

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



Samuel Caetano Gamonal

**METODOLOGIA E DIMENSIONAMENTO DE  
BARRAMENTOS FLEXÍVEIS EM SUBESTAÇÕES DE  
ALTA TENSÃO**

Vitória-ES

Agosto/2022

Samuel Caetano Gamonal

# **METODOLOGIA E DIMENSIONAMENTO DE BARRAMENTOS FLEXÍVEIS EM SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Samuel Caetano Gamonal, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Vitória-ES

Agosto/2022

Samuel Caetano Gamonal

# **METODOLOGIA E DIMENSIONAMENTO DE BARRAMENTOS FLEXÍVEIS EM SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Samuel Caetano Gamonal, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em 18 de Agosto de 2022.

**COMISSÃO EXAMINADORA:**



---

**Prof. Dr. Augusto César Rueda  
Medina**

Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador



---

**Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador



---

**Prof. Dr. Paulo José de Mello Menegáz**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador

Vitória-ES

Agosto/2022

*A Deus, aos meus pais e aos demais familiares e amigos pelo apoio.*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por toda força e graças derramadas ao longo do meu caminho e também agradecer especialmente as pessoas que fazem parte da minha vida e que permitem que eu mantenha o foco e dedicação nos estudos e demais objetivos. A todos vocês, minha eterna gratidão.

Aos meus pais, Orlando e Naira, pelo apoio incondicional e dedicação.

À minha esposa, Ana Carolina, por toda compreensão e apoio durante toda a graduação.

Ao meu orientador Augusto Rueda e meu coordenador de estágio Iury Careta por despertar meu interesse por esse tema fascinante e por toda ajuda, orientação e dedicação durante o desenvolvimento deste trabalho.

À banca examinadora pela aceitação do convite e pelo tempo investido para leitura e avaliação desse trabalho.

Agradeço à Universidade Federal do Espírito Santo e a todos os professores no qual tive contato, que contribuíram fundamentalmente para meu desenvolvimento como pessoa e também como profissional.

## RESUMO

Os projetos executivos são fundamentais para o ponto de partida na construção e/ou ampliação de subestações de energia e linhas de transmissão, que ao mesmo tempo são intensificados pela crescente demanda de energia no cenário brasileiro. Incorporado aos projetos dessa área, destaca-se o projeto da Disciplina Eletromecânica, que aborda os requisitos para estruturas de concreto e/ou metálica, como postes e pórticos, formado por desenhos e memoriais de cálculo de esforços às estruturas presentes em campo originado pela instalação de barramentos de alta tensão. O presente trabalho visa o dimensionamento de barramentos flexíveis, que por sua vez é um procedimento de certa complexidade, envolvendo numerosos cálculos e consulta em tabelas/ábacos. Nesse sentido, uma ferramenta de dimensionamento automatizado se torna indispensável; no entanto as ferramentas disponíveis no mercado possuem alto valor de aquisição, além de não abordarem certos fatores na implementação da metodologia de cálculo, como, por exemplo o peso da cadeia de ancoragem de cabos e condutores. Acerca disso, o trabalho apresenta a proposta de explicitar a metodologia aplicada no dimensionamento de barramentos flexíveis em subestações de alta tensão e através do desenvolvimento de uma ferramenta computacional utilizando o *software* MATLAB, otimizar o processo de cálculo. Apresentam-se simulações de dimensionamentos, baseadas em arranjos de barramentos de subestações com projetos reais. A validação da metodologia aplicada é realizada através de comparações com resultados de *softwares* utilizados no mercado atual de projetos por diversas empresas. A ferramenta busca permitir praticidade para o usuário aliado a eficiência nos cálculos efetuados, além de apresentar potencial comercial e, inclusive, está sendo utilizada profissionalmente.

**Palavras-chave:** Barramentos flexíveis; Subestações; Energia; Dimensionamento; Alta tensão.

## ABSTRACT

Executive projects are fundamental for the starting point in the construction and/or expansion of power substations and transmission lines, which at the same time are intensified by the growing demand for energy in the Brazilian scenario. Incorporated into the projects in this area, the projects of the electromechanical discipline stand out, which addresses the requirements for structures, consisting of drawings and memorials for calculating the efforts applied to buses applied to structures present in the field. The present work aims at the dimensioning of flexible buses, which in turn is a procedure of some complexity, involving numerous calculations and consultation in tables/abacus. In this sense, an automated dimensioning tool becomes indispensable. However, the tools available in commerce have a high acquisition value, in addition to not addressing certain factors in the implementation of the calculation methodology, such as the weight of the cable and conductor anchor chain. About this, the work has the proposal to explain the methodology applied in the design of flexible buses in high voltage substations and through the development of a computational tool using the *MATLAB software*, to optimize the calculation process. Simulations are presented of dimensioning, based on bus arrangements of substations with real projects. The validation of the applied methodology is carried out through comparisons with the results of software used in the current project area for many companies. The tool seeks to allow practicality for the user combined with efficiency in the calculations performed, in addition to presenting commercial potential and is even being used professionally.

**Keywords:** Flexible buses; Substations; Energy; Dimensioning; High Voltage.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Entrada de linha em uma subestação de energia. . . . .	15
Figura 2 – Representação de diagrama de esforços. . . . .	20
Figura 3 – Diagrama unifilar e arranjo físico de uma entrada de LT 230 kV na SE. . . . .	21
Figura 4 – Barramento flexível representado em linha de transmissão. . . . .	23
Figura 5 – Condutor suspenso em dois suportes de mesma altura. . . . .	24
Figura 6 – Forças atuantes na estrutura suporte. . . . .	25
Figura 7 – Cabo suspenso entre suportes com alturas diferentes. . . . .	26
Figura 8 – Mapa de isopletas, para determinação de $V_o$ em $m/s$ . . . . .	28
Figura 9 – Efeito do vento sobre os condutores. . . . .	29
Figura 10 – Mapa de isopletas, para determinação de $V_o$ em $m/s$ . . . . .	31
Figura 11 – Consideração de taludes e morros para cálculo do fator topográfico. . . . .	32
Figura 12 – Vão de barramento nivelado com cadeias de isoladores. . . . .	38
Figura 13 – Interface gráfica algoritmo de dimensionamento de barramentos flexíveis. . . . .	43
Figura 14 – Planilha com características construtivas cabo CA. . . . .	44
Figura 15 – Diagrama do processo da metodologia proposta. . . . .	45
Figura 16 – Fluxograma da rotina de cálculos. . . . .	46
Figura 17 – Fluxograma da rotina de esforços devido ao vento. . . . .	47
Figura 18 – Interface com parâmetros iniciais barramento de 230kV. . . . .	51
Figura 19 – Dimensionamento barramento flexível 230kV utilizando <i>software TFSwing</i> . . . . .	54
Figura 20 – Interface com parâmetros iniciais barramento de 230kV para um vão desnivelado. . . . .	55
Figura 21 – Dimensionamento de vão desnivelado no <i>software TFSwing</i> . . . . .	57



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Categoria de rugosidade do terreno. . . . .	34
Tabela 2 – Classe do objeto quanto às dimensões. . . . .	35
Tabela 3 – Parâmetros meteorológicos. . . . .	35
Tabela 4 – Fator estatístico $S_3$ . . . . .	35
Tabela 5 – Número de Reynolds para cabos. . . . .	39
Tabela 6 – Número de Reynolds para isolador. . . . .	40
Tabela 7 – Tabela de esticamento para um vão nivelado. . . . .	48
Tabela 8 – Quantidade mínima de disco de isoladores por classe de tensão. . . . .	50
Tabela 9 – Resultado para dimensionamento barramento de 230kV fixando valor de esforço inicial. . . . .	52
Tabela 10 – Resultado para dimensionamento barramento de 230kV definindo limite para flecha percentual. . . . .	52
Tabela 11 – Tabela de Esticamento para vão nivelado utilizando <i>software</i> proposto desenvolvido. . . . .	54
Tabela 12 – Dimensionamento de vão desnivelado para SE Campina Grande II no <i>software</i> proposto. . . . .	56
Tabela 13 – Dimensionamento de vão desnivelado no <i>software</i> proposto desconsiderando efeito da cadeia de isoladores. . . . .	56
Tabela 14 – Tabela de esticamento de cabos para o vão C5. . . . .	59
Tabela 15 – Tabela de esticamento de cabos para o vão C9. . . . .	60
Tabela 16 – Tabela com seleção de vãos para as simulações de dimensionamento. . . . .	61
Tabela 17 – Resultados das simulações de dimensionamento para 0°C para metodologia proposta. . . . .	62
Tabela 18 – Resultados das simulações de dimensionamento para 0°C para metodologia de referência. . . . .	62

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATV	Atividade
CA	Condutor de Alumínio Nu
CAA	Condutor de Alumínio com Alma de Aço
LTs	Linhas de Transmissão
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema
SIN	Sistema Interligado Nacional
SEs	Subestações de Energia

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Distância entre duas estruturas genéricas
$A_e$	Vão nivelado equivalente
$B$	Largura da base da estrutura
$C_0$	Comprimento do cabo após a mudança de temperatura 1
$C_1$	Distância a coluna mais baixa
$C_2$	Comprimento do cabo após a mudança de temperatura 2
$C_a$	Coefficiente de arrasto do cabo
$C_{a,i}$	Coefficiente de arrasto do isolador
$d$	Diâmetro nominal do cabo
$d_i$	Diâmetro do isolador empregado na cadeia
$d_1$	Diferença de nível entre a base ao topo do talude ou morro
$E$	Módulo de elasticidade do cabo
$f$	Flecha de um cabo suspenso
$f'$	Flecha de um cabo suspenso sob ação do vento
$f_s$	Componente da flexa horizontal para vãos desnivelados
$f_o$	Flecha máxima permitida para vãos desnivelados
$f_v$	Força de vento por unidade de comprimento
$f_1$	Flecha devido ao efeito da cadeia de isoladores
$f_2$	Flecha devido ao peso dos subcondutores
$F_y$	Força de arrasto perpendicular ao condutor
$F_i$	Força de arrasto de vento perpendicular a cadeia de isoladores
$F_v n$	Força resultante horizontal transmitida a estrutura devido efeito do vento em vão nivelados
$F_v d$	Força resultante horizontal transmitida a estrutura devido efeito do vento em vão nivelados

$g$	Aceleração da gravidade
$G_k$	peso da cadeia de isoladores por subcondutor (N)
$H$	Altura da Estrutura
$h$	Desnível entre dois suportes
$h_s$	Altura de Segurança
$K$	Coefficiente que relaciona $\frac{L_i}{d_i}$
$L$	Comprimento do cabo
$L_i$	Comprimento da cadeia de isoladores
$L_1$	Comprimento do cabo dado a temperatura 1
$L_2$	Comprimento do cabo dado a temperatura 2
$K$	Coefficiente que relaciona $\frac{L_i}{d_i}$
$L_k$	Projeção horizontal do comprimento da cadeia de isoladores
$m_s$	Densidade linear do subcondutor
$p_s$	Peso do Condutor
$p_r$	Peso virtual do cabo após ação do vento
$q_0$	Pressão dinâmica do vento
$S$	Área da seção transversal do cabo
$S_1$	Fator topográfico
$S_2$	Rugosidade do terreno
$S_3$	Fator estatístico
$t_1$	Temperatura de operação 1
$t_2$	Temperatura de operação 2
$T$	Tração axial em um condutor
$T_0$	Componente horizontal de tração axial em um condutor
$T_02$	Novo valor de componente horizontal da tração dos cabos
$T_A$	Força axial no suporte superior

$T_B$	Força axial no suporte inferior
$V$	Componente vertical da força axial
$V_p$	Velocidade do vento de projeto
$V_k$	Velocidade básica do vento
$X$	Comprimento do vão
$z$	Altura de instalação do cabo em relação a superfície do terreno
$\alpha$	Graus, ângulo vertical entre a força T com uma horizontal
$\alpha_1$	Ângulo de incidência do vento com relação ao condutor
$\alpha_t$	Coefficiente de expansão térmica
$\gamma$	Ângulo que um cabo, sob a ação do vento, faz com a vertical
$\psi$	Ângulo que um cabo, sob a ação do vento, faz com a horizontal
$\rho$	Massa específica do ar
$\theta$	Ângulo médio de inclinação do talude ou morro

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Apresentação</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b>	<b>16</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>16</b>
1.3.1	Objetivo Geral	16
1.3.2	Objetivos Específicos	17
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Barramentos Flexíveis</b>	<b>22</b>
<b>2.2</b>	<b>Comportamento Cabos Suspensos</b>	<b>23</b>
2.2.1	Cabos Suspensos em Vão Nivelados	23
2.2.2	Cabos Suspensos em Vão Desnivelados	25
<b>2.3</b>	<b>Influência de Agentes Externos</b>	<b>27</b>
2.3.1	Efeitos do Vento	28
2.3.1.1	Método da norma NBR 6123:1988	31
2.3.2	Variação de Temperatura	36
2.3.3	Efeitos da Cadeia de Isoladores	37
2.3.4	Força de Arrasto	39
2.3.4.1	Força de Arrasto ao Cabo	39
2.3.4.2	Força de Arrasto à Cadeia de Ancoragem	40
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO</b>	<b>41</b>
<b>3.1</b>	<b>Metodologia Adotada</b>	<b>41</b>
<b>3.2</b>	<b>Algoritmo de Dimensionamento</b>	<b>42</b>
3.2.1	Parâmetros Iniciais	42
<b>3.3</b>	<b>Banco de Dados</b>	<b>44</b>
<b>3.4</b>	<b>Rotinas de Cálculos</b>	<b>45</b>
3.4.1	Forças ocasionadas pelo vento	46
<b>3.5</b>	<b>Retorno/Saída do <i>software</i></b>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES</b>	<b>49</b>
<b>4.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>49</b>
<b>4.2</b>	<b>Simulação para Subestação Existente</b>	<b>49</b>
4.2.1	Dimensionamento vão nivelado	51
4.2.2	Comparativo com <i>software</i> comercial	53

4.2.3	Dimensionamento v~ao desnivelado . . . . .	55
4.3	<b>Simula~ao para Nova Subestaca~ao . . . . .</b>	<b>57</b>
4.4	<b>Comparativos de Simula~oes/Exemplos . . . . .</b>	<b>61</b>
5	<b>CONCLUS~AO E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>64</b>
5.1	<b>Conclus~ao . . . . .</b>	<b>64</b>
5.2	<b>Trabalhos Futuros . . . . .</b>	<b>65</b>
	<b>REFER~ENCIAS . . . . .</b>	<b>66</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

A geração de energia elétrica no Brasil é majoritariamente através das usinas hidrelétricas, chegando a 55,3% do total durante o ano de 2021, o que faz com que uma porção relevante da potência gerada se encontre distante dos principais centros consumidores. Por isto, o país dispõe de mais de 170 mil quilômetros de Linhas de Transmissão (EPE, 2022a).

Por conseguinte existe a necessidade de uma quantidade proporcionalmente elevada de Subestações de Energia, que são instalações de alta potência as quais direcionam e controlam o fluxo energético, transformando os níveis de tensão, para atender os consumidores.

Figura 1 – Entrada de linha em uma subestação de energia.



Fonte: Quantum (2021).

O avanço contínuo do setor de comércio e serviços do país tem alavancado o crescimento do consumo de eletricidade da classe comercial, onde o consumo de energia elétrica desta classe expandiu 11,3% em maio de 2022 em relação a maio de 2021. Conforme os dados mais atualizados da Pesquisa Mensal de Serviços (PMS/IBGE), o setor de serviços no Brasil cresceu 9,4% em abril deste ano comparado com abril de 2021 (EPE, 2022b).

Diante desta crescente demanda de energia para atender diversos setores do Brasil nos últimos anos, encontra-se a necessidade de novos investimentos na geração e transmissão, e conseqüentemente na construção de novas subestações e linhas de transmissão, a fim de manter um sistema tão complexo fortemente conectado.

Ao avaliar este cenário verifica-se a importância de projetos executivos para expansão do



sistema energético brasileiro; um elemento principal para elaboração deste, são os cabos condutores e para-raios juntamente com suas características de instalação, amparidade e esticamento. Para determinação dos cabos a serem empregados nas subestações e linhas de transmissão é necessário seu dimensionamento elétrico e mecânico. Neste trabalho o foco será o dimensionamento mecânico para barramentos flexíveis em subestações, relacionando com esticamento de cabos e ancoragem em estruturas. Sendo assim, são abordados os esforços estáticos e dinâmicos, que ocorrem devido à tração, peso, incidência de vento e/ou curto circuito.

## 1.2 Justificativa

O dimensionamento dos barramentos flexíveis é um procedimento laborioso, além de ser bastante complexo com diversos cálculos, iterações e consultas a quadros e tabelas com especificações dos condutores e para-raios, a fim de adequar a escolha da demanda de projeto em questão. Em face do exposto, o trabalho proposto visa a explanação da metodologia necessária para o dimensionamento eficaz e automatizado dos barramentos flexíveis.

A motivação parte pela observação de uma carência de orientação completa para esse dimensionamento de esforços na bibliografia. Além disso nota-se que as ferramentas computacionais atualmente existentes para uso profissional possuem alto valor de aquisição. Ademais, levantou-se que as ferramentas utilizadas não contemplam o fator de peso nas cadeias de ancoragem, fator este que varia de acordo com a demanda de cada projeto. Portanto, foi desenvolvida uma ferramenta com potencial comercial, condensando os métodos expostos em normas técnicas vigentes e artigos técnicos.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo Geral

O desenvolvimento deste trabalho tem como objetivo geral o aprofundamento e aplicação de conhecimentos relacionados a linhas de transmissão e subestações de energia em alta tensão, presentes no sistema de energia elétrica brasileiro, enfatizando o dimensionamento eletromecânico completo de esforços e tabelas de esticamento para barramentos flexíveis aplicado em subestações. Existem similaridades entre o princípio para metodologia do dimensionamento para linhas de transmissão e para subestações, entretanto dado momento

particularidades individuais devem ser evidenciadas, como a influência de angulação, estruturas vante e ré e variedades de estruturas no caso das linhas de transmissão, por exemplo. Já para subestações observa-se a influência das cadeias de isoladores e distribuição de peso em vãos desnivelados. Dessa maneira se fez necessário realizar a metodologia separadamente, ou seja, para desenvolvimento de uma ferramenta prática e eficaz, propõe-se o dimensionamento eletromecânico de barramentos flexíveis para subestações de energia.

Para isso, pretende-se demonstrar os cálculos e metodologia para dimensionamento e definição de esforços para instalação e orientação para escolha de estruturas de ancoragem dos cabos, a fim de embasar a aplicação de uma metodologia unificada e sua implementação computacional, automatizando o projeto, visto que as soluções atuais no mercado possuem alto valor de aquisição e apresentam distinções nos métodos utilizados.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Pesquisas e revisão bibliográfica acerca dos temas “Dimensionamento de Barramentos Flexíveis”, “Subestações de Alta Tensão” e “Dimensões e Esforços”;
- Apresentar a metodologia aplicada para dimensionamento e justificativa na escolha dos barramentos a serem aplicados em subestações de energia
- Agrupar e discernir especificações técnicas e informações a respeito dos barramentos flexíveis existentes e mais utilizados no mercado de energia no Brasil atualmente, a fim de dispor de um acervo para aplicação do dimensionamento;
- Implementar uma solução em *software* que consiga automatizar o dimensionamento de barramentos flexíveis e realizar análise de viabilidade;
- Validar os resultados obtidos e realizar comparações com soluções existentes no mercado;

## 1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho realizado está estruturado em cinco capítulos. O presente capítulo destina-se na realização de uma contextualização, sobre o tema abordado neste documento, a justificativa no qual foi embasada a proposta desenvolvida e por fim os objetivos gerais e específicos.

No segundo capítulo será apresentado uma abordagem, através de revisão da bibliografia, sobre subestações de energia, aplicando o conceito de barramentos flexíveis e sua utiliza-

ção em projetos executivos da área; também será apresentada a metodologia e cálculos necessários para dimensionamento eletromecânico de cabos condutores em projetos para tensões entre 69kV e 230kV.

No terceiro capítulo, complementa-se as pesquisas realizadas para determinar uma metodologia para o presente trabalho. Portanto, nesse capítulo serão explicitados as etapas nos quais foram divididas a estrutura do trabalho, detalhando as atividades alocadas em cada etapa.

No quarto capítulo apresentam-se os resultados obtidos em simulações realizadas com valores reais já utilizados em projetos executivos existentes para as subestações de Campina Grande II e Colatina II, elaborados pela empresa de projetos Petra Engenharia, empresa de atuação do autor, exemplificando as métricas, análises e realizando comparações e críticas.

Por fim, o quinto capítulo aborda as considerações finais, incluindo uma síntese do que foi realizado no trabalho, trazendo conclusões, considerações e sugestões para possíveis trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A geração de energia elétrica no Brasil ocorre de maneira predominante através de seu potencial hidráulico, por meio de hidrelétricas, com aproximadamente 62% do total durante o ano de 2020. Portanto uma grande parcela da energia é gerada afastada dos grandes centros consumidores e, por isto, se faz a necessidades de linhas de transmissão para realizar esse transporte, no final de 2020 o Brasil alcançou a marca de 162,1 mil km de extensão no sistema de transmissão (MME, 2021).

Em consequência disso, é necessário um número proporcional de subestações elétricas (SEs) de transmissão, responsáveis pela transformação da tensão, proteção, interligação, controle e supervisão do SIN (JUNIOR, 2021).

A crescente demanda de energia elétrica existente no Brasil exige constante ampliação das instalações, através disso inicia-se a fase de idealização das implantações, composta por diversas etapas, como: obtenção de licenças ambientais e de instalação, projeto básico, projeto executivo, contratação de fornecedores dentre outros (JUNIOR, 2021).

Os projetos eletromecânicos estão incorporados ao projeto executivo para construção e/ou ampliação de uma subestação. Segundo McDonald (2013), o projeto eletromecânico pode ser dividido nas seguintes Disciplinas de projetos:

- Arranjo Físico;
- Requisitos para estruturas;
- Rede de Aterramento;
- Rede de Cabos;
- Detalhes de instalação de equipamentos;
- Iluminação de pátio;
- Instalações prediais.

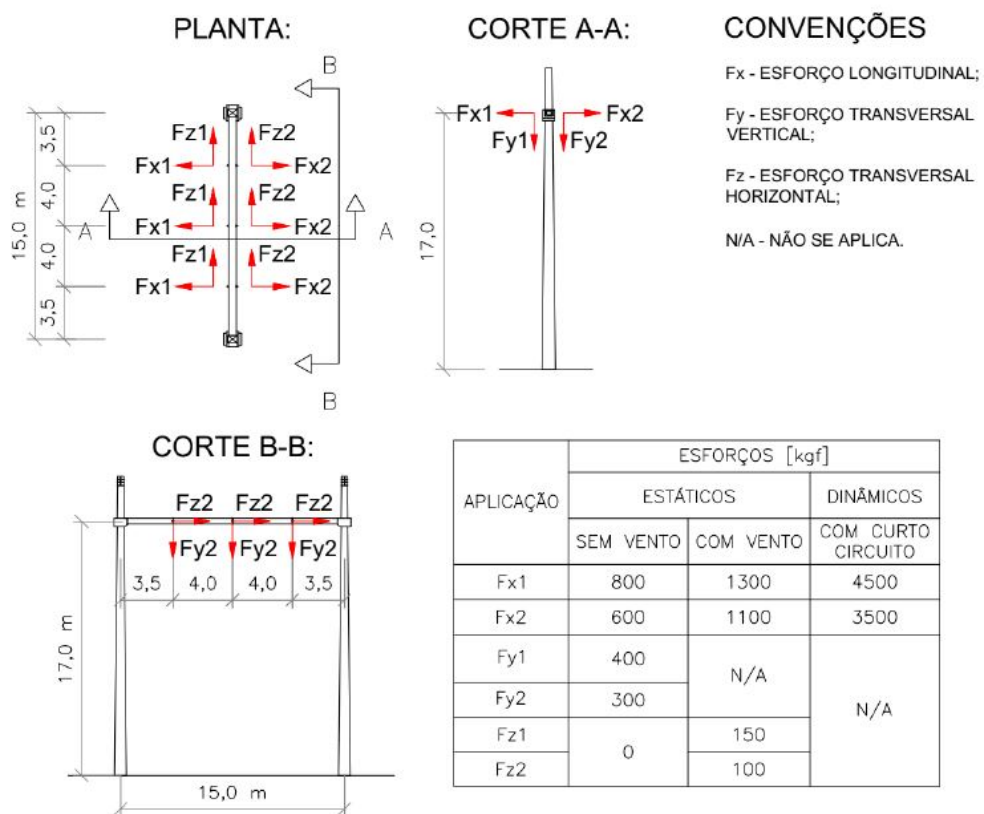
No arranjo físico de uma subestação existem níveis de instalação de barramentos, sendo que em instalações superiores e suas derivações habitualmente são empregados os barramentos flexíveis. Para instalações inferiores e intermediárias, para interligação entre os equipamentos dentre outros pode-se utilizar barramentos flexíveis ou rígidos, essa escolha

dependerá de alguns fatores como: custo agregado, distância entre suportes, parâmetros elétricos, normativas técnicas da transmissora, dentre outros.

Neste projeto serão evidenciados os cálculos realizados para se obter os documentos referentes à tabela de esticamento que pertence a Disciplina de Arranjo Físico e também documentos referentes ao diagrama de esforços que pertence a Disciplina de Requisitos de Estruturas. Eles se conectam, pois, de posse da tabela de esticamento de cabos advinda do dimensionamento de barramentos flexíveis e possível estipular e projetar as estruturas suportes que ancoram os mesmos.

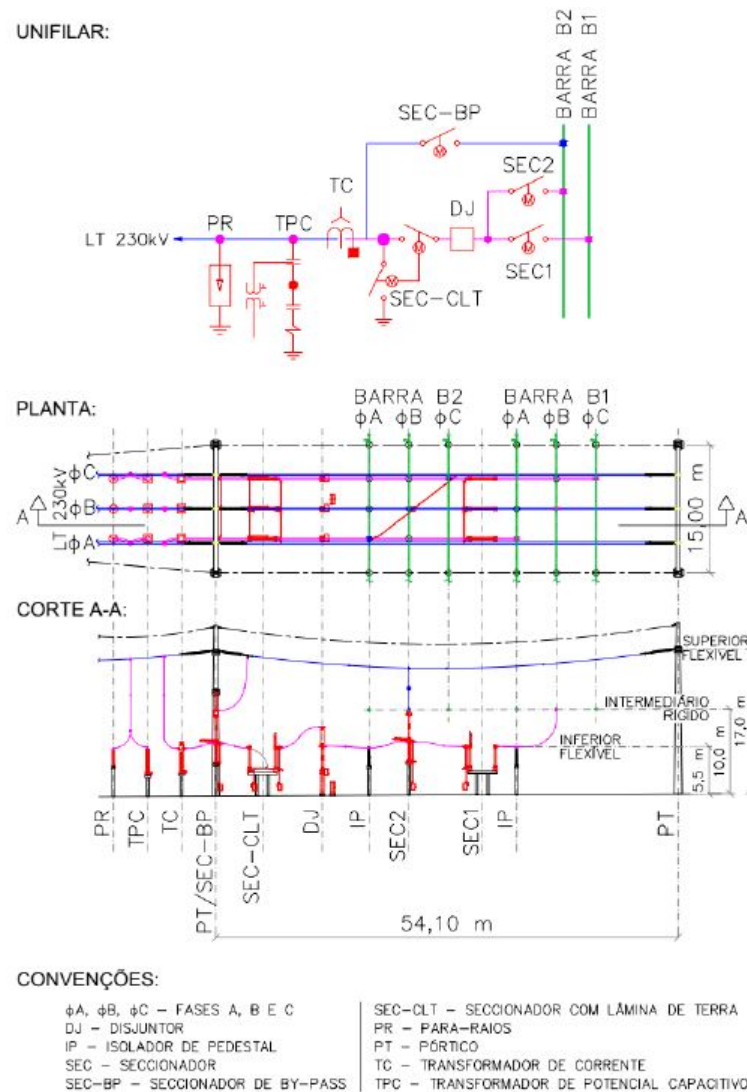
Na Figura 2 é ilustrado apresentação de projeto de requisitos de estruturas, por meio do diagrama de esforços, os valores definidos na tabela presente na figura são arbitrários. Por conseguinte, na Figura 3, é exemplificado um vão de entrada de linha de transmissão (LT) 230kV em uma subestação, através do diagrama unifilar, planta e corte do arranjo físico, onde é possível verificar os níveis de instalação dos barramentos. Como citado anteriormente após o dimensionamento eletromecânico do esticamento do barramento é possível produzir esse documento de projeto e a metodologia de cálculo para determinação dos esforços deve constar no memorial cálculo do projeto.

Figura 2 – Representação de diagrama de esforços.



Fonte: Junior (2021)

Figura 3 – Diagrama unifilar e arranjo físico de uma entrada de LT 230 kV na SE.



Fonte: Junior (2021)

É importante verificar a viabilidade técnica-finaceira para realizar o dimensionamento de estruturas, bem como sua relação com a segurança do empreendimento.

As estruturas de suporte e suas fundações representam uma pequena porcentagem dos custos totais de uma subestação. Entretanto, para otimizar os gastos é necessário que o dimensionamento destes componentes seja correto. As estruturas sobredimensionadas representam gastos desnecessários ao empreendimento, enquanto que estruturas subdimensionadas representam um risco à integridade da instalação e ao sistema elétrico ao qual a subestação se conecta (SILVA, 2018).

Desse modo o dimensionamento de barramentos flexíveis a fim de atender essa demanda de projeto se torna a premissa para produção dos documentos do projeto eletromecânico executivo de subestações, despertando relevância por se tratar de um documento obrigatório

para concessionárias contratantes e inevitabilidade de inovações para que seja possível otimizar sua elaboração e acurácia.

## 2.1 Barramentos Flexíveis

Para que ocorra com segurança o processos desempenhados por uma subestação, é indispensável que, em seu interior, a rede de alta tensão não seja conectada diretamente ao transformador de potência, sendo necessário sua passagem por um conjunto de outros equipamentos, como chaves seccionadoras, transformadores de corrente, transformadores de tensão, disjuntores, para-raios, garantindo integridade as instalações no caso de alguma falta que colocaria em risco a subestação, além de auxiliarem no fluxo de potência da mesma (FONSECA, 2009).

Dessa forma, o transporte da energia até a chegada na subestação dado através das linhas de transmissão, bem como a sua passagem pelos transformadores de potência e demais equipamentos existentes nas subestações, são dadas/conectadas através de barramentos, que podem ser classificados como rígidos ou flexíveis. O presente trabalho foi desenvolvido através da análise do dimensionamento exclusivamente de barramentos flexíveis.

Segundo Salengue (1974), no âmbito de instalações elétricas, entende-se por barramento um grupo de condutores elétricos, normalmente nus, pintados ou não, eventualmente encapsulados, designados para transportar altas correntes em dois ou mais pontos, ocasionando a distribuição de correntes com múltiplas alimentações e diversas saídas.

Se tratando de subestações de alta tensão e linhas de transmissão, utiliza-se normalmente cabos nus, que por sua vez possuem alguns pontos negativos. Uma vez que são maleáveis, estão sujeitos a esforços eletrodinâmicos provenientes do vento/chuva e curto circuito, sendo necessário maior distanciamento entre fases para garantir a segurança, além disso é necessário avaliar a distância de segurança cabo-solo, devido as flechas ocasionadas pelo esticamento do barramento. Essas características podem afetar principalmente instalações com espaço limitado, corroborando a importância de um preciso dimensionamento e projeto executivo para tal evento.

Em contrapartida a utilização de barramentos flexíveis facilita a interligação de pontos de maior distância com menor número de estruturas possível, além do fato que possuem menor valor aquisitivo quando comparados aos barramentos rígidos.

De acordo com Mamede (2021), os barramentos flexíveis presentes nestes cenários, são

normalmente de alumínio, com capacidade definida pela corrente nominal do circuito, transferência de calor e pelos esforços mecânicos de tração. A Figura 4 ilustra essa classe de barramento instalados em estruturas autoportantes compondo uma linha de transmissão.

Figura 4 – Barramento flexível representado em linha de transmissão.



Fonte: Machado (2018)

Normalmente são utilizados cabos de alumínio com alma de aço (CAA) em linhas de transmissão, visto sua maior resistência mecânica sendo aplicada a maiores vãos. Por outro lado o cabo de alumínio nu (CA), têm a vantagem de possuir maior capacidade de corrente e são menos pesados quando comparados a seus equivalente em CAA, sendo comumente utilizados em subestações.

## 2.2 Comportamento Cabos Suspensos

Os condutores em vãos de subestações são considerados suficientemente flexíveis quando os pontos de suspensão/ancoragem estejam afastados entre si, denotando formato de curva semelhante à forma característica de catenária. É aceitável desprezar o efeito concentrado das cadeias de isoladores para vão longos, porém para vão menores, normalmente em subestações as cadeias de isoladores podem se tornar fatores relevantes para o dimensionamento eletromecânico.

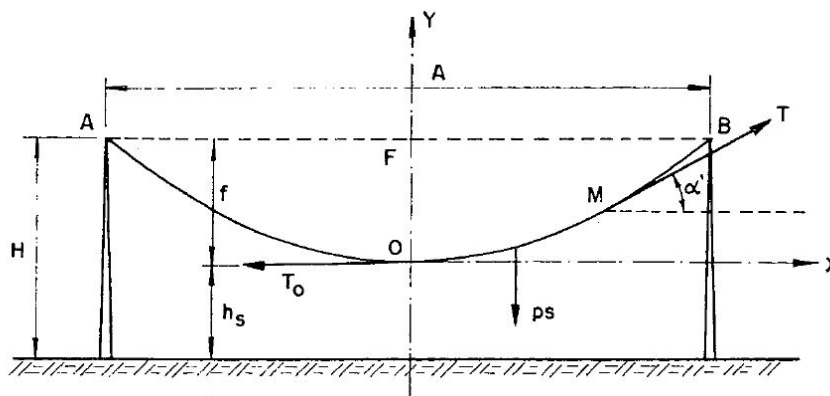
### 2.2.1 Cabos Suspensos em Vão Nivelados

Considera-se a Figura 5, que representa um condutor suspenso em duas estruturas de mesmo altura, separados por uma distância  $A$ . A distância  $A$  representa a distância entre os suportes, denominada vão. Nesta figura, a distância  $OF$  representa a flecha gerada pelo esticamento do cabo, diretamente ligada com a relação da altura de suspensão ( $H$ ) e com



a distância do vértice da curva ao solo ( $h_s$ ). A flecha depende da temperatura de operação do cabo, tamanho do vão, tração aplicada ao condutor em sua fixação ao suporte, sendo que a altura  $h_s$  é determinada por norma, visando segurança no dimensionamento.

Figura 5 – Condutor suspenso em dois suportes de mesma altura.



Fonte: Fuchs, Labegalini e Almeida (1992)

Considera-se M um ponto qualquer da catenária limitando o comprimento do condutor  $OM = s$ . Essa parcela do condutor estará em equilíbrio sob a ação das forças atuando sobre o mesmo. A força é representada pelo peso do condutor  $p_s$ , a tração indicada no ponto O é denominada  $T_o$  e cuja sua direção é tangente a curva no ponto O.

É visto que a força T equilibra as demais, sendo representada pela reação da estrutura os sistema de forças em atuação demonstrados na Figura 6. A força T representa a tração axial aplicada ao cabo, cuja sua direção é tangente à curva no ponto M, fazendo com a horizontal um ângulo representado por  $\alpha$ , por normas de seguranças existem limitações quanto aos esforços admissíveis nos condutores ocasionada pela tração T, como é visto na norma NBR 5422/85 (FUCHS; LABEGALINI; ALMEIDA, 1992).

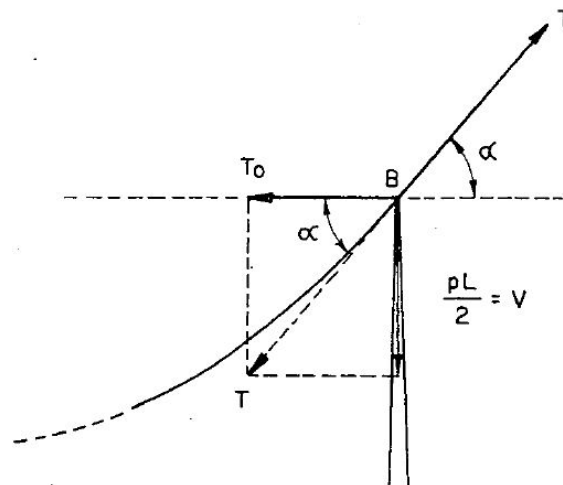
Dessa forma é possível extrair da análises de forças atuantes as Equações (2.1)-(2.4) para cabos suspensos sobre vão nivelados. Ressalta-se que as equações extraídas da literatura serão aplicadas na metodologia assumindo a confiabilidade e validação das mesmas na bibliografia.

$$\text{Força de Tração : } T = \frac{T_0}{\cos(\alpha)} \quad (2.1)$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{p \cdot L}{8 \cdot T_0}\right) \quad (2.2)$$

$$\text{Flecha : } f = \frac{p_s \cdot A^2}{8 \cdot T_0} \quad (2.3)$$

Figura 6 – Forças atuantes na estrutura suporte.



Fonte: Fuchs, Labegalini e Almeida (1992)

$$\text{Comprimento do Cabo : } L = A + \frac{8f^2}{3A} \quad (2.4)$$

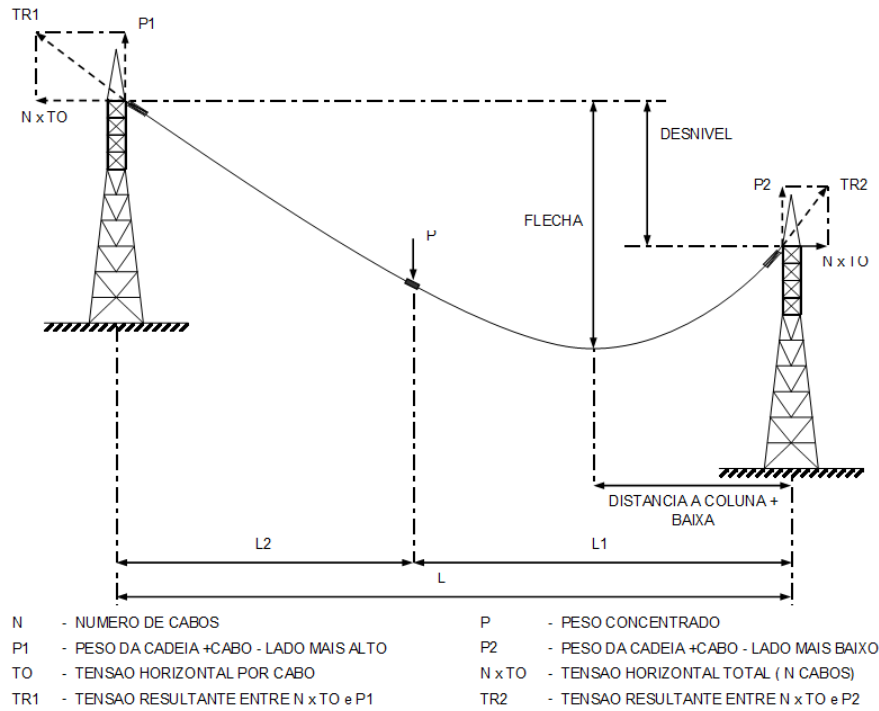
Onde:

- $T_0 \rightarrow$  Componente horizontal de tração axial do condutor;
- $\alpha \rightarrow$  Ângulo vertical entre a força de tração axial T com uma horizontal;
- $L \rightarrow$  Comprimento do cabo;
- $p_s \rightarrow$  Peso do condutor;
- $A \rightarrow$  Distância entre duas estruturas genéricas;

### 2.2.2 Cabos Suspensos em Vão Desnívelados

Existem situações que são mais frequentes em linhas de transmissão, onde a distância entre os vãos são maiores e existem modificações do nivelamento do terreno. Usualmente subestações possuem terreno terraplanado e nivelado, entretanto vãos desnivelados também podem ser encontrados como por exemplo, na interligação entre setores com tensões diferentes, obtendo uma conexão entre estruturas suportes com diferentes alturas. A Figura 7 traz a representação para interligação de estruturas desniveladas e suas variáveis relacionadas.

Figura 7 – Cabo suspenso entre suportes com alturas diferentes.



Fonte: Produção do próprio autor.

Dessa maneira deve ser prolongada a curva até o ponto onde a catenária teria a forma de um vão nivelado, esse novo vão é nomeado de vão equivalente e através dele o equacionamento é reformulado obtendo novas equações para flechas, comprimento do cabo e forças, como pode ser visto nas Equações (2.5)-(2.10).

$$T_A = \frac{A_e^2 * p^2}{8T_0} \quad (2.5)$$

$$A_e = A + \frac{2hT_0}{A * p} \quad (2.6)$$

$$T_B = T_0 + p * \left( \frac{A_e^2 * p}{8.T_0} - h \right) \quad (2.7)$$

$$L = \sqrt{B^2 + A^2 * \left( 1 + \frac{A^2}{12C_1^2} \right)} \quad (2.8)$$

$$f_s = \frac{A^2 * p}{8T_0} \quad (2.9)$$

$$f_0 = f_s * \left( 1 - \frac{B}{4f_s} \right)^2 \quad (2.10)$$

Onde:

- $T_A$  → Componente de força axial no suporte A (superior);
- $T_B$  → Componente de força axial no suporte B (inferior);
- $A_e$  → Vão nivelado equivalente;
- $p$  → Peso do condutor;
- $h$  → Desnível entre os suportes;
- $A$  → Distância entre as estruturas suporte;
- $T_o$  → Componente horizontal de tração axial do condutor;
- $B$  → Largura da base da estrutura suporte;
- $C_1$  → Distância da coluna mais baixa;
- $f_s$  → Componente de flexa horizontal para vãos denivelados;
- $f_o$  → Flecha máxima em um vão desnivelado;

### 2.3 Influência de Agentes Externos

Além dos esforços analisados na seção 2.4, que podem ser considerados permanentes, é exigido dos condutores suspensos esforços considerados transitórios, onde os mesmos transmitem esses esforços para as estruturas nos quais estão fixados. Para o projeto de dimensionamento eletromecânico deve-se considerar qualquer esforço aplicado sobre os cabos, independente de sua frequência.

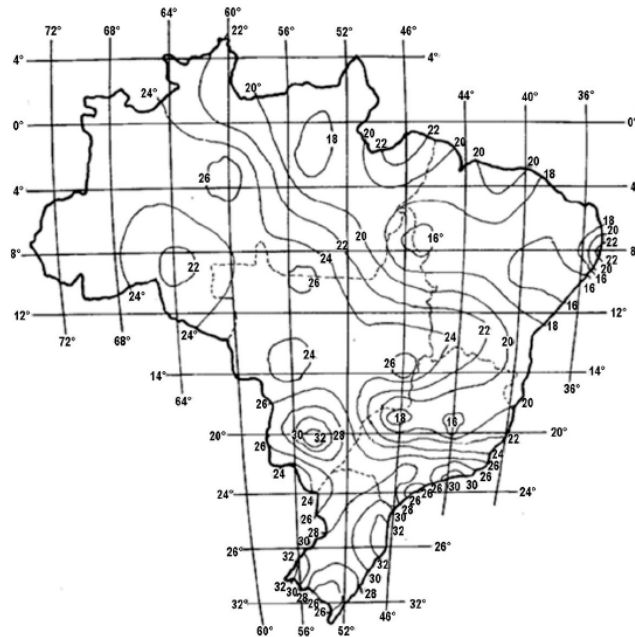
A força resultante devido a fatores meteorológicos ocorrem com certa frequência e ao longo de toda a utilização da linha de transmissão ou subestação. Periodicamente, em etapas de manutenção, os cabos podem ser solicitados por forças adicionais que devem ser previstas em projeto. Não menos importante, situações inesperadas também podem ocorrer, como a ruptura de algum cabo que pertence a linha de transmissão. Portanto para dimensionamento eficaz do barramento flexível deve-se atentar a diversas adversidades, para isso, o projetista conta com normas regulamentadoras precisas quanto a forma que é necessário conduzir os cálculos de esforços em dadas situações (FUCHS; LABEGALINI; ALMEIDA, 1992).

### 2.3.1 Efeitos do Vento

Os cabos suspensos são expostos a pressão dos ventos, que é proporcional à velocidade do vento encontrado na região, tendo como resultante uma força perpendicular ao eixo longitudinal dos condutores, que é repassada as estruturas suporte. Existem fatores que influenciam na determinação dessa força de arrasto, como a característica do terreno, características da instalação, grau de segurança e velocidade do vento (JUNIOR, 2021).

De acordo com a Associação Brasileira de Normas ABNT (1985), através da NBR 5422, pode-se obter gráficamente a velocidade do vento  $V_0$  para localidades no Brasil, conforme é visto na Figura 8.

Figura 8 – Mapa de isopletas, para determinação de  $V_0$  em  $m/s$ .



Fonte: NBR 5422 (ABNT, 1985).

Realizando a análise considerando como  $d$  o diâmetro dos cabos, a força resultante para a pressão ocasionada pelo vento se dá pela Equação (2.11):

$$f_v = q_o * d = \frac{1}{2} * \rho * V_p^2 * d \quad (2.11)$$

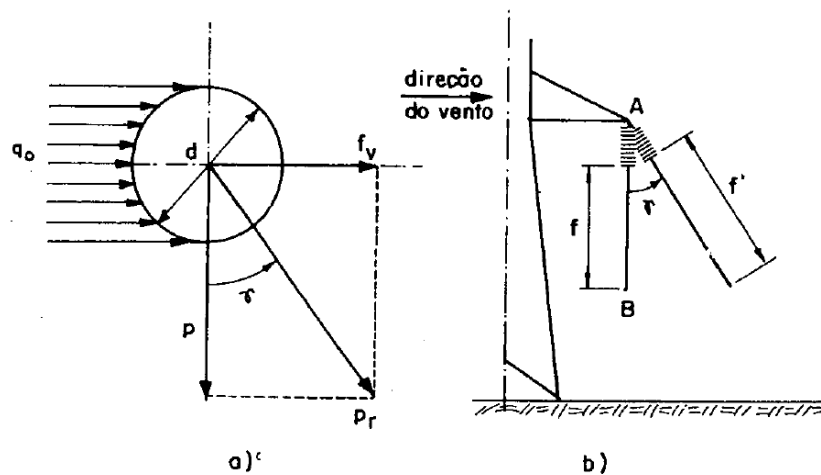
onde:

- $f_v \rightarrow$  Força de vento por unidade de comprimento;

- $q_o \rightarrow$  Pressão dinâmica do vento;
- $d \rightarrow$  Diâmetro do cabo condutor ou para-raio;
- $V_p \rightarrow$  Velocidade do vento de projeto;
- $\rho \rightarrow$  Massa específica do ar.

A força de vento ( $f_v$ ) se distribui uniformemente pelo condutor, sendo aplicada na horizontal. O peso dos cabos causa influência de esforço na vertical, a Figura 9 mostra o efeito do peso nos condutores e sua relação angular com que se comporta a catenária em relação ao plano que passa pelas estruturas de suporte.

Figura 9 – Efeito do vento sobre os condutores.



Fonte: Fuchs, Labegalini e Almeida (1992).

Onde:

- $p \rightarrow$  Peso do cabo condutor ou para-raio;
- $\gamma \rightarrow$  Ângulo que um cabo, sob a ação do vento, faz com a vertical (balanço da cadeia);
- $p_r \rightarrow$  Peso relativo do cabo sob a ação do vento;
- $f \rightarrow$  Flecha de um cabo suspenso;
- $f' \rightarrow$  Flecha de um cabo suspenso sob ação do vento.

Sendo aplicado o próprio peso do condutor e a força do vento de maneira simultânea, a catenária sofre um acréscimo de peso. Em consequência disso as trações nos cabos também aumenta ocasionando um novo equacionamento para a flecha máxima da catenária, como indicado nas Equações (2.12) e (2.13).

$$p_r = \sqrt{p^2 + f_v^2} \quad (2.12)$$

$$f' = \frac{p_r * A^2}{8T_{02}} \quad (2.13)$$

Onde:

- $T_{02} \rightarrow$  Novo valor de componente horizontal da tração nos cabos.

É importante ressaltar que a força resultante horizontal transmitida para a estrutura suporte depende se os vãos são nivelados ou não, sendo expressas pelas Equações (2.14) e (2.15).

$$\text{Vãos Nivelados} \rightarrow F_v n = \frac{A * f_v}{2} \quad (2.14)$$

$$\text{Vãos Desnivelados} \rightarrow F_v d = \frac{A * f_v}{2 \cos \psi} \quad (2.15)$$

Onde:

- $F_v n \rightarrow$  Força resultante horizontal transmitida à estrutura devido efeito do vento em vãos nivelados;
- $F_v d \rightarrow$  Força resultante horizontal transmitida à estrutura devido efeito do vento em vãos desnivelados;
- $\psi \rightarrow$  Ângulo que um cabo, sob a ação do vento, faz com a horizontal (balanço da cadeia).

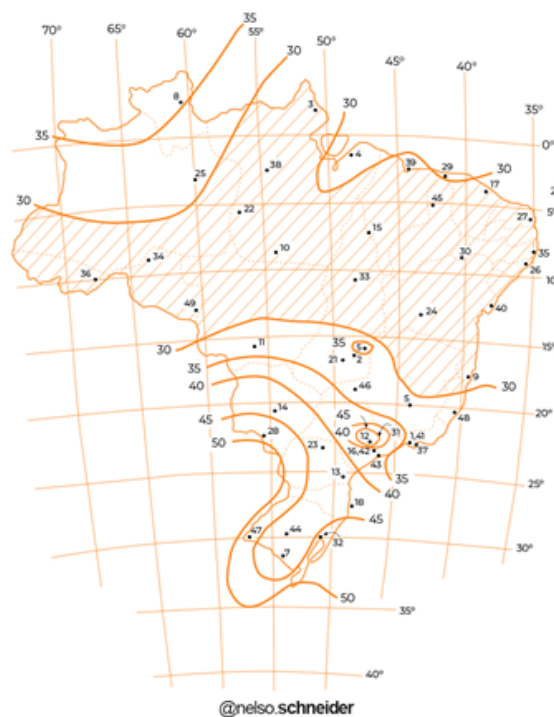
Para complementar a metodologia de dimensionamento proposta devida a influência do vento sob o lançamento de cabos condutores e para-raios, busca-se incorporar à metodologia descrita na NBR 5422 de 1988 e reforçada na obra de Fuchs, Labegalini e Almeida (1992)

o método utilizado na norma NBR 6123 de 1988, que aborda as forças devidas ao vento em edificações.

### 2.3.1.1 Método da norma NBR 6123:1988

De acordo com a norma ABNT NBR 6123 de 1988 considera que a velocidade básica do vento corresponde à velocidade de uma rajada com duração de 3 segundos, superado em média uma vez em 50 anos em uma altura de 10 metros em relação ao terreno, tendo em consideração local aberto e plano. Diante disso a norma define a velocidade característica do vento ( $V_k$ ), como um produto de fatores com a velocidade básica do vento ( $V_o$ ) extraída do mapa de isopletras, conforme Figura 10, para regiões do Brasil. Sendo assim têm-se a Equação (2.16) para cálculo de  $V_k$ .

Figura 10 – Mapa de isopletras, para determinação de  $V_o$  em  $m/s$ .



Fonte: Adaptado de NBR 6123 (ABNT, 1988).

$$V_k = V_o * S_1 * S_2 * S_3 \quad (2.16)$$

Onde:

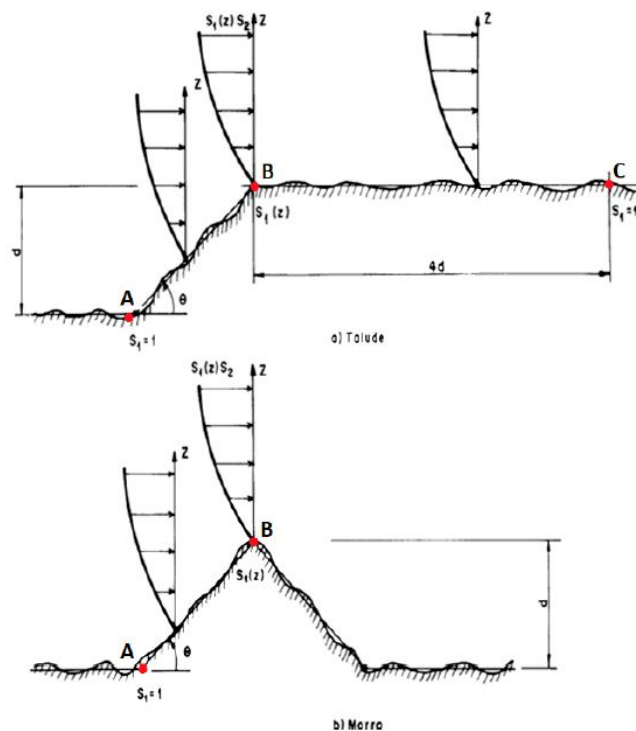
- $S_1$  → Fator topográfico;



- $S_2 \rightarrow$  Rugosidade do terreno;
- $S_3 \rightarrow$  Fator estatístico.

Na equação (2.16), o fator  $S_1$  corrige a velocidade de vento em função da topografia do terreno. Considera-se  $S_1 = 1$ , quando temos terreno consideravelmente planos, tais como os terrenos onde normalmente são construídas as subestações; por outro lado quando existe talude e morros deve ser interpretado conforme a Figura 11.

Figura 11 – Consideração de taludes e morros para cálculo do fator topográfico.



Fonte: Adaptado de NBR 6123 (ABNT, 1988).

Na condição de protegido em todas as direções, como em um vale profundo, adota-se o valor de 0,9. Para situações diferentes das citadas,  $S_1$  deve ser calculado conforme a Expressão (2.17).

$$S_1(z) = \begin{cases} 1 & , \theta \leq 3^\circ \\ 1 + (2,5 - \frac{z}{d_1}) * \text{tg}(\theta - 3^\circ) & , 6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ \\ 1 + (2,5 - \frac{z}{d_1}) * 0,31 & , \theta \geq 45^\circ \end{cases} \quad (2.17)$$

Onde:

- $\theta \rightarrow$  Ângulo médio de inclinação do talude ou morro;

- $z \rightarrow$  Altura de instalação do cabo, em relação à superfície do terreno;
- $d_1 \rightarrow$  diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro.

O fator  $S_2$  que representa a rugosidade do terreno que depende da variação da velocidade do vento, altura de instalação e dimensões da estrutura, é determinado pela Equação (2.18):

$$S_2 = b * F_r * \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (2.18)$$

Sendo  $F_r$  o fator rajada, que é sempre corresponde à categoria II.

Para definir o valor de  $S_2$  é necessário tipificar o terreno no qual está sendo a instalação, conforme Tabela 1, bem como identificar a classe do objeto através da Tabela 2. Os parâmetros  $b$  e  $p$  são parâmetros meteorológicos para ajuste do fator em função do período de integração, a Tabela 3 apresentam os valores para o tempo de 3s.

Tabela 1 – Categoria de rugosidade do terreno.

Categoria	Classificação
I	Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente. Exemplos: mar calmo; lagos e rios; pântanos sem vegetação.
II	Terrenos abertos em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. Exemplos: zonas costeiras planas; pântanos com vegetação rala; campos de aviação; pradarias e charnecas; fazendas sem sebes ou muros. Obs: cota média dos obstáculos considerada inferior ou igual a 1 m.
III	Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. Exemplos: granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos; fazendas com sebes e/ou muros; subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas. Obs: cota média dos obstáculos considerada igual a 3 m.
IV	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. Exemplos: zonas de parques e bosques com muitas árvores; cidades pequenas e seus arredores; subúrbios densamente construídos de grandes cidades; áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas. Obs: cota média dos obstáculos considerada igual a 10 m.
V	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. Exemplos: florestas com árvores altas, de copas isoladas; centros de grandes cidades; complexos industriais bem desenvolvidos. Obs: cota média dos obstáculos considerada igual ou superior a 25 m.

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988).

Tabela 2 – Classe do objeto quanto às dimensões.

Classe	Classificação
A	Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20.
B	Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical esteja entre 20 m e 50 m.
C	Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical exceda 50.

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988).

Tabela 3 – Parâmetros meteorológicos.

Categoria	Parâmetro	Classe A	Classe B	Classe C
I	$b$	1,100	1,110	1,120
	$p$	0,060	0,065	0,070
II	$b$	1,000	1,000	1,000
	$F_r$	1,000	0,980	0,950
III	$p$	0,060	0,065	0,070
	$b$	0,940	0,940	0,930
III	$p$	0,100	0,105	0,115
	$b$	0,860	0,850	0,840
III	$p$	0,120	0,125	0,135
	$b$	0,740	0,730	0,710
III	$p$	0,150	0,160	0,175

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988).

O fator estatístico é obtido através da Tabela 4. Para subestações de transmissão, cumulamente é empregado o valor referente ao Grupo 1 para  $S_3$ , justificado por sua alta relevância para o sistema elétrico e, conseqüentemente, para a sociedade em geral.

Tabela 4 – Fator estatístico  $S_3$ .

Grupo	Descrição	$S_3$
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva.	1,10
2	Edificações para hotéis e residências, comércio e indústria com alto fator de ocupação.	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação.	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção.	0,83

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988).

Através da velocidade característica do vento corrigida calculada a partir da Equação (2.16), calcula-se a pressão dinâmica do vento ( $q_o$ ), conforme Equação (2.19).

$$q_o = 0,613 * V_k^2 \quad (2.19)$$

### 2.3.2 Variação de Temperatura

Em uma linha de transmissão ou subestação, os cabos suspensos em vãos estão sujeitos a variações de temperatura. Essa variação pode acontecer por troca de calor com o meio, aquecimento por calor solar ou ainda devido ao estado de operação do condutor, ou seja, a corrente que circula sobre o cabo para atender a carga. Deve ser levado como fator de projeto a corrente nominal de operação e também situações de emergência para dimensionamento adequado do barramento.

Visto que o coeficiente de dilatação dos condutores possuem valores relevantes, ocorrem sobre os vão contrações e dilatações que necessitam ser levadas em consideração.

O modo mais adequado para aplicar a mudança de temperatura para a metodologia proposta é através das equações de mudança de estado, dessa forma é possível determinar o efeito do vento sobre os condutores e a variação simultânea das temperaturas.

O acréscimo na temperatura induz um aumento no comprimento do cabo, e consequentemente, redução na tração sobre ele. A variação obedece à lei de Hooke, onde diz que as deformações elásticas são proporcionais às tensões aplicadas. Portanto, a variação de temperatura do cabo provoca a variação de seu comprimento, conforme Equação (2.20).

$$L_2 - L_1 = L_1 * \alpha_t(t_2 - t_1) + \frac{L_1(T_02 - T_01)}{E * S} \quad (2.20)$$

Onde:

- $L_2$  → Comprimento do cabo à uma temperatura 2;
- $L_1$  → Comprimento do cabo à uma temperatura 1;
- $E$  → Módulo de elasticidade do cabo;
- $S$  → Área da seção transversal do cabo;

- $t_2 \rightarrow$  Temperatura de operação 2;
- $t_1 \rightarrow$  Temperatura de operação 1;
- $\alpha_t \rightarrow$  Coeficiente de expansão térmica.

A partir de então pode-se definir a variação do comprimento do condutor e aplicar na metodologia proposta com embasamento na Equação (2.21).

$$L_2 - L_1 = 2 * [(C_2 * \sinh * \frac{A}{2 * C_2}) - (C_1 * \sinh * \frac{A}{2 * C_1})] \quad (2.21)$$

Onde:

- $C_0 \rightarrow$  Comprimento do cabo após mudança de temperatura 1 -  $\frac{T_{01}}{p}$ ;
- $C_2 \rightarrow$  Comprimento do cabo após mudança de temperatura 2 -  $\frac{T_{02}}{p}$ .

### 2.3.3 Efeitos da Cadeia de Isoladores

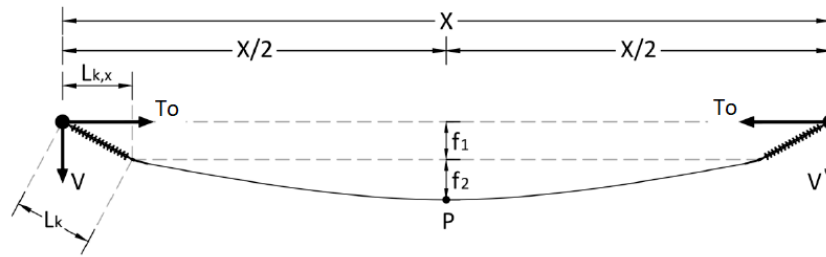
Em subestações com classes de tensão entre 69kV e 230kV, é comum a existência de vãos de barramentos flexíveis mais curtos, com comprimento inferior à 20 metros. Visto que em determinados tamanhos de vãos o peso do cabo é muito maior do que o peso da cadeia de ancoragem, fazendo assim com que a mesma acompanhe a flecha feita na suspensão do condutor.

Entretanto, para os vãos existentes em subestações, o peso da cadeia irá influenciar, tendo em vista que o comprimento total desta pode representar cerca de 30% do comprimento total do vão. Apresenta-se então um método para acrescentar a influência das cadeias como cargas concentradas (JUNIOR, 2021).

Na Figura 12 pode ser visualizado o comportamento da catenária desenvolvida pelo cabo após seu lançamento com a influência da cadeia de isoladores e suas forças atuantes. Devido à suportação nivelada, a componente  $V$  se resume à metade do peso no barramento pelo condutor; portanto temos a Equação (2.22) para cáculo desta componente.

$$V = \frac{1}{2} * [m_s * g * (X - 2L_k) + G_k] \quad (2.22)$$

Figura 12 – Vão de barramento nivelado com cadeias de isoladores.



Fonte: Junior (2021).

Onde:

- $V \rightarrow$  Componente vertical de força axil devido a cadeia de isoladores;
- $m_s \rightarrow$  Densidade linear do subcondutor
- $g \rightarrow$  Aceleração da gravidade;
- $X \rightarrow$  Comprimento do vão;
- $L_k \rightarrow$  Projeção horizontal do comprimento da cadeia de isoladores;
- $G_k \rightarrow$  Peso da cadeia de isoladores por subcondutor;
- $L_k \rightarrow$  Comprimento da cadeia de isoladores.

As Equações (2.23) e (2.24), determinam as componentes parciais que representam a flecha dada devido a cadeia de isoladores e pelo subcondutor, respectivamente. Sendo que flecha total é dada pela soma dessas componentes.

$$f_1 = \frac{V}{H} * L_k \quad (2.23)$$

$$f_2 = \frac{m_s * g * (X - 2L_k)^2}{8H} * L_k \quad (2.24)$$

Onde:

- $f_1 \rightarrow$  Flecha devido o efeito da cadeia de isoladores;
- $f_2 \rightarrow$  Flecha devido o efeito do peso dos subcondutores.

## 2.3.4 Força de Arrasto

### 2.3.4.1 Força de Arrasto ao Cabo

Deve-se considerar para efeitos de cálculos a força perpendicular ao cabo, resultado da força de arrasto e sendo dependente de seu coeficiente. Por sua vez, o coeficiente de arrasto depende do número de Reynolds e pode ser calculado pela Equação (2.25):

$$Re = 7 * 10^4 * V_k * d \quad (2.25)$$

O resultado se relaciona com o coeficiente de arrasto conforme a Tabela 5. Posteriormente a Equação (2.26) é empregada para obter a componente da força perpendicular ao cabo.

Tabela 5 – Número de Reynolds para cabos.

Número de Reynolds	$C_a$ para cabos $\frac{r'}{d_s} \leq \frac{1}{30}$	$C_a$ para cabos $\frac{r'}{d_s} \geq \frac{1}{25}$
$Re \leq 25000$	1,2	1,3
$42000 < Re$	0,9	1,1

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988).

$$F_y = C_a * q_o * L * d * \text{sen}^2 \alpha_1 \quad (2.26)$$

Onde:

- $F_y$  → Força de arrasto perpendicular a cabo;
- $C_a$  → Coeficiente de arrasto do cabo;
- $q_o$  → Pressão dinâmica do vento;
- $L$  → Comprimento do cabo;
- $d$  → Diâmetro do cabo;
- $\alpha_1$  → Ângulo de incidência do vento com relação ao condutor.



## 2.3.4.2 Força de Arrasto à Cadeia de Ancoragem

É possível obter a força de arrasto aplicada a cadeia de ancoragem ao aproximar seu modelo a uma barra prismática de seção circular, dada pela Equação (2.27):

$$F_i = C_{ai} * q_o * K * d_i * L_i \quad (2.27)$$

Onde:

- $F_i$  → Força de arrasto perpendicular a cadeia de isoladores;
- $C_{ai}$  → Coeficiente de arrasto dos isoladores;
- $K$  → Coeficiente que relaciona  $\frac{L_i}{d_i}$
- $L_i$  → Comprimento da cadeia de isoladores;
- $d_i$  → Diâmetro do isolador.

O coeficiente de arrasto para os isoladores também se relaciona com o número de Reynolds através da Tabela 6, que deve ser analisada para aplicação da expressão (2.27).

Tabela 6 – Número de Reynolds para isolador.

Número de Reynolds	Coeficiente de Arrasto $C_{ai}$
$Re < 4,2 * 10^5$	1,2
$4,2 * 10^5 \leq Re \leq 8,4 * 10^5$	0,6
$8,4 * 10^5 \leq Re \leq 2,3 * 10^6$	0,7
$2,3 * 10^6 \leq Re$	0,8

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988).

## 3 METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

### 3.1 Metodologia Adotada

Considera-se como etapa principal do presente trabalho a etapa de desenvolvimento da metodologia de dimensionamento com embasamento em normas regulamentadoras e artigos técnicos, onde foi possível:

- Inserção de dados iniciais importantes para o projeto, extraídos de tabelas e ábacos, como parâmetros construtivos e especificações de cabos condutores, dados de estruturas utilizadas em suspensão de cabos;
- Desenvolvimento da ferramenta computacional para dimensionamento eletromecânico de barramentos flexíveis através do *software* MATLAB.

Como descrito acima foi nesta etapa onde ocorreu efetivamente a produção da ferramenta de dimensionamento eletromecânico de barramentos, para isso foi necessário seguir um roteiro de projeto adequado, a fim de potencializar os resultados da ferramenta. Assim, foi necessário seguir os métodos descritos a seguir:

1. Para início de projeto eletromecânico de um barramento flexível determinado foi necessário dispor principalmente do tipo e número de condutores por fase e seus devidos espaçamentos. Essas informações geralmente são determinadas através de estudos de otimização técnico-econômicas. Demais informações construtivas da cadeia de ancoragem e características da instalação do barramento são necessárias como parâmetros de entrada;
2. Foi necessário ter acesso a documentos relacionados com a topografia do local a ser realizada a instalação do novo barramento. No caso de linhas de transmissão trata-se da planta do traçado e para subestações planta com arranjo geral. Para linhas de transmissão realiza-se um levantamento topográfico prévio da sua faixa de servidão, onde será realizado um estudo de locação de estruturas. Sendo levantado também neste tópico as condições meteorológicas do local de implantação do empreendimento;
3. De posse das informações necessárias a respeito do local, foi preciso adquirir especificações técnicas de condutores e estruturas utilizadas em projeto; para isso foi realizado um levantamento de tabelas e ábacos para produção de um banco de dados contendo todas informações necessárias para os próximos passos do projeto;

4. Foi necessário produzir uma ferramenta capaz de absorver todas informações necessárias com o objetivo de, ao fim do projeto verificar se as trações aplicadas ao cabo estão aceitáveis, se o cabo utilizado pelo cliente (empresas privadas e concessionárias de energia que contraram a empresa projetista) atende e ainda no caso de projeto inicial definir as trações a serem aplicadas aos vãos das subestações. Para isso, foi desenvolvido uma rotina no *software* MATLAB, capaz de associar todas informações teóricas de cálculos para o barramento aliadas a informações físicas do local a ser projetado.

## 3.2 Algoritmo de Dimensionamento

Nesta seção são apresentados maiores detalhes do algoritmo computacional para dimensionamento eletromecânico de barramentos flexíveis de subestações, minuciando acerca dos parâmetros e variáveis de entrada, interface com usuário, rotinas de cálculos e retorno de resultados.

### 3.2.1 Parâmetros Iniciais

Considera-se parâmetros iniciais para este algoritmo os valores externos necessários para o dimensionamento eletromecânico completo do barramento flexível. A partir destes valores, foi possível alimentar variáveis internas do algoritmo para resolução dos cálculos. Para obter esses valores foi elaborado uma interface gráfica que interage com o usuário de maneira simples e prática, com sugestões de preenchimento para falhas no preenchimento dos valores.

A Figura 13 exhibe a interface criada através da ferramenta *guide* disponível no *MATLAB*, sendo possível inserir como parâmetros desejados separadamente por seção, sendo eles:

- Características do cabo: nesta seção deve ser inserido qual tipo de cabo será feito o dimensionamento. No momento é possível dimensionar cabos condutores do tipo CA, CAA e cabos para-raios tipo HS (cordoalha de aço de média resistência). Em seguida deve-se escolher o código/nome do cabo pretendido;
- Característica do Vão: nesta seção deve ser informado ao *software* as características do vão e de instalação do cabo à estrutura, bem como informar se as estruturas estão niveladas ou desniveladas quanto à altura de instalação do cabo;

- Cadeia de Isoladores: O desenho de instalação e especificação de cadeia de isoladores faz parte do projeto executivo eletromecânico na parte de detalhes de instalação de equipamentos. Através desse projeto é possível obter informações necessárias para inserção dos parâmetros no *software* como: comprimento e peso da cadeia de ancoragem e diâmetro do isolador utilizado. Ademais, deve finalizar essa seção informando o quantitativo de condutores e cadeias por fase serão instaladas;
- Parâmetros Externos: nesta seção é necessário inserir o valor de velocidade do vento da região onde será o empreendimento através das informações citadas na Seção 2.3.1, bem como informar o valor do "tiro inicial", que representa a força inicial de tração suportada pela estrutura de ancoragem para esticamento dos cabos no momento do lançamento.

Figura 13 – Interface gráfica algoritmo de dimensionamento de barramentos flexíveis.

The screenshot shows a software window titled "interface" with standard window controls (minimize, maximize, close). The main content area has a blue background and is titled "Flechas e Tensões". It is organized into four sections, each with a light blue header:

- Características do Cabo:** Includes dropdown menus for "Tipo:" and "Código/Nome:".
- Cadeia de Isoladores:** Includes input fields for "Comprimento Total [m]:", "Peso [kgf]:", "n subcondutores:", "n pncas:", and "Ø isolador [m]:".
- Características do Vão:** Includes a dropdown for "Escolha entre Vão Nivelado (VN) e Vão Desnivelado (VD):", and input fields for "Comprimento do Vão [m]:", "h1 Instalação [m]:", and "h2 Instalação [m]:".
- Parâmetros Externos:** Includes input fields for "Velocidade do Vento [km/h]:" and "Tiro Inicial [kgf]:".

A "Calcular" button is positioned at the bottom right of the interface.

Fonte: Produção do próprio autor.

Para prosseguir com o dimensionamento eletromecânico do barramento em questão, existe um botão localizado no canto inferior direito da tela com dizeres de "Calcular", após apertar esse botão os cálculos serão realizados conforme próximas seções deste capítulo.

### 3.3 Banco de Dados

De posse das informações sobre o cabo condutor informado pelo projetista ao *software* em desenvolvimento, será necessário obter informações e características específicas desse tipo e classe de cabo escolhido, dados como: seção transversal, massa, formação de fios, diâmetro nominal, carga de ruptura, dentre outros. Essas informações geralmente estão contidas em Datasheets dos cabos, geralmente elaborados pelos próprios fabricantes.

Diante disso foi elaborada uma planilha em Excel, extraindo todas características construtivas dos condutores CA, CAA e cabo HS, utilizando os catálogos de fornecimento das empresas NEXANS (2010) e BELGO MINEIRA (2006), respectivamente. Essa planilha trabalha como um banco de dados que alimenta a rotina principal do algoritmo, através de funções existentes no MATLAB. A Figura 14 mostra a aba da planilha com informações para cabos CA, demonstrando nas colunas as características construtivas e parâmetros relevantes para dimensionamento conforme citado no parágrafo anterior.

Figura 14 – Planilha com características construtivas cabo CA.

CABOS CA												
Código	Identificação do Cabo		Seção Transversal	Classe	FORMAÇÃO		Diâmetro Nominal	Massa Nominal	Carga de Ruptura	Módulo de Elasticidade	Coeficiente de Dilatação Linear	Capacidade de Corrente
	Bitola	Unid			mm <sup>2</sup>	No.Fios x Diâmetro						
					AL	Aço	mm	kgf / m	kgf	kgf / mm <sup>2</sup>	(°C) <sup>-1</sup>	A
PEACHBELL	6	AWG	13,30	A	7x1,55	-	4,65	0,0365	252	6.200	0,0000230	95
ROSE	4	AWG	21,15	A	7x1,96	-	5,88	0,0582	402	6.200	0,0000230	130
IRIS	2	AWG	33,62	AA,A	7x2,47	-	7,41	0,0925	595	6.000	0,0000230	175
PANSY	1	AWG	42,41	AA,A	7x2,78	-	8,34	0,1171	715	6.200	0,0000230	200
POPPY	1/0	AWG	53,52	AA,A	7x3,12	-	9,36	0,1476	890	6.200	0,0000230	235
ASTER	2/0	AWG	67,44	AA,A	7x3,50	-	10,50	0,1857	1.121	6.200	0,0000230	270
PHLOX	3/0	AWG	85,02	AA,A	7x3,93	-	11,79	0,2341	1.372	6.200	0,0000230	315
OXLIP	4/0	AWG	107,22	AA,A	7x4,41	-	13,23	0,2947	1.692	6.000	0,0000230	365
SNEEZEWORD	250,0	MCM	126,68	AA	7x4,80	-	14,40	0,3493	2.046	6.200	0,0000230	405
VALERIAN	250,0	MCM	126,68	A	19x2,91	-	14,55	0,3485	2.098	6.000	0,0000230	405
DAISY	266,8	MCM	135,19	AA	7x4,96	-	14,68	0,3730	2.143	6.000	0,0000230	420
LAUREL	266,8	MCM	135,19	A	19x3,01	-	15,05	0,3728	2.243	6.000	0,0000230	425
PEONY	300,0	MCM	152,01	A	19x3,19	-	15,95	0,4188	2.449	6.000	0,0000230	455
TULIP	336,4	MCM	170,45	A	19x3,38	-	16,90	0,4701	2.697	6.000	0,0000230	495
DAFFODIL	350,0	MCM	177,34	A	19x3,45	-	17,25	0,4897	2.863	6.000	0,0000230	506
CANNA	397,5	MCM	201,41	AA,A	19x3,68	-	18,40	0,5572	3.195	6.000	0,0000230	550
GOLDENTUFT	450,0	MCM	228,02	AA	19x3,91	-	19,55	0,6289	3.569	6.000	0,0000230	545
COSMOS	477,0	MCM	241,69	AA	19x4,02	-	20,10	0,6650	3.774	6.000	0,0000230	615
SYRING	477,0	MCM	241,69	A	37x2,88	-	20,16	0,6645	3.838	6.000	0,0000230	615

Fonte: Produção do próprio autor.

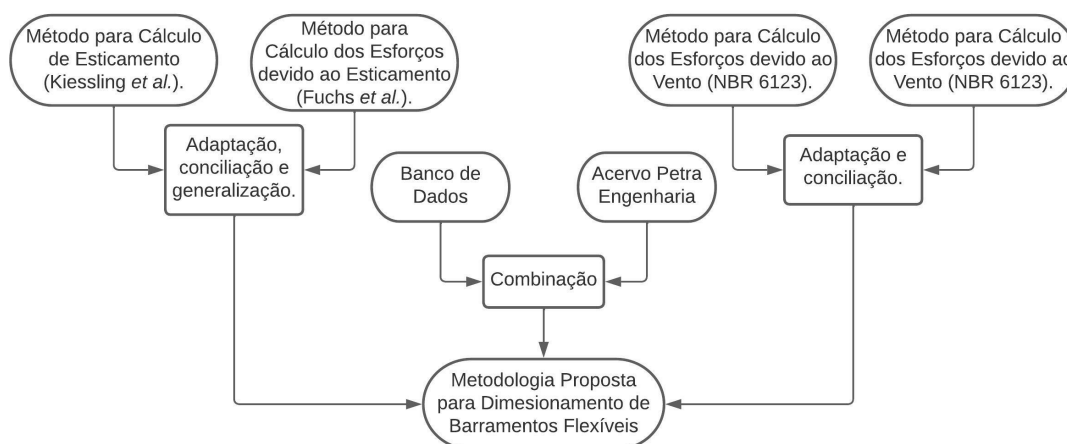
Após importar os valores necessários e salvá-los em variáveis globais, pode-se dar início às rotinas de cálculos para dimensionamento eletromecânico de flechas e esticamento do barramento flexível.

### 3.4 Rotinas de Cálculos

Para desenvolvimento da rotina de cálculos foram utilizadas as referências de normas técnicas, artigos técnicos e livros conceituados no setor de projetos. Após análise do referencial teórico foi possível encontrar lacunas nos métodos expostos, como o desprezo das forças resultantes para cadeia de isoladores, abrangência para barramentos desnivelados e efeito transversal do vento no ponto de ancoragem, por exemplo. Dessa maneira nesse trabalho foi proposto a unificação e adaptação dos métodos de esticamento, considerando as bibliografias de Kiessling, Nefzgez e Nolasco (2003) e Fuchs, Labegalini e Almeida (1992), bem como das normas regulamentadoras descritas no fluxograma da Figura 15 para alcançar um nível maior de eficácia. Ademais a conciliação e adaptação foi realizada preservando os conceitos físicos e pode ser entendida pelo fluxograma presente na Figura 15.

A união de conceitos presentes nos livros estudados visam mesclar a ideia concreta de esforços de flechas e tensões para cabos presentes na obra de Fuchs, Labegalini e Almeida (1992), que é comumente utilizada para cálculos eletromecânicos de linhas de transmissão onde o dimensionamento se torna ainda mais complexo, com a obra de Kiessling, Nefzgez e Nolasco (2003), que apresenta dimensionamento para vãos nivelados e desnivelados considerando a influência da cadeia de isoladores.

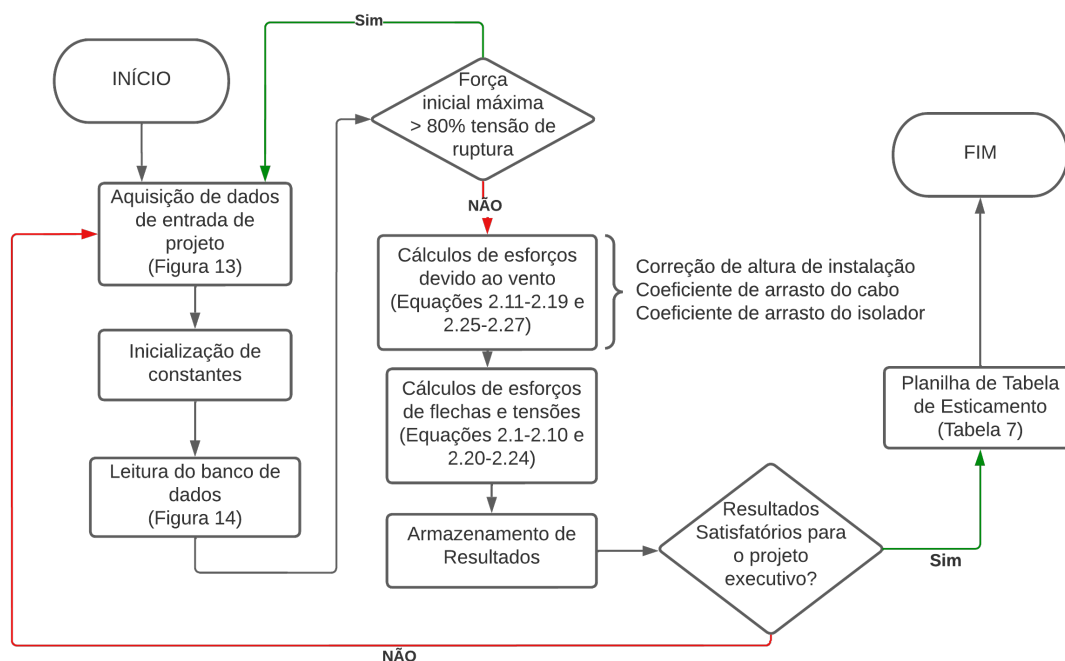
Figura 15 – Diagrama do processo da metodologia proposta.



Fonte: Produção do próprio autor.

O fluxograma representado na Figura 16 constitui de uma maneira simplificada uma sequência de cálculos usados para o dimensionamento em subestações, sendo percorridos pelo *software* de acordo com os dados previamente introduzidos.

Figura 16 – Fluxograma da rotina de cálculos.



Fonte: Produção do próprio autor.

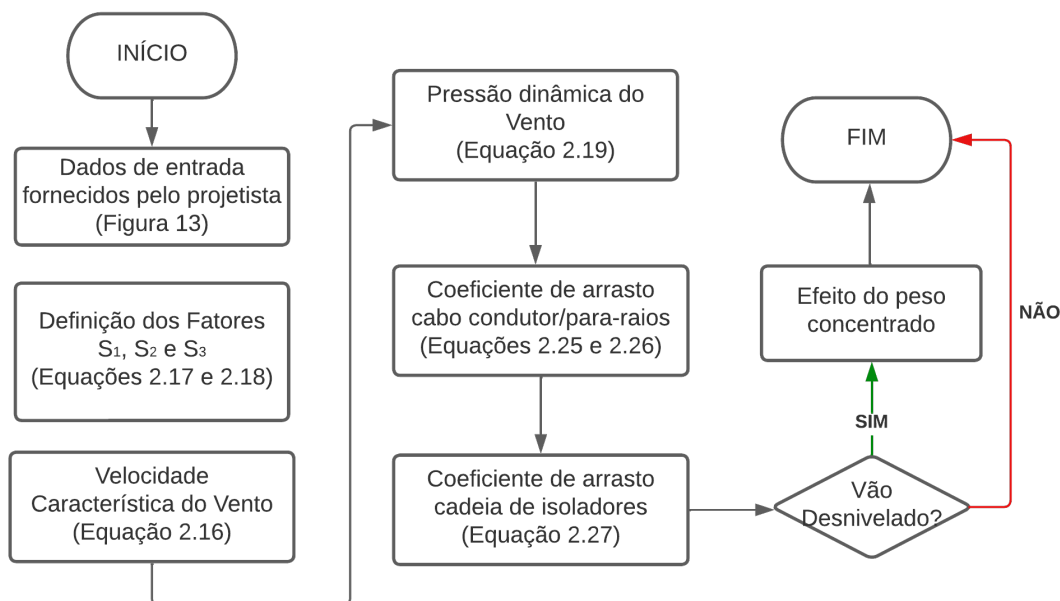
### 3.4.1 Forças ocasionadas pelo vento

Nesta etapa da rotina do dimensionamento, são determinadas as forças de arrasto do vento sobre os condutores e cadeia de isoladores, bem como é corrigida a altura de instalação do barramento projetado, conforme descrito na Subseção 2.3.1. A metodologia dessa rotina se baseia, principalmente na norma NBR 6123 e pode ser entendida através do fluxograma apresentado na Figura 17, tendo em vista que os parâmetros de entrada necessários são definidos pelo projetista.

Obtêm-se os fatores de topografia, rugosidade do terreno e estatístico a partir das diretrizes expostas na subseção 2.3.1.1. Para o valor de  $S_1$  é adotado o valor unitário por se tratar de subestações construídas em terrenos nivelados. Através da altura de instalação e categoria da rugosidade do terreno descritas na Tabelas 1 e 2 e usando a Equação (2.18), é possível obter o fator  $S_2$ . Por fim, foi utilizado o valor de 1,1 para o fator estatístico  $S_3$ , representando edificações cuja ruína pode afetar a segurança de pessoas.

A partir deste momento determinam-se as forças de arrasto para os cabos condutores e sobre a cadeia de isoladores, através da obtenção do número de Reynolds e os coeficientes de arrasto para ambos. As referências para se obter os coeficientes de arrasto estão descritos nas Tabelas 5 e 6, respectivamente.

Figura 17 – Fluxograma da rotina de esforços devido ao vento.



Fonte: Produção do próprio autor.

O fim desta rotina de cálculos de esforços ocasionados pelo vento indica que os valores encontrados nesta etapa do dimensionamento serão aplicados na rotina de cálculos de esticamento, flechas e tensões, a qual é a próxima fase a ser executada pelo *software*.

### 3.5 Retorno/Saída do *software*

Nesta etapa ocorre o retorno dos resultados do dimensionamento de forma ordenada para fácil entendimento do usuário. Diante disso foi elaborada uma planilha com cabeçario e células vazias que serão preenchidas através da ferramenta de escrita em arquivos do tipo *xls* existentes no MATLAB, que deve conter todas as informações necessárias referentes à tabela de esticamento dos cabos, auxiliando na etapa de execução do lançamento e instalação do barramento *in loco* que deverá ser realizada pela empreiteira contratada para executar o empreendimento.

A Tabela 7 ilustra o modelo de planilha adotada seguindo o padrão projetos realizados pela Petra Engenharia (2022), para vão nivelados apresenta-se dados de força horizontal, força resultante, comprimento da flecha e valor percentual da flecha do cabo em relação ao vão.

De posse dos resultados o projetista poderá avaliar se os valores encontrados foram



Tabela 7 – Tabela de esticamento para um vão nivelado.

<b>TABELA DE ESTICAMENTO DE CABOS</b>				
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Força Horizontal (kgf)</b>	<b>Força Resultante (kgf)</b>	<b>Flecha Total (m)</b>	<b>Flecha Total (%)</b>
0	410,30	415,43	0,85	2,13
5	398,60	403,88	0,88	2,19
10	387,70	393,12	0,90	2,26
15	377,70	383,27	0,93	2,32
20	368,40	374,10	0,95	2,37
25	359,80	365,64	0,97	2,43
30	351,70	357,67	0,99	2,49
35	344,10	350,20	1,02	2,54
40	337,00	343,23	1,04	2,59
45	330,30	336,65	1,06	2,65
50	323,90	330,37	1,08	2,70
55	318,00	324,59	1,10	2,75
60	312,30	319,01	1,12	2,80
65	306,90	313,72	1,14	2,85
70	301,80	308,74	1,16	2,90
75	296,90	303,95	1,18	2,95
80	292,30	299,46	1,20	2,99

Fonte: Produção do próprio autor.

satisfatórios considerando os dados de entrada. O *software* elaborado pode ser utilizado pelo projetista em ambos os casos: (i) quando o empreendimento se trata da construção de uma nova subestação, onde será projetado completamente todas as estruturas; ou, ainda, (ii) para ampliações e revitalização, onde as estruturas já estão dimensionadas e o dimensionamento de barramentos flexíveis deve se adequar ao padrão existente. Dependendo do tipo de empreendimento, o projetista irá avaliar se os resultados atendem os parâmetros de projetos e as especificações da proprietária da subestação.

A planilha elaborada com o resultado extraído do *software* serve de embasamento para o projetista elaborador diretamente dois documentos de projeto executivo que habitualmente são solicitados, os quais são:

- Tabela de Esticamento - Memória de Cálculo
- Tabela de Esticamento - Planta e Cortes

A Tabela de Esticamento - Planta e Cortes, é um projeto elaborado a partir das informações de trações e flechas dos cabos. O documento é indispensável para realização do lançamento de cabos e grampeamento na execução do empreendimento, além de garantir para proprietária da subestação que suas especificações técnicas estão sendo atendidas.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

### 4.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo a apresentação e análises dos resultados produto de simulações de dimensionamento, utilizando o *software* desenvolvido com a metodologia proposta. Para tal foram utilizados dados de projetos executivos reais já realizados e aprovados pelas empresas contratantes do projeto e dados de simulações realizadas em trabalhos semelhantes, com intuito de validar as abordagens propostas e comparar os resultados obtidos.

### 4.2 Simulação para Subestação Existente

Nesta seção será realizada a simulação do dimensionamento eletromecânico de barramentos flexíveis para obtenção dos documentos de tabela de esticamento de cabos condutores e para-raios para subestação de Campina Grande II, gerenciada pela Companhia Hidrelétrica de São Francisco (CHESF). O projetado básico do empreendimento foi realizado visando prover as informações necessárias para a instalação do 4º transformador de 100 MVA no setor de 230kV, para atendimento à Resolução Autorizativa ANEEL nº 8.328/2019.

O arranjo da subestação é do tipo barra principal e barra de transferência, empregando disjuntor simples com três chaves seccionadoras por célula, com exceção da célula de transferência, que emprega disjuntor simples e duas chaves seccionadoras. Para instalação do transformador em questão e sua conexão ao setor de 69kV foi precisa a instalação de um vão com novos cabos condutores; para tal fim, deve-se ser projetado os documentos eletromecânicos referentes à Tabela de Esticamento.

Para simulação realizada sabe-se que a subestação está localizada em terreno plano com obstáculos baixos, em local cuja a velocidade básica do vento é de aproximadamente 30m/s. O barramento para conexão no setor de 230kV é constituído por subcondutores do tipo CAA, um cabo por fase, com bitola 636 MCM (Grosbeak), em um vão nivelado. Na saída de baixa do novo transformador de 100MVA a ser instalado até o barramento principal de 69kV, foi projetada a conexão com subcondutores do tipo CAA, dois cabos por fase, com bitola 954 MCM (Rail) em um vão desnivelado. Não foi necessário realizar projeto executivo para os condutores de blindagem atmosférica, pois os mesmos já estavam

instalados no local onde se projetou o passo do novo barramento.

Cada companhia possui suas especificações técnicas de projeto. Para obter informações sobre a utilização de cadeia de ancoragem e valores básicos a serem utilizados no dimensionamento, observou-se a especificação 301-CHESF-ET-PJ-EM-ABR2019, onde têm-se a informação da Tabela 8.

Tabela 8 – Quantidade mínima de disco de isoladores por classe de tensão.

Tensão nominal entre as fases	500kV	230kV	138kV	69kV	34,5kV	13,8kV
Qtd. de isoladores por penca	26	16	10	6	4	2

Fonte: CHESF (2019).

Após o projeto de instalação de equipamentos referente às ferragens para cadeia de isoladores têm-se os dados relativos à mesma para alimentar o *software* de dimensionamento.

A partir da especificação técnica também é possível obter diretrizes referentes às características do vento e condições de flechamento apresentadas a seguir:

- As flechas máximas dos cabos dos barramentos flexíveis de alta tensão não devem ultrapassar 3% do vão e devem atender aos critérios de distâncias elétricas de segurança;
- A condição de flecha máxima e tração máxima dos cabos da subestação devem atender aos critérios da Quadro 1.

Quadro 1 – Condições de Flecha e Tração Máxima.

	Flecha Máxima		Tração Máxima	
	Temperatura (°C)	Velocidade do Vento (km/h)	Temperatura (°C)	Velocidade do Vento (km/h)
<b>Cabo condutor</b>	90	zero	10	110
<b>Cabo condutor termorresistente</b>	150	zero	10	110
<b>Cabo SPDA</b>	50	zero	10	110

Fonte: CHESF (2019).

### 4.2.1 Dimensionamento vão nivelado

De posse da informação que a estrutura na qual foi ancorado o barramento de 230kV está dimensionada para suportar uma força horizontal de 1000kgf, foi estipulada um força inicial máxima (tiro máximo) de 700kgf, conforme procedimento interno para elaboração de projetos da empresa Petra Engenharia, onde é aplicado como esforço inicial 70% da carga nominal da estrutura em questão. A interface do *software* com os parâmetros iniciais para dimensionamento do barramento flexível de 230 kV para esse subestação está ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Interface com parâmetros iniciais barramento de 230kV.

The screenshot shows a software window titled "interface" with a title bar containing standard window controls. The main content area is titled "FLECHAS E TENSÕES" and is organized into four main sections:

- Cabo Condutor:** Includes a dropdown for "Tipo" (set to "CAA") and a dropdown for "Código/Nome" (set to "GROSBEAK").
- Cadeia de Isoladores:** Includes input fields for "Comprimento Total [m]" (3.45), "Peso [kgf]" (100.53), "n subcondutores" (1), "n pencas" (1), and "Ø isolador [m]" (0.280).
- Características do Vão:** Includes a dropdown for "Escolha entre Vão Nivelado (VN) e Vão Desnivelado (VD)" (set to "VN"), and input fields for "Comprimento do Vão [m]" (29.60), "h1 Instalação [m]" (17.90), and "h2 Instalação [m]" (17.90).
- Parâmetros Externos:** Includes input fields for "Velocidade do Vento [km/h]" (110) and "Tiro Inicial [kgf]" (700).

A "Calcular" button is located at the bottom right of the interface.

Fonte: Produção do próprio autor.

O resultado obtido no dimensionamento setando um valor para o esforço inicial está representado na Tabela 9. Percebe-se que os resultados obtidos para flecha total percentual atendem as especificações técnicas determinadas pela CHESF, conforme citado na introdução da Seção 4.2. Contudo o valor de flecha percentual não chega a atingir seu valor máximo, tendo em vista o limite de 3% estipulado pela companhia.

A partir da visualização desse ponto a metodologia elaborada permite utilizar o *software* proposto de maneira automatizada, onde é possível determinar o valor limite para a flecha percentual e assim tornar o valor do esforço inicial menor possível. A vantagem dessa técnica é garantir que não seja aplicado sobre a estrutura suporte um esforço desnecessário,

aumentando ainda mais a segurança da instalação projetando corretamente o esticamento dos cabos. Neste caso o algoritmo não mais define um valor para o esforço inicial, tomando o percentual da flecha com premissa para determinar a tabela de esticamento. O resultado do novo dimensionamento pode ser visto na Tabela 10.

Tabela 9 – Resultado para dimensionamento barramento de 230kV fixando valor de esforço inicial.

<b>TABELA DE ESTICAMENTO DE CABOS</b>				
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Força Horizontal (kgf)</b>	<b>Força Resultante (kgf)</b>	<b>Flecha Total (m)</b>	<b>Flecha Total (%)</b>
0	586,70	598,36	0,53	1,77
5	572,80	584,74	0,54	1,82
10	559,70	571,91	0,55	1,86
15	547,50	559,98	0,56	1,90
20	536,00	548,74	0,58	1,94
25	525,20	538,19	0,59	1,98
30	515,00	528,25	0,60	2,02
35	505,30	518,79	0,61	2,06
40	496,10	509,84	0,62	2,10
45	487,40	501,37	0,63	2,14
50	479,20	493,41	0,64	2,17
55	471,30	485,74	0,65	2,21
60	463,80	478,46	0,66	2,25
65	456,60	471,49	0,68	2,28
70	449,80	464,91	0,69	2,32
75	443,20	458,52	0,70	2,35
80	436,90	452,44	0,71	2,38

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 10 – Resultado para dimensionamento barramento de 230kV definindo limite para flecha percentual.

<b>TABELA DE ESTICAMENTO DE CABOS</b>				
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Força Horizontal (kgf)</b>	<b>Força Resultante (kgf)</b>	<b>Flecha Total (m)</b>	<b>Flecha Total (%)</b>
0	415,70	432,00	0,74	2,50
5	410,40	426,90	0,75	2,54
10	405,40	422,10	0,76	2,57
15	400,60	417,49	0,77	2,60
20	395,90	412,98	0,78	2,63
25	391,30	408,58	0,79	2,66
30	387,00	404,46	0,80	2,69
35	382,70	400,35	0,81	2,72
40	378,60	396,43	0,81	2,75
45	374,60	392,61	0,82	2,78
50	370,80	388,99	0,83	2,81
55	367,00	385,37	0,84	2,84
60	363,40	381,94	0,85	2,87
65	359,90	378,61	0,86	2,89
70	356,50	375,38	0,86	2,92
75	353,10	372,15	0,87	2,95
80	349,90	369,12	0,88	2,98

Fonte: Produção do próprio autor.

Ao comparar a segunda coluna das Tabelas 9 e 10, busca-se relacionar a variação de tração aplicada para ambas tabelas dada mesma temperatura de operação. Em 40°C

temos 496,10kgf aplicados no barramento para o primeiro dimensionamento, já para o dimensionamento com otimização esse valor reduz para 378,60kgf, representando um decréscimo de 23,7%.

Ao analisar a média percentual da redução do esforço horizontal proveniente do esticamento dos cabos para o segundo caso, obtém-se aproximadamente foi 30%. Essa atenuação permite que a estrutura sofra menos esforço e o projeto continue dentro das normativas da companhia. Ainda que seja pouca a variação no valor para flecha percentual, para vãos de subestação, geralmente com pouca extensão, a diferença na força exercida sobre a estrutura é bastante notável. Sendo assim, neste caso evidencia-se a importância de analisar os resultados e buscar refinamentos de projeto.

#### 4.2.2 Comparativo com *software* comercial

Para validar o dimensionamento de barramento flexível para a tabela de esticamento obtida através do algoritmo proposto foi necessário consultar a primeiro momento um *software* validado no mercado e comercializado para determinada função. A Petra Engenharia possui licença para uso do *TFSwing*, *software* desenvolvido pela empresa de consultoria NSA (2022) para dimensionamento de flechas e tensões aplicados em linhas de transmissão. A aplicação do algoritmo desta plataforma desconsidera a influência da cadeia de isoladores nos cálculos, justamente por ser tratar de vãos extensos e o peso para esticamento da cadeia se torna irrelevante para o dimensionamento.

Portanto, para possibilitar qualquer tipo de comparação foi necessário extrair a influência da cadeia de isoladores para os cálculos do *software* proposto. Para tal fim, o valor da massa da cadeia foi definido como nulo, bem como o número de pencas de cadeia de isoladores. O resultado para o dimensionamento do vão nivelado 230kV para subestação de Campina Grande II, dado um esforço inicial máximo de 700kgf é apresentado na Tabela 11.

Utilizou-se do *software TFSwing* para gerar a tabela de esticamento do mesmo barramento 230kV dimensionado na seção 4.2.1 a fim de comparar com dimensionamento obtido na Tabela 11, o resultado atingido é evidenciado na Figura 19.

Tabela 11 – Tabela de Esticamento para vão nivelado utilizando *software* proposto desenvolvido.

TABELA DE ESTICAMENTO DE CABOS				
Temperatura (°C)	Força Horizontal (kgf)	Força Resultante (kgf)	Flecha Total (m)	Flecha Total (%)
0	503,50	517,55	0,28	0,96
5	441,90	457,85	0,32	1,09
10	395,70	413,44	0,36	1,22
15	360,10	379,50	0,40	1,34
20	331,90	352,86	0,43	1,45
25	309,00	331,41	0,46	1,56
30	290,00	313,77	0,49	1,66
35	273,90	298,95	0,52	1,76
40	260,10	286,36	0,55	1,85
45	248,20	275,60	0,57	1,94
50	237,70	266,18	0,60	2,03
55	228,30	257,82	0,62	2,11
60	220,00	250,50	0,65	2,19
65	212,50	243,94	0,67	2,27
70	205,70	238,04	0,69	2,34
75	199,50	232,70	0,71	2,41
80	193,80	227,84	0,74	2,49

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 19 – Dimensionamento barramento flexível 230kV utilizando *software* *TFSwing*.

#### TRAMO 29,6m

Cabo: GROSBEAK - Critério de Cálculo: COND. 1 - Equivalente de Creep(Fluência): 20,0°C

Tramo Entre as Estruturas E-1 a E-2				Temperaturas (°C)										Var. da Flecha m/°C
Vão Básico		Tração Horizontal Inicial (kgf)		0	5	10	15	20	25	30	35	40		
29,6 m		Tração Tangencial Inicial (kgf)		503,7	445,4	400,7	365,6	337,5	314,4	295,2	279,0	265,0		
				504,0	445,8	401,1	366,1	338,0	315,0	295,9	279,6	265,7		
Estrutura			Vão à Frente (m)	Desnível (m)	Flechas (m)								Var. da Flecha m/°C	
Nome/N°	Tipo	Fix												
E-1		A	29,60	0,00	0,28	0,32	0,36	0,39	0,42	0,45	0,48	0,51	0,54	0,006

Fonte: Produção do próprio autor.

Pretende-se analisar duas grandezas separadamente. Primeiramente compara-se o valor obtido para o esforço horizontal à estrutura, representada por tração ou força horizontal; nesse sentido, utilizando o *software* comercial, a resposta obtida no método proposto possui erro acumulado em média de 1,10%. Em segundo momento, ao comparar os valores obtidos na Tabela 11 e Figura 19 para a flechas do barramento, percebe-se que o dimensionamento com algoritmo proposto acompanha os valores obtidos no *TFSwing* ao longo da curva de temperatura.

Considera-se o resultado satisfatório também ao se observar de outra ótica: têm-se que um dos objetivos do presente trabalho é equacionar, aplicar e avaliar a interferência da cadeia de ancoragem nos cálculos de tabela de esticamento. Percebe-se ao comparar os

resultados das Tabelas 9 e 11, visto que possuem os mesmos dados de entrada, que ao retirar a influência da cadeia de isoladores o valor para força horizontal decresce, ao analisar isoladamente para a temperatura de operação em 5°C o esforço reduz de 572,00kgf para 441,90kgf, aproximadamente 23%.

Resultado esperado, considerando que ao inserir a atuação da cadeia de ancoragem para vãos de subestação ocasionará o acréscimo no peso agregado e forças aplicadas sobre determinada estrutura. Conclui-se que para vãos consideravelmente curtos em subestações, a inobservância da influência da cadeia de isoladores pode acarretar dimensionamentos equivocados de suportes e barramentos.

### 4.2.3 Dimensionamento vão desnivelado

Para o dimensionamento do vão desnivelado em questão da subestação de Campina Grande II, podemos utilizar a mesma interface vista na Figura 13, selecionando a opção “VD” no campo de seleção do tipo de vão. Dada os parâmetros iniciais de projeto, que estão representados na Figura 20.

Figura 20 – Interface com parâmetros iniciais barramento de 230kV para um vão desnivelado.

The screenshot shows a software interface titled "FLECHAS E TENSÕES" with the following parameters:

Section	Parameter	Value
Cabo Condutor	Tipo	CAA
	Código/Nome	RAIL
Cadeia de Isoladores	Comprimento Total [m]	1.85
	Peso [kgf]	55.3
	n subcondutores	1
	n pncas	1
Características do Vão	Escolha entre Vão Nivelado (VN) e Vão Desnivelado (VD)	VD
	Comprimento do Vão [m]	77.0
	h1 Instalação [m]	17.9
	h2 Instalação [m]	14.8
Parâmetros Externos	Velocidade do Vento [km/h]	110
	Tiro Inicial [kgf]	1200

A "Calcular" button is located at the bottom right of the interface.

Fonte: Produção do próprio autor.



Considerou-se um esforço inicial para este barramento de 1200kgf, o valor do esforço inicial é inserido com base na experiência do projetista, uma vez que a ferramenta proposta visa otimizar e realizar iterações a partir da primeira escolha. A tabela de esticamento retornada pelo *software* é mostrada na Tabela 12

Tabela 12 – Dimensionamento de vão desnivelado para SE Campina Grande II no *software* proposto.

TABELA DE ESTICAMENTO DE CABOS						
Temperatura (°C)	T0 (kgf)	TR1 (kgf)	TR2 (kgf)	Flecha (m)	Distância + Baixa (m)	Flecha Total (%)
0	1.187,50	1.200,85	1.189,35	3,19	8,70	1,81
5	1.090,70	1.105,22	1.092,96	3,24	11,13	1,89
10	1.009,90	1.025,56	1.012,57	3,29	13,16	1,97
15	942,00	958,77	945,08	3,34	14,86	2,05
20	884,30	902,15	887,78	3,40	16,31	2,12
25	834,80	853,68	838,68	3,45	17,55	2,20
30	792,00	811,88	796,26	3,51	18,62	2,27
35	754,50	775,34	759,14	3,57	19,57	2,33
40	721,50	743,27	726,50	3,63	20,39	2,40
45	692,10	714,76	697,46	3,69	21,13	2,47
50	665,90	689,42	671,60	3,74	21,79	2,53
55	642,20	666,56	648,24	3,80	22,38	2,59
60	620,70	645,87	627,07	3,86	22,92	2,65
65	601,20	627,16	607,89	3,91	23,41	2,71
70	583,30	610,02	590,30	3,97	23,86	2,77
75	566,90	594,36	574,21	4,02	24,27	2,83
80	551,70	579,88	559,31	4,07	24,66	2,89

Fonte: Produção do próprio autor.

O resultado atingido é satisfatório considerando as exigências da concessionária. Para validação do dimensionamento de esticamento e flechamento em vãos desnivelados será utilizado novamente o *software TFSwing*, portanto o foi realizado o dimensionamento do vão em questão retirando a influência da cadeia de isoladores. O resultado obtido pela metodologia proposta é evidenciando na Tabela 13, tal como os resultados para o *software* comercial é apresentado na Figura 21.

Tabela 13 – Dimensionamento de vão desnivelado no *software* proposto desconsiderando efeito da cadeia de isoladores.

TABELA DE ESTICAMENTO DE CABOS						
Temperatura (°C)	T0 (kgf)	TR1 (kgf)	TR2 (kgf)	Flecha (m)	Distância + Baixa (m)	Flecha Total (%)
0	1.124,70	1.138,91	1.126,99	3,18	10,28	1,41
5	1.044,10	1.059,39	1.046,80	3,22	12,30	1,49
10	975,90	992,24	979,00	3,26	14,01	1,57
15	917,70	935,06	921,19	3,31	15,47	1,70
20	867,60	885,94	871,48	3,36	16,73	1,80
25	824,10	843,39	828,36	3,41	17,82	1,83
30	785,80	806,01	790,43	3,46	18,78	1,86
35	752,10	773,19	757,10	3,51	19,63	1,96
40	722,00	743,94	727,35	3,56	20,38	2,00

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 21 – Dimensionamento de vão desnivelado no *software TFSwing*.

Tramo Entre as Estruturas				Temperaturas (°C)										
E-1 a E-2				0	5	10	15	20	25	30	35	40		
Vão Básico	Tração Horizontal Inicial(kgf)			1124,8	1049,3	984,4	928,2	879,3	836,4	798,4	764,7	734,5		
77,0 m	Tração Tangencial Inicial(kgf)			1126,5	1051,1	986,3	930,3	881,4	838,6	800,8	767,2	737,1		
Estrutura			Vão à Frente (m)	Desnível (m)	Flechas (m)								Var. da Flecha m/°C	
Nome/N°	Tipo	Fix												
E-1		A	77,00	3,10	1,06	1,13	1,21	1,28	1,35	1,42	1,49	1,55	1,62	0,014

Fonte: Produção do próprio autor.

Novamente compara-se o valor obtido para o esforço horizontal à estrutura, representada por tração ou força horizontal; nesse sentido, utilizando o software comercial, a resposta obtida no método proposto possui erro em média de 1,83%. O resultado obtido nas simulações são adequados e indicam que a metodologia proposta tem um comportamento para rotina de esticamento semelhante ao de um *software* valido ao se dimensionar vãos desnivelados.

### 4.3 Simulação para Nova Subestação

Esta seção será dedicada para a demonstração de aplicação em projeto real e simulação do dimensionamento eletromecânico de barramentos flexíveis para obtenção dos documentos de tabela de esticamento de cabos condutores e para-raios, assim como dos documentos de dimensões e esforços para construção da subestação de Colatina II, gerenciada pela Empresa de Luz e Força Santa Maria - ELFSM (2022). O projeto executivo deste empreendimento está em andamento e para obter os documentos citados acima foi utilizada a metodologia proposta neste trabalho, visando ter aceitação de empresas e distribuidoras conceituadas no mercado de energia brasileiro.

O potencial da ferramenta proposta ao ser aplicada para empreendimentos de construção de novas subestações está centralizado na otimização de esforço a ser aplicado sobre o barramento. Em outras palavras o objetivo da metodologia neste caso é projetar o menor esforço possível para se obter características de flechamentos que respeitam as especificações técnicas das concessionárias. A metodologia utilizada aponta três benefícios principais, que são:

- Garantir que o esticamento de cabos seja feito de maneira que forneça segurança futura para instalação, evitando esforços desnecessários;
- Trabalhar corretamente com a expectativa de expansão da subestação;

- Dimensionar corretamente as estruturas suporte, evitando desperdício financeiro na aquisição das mesmas e execução de suas fundações.

Dessa maneira foi realizado o dimensionamento do barramento flexível dos vãos denominados C5 e C9 para realizar análises, Os quadros 2 e 3 apresentam as características do vão e seus parâmetros de entrada.

A condicionante de percentual de flechamento de cabos para este empreendimento é similar ao da Subseção 4.2.1. Considera-se um limite de 3% avaliando o comportamento do esticamento para temperatura de operação mais crítica, no caso, de 80°C. Os resultados obtidos são demonstrados nas Tabelas 14 e 15.

Quadro 2 – Parâmetros de entrada para dimensionamento do vão C5.

ELFSM - Empresa Luz e Força Santa Maria S.A.			
Subestação COLATINA II 138/69/24,2/11,4 kV			
DADOS PARA CÁLCULO			
SETOR	69 kV	IDENTIFICAÇÃO DO VÃO	C5
CONDUTOR	Tipo do condutor (cabo)		CAA
	Identificação do condutor (cabo)		RAIL - 954,0 MCM
	75% da Carga de Ruptura do Condutor		8.707,50 kgf
	Seção de cada sub-condutor		517,40 mm <sup>2</sup>
	Diâmetro de cada sub-condutor		0,02961 mm
	Peso próprio do sub-condutor		1,6030 kgf/m
	Módulo de elasticidade		6.500,0 kgf/mm <sup>2</sup>
	Coefficiente de dilatação linear		0,0000209 °C <sup>-1</sup>
CADEIA DE ANCORAGEM	Identificação da Cadeia		CA-61
	Número de sub-condutores por fase		1
	Peso da cadeia de ancoragem		27,52 kgf
	Número de pencas		1
	Comprimento total da cadeia de ancoragem		1,12 m
VÃO	Diâmetro		0,254 m
	Comprimento do vão		20,9 m
	Altura de instalação		13,0 m
	Diferença de nível entre apoios do vão		3,6 m
	Tipo do Vão		Desnivelado
CONDIÇÕES GERAIS	Temperatura inicial		0 °C
	Velocidade do vento		110 km/h

Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 3 – Parâmetros de entrada para dimensionamento do vão C9.

<b>ELFSM - Empresa Luz e Força Santa Maria S.A.</b>			
<b>Subestação COLATINA II 138/69/24,2/11,4 kV</b>			
<b>PET-SECL-TE-A4-0715 - TABELA DE ESTICAMENTO DE CABOS</b>			
<b>DADOS PARA CÁLCULO</b>			
<b>SETOR</b>	<b>138 kV</b>	<b>IDENTIFICAÇÃO DO VÃO</b>	<b>C9</b>
<b>CONDUTOR</b>	Tipo do condutor (cabo)		CAA
	Identificação do condutor (cabo)		RAIL - 954,0 MCM
	75% da Carga de Ruptura do Condutor		8.707,50 kgf
	Seção de cada sub-condutor		517,40 mm <sup>2</sup>
	Diâmetro de cada sub-condutor		0,02961 mm
	Peso próprio do sub-condutor		1,6030 kgf/m
	Módulo de elasticidade		6.500,0 kgf/mm <sup>2</sup>
	Coefficiente de dilatação linear		0,0000209 °C <sup>-1</sup>
<b>CADEIA DE ANCORAGEM</b>	Identificação da Cadeia		CA-101
	Número de sub-condutores por fase		1
	Peso da cadeia de ancoragem		55,30 kgf
	Número de pencas		1
	Comprimento total da cadeia de ancoragem		1,70 m
	Diâmetro		0,254 m
<b>VÃO</b>	Comprimento do vão		32,6 m
	Altura de instalação		13,0 m
	Diferença de nível entre apoios do vão		0,0 m
	Tipo do Vão		<b>Nivelado</b>
<b>CONDIÇÕES GERAIS</b>	Temperatura inicial		0 °C
	Tiro máximo por fase		500 kgf
	Velocidade do vento		110 km/h

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 14 – Tabela de esticamento de cabos para o vão C5.

<b>TABELA DE ESTICAMENTO DE CABOS</b>						
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>T0 (kgf)</b>	<b>TR1 (kgf)</b>	<b>TR2 (kgf)</b>	<b>Flecha (m)</b>	<b>Distância + Baixa (m)</b>	<b>Flecha Total (%)</b>
0	67,40	90,45	74,39	3,95	3,31	2,22
5	67,00	90,16	74,06	3,95	3,36	2,28
10	66,60	89,86	73,73	3,96	3,40	2,33
15	66,20	89,56	73,40	3,97	3,44	2,38
20	65,80	89,27	73,07	3,97	3,48	2,44
25	65,40	88,97	72,74	3,98	3,52	2,49
30	65,00	88,68	72,41	3,98	3,57	2,54
35	64,60	88,39	72,08	3,99	3,61	2,59
40	64,20	88,10	71,75	4,00	3,65	2,64
45	63,90	87,88	71,51	4,00	3,68	2,69
50	63,50	87,59	71,18	4,01	3,73	2,73
55	63,20	87,37	70,94	4,01	3,76	2,78
60	62,80	87,08	70,61	4,02	3,80	2,82
65	62,50	86,86	70,37	4,02	3,83	2,87
70	62,10	86,58	70,05	4,03	3,87	2,91
75	61,80	86,36	69,80	4,04	3,91	2,96
80	61,50	86,15	69,56	4,04	3,94	3,00

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 15 – Tabela de esticamento de cabos para o vão C9.

Temperatura (°C)	Força Horizontal (kgf)	Força Resultante (kgf)	Flecha Total (m)	Flecha Total (%)
0	352,90	359,52	0,70	2,16
5	343,80	350,59	0,72	2,21
10	335,30	342,26	0,74	2,27
15	327,30	334,43	0,76	2,32
20	319,90	327,19	0,78	2,38
25	313,00	320,45	0,79	2,43
30	306,50	314,10	0,81	2,48
35	300,40	308,15	0,83	2,53
40	294,60	302,50	0,84	2,58
45	289,20	297,24	0,86	2,63
50	284,00	292,19	0,87	2,68
55	279,10	287,43	0,89	2,73
60	274,50	282,96	0,90	2,77
65	270,00	278,60	0,92	2,82
70	265,80	274,53	0,93	2,86
75	261,70	270,56	0,95	2,91
80	257,90	266,89	0,96	2,95

Fonte: Produção do próprio autor.

O início da utilização da metodologia proposta na empresa de atuação do autor possibilitou ao projetista algumas vantagens:

- Primeiramente para realizar esse dimensionamento, visto que a empresa não possui *software* pago para projetos executivos de subestações, o mesmo era elaborado por planilhas contando com conferência manual de alguns pontos. Ou seja, a proposta se baseia em economizar tempo de atuação do projetista.
- Segundo, têm-se o parâmetro de esforço máximo para a estrutura nos casos de novas subestação, se dava por "tentativa e erro". A solução para tal, foi realizada com a automatização deste processo pela delimitação de percentual de flechamento. Tomando como exemplo o resultado visto para o vão C9, caso o projetista obtesse a tabela de esticamento com percentual de flecha de 2,46%, era o suficiente para obter um esforço na estrutura superior a 500kgf.

A princípio, a modificação no flechamento não apresenta problemas para o esticamento do barramento e, de fato, não possui. Entretanto, na utilização de postes duplo T do tipo "B", comumente empregados em subestações de 69kV e 138kV, existe uma modificação da resistência nominal no topo do poste. Segundo o catálogo da Premazon (2022), além da alteração de valor para adquirir a estrutura suas dimensões da base modificam, trazendo a necessidade da execução de uma fundação maior, fato este que também gera mais custos.



#### 4.4 Comparativos de Simulações/Exemplos

Esta seção é destinada para a validação da metodologia de cálculo proposta e sua implementação, através de comparação de resultados com outras referências, sendo elas: exemplos resolvidos em livros conceituados e dimensionamentos realizados em trabalhos com tema semelhante. Busca-se validar as etapas de esticamento e tabela de esticamento de cabos com flechas e trações.

Em Junior (2021), apresenta-se simulações de dimensionamentos para abranger diversas situações para tensões de 138kV, 230kV e 525kV. Para a realização das mesmas foi considerada a subestação com terreno plano, com obstáculos baixos, cuja velocidade básica do vento é de  $43m/s$ . Todos os barramentos de fase são constituídos por subcondutores do tipo CAA, sendo dois por fase para tensões de 138 kV e 230 kV e quatro para 525 kV. Para os vãos de 138 kV, a bitola é de 477 MCM (Hawk), para os de 230 kV é de 1113 MCM (Bluejay) e 954 MCM (Rail) para os de 525 kV. A Tabela 16 apresenta a tabela de vãos utilizados para dimensionamento da metodologia a ser comparada. Desta maneira, no presente trabalho, foram realizadas as análises pontuais para os vãos denominados como F11, F22 e F51.

Tabela 16 – Tabela com seleção de vãos para as simulações de dimensionamento.

Características	Vãos – nomenclaturas								
	F11	F12	F21	F22	F23	F51	F52	B01	B02
Tensão (kV)	138	138	230	230	230	525	525	0	0
$X$ (m)	16,0	46,5	18,0	54,1	54,1	60,0	144,5	144,5	40
$m_k$ (kg)	60	60	100	100	100	420	420	-	-
$L_k$ (m)	2,0	2,0	2,9	2,9	2,9	5,3	5,3	-	-
$d_k$ (mm)	255	255	255	255	255	280	280	-	-
$z$ (m)	14,0	14,0	17,0	17,0	17,0	15,5	28,0	34	20
$a$ (m)	3,0	3,0	4,0	4,0	4,0	7,5	8,7	-	-
$I_k''$ (kA)	40	40	50	50	50	63	63	-	-
$n_{esp}$	1	2	1	3	3	3	8	-	-
$a_s$ (mm)	200	200	350	350	350	457	457	-	-
$h$ (m)	0	0	0	0	11	0	0	0	15

Fonte: Junior (2021).

Após simulação no *software* proposto foi possível obter o resultados apresentados na Tabela 17. A Tabela 18 apresenta a relação de resultados para as variáveis pertinentes para comparação, obtidos na dissertação de Mestrado tomada como referência, Junior (2021).

Tabela 17 – Resultados das simulações de dimensionamento para 0°C para metodologia proposta.

Nomenclatura do Vão	$T_r$ [kgf]	Flecha[m]	Flecha[%]
F11	261,2	0,47	2,96
F22	1.005,5	1,52	2,81
F51	2.240,5	1,72	2,97

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 18 – Resultados das simulações de dimensionamento para 0°C para metodologia de referência.

Nomenclatura do Vão	$T_r$ [kgf]	Flecha[m]	Flecha[%]
F11	265,9	0,47	2,97
F22	1.126,8	1,48	2,75
F51	2.421,2	1,61	2,78

Fonte: Adaptado de Junior (2021)

Percebe-se que os resultados obtidos em ambos trabalhos para o vão denominado F11 são similares, evidenciando a funcionalidade da metodologia proposta para esforços estáticos (esticamento de condutores, efeito gravitacional e efeitos do vento). A medida que a classe de tensão do vão em análise aumenta as dissimilaridades podem ser notadas. Embora a diferença encontrada para Tração Resultante ( $T_r$ ) nas simulações para F22 e F51 não ultrapassem 10%, o fato do trabalho de referência utilizar a abordagem de esforços dinâmicos ocasionados da decorrência de um curto circuito influenciou para aumentar a variação entre os resultados.

Posteriormente com o objetivo de validar a metodologia de esticamento de cabos utilizou-se como referência o exemplo de cálculo de esticamento presente na obra de Kiessling, Nefzgez e Nolasco (2003). Neste exemplo é necessário determinar a tração sob o barramento na temperatura de 40°C a partir de características pré-determinadas a 10°C. As características do barramento são descritas a seguir:

- Comprimento do vão : 50m;
- Condutor: 1 cabo CAA por fase
  - Densidade Linear: 2,116 kg/m;
  - Módulo de Elasticidade: 68 kN/mm<sup>2</sup>;
  - Coeficiente de dilatação térmica: 1,94x10<sup>-5</sup> 1/°C;
  - Seção Transversal: 635,5 mm<sup>2</sup>.
- Cadeia de Isoladores: 5m de comprimento e massa de 150kg;

- Tração a 10°C: 6355N
- Flecha a 10°C: 1,64m

Para realizar a simulação no *software* proposto, não foi possível utilizar a entrada de dados do usuário através da interface de aquisição de dados, nem pelo banco de dados, uma vez que as características utilizadas pelo exemplo não correspondem a nenhum cabo comercializado e catalogado. Dessa forma, realizou-se a entrada manual dos dados para validação da rotina de cálculos proposta. Obteveram-se então, os seguintes resultados para o vão:

- Tração a 40°C: 6003,63N
- Flecha a 40°C: 1,65m

Os resultados apresentados no livro de referência são:

- Tração a 40°C: 6005N
- Flecha a 40°C: 1,74m

Visto que existe compatibilidade entre os resultados obtidos no *software* proposto com o resultados apresentados no livro de referência, considera-se validada a metodologia quanto ao cálculo de esticamento. Nesta validação apenas a rotina de esticamento pode ser comparada, uma vez que informações relacionadas a esforços causados pelo vento não foram mencionados.



## 5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusão

O objetivo principal deste trabalho foi propor uma solução simplificada para projetistas eletromecânicos ao dimensionar os barramentos flexíveis no que diz respeito aos esforços e tabelas de esticamento para cabos condutores e para-raios em projetos de subestações.

A técnica proposta é baseada fundamentalmente em produzir uma interface através do *software MATLAB*, que ao interagir com o projetista possibilite a aplicação de normativas técnicas e do conteúdo de esforços de barramentos flexíveis. Tal abordagem é motivada pela identificação de carências nas metodologias aplicadas atualmente profissionalmente aliada a inexistência de uma solução computacional economicamente viável. Para atingir o objetivo proposto utilizaram-se como base as normativas técnicas NBR 5422 (ABNT, 1985) e NBR 6123 (ABNT, 1988) para avaliar o efeitos dos ventos e a unificação das metodologias para cálculo de flechas e trações expostas em Fuchs, Labegalini e Almeida (1992) e Kiessling, Nefzgez e Nolasco (2003).

A funcionalidade da ferramenta proposta foi, inicialmente testada para um empreendimento de subestação existente (ampliação), avaliando seus resultados para vão nivelados e desnivelados em comparação com *software* comercial (*TFSwing*). Nesta etapa, foram apresentado resultados satisfatórios e suficientes para elaboração do projeto eletromecânico de Requisitos para Estruturas e Tabela de Esticamento de maneira confiável e eficaz.

Em segundo momento, foi demonstrada uma aplicação real da metodologia proposta em projetos executivos elaborados pela empresa Petra Engenharia. Os documentos de Tabela de Esticamento e Requisitos de Estruturas foram submetidos a análise do setor de engenharia da empresa de energia responsável pela nova subestação a fim de validar os dimensionamentos encontrados através da ferramenta de dimensionamento de barramentos flexíveis desenvolvida. Adicionalmente, vale ressaltar que a ferramenta apresenta potencial comercial e, inclusive, está sendo utilizada profissionalmente pela empresa de atuação do autor, sendo que projetos elaborados com esta metodologia já foram aprovados por concessionárias no setor de transmissão e distribuição.

Como última análise faz-se a validação do dimensionamento proposto com exemplos presentes na literatura, bem como a realização de comparações com resultados obtidos

para 3 vãos típicos do um trabalho de Mestrado de Junior (2021), com tema similar. A simulação realizada apresenta resultados apropriados e, por sua vez, fomenta a procura por melhorias na proposta de metodologia do presente trabalho.

Esta pesquisa realizada busca preencher um carência encontrada na bibliografia do setor eletromecânico de subestações, aplicando um método eficaz para dimensionamento de barramentos flexíveis. Ademais, busca-se aperfeiçoar e otimizar o trabalho desenvolvido pela empresa de atuação do autor utilizando a ferramenta proposta cumprindo os objetivos gerais e específicos relacionados na seção 1.3.

## 5.2 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, podem-se sugerir os seguintes pontos:

- Implementação do programa computacional em outra linguagem que permita maior dinamismo em sua utilização pelo usuário, como por exemplo, utilização de *Python*;
- Refinamento do *software* para agregar valor comercial possibilitando alcançar empresas projetista em todo território nacional;
- Inserção de esforços devido ao curto circuito no dimensionamento de barramentos flexíveis;
- Combinar a proposta atual com dimensionamento elétrico de barramentos, como efeito corona, efeitos térmicos, critério de ampacidade, dentre outros;
- Desenvolvimento de metodologia para dimensionamento de barramentos flexíveis focado em linhas de transmissão visando um *software* completo.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 5422: Projetos de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Rio de Janeiro, 1985. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 64.
- ABNT. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações: considerações gerais. Rio de Janeiro, 1988. Citado na página 64.
- ELFSM. Empresa de Luz e Força Santa Maria: Mais energia para sua vida. 2022. Disponível em: <<https://portal.elfsm.com.br/>>. Acesso em: jun. 2022. Citado na página 57.
- ENGENHARIA, P. Petra Engenharia LTDA: projetos de sistemas elétricos de potência (SEP). 2022. Disponível em: <<https://www.petraengenharia.com.br/>>. Acesso em: abr. 2022. Citado na página 47.
- EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022: Ano base 2021. Rio de Janeiro, Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2022. Citado na página 15.
- EPE. Resenha Mensal: O consumo nacional de energia elétrica foi 41.999 GWh em maio, expandindo 3,0% em comparação com mesmo mês de 2021. Rio de Janeiro, Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2022. Citado na página 15.
- FONSECA, C. M. Dimensionamento de Barramentos em Subestações. 2009. Citado na página 22.
- FUCHS, R. D.; LABEGALINI, P. R.; ALMEIDA, M. T. Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão. São Paulo, Brasil: Edgard Blucher, 1992. ISBN 85-212-0187-7. Citado 7 vezes nas páginas 24, 25, 27, 29, 30, 45 e 64.
- JUNIOR, I. L. Metodologia Unificada para Cálculo dos Esforços Eletromecânicos de Barramentos Flexíveis em Subestações Elétricas de Transmissão. 2021. Citado 9 vezes nas páginas 19, 20, 21, 28, 37, 38, 61, 62 e 65.
- KIESSLING, F.; NEFZGEZ, P.; NOLASCO, F. Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction. First edition. Berlin, Alemanha: [s.n.], 2003. Citado 3 vezes nas páginas 45, 62 e 64.
- MACHADO, P. Desimpedimento da faixa de servidão para linhas de transmissão: Do estudo de traçado às obras. 2018. Disponível em: <<https://www.visaogeo.com.br/desimpedimento-faixa-servidao-linhas-transmissao>>. Acesso em: 25 set. 2021. Citado na página 23.
- MAMEDE, J. F. Subestações de Alta Tensão. Rio de Janeiro: LTC, 2021. ISBN 978-85-216-3727-1. Citado na página 22.
- MCDONALD, J. D. Electric Power Substations Engineering. Third edition. Boca Raton, Flórida, EUA: [s.n.], 2013. Citado na página 19.
- MINEIRA, B. Catálogo de Cabos e Cordoalhas de Alumínio. Rio de Janeiro, 2006. Citado na página 44.

- MME. Resenha Energética Brasileira: Oferta e Demanda de Energia. Brasília, Brasil: Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, 2021. Citado na página 19.
- NEXANS. Catálogo de Condutores Nus de Alumínio. Rio de Janeiro, 2010. Citado na página 44.
- NSA. NSA Consultoria: Consultoria para projetos de linhas de transmissão e subestações de energia. 2022. Disponível em: <<http://nsaconsultoria.com.br/>>. Acesso em: jun. 2022. Citado na página 53.
- PREMAZON. Premazon: Construções Eficientes. 2022. Disponível em: <<http://preamazon.com.br/site/produtos/>>. Acesso em: abr. 2022. Citado na página 60.
- QUANTUM. SUBESTAÇÕES: Projetos, fornecimento de materiais e montagem de subestações e linhas de transmissão. 2021. Disponível em: <<http://www.quantumengenharia.net.br/subestacoes/>>. Acesso em: 20 set. 2021. Citado na página 15.
- SALENGUE, W. Barramentos Condutores em Instalações Elétricas Industriais. Rio de Janeiro: [s.n.], 1974. Citado na página 22.
- SILVA, F. R. Análise de Metodologia de Cálculo de Esforços Estáticos e Dinâmicos para Dimensionamento de Estruturas de Subestações Isoladas a Ar com Barramentos Flexíveis. 2018. Citado na página 21.