m'_s \cdot g)^2 \cdot w^2}{\frac{\sqrt{l_v^2 - h^2}}{w} - 1}} \quad (58)$$

onde:

H_s Componente horizontal causada por um subcondutor no ponto inferior da baixada, em N;
 m'_s Massa por unidade de comprimento dos subcondutores, em kg/m;
 m_i e m_k Coeficientes de sobrecarga dos estados atmosférico i e k , respetivamente;
 g Valor convencional da aceleração gravitacional, em m/s²;
 w Largura da baixada, em m;
 l_v Comprimento do total do condutor da baixada, em m;
 h Altura da baixada, em m.

No ponto superior da baixada calcula-se a componente vertical da força, pela equação (59).

$$V_s = m'_s \cdot l_v \cdot g \quad (59)$$

onde:

V_s Componente horizontal causada por um subcondutor no ponto superior da baixada, em N.

Com os cálculos realizados anteriormente, é possível calcular a força estática média do condutor na baixada, através da equação (60).

$$F_{st} = n \frac{(H_s + V_s)}{2} \quad (60)$$

onde:

F_{st} Força de tensão estática média na baixada, em N;
 n Número de subcondutores.

Com a ocorrência do curto-circuito surge a força de tensão, que varia em função da distância entre os condutores e nível do curto-circuito, calculada pela equação (61).

$$F_{t,d} = \frac{5}{3} l_v \frac{\mu_0 (l_k'')^2 l_v}{2\pi a w}, \text{ para } 1,4 w \leq l_v \leq 3,3 w \quad (61)$$

onde:

$F_{t,d}$ Força de tensão durante o curto-circuito, em N;
 μ_0 Constante magnética, permeabilidade do vácuo = $4\pi \times 10^{-7}$, em H/m;
 l_k'' Corrente inicial de curto-circuito trifásico simétrico (valor eficaz), em A;
 l_k'' Distância entre eixos dos condutores, em m.

O curto-circuito também gera a força resultante da atração entre os subcondutores da mesma fase, denominada força de *pinch* ou de pinça ($F_{pi,d}$).

A força de *pinch* pode ser calculada de acordo com a equação (62), quando temos uma configuração de feixe simétrico, ou seja, que o número de subcondutores, n , é maior que 1 e menor ou igual a 4.

$$F_{pi,d} = 1,1 \cdot F_{t,d} \quad (62)$$

As condições das equações (63) e (64), ao serem atendidas, indicam que os subcondutores colidem.

$$\frac{a_s}{d} \leq 2,0 \text{ e } l_s \geq 50 a_s \quad (63)$$

$$\frac{a_s}{d} \leq 2,5 \text{ e } l_s \geq 70 a_s \quad (64)$$

onde:

a_s Distância entre subcondutores, em m;
 d Diâmetro dos subcondutores, em mm.

Caso as condições anteriores não sejam atendidas, o cálculo da força de *pinch* é realizado através de outros parâmetros.

Inicialmente é calculada a força da corrente de curto-circuito, que é apresentada na equação (65).

$$F_v = (n - 1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_k''}{n} \right)^2 \frac{l_s v_2}{a_s v_3} \quad (65)$$

onde:

F_v Força entre os subcondutores de um feixe devido à corrente de curto-circuito, em N;
 v_2, v_3 Fatores para o cálculo de $F_{pi,d}$.

A seguir os fatores necessários serão calculados.

O fator v_1 é calculado pela equação (66).

$$v_1 = f \cdot \frac{1}{\sin \frac{180}{n}} \sqrt{\frac{(a_s - d)m'_s}{\frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{m_k''}{n} \right)^2 \frac{n - 1}{a_s}}} \quad (66)$$

onde:

f Frequência elétrica da instalação, em Hz.
 v_1 Fator para o cálculo de $F_{pi,d}$.

O fato v_2 é encontrado através da Figura 20, ou pela equação (67), em função de v_1 .

$$v_2 = 1 - \frac{\sin(4\pi \cdot f \cdot T_{pi} - 2\gamma) + \sin 2\gamma}{4\pi \cdot f \cdot T_{pi}} + \frac{f \cdot \tau}{f \cdot T_{pi}} \left(1 - e^{-\frac{2\pi \cdot f \cdot T_{pi}}{f \cdot \tau}}\right) \sin^2 \gamma$$

$$- \frac{8\pi \cdot f \cdot \tau \cdot \sin \gamma}{1 + (2\pi \cdot f \cdot \tau)^2} \left[\left(2\pi \cdot f \cdot \tau \frac{\cos(2\pi \cdot f \cdot T_{pi} - \gamma)}{2\pi \cdot f \cdot T_{pi}} \right. \right. \quad (67)$$

$$\left. \left. + \frac{\sin(2\pi \cdot f \cdot T_{pi} - \gamma)}{2\pi \cdot f \cdot T_{pi}} \right) e^{-\frac{f T_{pi}}{f \tau}} + \frac{\sin \gamma - 2\pi \cdot f \cdot \tau \cdot \cos \gamma}{2\pi \cdot f \cdot T_{pi}} \right]$$

Na equação (68) encontramos os valores de τ e γ .

$$\frac{1}{\tau} = -\frac{2\pi \cdot f}{3} \ln \left(\frac{k - 1,02}{0,98} \right) \text{ com } k \geq 1,1 \text{ e } \gamma = \arctan(2\pi \cdot f \cdot \tau) \quad (68)$$

O T_{pi} é obtido pela equação (69).

$$v_1 = f \cdot T_{pi} \sqrt{v_2} \quad (69)$$

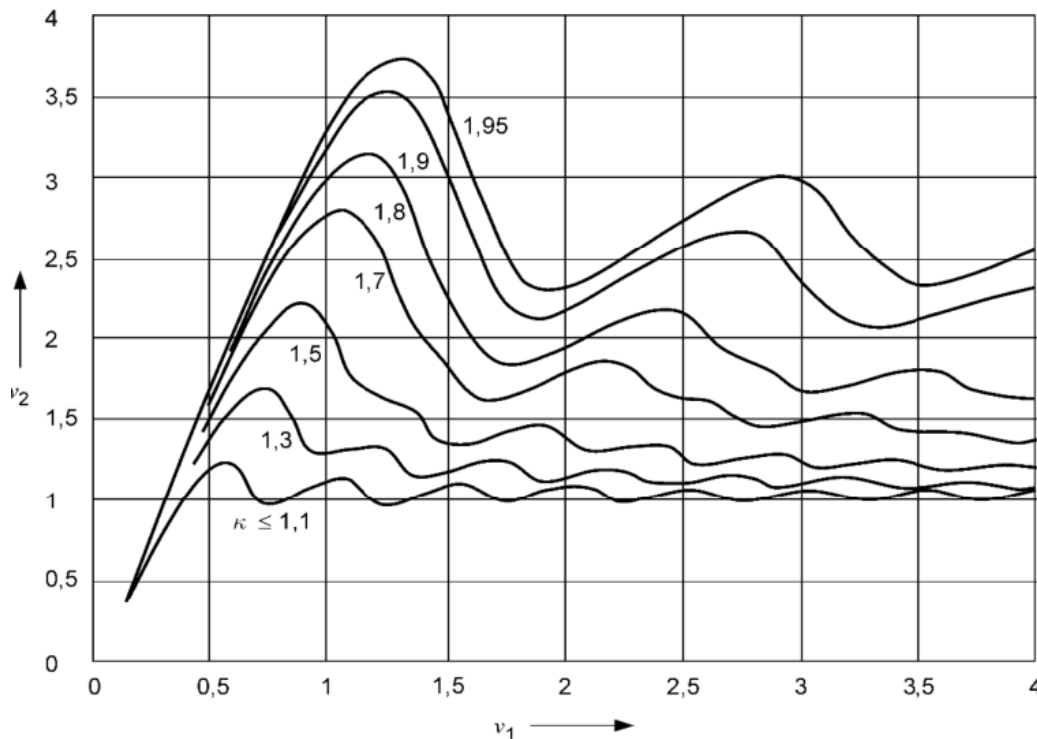


Figura 20 – Determinação gráfica do fator v_2 como função do fator v_1

O fator v_3 é calculado pela equação (70), ou encontrado na Figura 21.

$$v_3 = \frac{d/a_s}{\sin \frac{180}{n}} \cdot \frac{\sqrt{(a_s/d) - 1}}{\arctan \sqrt{(a_s/d) - 1}} \quad (70)$$

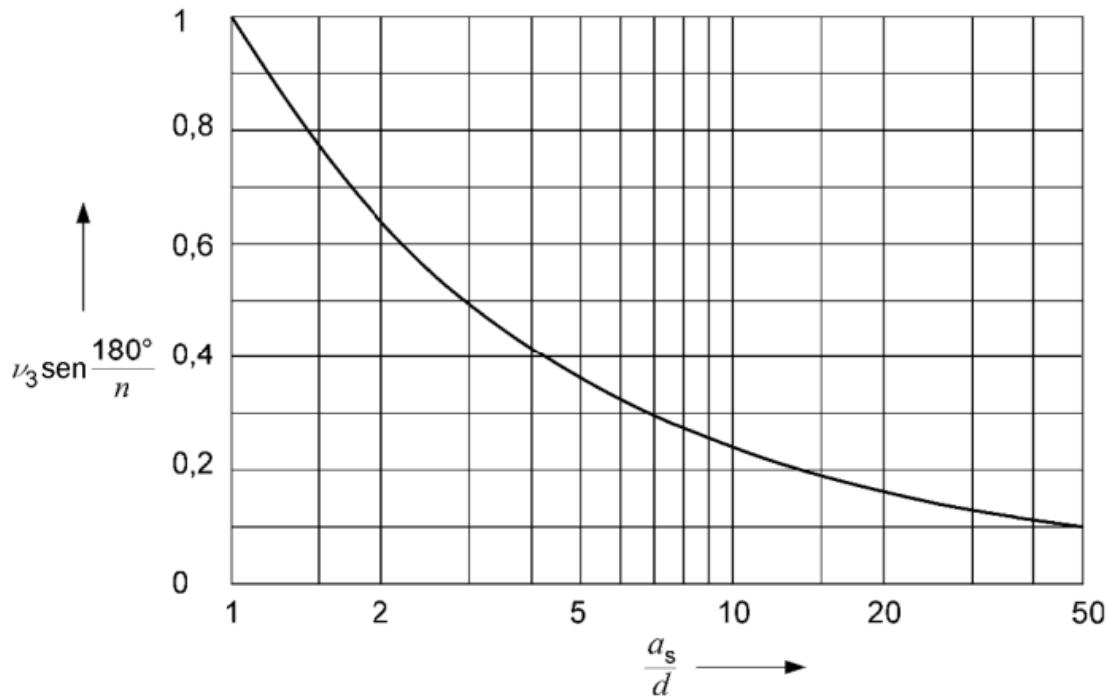


Figura 21 – Determinação gráfica do fator v_3 como função do fator de a_s/d .

Os fatores de deformação ε_{pi} e ε_{st} que caracterizam a deformação do feixe são calculados nas equações (71) e (72).

$$\varepsilon_{pi} = 0,375 \cdot n \frac{F_v \cdot l_s^3 \cdot N}{(a_s - d)^3} \left(\sin \frac{180}{n} \right)^3 \quad (71)$$

$$\varepsilon_{st} = 1,5 \frac{F_{st} \cdot l_s^2 \cdot N}{(a_s - d)^2} \left(\sin \frac{180}{n} \right)^2 \quad (72)$$

onde:

N Norma de rigidez, em N^{-1} , determinada de acordo com a equação (34).

Com os fatores de deformação é calculado o parâmetro j . Este parâmetro define a disposição dos condutores com a passagem da corrente de curto-circuito, calculada na equação (73).

$$j = \sqrt{\frac{\varepsilon_{pi}}{1 + \varepsilon_{st}}} \quad (73)$$

Se $j \geq 1$, os subcondutores se chocam no momento do curto-circuito e a força de tração $F_{pi,d}$ é calculada na equação (74).

$$F_{pi,d} = F_{st} \left(1 + \frac{v_e}{\varepsilon_{st}} \xi \right) \quad (74)$$

v_e é calculado na equação (75).

$$v_e = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} n(n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_k''}{n} \right)^2 N \cdot v_2 \left(\frac{l_s}{a_s - d} \right)^4 \frac{\left(\sin \frac{180}{n} \right)^4}{\xi^3} \left\{ 1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (75)$$

O valor de v_4 é calculado na equação (76).

$$v_4 = \frac{a_s - d}{d} \quad (76)$$

O valor de ξ é obtido pela Figura 22, ou calculado de acordo com a equação (77).

$$\xi^3 + \varepsilon_{st} \xi^2 - j^2 (1 + \varepsilon_{st}) = 0 \quad (77)$$

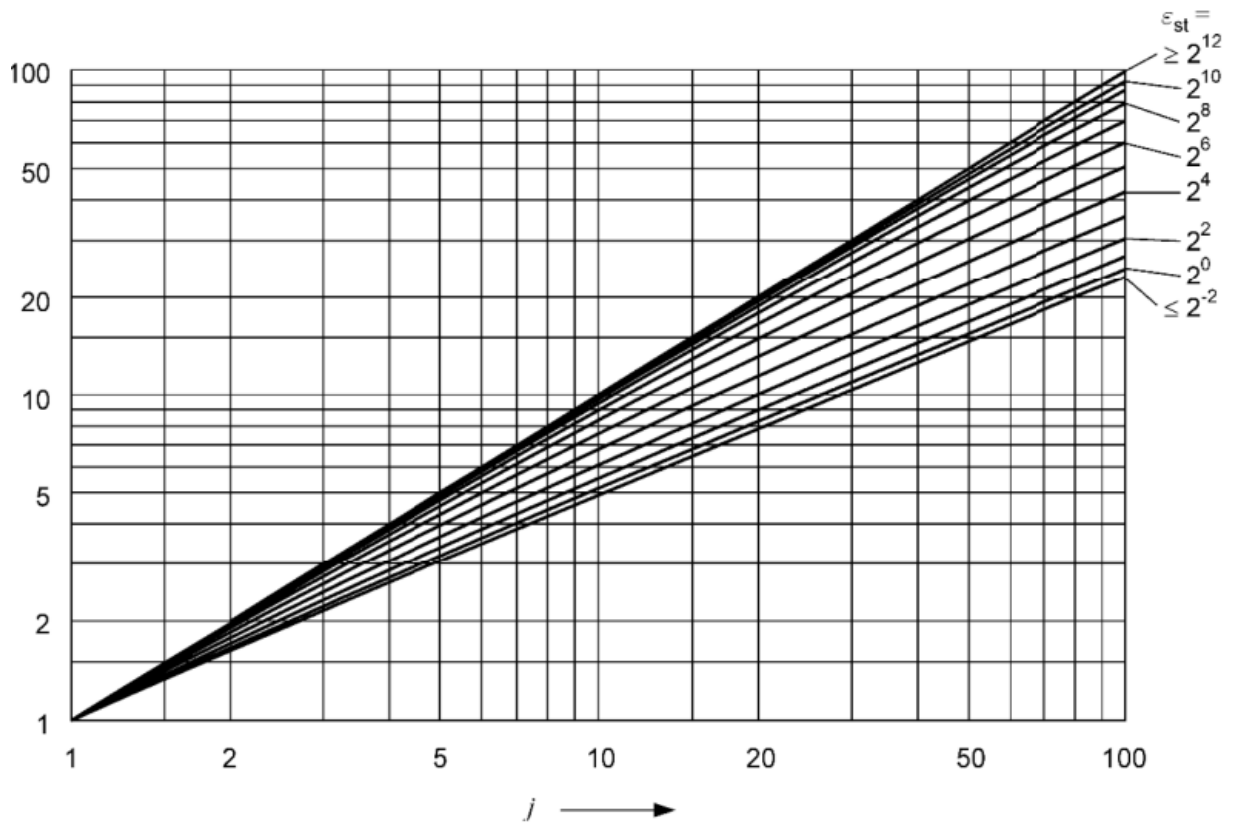


Figura 22 – Determinação gráfica do fator ξ como função do fator de j e de ε_{st} .

Se $j < 1$ os subcondutores não se chocam no momento do curto-circuito e a força de tração $F_{pi,d}$ é calculada na equação (78).

$$F_{pi,d} = F_{st} \left(1 + \frac{v_e}{\varepsilon_{st}} \eta^2 \right) \quad (78)$$

O valor de v_e é calculado na equação (75), mas o valor de v_4 é diferente e é calculado na equação (79).

$$v_4 = \eta \frac{a_s - d}{a_s - \eta(a_s - d)} \quad (79)$$

O valor de η é calculado na equação (80), ou através das figuras Figura 23 em função de a_s/d e j .

$$\eta^3 + \varepsilon_{st}\eta - j^2(1 + \varepsilon_{st})f_\eta = 0 \quad (80)$$

$$\text{com } 0 < \eta < 1$$

onde

$$f_\eta = \frac{v_3}{a_{sw}/a_s}$$

$$a_{sw}/a_s = \frac{2\gamma_a/a_s}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \cdot \frac{\sqrt{\frac{1-2\gamma_a/a_s}{2\gamma_a/a_s}}}{\arctan \sqrt{\frac{1-2\gamma_a/a_s}{2\gamma_a/a_s}}} \quad (81)$$

$$2\gamma_a/a_s = 1 - \eta(1 - d/a_s)$$

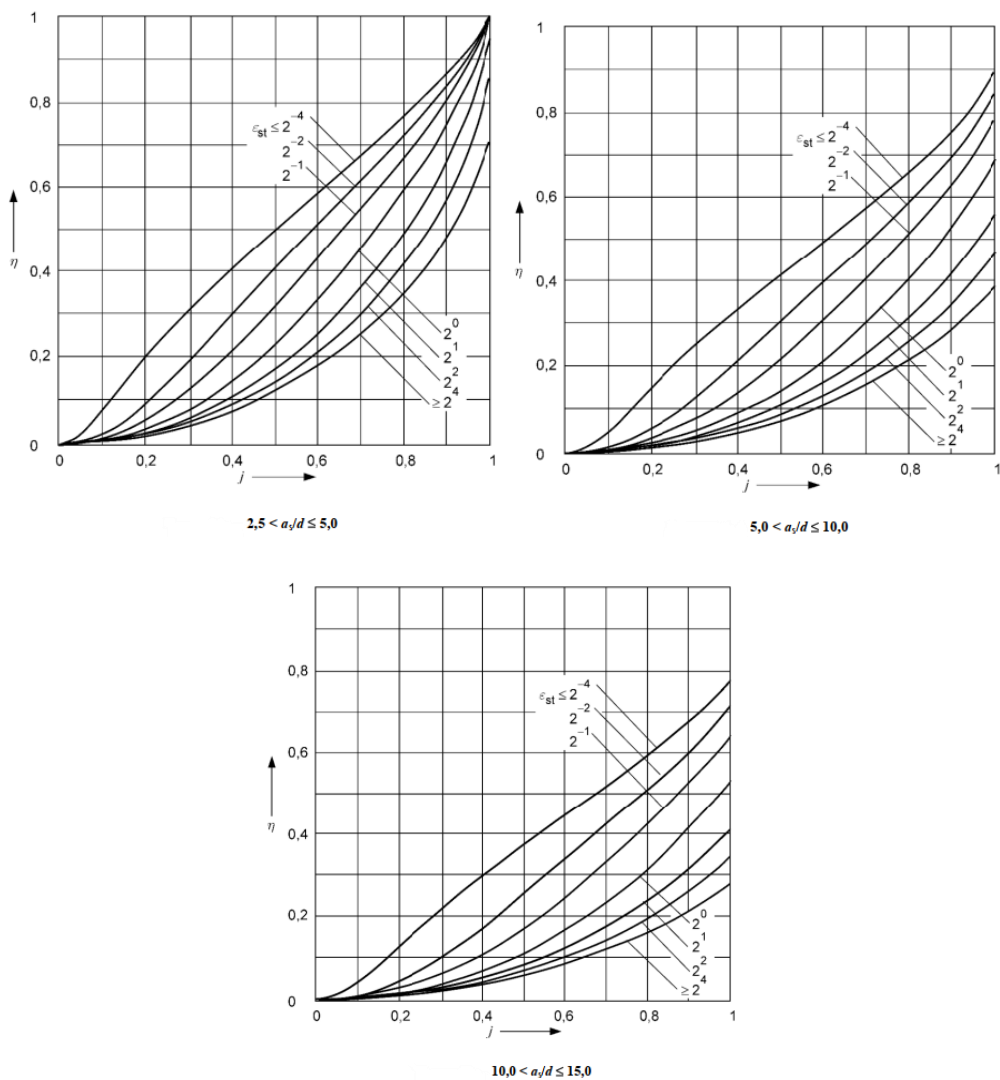


Figura 23 – Determinação gráfica do fator η .

4 Desenvolvimento da Ferramenta Computacional em *Python*

Como os cálculos dos esforços eletromecânicos, aplicados aos condutores rígidos e flexíveis, precisam ser realizados repetidamente, devido à variedade de informações que surgem entre os equipamentos, como distâncias, alturas, diâmetros dos condutores, entre outros parâmetros, tornou-se essencial a criação de uma solução automatizada. Para isso, foi desenvolvida uma ferramenta computacional em *Python*, estruturada de forma modular, permitindo fácil manutenção, atualização e expansão conforme as necessidades do projeto, com uma lógica clara e bem definida de processamento.

A arquitetura da aplicação pode ser resumida em três blocos principais: módulo de entrada de dados, módulo de processamento de dados e módulo de saída de resultados.

No módulo de entrada de dados, o projetista deverá inserir as principais características do sistema. Além disso, serão fornecidas as informações referentes ao condutor utilizado.

Para facilitar esse processo, um condutor será selecionado a partir de uma lista pré-definida disponibilizada pela ferramenta. Uma vez selecionado, o sistema extrai as informações do referido condutor da base de dados. A partir dessa seleção, o sistema acessa automaticamente a base de dados interna e extrai todas as propriedades técnicas associadas ao condutor escolhido, como diâmetro, massa linear, seção transversal, entre outras, eliminando a necessidade de preenchimento manual desses dados e garantindo maior agilidade e precisão na etapa inicial do processo.

Uma parte dos dados de entrada é composta de informações atmosféricas pré-determinadas. No entanto, há a possibilidade desses dados serem alterados manualmente, para atender normas específicas de outros países.

No módulo de processamento de dados, após a leitura dos três *templates* – as informações digitadas pelo projetista, a tabela das características dos condutores e o ficheiro Excel contendo as fórmulas para o cálculo dos esforços eletromecânicos – os dados são combinados de forma integrada. A ferramenta realiza o cruzamento dessas informações, organizando os parâmetros necessários para aplicar as equações normativas correspondentes. A partir desse ponto, o sistema inicia automaticamente os cálculos dos esforços eletromecânicos, considerando as condições específicas do projeto e respeitando os critérios definidos nas normas técnicas aplicáveis. Essa abordagem garante padronização, precisão e agilidade no processamento, além de permitir fácil adaptação a diferentes configurações de entrada.

No módulo de saída de resultados é criado um *template* com as informações dos cálculos realizados. Inicialmente, serão apresentados os resultados dos esforços, mas caso o projetista queira obter o resultado de cálculo de alguma fórmula específica, isto é possível.

A Figura 24 apresenta o fluxograma simplificado do programa.

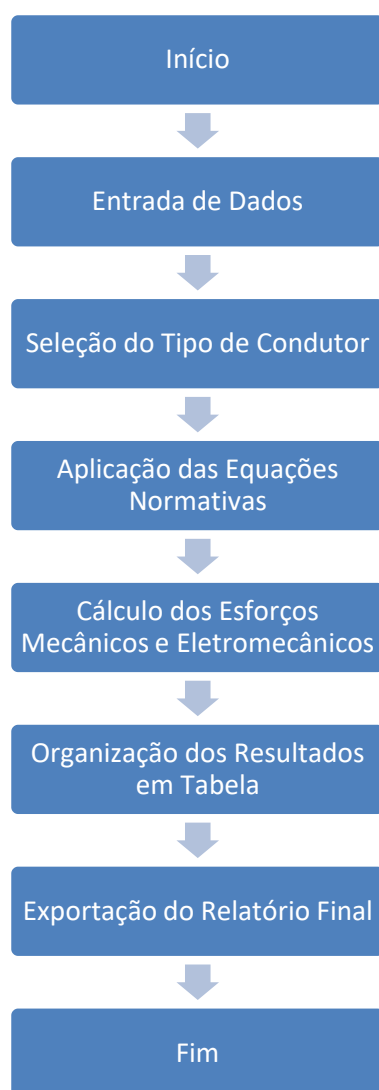


Figura 24 – Fluxograma simplificado do programa em *Python*.

A estrutura modular facilita a compreensão do fluxo de cálculo, mas também assegura que a aplicação possa evoluir de forma consistente, incorporando novas demandas e requisitos futuros sem comprometer sua estrutura principal.

A base de dados foi implementada em formato tabular, podendo ser facilmente atualizada pelo projetista. Essa flexibilidade garante que novos condutores sejam adicionados conforme necessário e que modelos desatualizados sejam removidos ou substituídos, sem comprometer a integridade do programa.

Cada condutor é caracterizado por um conjunto mínimo de informações essenciais para os cálculos de esforços eletromecânicos, conforme mostrado no exemplo da Tabela 11.

Tabela 11 — Características dos cabos flexíveis (base de dados da QDE)

DESCRIÇÃO	DIÂMETRO EXTERNO [mm]	SECÇÃO NOMINAL [m ²]	MASSA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO [kg/m]	EMISSIVIDADE
CABLE ASTER 366	24,9	0,0003662	1,0089	0,5
CABLE ASTER 570	31,1	0,0005702	1,576	0,5
CABLE ASTER 851	38	0,0008507	2,3607	0,5

A tabela pode ser expandida com outros parâmetros, como coeficiente de dilatação térmica, resistividade elétrica e tensão máxima de operação, dependendo do nível de detalhe necessário ao projeto.

Dessa forma, a ferramenta não apenas automatiza os cálculos, mas também centraliza as informações em uma plataforma única, reduzindo erros de transcrição e eliminando o risco de paralaxe associado ao uso de gráficos impressos.

As implementações das fórmulas para realização dos cálculos dos esforços eletromecânicos foram implementadas em *Python*, respeitando as equações e metodologias estabelecidas nas normas IEC 60865-1:2011, IEC 60865-2:2015, IEEE 605:2008 e RSLEAT:1992.

A abordagem adotada consistiu em transformar cada equação normativa em uma função computacional, permitindo modularidade, clareza e reaproveitamento de código.

A função adicionada abaixo representa como limpamos as fórmulas que vêm do Excel para que os cálculos possam ser realizados pelo *Python*. As funções consistem em limpar a fórmula com os dados que são desnecessários no *Python*, tais como o primeiro sinal de igual e sinais de dólar.

A segunda função consiste em transformar as funções matemáticas do Excel em funções matemáticas que o *Python* consegue ler. Essa função consiste em substituir o texto das fórmulas, como ilustrado abaixo.

```
# ----- Formula Cleaning ----- #
def clean_formula(formula: str) -> str:
    """
    Remove leading '=' and replace $.
    """
    formula = formula.strip()
    if formula.startswith("="):
        formula = formula[1:]
    formula = formula.replace("$", "")
    return formula

# ----- Excel Function Replacement ----- #
def replace_excel_functions(formula: str) -> str:
    """Normalize Excel operators only; functions are handled by safe_globals."""
    # If you already call clean_formula(formula), skip the '='/'$' here.
    # formula = formula.replace(";", ",") # arg
    sep
    formula = formula.replace(", ", ";")
    formula = re.sub(r"(?<=\d),(?=\d)", ".", formula) # 0,3 ->
    0.3
    formula = formula.replace("<>", "!=")
    formula = re.sub(r"(?!<>=!)=(?!=)", "==", formula) # bare =
    -> ==
    formula = formula.replace("^", "**")
    return formula
```

A função anexada abaixo pode ser considerada uma das principais funções do programa, pois é onde as fórmulas e células são substituídas por valores reais.

```
# ----- Main Evaluator ----- #
def evaluate_formula_from_excel(cell, sheet_name, values_wb, formulas_wb,
cache=None) -> any:
    formula_ws = formulas_wb[sheet_name]
    value_ws = values_wb[sheet_name]

    formula = cell.value

    coord = cell.coordinate

    if cache is None:
        raise ValueError("A shared cache must be passed to her")

    key = f"{sheet_name}!{cell.coordinate}"
    if key in cache:
        return cache[key]

    if formulas_wb is None:
        formulas_wb = formula_ws.parent

    formula = clean_formula(formula)
```

```

    formula = replace_excel_functions(formula)

    formula = replace_cross_sheet_references(cell, formula, values_wb,
    formulas_wb, sheet_name, cache)

    formula = replace_same_sheet_references(cell, formula, sheet_name,
    values_wb, formulas_wb, cache)

    if "LARGE" in formula:
        formula = excel_to_python_expr(formula)

    if formula.upper().startswith("IF("):
        return parse_if(cell, formula, cache, sheet_name)
    else:
        try:
            result = eval_formula(formula.replace(";", ", "))
        except Exception:
            result = formula.strip("'").strip('"')
        key = f"{sheet_name}!{cell.coordinate}"

    if result is not None:
        cache[key] = result
    return result

```

Uma das variáveis centrais do código é o *cache*. Trata-se de um dicionário ({chave: valor}) em que cada chave é única. Neste projeto, as chaves têm o formato "NomeDaAba!Célula" (por exemplo, "Folha1!B3"). No *cache* são guardados os resultados finais de todas as fórmulas calculadas e também os valores fornecidos como *input*. Cada valor é numérico (inteiro ou decimal).

O ficheiro *excel_into_python* tem como objetivo limpar e converter funções próprias do Excel para os seus equivalentes em *Python*. Por exemplo, a forma de escrever LOG10 no Excel difere de *math.log10* em *Python*. As funções deste módulo tratam dessas substituições, garantindo que as fórmulas ficam consistentes e executáveis em *Python*. Abaixo segue o código da função *build_safe_globals()*.

```

def build_safe_globals():
    sg = {"__builtins__": {}, "math": math} # {} not None

    def add(name, obj):
        for k in {name, name.upper(), name.lower()}:
            sg[k] = obj

    # Excel math
    add("SQRT", math.sqrt);
    add("SIN", math.sin);
    add("COS", math.cos);
    add("TAN", math.tan)
    add("ATAN", math.atan);
    add("ATAN2", math.atan2);
    add("ABS", abs)
    add("RADIANS", math.radians);
    add("DEGREES", math.degrees)
    add("LN", math.log);

```

```

add("LOG10", math.log10);
add("EXP", math.exp)
add("PI", lambda: math.pi) # PI()

# Aggregates / logic / booleans
add("MAX", max);
add("MIN", min);
add("LARGE", LARGE);
add("SMALL", SMALL)
add("super_max", super_max)
add("SE", lambda cond, a, b: a if cond else b)
add("IF", lambda cond, a, b: a if cond else b)
add("AND", lambda *xs: all(xs));
add("OR", lambda *xs: any(xs));
add("NOT", lambda x: not x)
add("TRUE", True);
add("FALSE", False)

# Your PT aliases
add("MÁXIMO", max);
add("MÍNIMO", min)

# make all/any available if your logical transformer uses them
add("all", all);
add("any", any)

# Hyperbolic functions (Excel-compatible names)
add("COSH", lambda x: math.cosh(_coerce_num_excel(x)))
add("SINH", lambda x: math.sinh(_coerce_num_excel(x)))
add("TANH", lambda x: math.tanh(_coerce_num_excel(x)))

# Inverse hyperbolic functions (Excel: ACOSH/ASINH/ATANH)
add("ACOSH", lambda x: (math.acosh(_coerce_num_excel(x))
                        if _coerce_num_excel(x) >= 1
                        else (_ for _ in []).throw(ValueError("#NUM!
(ACOSH domain x>=1)"))))
add("ASINH", lambda x: math.asinh(_coerce_num_excel(x)))
add("ATANH", lambda x: (math.atanh(_coerce_num_excel(x))
                        if -1 < _coerce_num_excel(x) < 1
                        else (_ for _ in []).throw(ValueError("#NUM!
(ATANH domain -1<x<1)"))))

add("SAFE_CMP", SAFE_CMP)

return sg

```

O *parse_if* foi um dos módulos mais desafiantes. Logo no início recorreremos às funções de *excel_into_python* para limpar as fórmulas e permitir percorrê-las corretamente. A principal dificuldade desta função é que tanto o primeiro como o segundo retorno podem, eles próprios, ser condições SE, e podem surgir condições embutidas em expressões matemáticas (por exemplo, multiplicações entre cálculos e resultados de SE). Abaixo segue o código da função *parse_if()*.

```

def parse_if(cell, formula: str, cache, sheet_name) -> object:
    inner = formula[formula.find("(")+1:-1]
    parts = split_excel_args(inner)

```

```

coord = cell.coordinate

key = f"{sheet_name}!{cell.coordinate}"
if key in cache:
    return cache[key]

if len(parts) == 3:
    condition, true_val, false_val = parts
elif len(parts) == 2:
    condition, true_val = parts
    false_val = "FALSE"
else:
    print("Error inside parse if, in parts")
    code.interact(local=dict(globals(), **locals()))
    raise ValueError(f"Invalid IF formula parts: {parts}")

try:
    cond = excel_cond_to_python(condition, split_excel_args)
except Exception as e:
    if "IF" in condition:
        b_index = condition[2:-1].find("IF") + 2
        e_index = find_matching_paren(condition, b_index) + 1
        new_formula = condition[b_index:e_index]
        clean_formula = excel_cond_to_python(new_formula,
split_excel_args)
        parse_if(cell, clean_formula, cache, sheet_name)

cond = excel_cond_to_python(condition, split_excel_args)

try:
    cond_result = eval_formula(cond.replace(";", ", "))
except Exception as e:
    print("error in parse if, not able to calculate eval")
    code.interact(local=dict(globals(), **locals()))
branch = true_val if cond_result else false_val

if "IF(" in branch[2:-1]:
    if branch.find("IF") != -1:
        b_index = branch.find("IF") + 1
    else:
        b_index = branch.find("IF")
    e_index = find_matching_paren(branch, b_index) + 1
    new_formula = branch[b_index:e_index]
    clean_formula = excel_cond_to_python(new_formula, split_excel_args)
    parse_if(cell, clean_formula, cache, sheet_name)

if branch.strip().upper().startswith("IF(") or
branch.strip().upper().startswith("(IF("):
    inner_if = branch.strip()
    branch_final = excel_cond_to_python(inner_if, split_excel_args)
    if branch_final.startswith("(") and branch_final.endswith(")"):
        branch_final = branch_final[1:-1]
    return parse_if(cell, branch_final, cache, sheet_name)

try:
    result = float(eval_formula(branch.replace(";", ", ")))

```

```

        key = f"{sheet_name}!{cell.coordinate}"
        if result is not None:
            cache[key] = result
        return result
    except Exception:
        pass
    q = branch.strip()
    if (q.startswith('"') and q.endswith('"')) or (q.startswith("'") and
q.endswith("'")):
        key = f"{sheet_name}!{cell.coordinate}"
        if q[1:-1] is not None:
            cache[key] = q[1:-1]
        return q[1:-1]

    key = f"{sheet_name}!{cell.coordinate}"
    if q is not None:
        cache[key] = q
    return q

```

O ficheiro *exporting.py* reúne as funções responsáveis por exportar os valores já calculados e armazenados no cache. A função *export_cache_to_excel* começa por criar um ficheiro de saída a partir do *template* de entrada e, em seguida, percorre o *cache* passado como parâmetro para escrever os valores no novo ficheiro, nas respetivas células. Abaixo segue o código da função *export_cache_to_excel*.

```

def export_cache_to_excel(input_file_path, output_file_path, cache):
    shutil.copy(input_file_path, output_file_path)
    wb = load_workbook(output_file_path, keep_vba=True, data_only=False)

    sheet_masters_written = defaultdict(set)

    for key, value in cache.items():
        # print(key, value)
        key_str = str(key)
        if "!" not in key_str:
            print("! not in key_str")
            continue
        sheet_name, coord = key_str.split("!", 1)
        if sheet_name not in wb.sheetnames or ":" in coord:
            print("sheet_name not in wb", sheet_name)
            print(": in coord", coord)
            continue

        ws = wb[sheet_name]
        col_letters, row_idx = coordinate_from_string(coord)
        col_idx = column_index_from_string(col_letters)
        mr = _owning_merge_range(ws, row_idx, col_idx)
        if mr is not None:
            master = (mr.min_row, mr.min_col)
            if master in sheet_masters_written[sheet_name]:
                print("master in sheet_masters_written", master, sheet_name,
sheet_masters_written[sheet_name])
                continue
            ws.cell(row=mr.min_row, column=mr.min_col).value = value
            sheet_masters_written[sheet_name].add(master)
        else:

```

```
        ws.cell(row=row_idx, column=col_idx).value = value
wb.save(output_file_path)
wb.close()
```

Para tornar a ferramenta prática e acessível aos projetistas, uma vez que todos os *templates* estejam completos e adicionados em seus devidos lugares o projetista apenas precisará correr uma linha de comando no terminal e receberá o seu output.

Essa abordagem permite execução rápida dos cálculos e fácil integração em scripts de projeto.

A implantação da ferramenta computacional em *Python* foi eficaz na automatização dos cálculos dos esforços eletromecânicos, pois a estrutura modular adotada, com à integração de planilhas Excel e a possibilidade de atualização de dados garante ao projetista praticidade e adaptabilidade a diferentes cenários de projeto.

5 Aplicação da Ferramenta Python em um Estudo de Caso Real

Com o propósito de validar a execução dos cálculos sobre os esforços eletromecânicos desenvolvidos em *Python*, de acordo com as normas IEC 60865-1:2011, IEC 60865-2:2015, IEEE 605:2008 e RSLEAT:1992, será apresentado um caso real aplicado a uma subestação elétrica. Ressalta-se que, a fim de preservar informações confidenciais e garantir o cumprimento do contrato de confidencialidade, firmado entre a QDE e o cliente, serão exibidas apenas partes específicas do painel da subestação elétrica. As informações selecionadas são suficientes para demonstrar a aplicação da metodologia e validar os resultados, sem revelar dados sensíveis ou estratégicos do projeto real.

A aplicação da ferramenta computacional desenvolvida em *Python* proporciona uma série de facilidades no processo de cálculo dos esforços eletromecânicos. Entre os principais benefícios destaca-se a redução do tempo de execução, uma vez que tarefas repetitivas deixam de ser realizadas manualmente. Além disso, a automação minimiza a ocorrência de erros humanos, garantindo maior precisão e confiabilidade nos resultados obtidos. A padronização das etapas e a integração dos dados também contribuem para um processo mais eficiente e consistente.

Na sequência, serão apresentadas as principais diferenças entre o fluxo de trabalho anterior, baseado em procedimentos manuais, e o novo procedimento automatizado proporcionado pela ferramenta. Essa comparação tem como objetivo evidenciar os avanços obtidos com a automação, tanto em termos de agilidade quanto de qualidade técnica dos cálculos realizados.

Vale ressaltar que as informações das dimensões e posicionamentos dos equipamentos ainda devem ser levantados nos projetos respectivos e são dados de entrada para os cálculos.

Nos cálculos de condutores flexíveis ou rígidos feitos com *Python*, não é necessário inserir todos os parâmetros do condutor, nem consultar gráficos nem usar recursos do Excel.

Considerando apenas o tempo necessário para a inserção dos dados, a análise dos resultados dos cálculos e a consulta aos gráficos, que forneciam informações com menor precisão, essas operações demandavam, aproximadamente, três a quatro horas. Além disso, as verificações posteriores desses cálculos geravam incertezas, devido à dependência das consultas gráficas.

5.1 Cálculo dos Condutores Flexíveis Verticais

Iniciando pelo cálculo do condutor flexível vertical, pode ser verificada, na Tabela 12, a relação de 26 parâmetros que necessitavam ser incluídos manualmente para a realização dos cálculos dos esforços eletromecânicos em condutores flexíveis verticais. Além disso, havia a necessidade de consultar dois gráficos na norma IEC 68865-1:2011, para obter dois parâmetros para os cálculos.

Tabela 12 — Dados inseridos antes do *Python*, para o cálculo do condutor flexível vertical.

Características do Sistema	Símbolo	Cabo - Painel de Linha	Unidade
Tensão nominal do sistema	U_n	150	<i>kV</i>
Corrente inicial de curto-circuito bifásico simétrico inicial	$I_{k''}$	22,75	<i>kA</i>
Duração da corrente de curto-circuito	T_{k1}	3	<i>s</i>
Frequência do sistema	f	50	<i>Hz</i>
Relação X/R	X/R	7,69	
Fator empírico para o cálculo do valor de pico da corrente de curto-circuito	κ	1,68	
Condições de Cálculo: Informações atmosféricas			
Hipótese A (Estado de Inverno)	θ_i	-10	°C
	q_i	300	<i>Pa</i>
Hipótese B (Estado de Primavera)	θ_p	15	°C
	q_p	1050	<i>Pa</i>
Hipótese C (Estado de Verão)	θ_v	80	°C
	q_v	0	<i>Pa</i>
Densidade do gelo		0,9	<i>kg/dm³</i>
Espessura da camada de gelo		10	<i>mm</i>
Coeficiente de redução	α	0,6	
Coeficiente de forma	c	1	
Valor convencional da aceleração da gravidade	g	9,81	<i>m/s²</i>
Permeabilidade do vácuo	μ_o	1,26E-06	<i>H/m</i>
Condutor:		851-AL4 (ASTER 851)	
Número de subcondutores	n	2	

Diâmetro do subcondutor	d	38	mm
Área de secção do subcondutor	A_s	850,7	mm^2
Massa por unidade de comprimento	m'_s	2,3607	kg/m
Módulo de Young	E	52500	N/mm^2
Coefficiente de dilatação	α_e	2,30E-05	$^{\circ}C^{-1}$
Constante da elasticidade resultante dos suportes	S	100	N/mm
Diâmetro exterior	D	N.A.	m
Diâmetro interior	d	N.A.	m
Espessura	t	N.A.	m
Área da superfície do condutor por unidade de comprimento	A_c	N.A.	m^2/m
Tensão mecânica correspondente ao limite elástico	f_y	N.A.	N/m^2
Momento de inércia	J_m	N.A.	m^4
Módulo da flexão	W_m	N.A.	m^4
Constante de material do condutor	c_{th}	2,7E-19	$m^4/(A^2s)$

Abaixo temos as figuras dos gráficos consultados na norma IEC 60865:2011, para obter o valor de v_2 e de ξ .

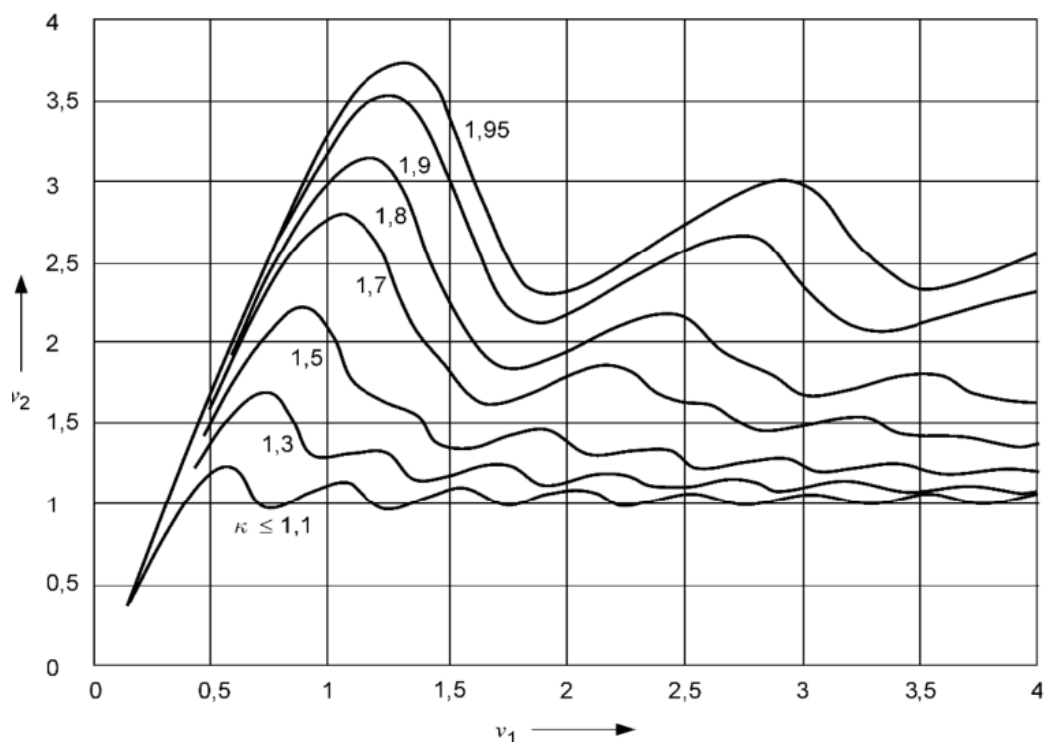


Figura 25 – Determinação gráfica do fator v_2 como função do fator v_1

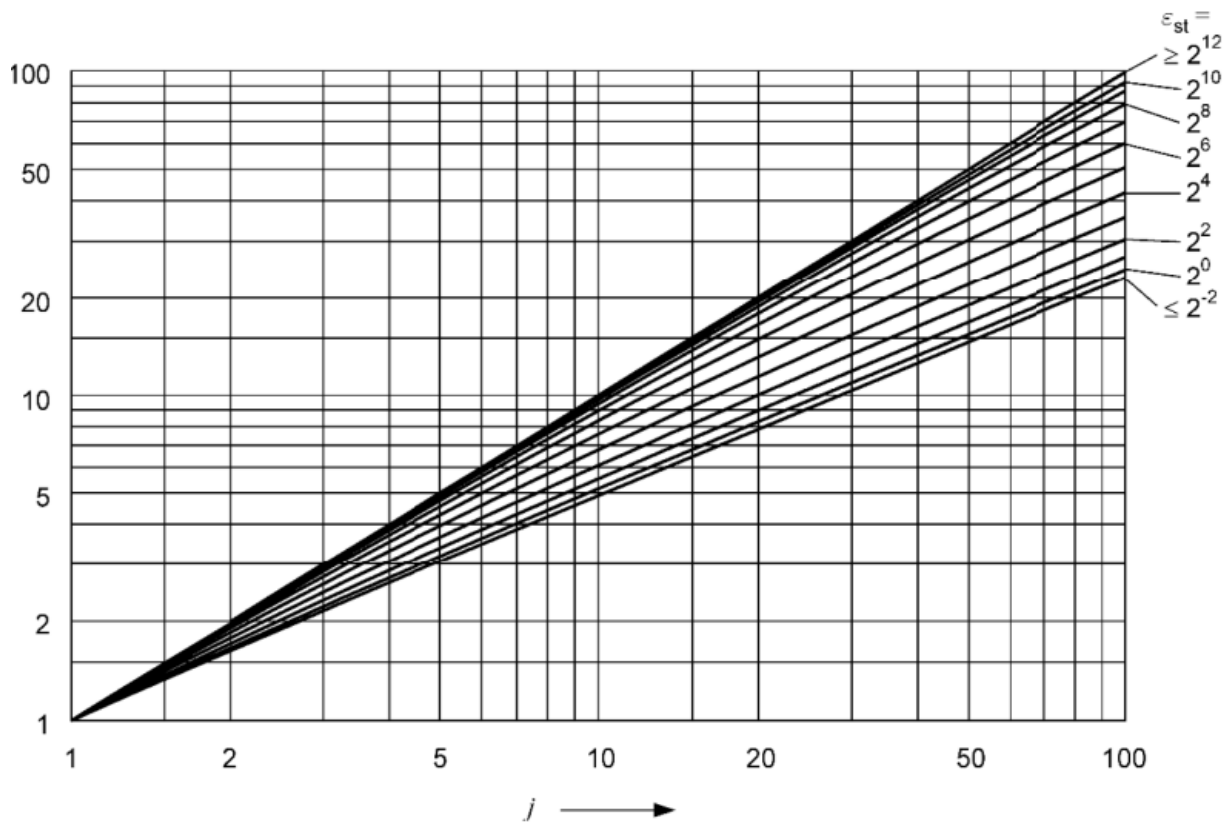


Figura 26 – Determinação gráfica do fator ξ como função do fator de j e de ε_{st} .

Com a aplicação em *Python*, temos o valor de v_2 de forma precisa. Vale ressaltar que o cálculo de v_2 necessita de encontrar dois novos parâmetros τ e γ , através das equações (83) e resolver a questão de duas equações e duas incógnitas apresentada nas equações (82) e (84), pois v_2 e o T_{pi} são parâmetros que dependem um do outro.

$$\begin{aligned}
 v_2 = 1 - & \frac{\sin(4\pi \cdot f \cdot T_{pi} - 2\gamma) + \sin 2\gamma}{4\pi \cdot f \cdot T_{pi}} + \frac{f \cdot \tau}{f \cdot T_{pi}} \left(1 - e^{-\frac{2\pi \cdot f \cdot T_{pi}}{f \cdot \tau}} \right) \sin^2 \gamma \\
 & - \frac{8\pi \cdot f \cdot \tau \cdot \sin \gamma}{1 + (2\pi \cdot f \cdot \tau)^2} \left[\left(2\pi \cdot f \cdot \tau \frac{\cos(2\pi \cdot f \cdot T_{pi} - \gamma)}{2\pi \cdot f \cdot T_{pi}} \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{\sin(2\pi \cdot f \cdot T_{pi} - \gamma)}{2\pi \cdot f \cdot T_{pi}} \right) e^{-\frac{f T_{pi}}{f \tau}} + \frac{\sin \gamma - 2\pi \cdot f \cdot \tau \cdot \cos \gamma}{2\pi \cdot f \cdot T_{pi}} \right]
 \end{aligned} \tag{82}$$

$$\frac{1}{\tau} = -\frac{2\pi \cdot f}{3} \ln\left(\frac{k - 1,02}{0,98}\right) \text{ com } k \geq 1,1 \text{ e } \gamma = \arctan(2\pi \cdot f \cdot \tau) \quad (83)$$

O T_{pi} é obtido pela equação (69).

$$v_1 = f \cdot T_{pi} \sqrt{v_2} \quad (84)$$

O valor do fator ξ passou a ser encontrado com a equação (85).

$$\xi^3 + \varepsilon_{st} \xi^2 - j^2(1 + \varepsilon_{st}) = 0 \quad (85)$$

Com a utilização do *Python*, passamos a incluir apenas 7 parâmetros, pois os dados dos condutores são apresentados de forma automática, e os parâmetros atmosféricos vem pré-definidos podendo ser ajustados conforme a localização da subestação elétrica. Os campos a serem preenchidos estão destacados em verde.

Tabela 13 — Dados inseridos com a utilização do *Python*, para o cálculo do condutor flexível vertical.

Características do Sistema	Símbolo	Cabo - Painel de Linha	Unidade
Tensão nominal do sistema	U_n	150	kV
Corrente inicial de curto-circuito bifásico simétrico inicial	$I_{k''}$	22,75	kA
Duração da corrente de curto-circuito	T_{k1}	3	s
Frequência do sistema	f	50	Hz
Relação X/R	X/R	7,69	
Fator empírico para o cálculo do valor de pico da corrente de curto-circuito	κ		
Condições de Cálculo: Informações atmosféricas			
Hipótese A (Estado de Inverno)	θ_i	-10	°C
	q_i	300	Pa
Hipótese B (Estado de Primavera)	θ_p	15	°C
	q_p	1050	Pa
Hipótese C (Estado de Verão)	θ_v	80	°C
	q_v	0	Pa
Densidade do gelo		0,9	kg/dm ³
Espessura da camada de gelo		10	mm
Coeficiente de redução	α	0,6	
Coeficiente de forma	c	1	

Valor convencional da aceleração da gravidade	<i>g</i>	9,81	<i>m/s²</i>
Permeabilidade do vácuo	<i>μ_o</i>	1,26E-06	<i>H/m</i>
Condutor:		851-AL4 (ASTER 851)	
Número de subcondutores	<i>n</i>	2	

Com a Figura 27, tem-se o condutor flexível vertical entre o transformador de medida de corrente e o seccionador com chave de aterramento. Para o cálculo dos esforços são necessárias informações dos equipamentos, que são apresentadas em verde na Figura 28.

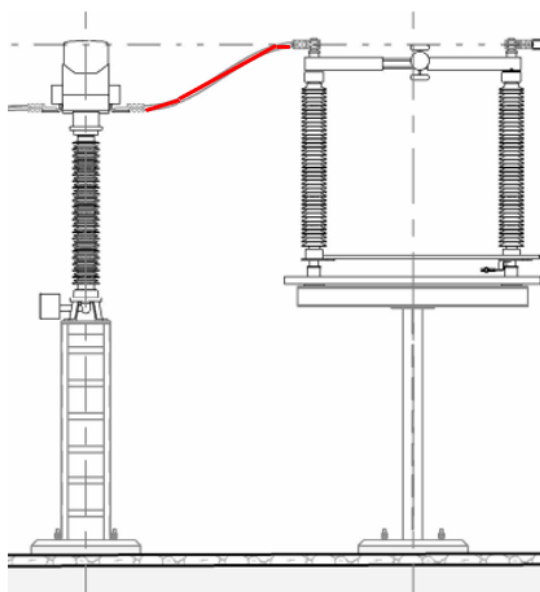


Figura 27 – Condutor flexível vertical entre o transformador de medida de corrente e o seccionador com chave de aterramento.

Dados de entrada		
Características do Sistema:		
Tensão nominal do sistema	U_n	220 kV
Corrente inicial de curto-circuito bifásico simétrico inicial	$I''k$	25 kA
Duração da corrente de curto-circuito	$Tk1$	1 s
Frequência do sistema	f	50 Hz
Relação X/R	X/R	10
Fator empírico para o cálculo do valor de pico da corrente de curto-circuito	k	1,75
Altura da Baixa	h	6,00 m
Largura da baixada	w	0,63 m
Distância entre suportes	l	6,03 m
Comprimento do total do condutor da baixada	lv	6,39 m
Distância entre condutores	a	4 m
Distâncias entre peças de conexão	ls	6,03 m
Distância entre subcondutores	as	0,11 m
Constante da elasticidade resultante dos suportes	S	100 N/mm
Condições de Cálculo:		
Hipótese A (Estado de Inverno)	θ_i	-10 °C
	q_i	300 Pa
Hipótese B (Estado de Primavera)	θ_p	15 °C
	q_p	1050 Pa
Hipótese C (Estado de Verão)	θ_v	80 °C
	q_v	0 Pa
Densidade do gelo		0,9 kg/dm ³
Espessura da camada de gelo		10 mm
Coefficiente de redução	α	0,6
Coefficiente de forma	c	1
Valor da aceleração gravitacional convencional	g	9,81 m/s ²
Permeabilidade do vácuo	μ_0	1,26E-06 H/m
Fator v2 (de acordo com a Figura 9 da norma IEC 60865-1)	v_2	2,82947
Parâmetro ξ (de acordo com a Figura 11 da norma IEC 60865-1)	Atualizar Fator ξ	192
Condutor:		
		CABO ASTER 851
Número de subcondutores	n	2
Diâmetro dos subcondutores	d	38 mm
Secção dos subcondutores	As	851 mm ²
Massa por unidade de comprimento dos subcondutores	$m's$	2,3607 kg/m
Módulo Young	E	52500 N/mm ²
	ξ	192
	Equação de ξ	0
Cálculos		
Força de tensão de curto-circuito e o deslocamento horizontal máximo		
Força de tensão durante o curto circuito	Ft,d	3376 N
Deslocamento horizontal máximo	bh	0,87 m
Distância mínima no ar entre condutores (fase-fase) durante o curto-circuito	$amin$	2,25 m
Força de tensão estática		
Componente horizontal causada por um subcondutor no ponto inferior da baixada	Hs	2 N
Componente vertical causada por um subcondutor no ponto superior da baixada	Vs	148 N
Força de tensão estática média na baixada	Fs,t	150 N
Dimensões e parâmetros característicos		
Verificação das condições (52) e (53) da norma IEC 60865-1		Não
Força de curto-circuito entre subcondutores	Fv	9607 N
Fatores de cálculo de FV	$v1$	1,223
	$v3$	0,505
Módulo de Young real	$E_{eff,Tw}$	1,58E+10 N/m ²
Norma de rigidez	N	1,69E-06 N ⁻¹
Fatores de deformação	est	2,67
	ϵ_{pi}	7,17E+06
Parâmetro j	j	1398
Fator ve	ve	0,50
Fator v4	$v4$	1,89
Força de tensão devida à contração	$F_{pi,d}$	5554 N
Conclusões		
De acordo com a norma IEC 60865-1, o valor Fmáx deverá ser aplicado como um esforço estático às estruturas, aos isoladores, aos conectores e às fundações:		
Força de tensão máxima	$F_{máx}$	5554 N
Ação do Vento		
Força de ação do vento sobre o condutor	F_y	153 N
Ação do Peso Próprio do Cabo		
Força de ação do peso do próprio cabo	F_z	148 N

Figura 28 – Resultados apresentados pelo Python dos parâmetros dos esforços eletromecânicos dos condutores flexíveis verticais.

5.2 Cálculo dos Condutores Rígidos

No cálculo dos condutores rígidos, antes da utilização do *Python*, era necessário inserir 24 parâmetros, da mesma forma que foi apresentado na Tabela 12. Com a utilização do *Python* são inseridos somente 7 parâmetros. Além disso, foi eliminada a necessidade de consulta aos gráficos da Figura 29 e da Figura 30, pois as fórmulas dos gráficos foram inseridas no *Python*.

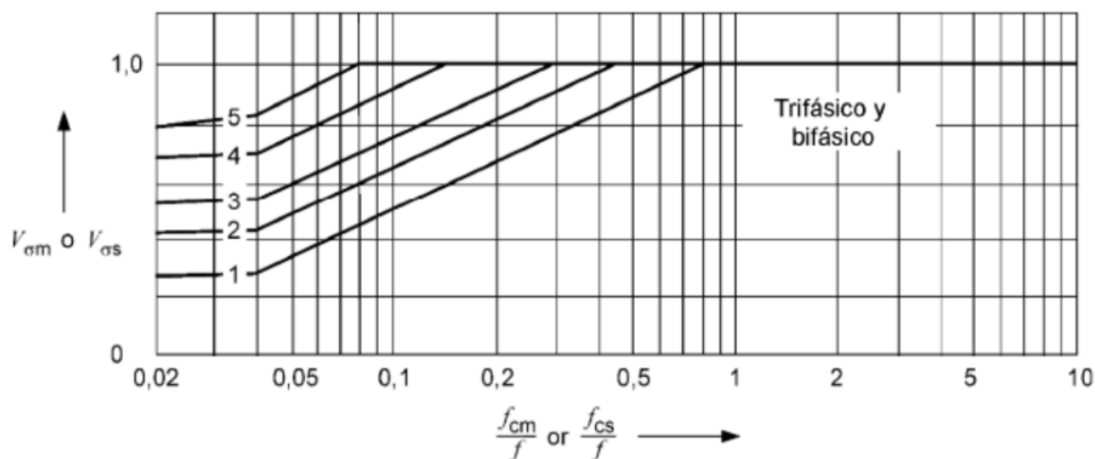


Figura 29 – Fator V_{om} a ser usado em curto-circuito.

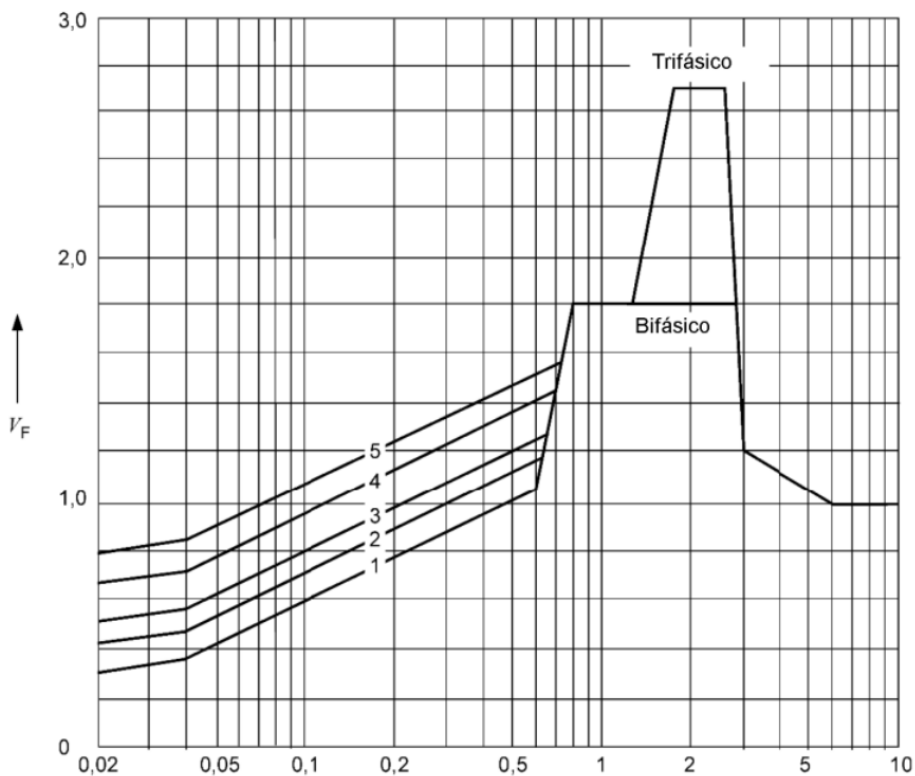


Figura 30 – Fator V_{rm} a ser usado em curto-circuito (IEC 60865-1:2011).

Para o cálculo do condutor rígido tubular, temos como exemplo a Figura 31 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, com o condutor entre um seccionador com chave de aterramento e um isolador.

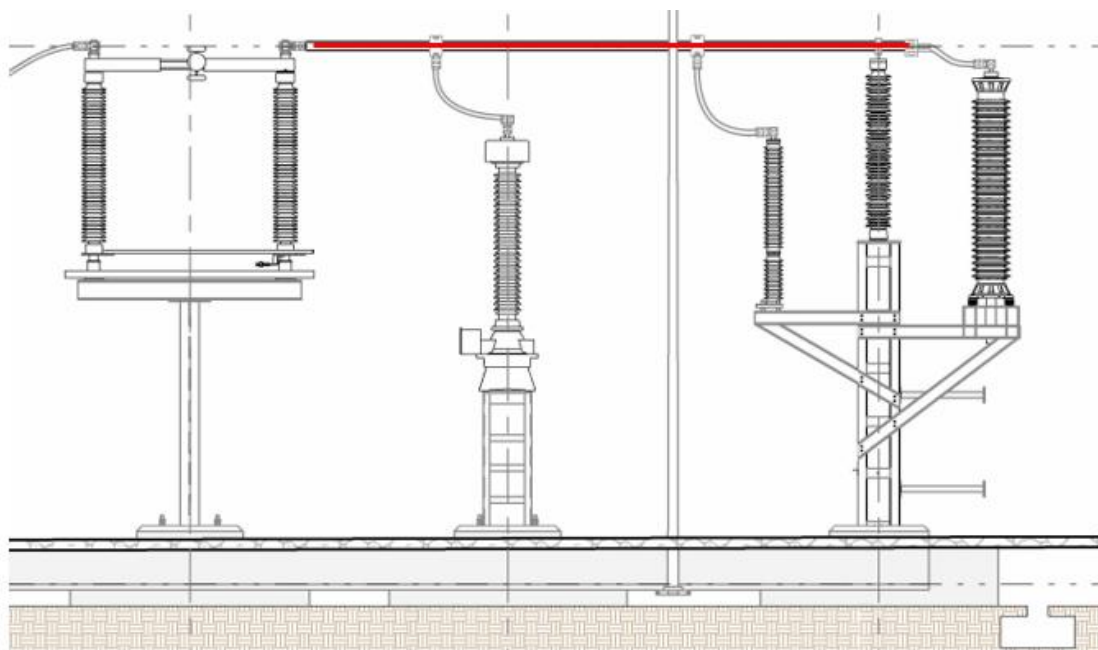


Figura 31 – Condutor rígido tubular entre o seccionador com chave de aterramento e o isolador.

Na Figura 32, na Figura 33 e na Figura 34, têm-se os resultados dos cálculos do condutor rígido tubular, com os campos em verde referentes às informações dos equipamentos a serem inseridos. Vale ressaltar que os valores de entrada aparecem em cinza na planilha de resultado, pois estes foram inseridos anteriormente.

Dimensionamento dos barramentos (Rígidos)		
Caso:		
Dados principais de dimensionamento		
Características do Sistema:		
Tensão nominal do sistema	U_n	150 kV
Corrente inicial de curto-circuito bifásico simétrico inicial	IK''	22,75 kA
Duração da corrente de curto-circuito	$Tk1$	3 s
Frequência do sistema	f	50 Hz
Relação X/R	X/R	7,69
Fator empírico para o cálculo do valor de pico da corrente de curto-circuito	κ	1,68
Condições de Cálculo:		
Hipótese A (Estado de Inverno)	θ_i	-10 °C
	q_i	300 Pa
Hipótese B (Estado de Primavera)	θ_p	15 °C
	q_p	1050 Pa
Hipótese C (Estado de Verão)	θ_v	80 °C
	q_v	0 Pa
Densidade do gelo		0,9 kg/dm ³
Espessura da camada de gelo		10 mm
Coefficiente de redução	α	0,6
Coefficiente de forma	c	1
Valor convencional da aceleração da gravidade	g	9,81 m/s ²
Permeabilidade do vácuo	μ_0	1,25664E-06 H/m
Características dos condutores que constituem o barramento:		
TUBO DE ALUMÍNIO 80/72		Al
Diâmetro exterior	D	0,08 m
Diâmetro interior	d	0,072 m
Espessura	t	0,004 m
Secção do condutor	A_c	955,04 mm ²
Área da superfície do condutor por unidade de comprimento	A_s	0,25 m ² /m
Massa por unidade de comprimento do condutor	$m's$	2,60 kg/m
Módulo de Young	E	70000,00 N/mm ²
Tensão mecânica correspondente ao limite elástico	f_y	160000000,00 N/m ²
Momento de inércia	J_m	0,00 m ⁴
Módulo da flexão	W_m	0,00 m ⁴
Configuração/diposição do barramento:		
Distância entre eixos de suportes adjacentes	l	5,6000 m
Distância entre eixos dos condutores	a	3,00 m
Características dos isoladores:		
-Isolador de classe C6-750		
Carga de ruptura à flexão dos isoladores	$Fr, d \text{ máx}$	6000 N
Altura do isolador	h_i	1,7 m
Altura do ligador	h_l	0,2044 m

Figura 32 – Resultados apresentados pelo Python dos parâmetros dos esforços eletromecânicos dos condutores rígidos tubulares (dados principais)

Esforços eletromecânicos - Capacidade de resistência mecânica em situação de curto-circuito	
1 - Dados de entrada	
1.1 Características do Sistema	
Corrente inicial de curto-circuito trifásico simétrico	22,75 kA
Fator empírico para o cálculo do valor de pico da corrente de curto-circuito	1,68
Frequência do sistema	50 Hz
1.2 Configuração do barramento	
Distância entre eixos de suportes adjacentes	5,60 m
Distância entre eixos dos condutores	3,00 m
1.3 Características dos condutores	
TUBO DE ALUMÍNIO 80/72	
Diamêtro exterior do condutor	0,080 m
Diâmetro interior do condutor	0,072 m
Espessura da parede do condutor	0,004 m
Massa por unidade de comprimento do condutor	2,60 kg/m
Módulo de Young	7,00E+10 N/m ²
Tensão mecânica correspondente ao limite elástico	1,60E+08 N/m ²
Momento de inércia do condutor	6,915E-07 m ⁴
Módulo da flexão do condutor	1,72863E-05 m ⁴
1.4 Características dos isoladores	
-Isolador de classe C6-750	
Carga de ruptura à flexão dos isoladores	6000 N
Altura do isolador	1,7 m
Altura do ligador	0,2044 m
1.5 Características dos suportes	
Tipo do suporte A	Simplex
Tipo do suporte B	Simplex
Coeficientes associados ao suportes, que dependem do tipo e do número de suporte, em conformidade com a Tabela 3 da norma.	0,500
	0,500
	1,00
	1,57
1.6 Parâmetros de cálculo	
Permeabilidade do vácuo	1,26E-06 H/m

Figura 33 – Resultados apresentados pelo *Python* dos parâmetros dos esforços eletromecânicos dos condutores rígidos tubulares (dados de entrada)

2 - Cálculos	
2.1 Cálculo da força máxima entre condutores principais durante o curto-circuito trifásico	
Valor de pico da corrente de curto-circuito	54,16 kA
Força máxima sobre o condutor central principal	948 N
2.2 Cálculo da tensões mecânicas	
Frequência própria de vibração do condutor	6,83 Hz
Relação entre a frequência própria e a frequência da rede	0,1366
Fatores que contabilizam os fenômenos dinâmicos, obtidos em função de fcm de acordo com os gráficos das figuras 4 e 5 da norma.	1,6000
	1,5317
	0,6662
Tensão mecânica de flexão causada pelas forças entre condutores principais	9,41E+07 N/m2
Fator de plasticidade	1,340
Tensão mecânica admissível no condutor	2,14E+08 N/m2
O condutor do barramento suportará as forças de curto-circuito se: $q q . f y \geq \sigma m , d$	VERIFICADO
2.3 Cálculo das forças exercidas sobre os suportes dos condutores	
Força estática equivalente sobre os suportes (A)	484 N
Força estática equivalente sobre os suportes (B)	484 N
Força estática máxima resultante, tendo em conta a altura do ligador (Cálculo dos	542 N
Os suportes/isoladores serão adequados se: $F r , d \text{ máx } > F r , d \text{ res}$	VERIFICADO
2.4 Ação do Vento	
Força de ação do vento sobre o condutor	$F_y = 282 \text{ N}$
2.5 Ação do Peso Próprio do Condutor	
Força de ação do peso do próprio condutor	$F_z = 143 \text{ N}$
Verificação da frequência de ressonância	
1 - Dados de entrada	
Frequência do sistema	50 Hz
2 - Cálculos	
Frequência própria de vibração do condutor	6,83 Hz
Dever-se-á verificar que a frequência própria não se encontra nos seguintes	VERIFICADO

Figura 34 – Resultados apresentados pelo *Python* dos parâmetros dos esforços eletromecânicos dos condutores rígidos tubulares (cálculos)

5.3 Cálculo dos Condutores Flexíveis Horizontais

No cálculo dos condutores flexíveis horizontais, segue-se o mesmo conceito dos anteriores e obtendo-se as seguintes melhorias:

- Redução dos parâmetros a serem digitados de 21 para 7;
- Eliminação da necessidade de consultar o gráfico da Figura 35;
- Inclusão das fórmulas (86) e (87) no *Python*.

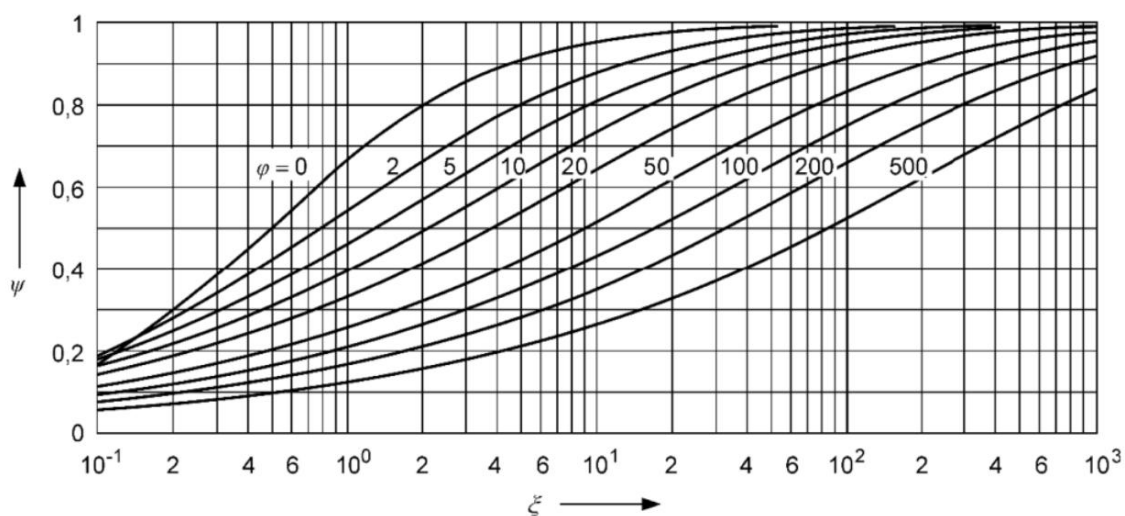


Figura 35 – Fator (Ψ) relativo à força de tração em condutores flexíveis

$$\varphi^2 \cdot \Psi^3 + \varphi(2 + \zeta)\Psi^2 + (1 + 2 \cdot \zeta)\Psi - \zeta(2 + \varphi) = 0 \quad (86)$$

$$\theta_i + \frac{t_i}{\alpha_d E} - \frac{m_i^2 w^2 L^2}{24 \alpha_d \sigma^2 t_i^2} = \theta_k + \frac{t_k}{\alpha_d E} - \frac{m_k^2 w^2 L^2}{24 \alpha_d \sigma^2 t_k^2} \quad (87)$$

Na Figura 36, o condutor flexível horizontal localizado entre o descarregador de sobretensão e o transformador de intensidade.

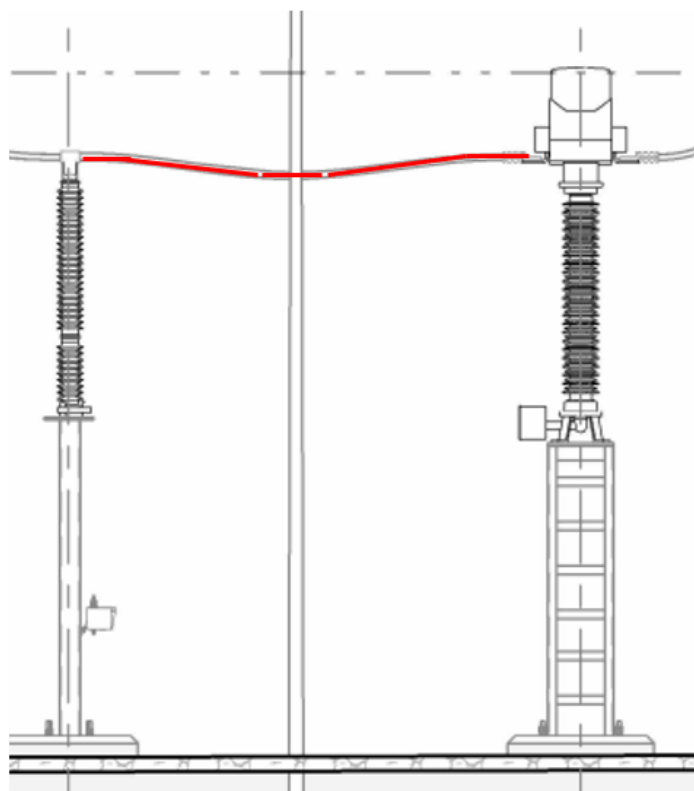


Figura 36 – Condutor flexível horizontal entre o descarregador de sobretensão e o transformador de intensidade

Os resultados obtidos com o *Python* para os cálculos dos condutores flexíveis horizontais são apresentados na Figura 37, na Figura 38, na Figura 39 e na Figura 40. Vale ressaltar que para os condutores flexíveis horizontais há mais cálculos, devido às condições atmosféricas terem maior influência no comportamento da deformação dos condutores nesta posição. Por esta razão, temos resultados dos cálculos dos esforços estáticos e dinâmicos separados.

Cálculos dos esforços estáticos.

Dados de entrada		
Condições de Cálculo:		
Hipótese A (Estado de Inverno)	θ_i	-30 °C
	q_i	300 Pa
Hipótese B (Estado de Primavera)	θ_p	15 °C
	q_p	750 Pa
Hipótese C (Estado de Verão)	θ_v	110 °C
	q_v	0 Pa
Densidade do gelo		0,9 kg/dm ³
Espessura da camada de gelo		10 mm
Coefficiente de redução	α	0,6
Coefficiente de forma	c	1
Valor convencional da aceleração da gravidade	g	9,810 m/s ²
Condutor:		
		CABO ASTER 570
Número de subcondutores	n	1
Diâmetro do subcondutor	d	31,100 mm
Área de secção do subcondutor	A_s	570,000 mm ²
Massa por unidade de comprimento	$m's$	1,576 kg/m
Módulo de Young	E	52500,000 N/mm ²
Coefficiente de dilatação	α_e	0,000 °C ⁻¹
Comprimento efetivo do vão de ligação	$leff$	0,85 m
Ponto de Ligação A		DST 60kV
Altura do Ponto de Ligação A	hA	4,57 m
Ponto de Ligação B		Travessia TP 60kV
Altura do Ponto de Ligação B	hB	4,35 m
Força de tração máxima admissível	$Tmax$	150 N
Atualizar Equações de Estados (Sempre que se altere algum dado)		

Figura 37 – Resultados apresentados pelo *Python* dos parâmetros dos esforços estáticos dos condutores flexíveis horizontais (dados de entrada)

Cálculos		
Forças Exercidas pelos Agentes Atmosféricos e pelos Cabos		
Força devida à ação do peso do próprio cabo	<i>WC</i>	15,461 N/m
Força devida à ação do vento no Estado de Inverno	<i>Fvi</i>	9,198 N/m
Força devida à ação do vento no Estado de Primavera	<i>Fvp</i>	13,995 N/m
Força devida à ação do gelo	<i>Wg</i>	11,400 N/m
Força resultante aplicada sobre o condutor no Estado de Inverno	<i>Fri</i>	28,392 N/m
Força resultante aplicada sobre o condutor no Estado de Primavera	<i>Frp</i>	20,854 N/m
Força resultante aplicada sobre o condutor no Estado de Verão	<i>Frv</i>	15,461 N/m
Coeficiente de Sobrecarga no Estado de Inverno	<i>mri</i>	1,836
Coeficiente de Sobrecarga no Estado de Primavera	<i>mrp</i>	1,349
Coeficiente de Sobrecarga no Estado de Verão	<i>mrv</i>	1,000
	<i>mrp > mri</i>	NÃO
	<i>mrp = mri</i>	NÃO
Vão Crítico	<i>Lcr</i>	Imaginário
Estado mais desfavorável (para aplicar na equação dos estados)	<i>H.P.</i>	Inverno
Força de tração máxima no cenário mais desfavorável	<i>TH.P.</i>	150 N
Temperatura do condutor no cenário mais desfavorável	<i>ΘH.P.</i>	-30 °C
Coeficiente de sobrecarga no cenário mais desfavorável	<i>mH.P.</i>	1,836
Determinação das Forças de tensão e flechas estáticas do condutor		
Resultado da Equação de Estados para Hipótese A (Deverá ser igual a 0)	<i>EEi</i>	0,000
Força da tensão estática do condutor na Hipótese A (Inverno)	<i>Ti</i>	150,000 N
Flecha estática do condutor na Hipótese A (Inverno)	<i>fi</i>	0,018 m
Flecha estática do condutor na Hipótese A em percentagem (Inverno)	<i>fi(%)</i>	2,08 %
Resultado da Equação de Estados para Hipótese B (Deverá ser igual a 0)	<i>EEp</i>	0,000
Força da tensão estática do condutor na Hipótese B (Primavera)	<i>Tp</i>	78,749 N
Flecha estática do condutor na Hipótese B (Primavera)	<i>fp</i>	0,025 m
Flecha estática do condutor na Hipótese B em percentagem (Primavera)	<i>fp(%)</i>	2,91 %
Resultado da Equação de Estados para Hipótese B (Deverá ser igual a 0)	<i>EEv</i>	0,000
Força da tensão estática do condutor na Hipótese C (Verão)	<i>Tv</i>	40,932 N
Flecha estática do condutor na Hipótese C (Verão)	<i>fv</i>	0,035 m
Flecha estática do condutor na Hipótese C em percentagem (Verão)	<i>fv(%)</i>	4,15 %
Conclusões		
Comprimento do vão complementar	<i>ae</i>	3,6
Flecha no comprimento do vão complementar	<i>fe</i>	0,307 m
Forças de tração máximas no estado mais desfavorável	<i>SA</i>	159 N
	<i>SB</i>	152 N

Figura 38 – Resultados apresentados pelo *Python* dos parâmetros dos esforços estáticos dos condutores flexíveis horizontais (cálculos)

Cálculos dos esforços dinâmicos.

Dados de entrada		
Corrente de curto circuito trifásica simétrica inicial	<i>I_{k''}</i>	50 kA
Duração da corrente de curto-circuito	<i>T_{k1}</i>	3 s
Comprimento efetivo do vão de ligação	<i>l_{eff}</i>	0,85 m
Distância entre condutores:	<i>f</i>	50 Hz
Lado 1	<i>a1</i>	0,9 m
Lado 2	<i>a2</i>	0,9 m
Constante da elasticidade resultante dos suportes	<i>S</i>	100 N/mm
Condutor: CABO ASTER 570		
Número de subcondutores	<i>n</i>	1
Área de secção do subcondutor	<i>A_s</i>	850,7 mm ²
Massa por unidade de comprimento	<i>m'_s</i>	2,3607 kg/m
Módulo de Young	<i>E</i>	52000 N/mm ²
Força de tração estática do condutor principal:		
Temperatura mínima de inverno local	<i>F_{st,Tw}</i>	150 N
Temperatura máxima de operação permanente do condutor	<i>F_{st,Tmax}</i>	41 N
Valor convencional da aceleração da gravidade	<i>g</i>	9,81 m/s ²
Fator ψ (de acordo com a Figura 7 da norma IEC 60865-1)		
	<i>ψ_{Tw}</i>	0,186
ATUALIZAR ESTE FATOR (SEMPRE QUE SE ALTERAM OS DADOS)	<i>ψ_{Tmax}</i>	0,615
Constante de material do condutor	<i>cth</i>	2,7E-19 m ⁴ /(A ² s)

Figura 39 – Resultados apresentados pelo *Python* dos parâmetros dos esforços dinâmicos dos condutores flexíveis horizontais (dados de entrada)

Cálculos		
Carga electromagnética e parâmetros característicos		
Distância equivalente entre condutores	a	0,9 m
Carga eletromagnética característica por unidade de comprimento	F'	416,7 N
Relação entre a força electromecânica sobre um condutor sobre condições de curto-circuito, e a força gravítica	r	17,99
Direção da força resultante exercida no condutor	$\delta 1$	86,8 °
Flechas estáticas equivalentes do condutor no ponto intermédio do vão	$f_{es,Tw}$	0,014 m
	$f_{es,Tmax}$	0,051 m
Períodos de oscilação dos condutores	TTw	0,212 s
	$TTmax$	0,406 s
Períodos resultantes da oscilação do condutor durante curto-circuito	$Tres,Tw$	0,058 s
	$Tres,Tmax$	0,112 s
Módulos de Young real	$E_{eff,Tw}$	1,58E+10 N/m ²
	$E_{eff,Tmax}$	1,57E+10 N/m ²
Normas de rigidez	NTw	1,184E-05 1/N
	$NTmax$	1,184E-05 1/N
Fatores de tensão mecânica	ζTw	0,40
	$\zeta Tmax$	19,89
TK1 a utilizar	$Tk1,Tw$	0,1 s
	$Tk1,Tmax$	0,2 s
Angulo de balanço do condutor no fim do curto-circuito	$\delta_{end,Tw}$	173,6 °
	$\delta_{end,Tmax}$	173,6 °
Magnitudes para o ângulo máximo de balanço	$\chi_{end,Tw}$	-16,99
	$\chi_{end,Tmax}$	-16,99
Angulo máximo de balanço no fim do curto-circuito	$\delta_{max,Tw}$	180,0 °
	$\delta_{max,Tmax}$	180,0 °
Força de tensão durante o curto-circuito causado pelo balanço dos condutores		
Parâmetros de carga	ϕTw	51,06
	$\phi Tmax$	51,06
Força de tensão durante curto-circuito (Temperatura mínima)	Ft,d,Tw	1,58 kN
Força de tensão durante curto-circuito (Temperatura máxima)	$Ft,d,Tmax$	1,33 kN
Força de tensão máxima durante curto-circuito	Ft,d	1,58 kN
Flecha dinâmica do condutor no ponto intermédio do vão		
Expansão elástica	ϵ_{ela}	1,52E-02
Expansão térmica	ϵ_{th}	1,359E-05
Fator de dilatação	CD	1,61
Fator de forma	CF	1,15
Flecha dinâmica do condutor no ponto intermédio do vão	f_{ed}	0,09 m
Força de tensão após curto-circuito causado pela caída dos condutores		
Força de tensão após curto-circuito (Temperatura mínima)	Ff,d,Tw	0,37 kN
Força de tensão após curto-circuito (Temperatura máxima)	$Ft,d,Tmax$	0,62 kN
Força de tensão máxima após curto-circuito	Ft,d	0,62 kN
Deslocamento horizontal do vão e distância mínima no ar entre condutores		
Deslocamento horizontal máximo dos condutores	bh	0,09 m
Distância mínima no ar entre condutores	a_{min}	0,71 m
Conclusões		
De acordo a norma IEC 60865-1:2011, os suportes (equipamentos, isoladores de poste e estruturas metálicas) e as fundações devem suportar a seguinte força de flexão:		
-> max{Ft,d; Ff,d}		1,576 kN
O sistema de fixação do condutor deverá ser especificado para as seguintes cargas máximas:		
	Carga Estática	0,150 kN
	Carga Dinâmica	2,365 kN
-> O deslocamento horizontal é 0,09 m e a distância mínima entre fases é 0,71 m.		

Figura 40 – Resultados apresentados pelo Python dos parâmetros dos esforços dinâmicos dos condutores flexíveis horizontais (cálculos)

Os valores obtidos com a ferramenta computacional apresentaram valores mais precisos e consistentes em comparação ao método tradicional. Os principais benefícios observados com sua utilização vão além da precisão numérica e incluem:

- Agilidade nos cálculos de esforços mecânicos e eletromecânicos, com redução de tempo de cerca de 4 horas, para 1 hora, ou menos, dependendo do tipo de condutor, posição dos mesmos e das distâncias entre os equipamentos;
- Padronização dos resultados conforme as normas internacionais;
- Flexibilidade para inserção de novos tipos de condutores e cenários;
- Redução de erros humanos, especialmente aqueles associados a consultas gráficas (paralaxe).

Desta forma, a ferramenta representa um avanço significativo no desenvolvimento de projetos de subestações elétricas, sobretudo por contribuir para o aumento da qualidade dos projetos e proporcionar um ganho de tempo expressivo. Ao automatizar cálculos complexos e padronizar procedimentos, a aplicação atende de forma eficaz às demandas atuais do mercado, que exigem soluções cada vez mais ágeis, precisas e confiáveis.

6 Conclusões e Perspetivas Futuras

A crescente complexidade dos projetos de subestações elétricas exige ferramentas cada vez mais eficientes e padronizadas, que aliem precisão técnica, agilidade na execução e conformidade com normas internacionais. Neste contexto, a ferramenta computacional desenvolvida em *Python* ao longo desta dissertação representa um avanço relevante na automatização dos cálculos dos esforços eletromecânicos em condutores rígidos e flexíveis.

O sistema proposto demonstrou ser eficaz ao integrar informações de diferentes fontes - dados de entrada fornecidos pelo projetista, base de dados de condutores e fórmulas de cálculo extraídas de normas - e processá-las de forma automatizada e confiável. A abordagem modular adotada na estrutura da ferramenta permite sua fácil adaptação e expansão, podendo atender a diferentes exigências técnicas, inclusive com ajustes para normas internacionais adicionais.

Além da melhoria na precisão dos resultados obtidos, os principais benefícios observados com a aplicação da ferramenta foram a redução do tempo de execução, a eliminação de tarefas repetitivas e o aumento da rastreabilidade dos resultados. A substituição de métodos manuais por cálculos automatizados trouxe segurança ao processo e promoveu a padronização das análises, garantindo maior confiabilidade aos projetos desenvolvidos.

A validação da ferramenta por meio de um caso real aplicado a uma subestação elétrica, respeitando as exigências contratuais de sigilo, demonstrou a aplicabilidade prática do sistema e sua adequação às condições reais de projeto. A apresentação dos dados de entrada organizados por tipo de condutor, bem como a estrutura clara de entrada, processamento e saída, mostram o cuidado metodológico na construção da ferramenta.

Como trabalho futuro, sugere-se a ampliação da base de dados com novos tipos de condutores e a criação de módulos adicionais que permitam a análise de esforços térmicos em estruturas metálicas e simulações de coordenação de isolamento. Também é recomendável explorar a integração com interfaces gráficas e sistema BIM (*Building Information Modeling*), visando maior interoperabilidade com outras plataformas de engenharia.

Portanto, conclui-se que a ferramenta proposta nesta dissertação contribui significativamente para o avanço do processo de dimensionamento eletromecânico em subestações elétricas, oferecendo ao projetista uma solução robusta, ágil e alinhada com as exigências do setor elétrico.

7 Referências

- (Frene et al., 2021). *Frene, H. M., Arrojo, C. D., Dias, R. & Scaramutti, J. C. (2021) Mechanical stresses of electromagnetic origin: Effects produced by three-phase short-circuit currents on a rigid busbar system. In: Proc. of the 3rd Int. Conf. on Electrical, Communication and Computer Engineering (ICECCE), Kuala Lumpur, Malaysia, IEEE.*
- (IEC 60865-1:2011) *IEC 60865-1:2011 - Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 1: Definitions and calculation methods. International Electrotechnical Commission*
- (IEC 60865-2:2015) *IEC 60865-2:2015 - Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 2: Examples of calculation. International Electrotechnical Commission*
- (Grainger & Stevenson, 1994). Grainger, J.J. and Stevenson, W.D. (1994). *Power System Analysis. New York: McGraw-Hill.*
- (Kozarek et al., 2023) Kozarek, Ł. et al. (2023) 'Impact of the Short-Circuit Current Value on the Operation of Overhead Connections in High-Voltage Power Stations', *Energies*, 16(8), p. 3462. <https://doi.org/10.3390/en16083462>.
- (Frontin 2013) Frontin, S.O. (org.) (2013). Equipamentos de alta tensão: prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. 1ª ed. Brasília: Teixeira. 934 p. ISBN: 978-85-88041-09-7.
- (Monteiro 2023) Monteiro, P.R.D. (org.) (2023). Introdução à subestação e seus principais equipamentos [livro eletrônico]. São José dos Pinhais, PR: Seven Events. ISBN 978-65-84976-77-1.
- (Ramos, 2015) Ramos, A.C.F., (2015). Sistema de apoio à gestão da manutenção de subestações: estágio na EDP Distribuição. Tese de doutoramento. [s.l.]: [s.n.].

- (IEEE 605:2008) *IEEE 605:2008 – Guide for Bus Design in Air Insulated Substations. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*
- (IEC 60909-0:2016) *IEC 60909-0:2016- Short-circuit currents in three-phase a.c. systems. International Electrotechnical Commission*
- (Lima, 2022) LIMA, H. R. S. M. P. de (2022). Eletrodinâmicos de barramentos/condutores flexíveis. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Departamento de Engenharia Eletrotécnica.
- (Ribeiro, 2021) RIBEIRO, T. M. S. (2021). Estudo prévio e modelação 3D do projeto elétrico de uma subestação. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Departamento de Engenharia Eletrotécnica.
- (Costa, 2021) COSTA, P. S. S. da (2021). Cálculo de esforços eletromecânicos em ligações horizontais e verticais de subestações elétricas. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores.
- (Tisott, 2011) TISOTT, A. (2011). Estudo do uso de barramentos rígidos em subestações. Projeto de Diplomação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Elétrica, Porto Alegre.
- (Magalhães, 2013) MAGALHÃES, J. P. C. (2013). *Cabos de alta temperatura em linhas aéreas AT: condições de falha térmica/mecânica*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores – Major Energia.
- (RSLEAT:1992) Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão (RSLEAT). Diário da República n.º 41/1992, Série I-B de 1992-02-18, páginas 960 – 984, Lisboa: Diário da República. Disponível em: <https://dre.pt> [Acedido em: 02 jun. 2025].

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

ISEP, Porto, 24 de setembro de 2025

Alexandre Moraes da Mota