

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA

ILTON DE LIMA JUNIOR

**METODOLOGIA UNIFICADA PARA CÁLCULO DOS ESFORÇOS
ELETROMECAÂNICOS DE BARRAMENTOS FLEXÍVEIS EM
SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS DE TRANSMISSÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA

2021

ILTON DE LIMA JUNIOR

**METODOLOGIA UNIFICADA PARA CÁLCULO DOS ESFORÇOS
ELETROMECAÂNICOS DE BARRAMENTOS FLEXÍVEIS EM SUBESTAÇÕES
ELÉTRICAS DE TRANSMISSÃO**

**Unified Methodology for Calculating the Eletromechanical Efforts of Flexible
Busbars in Electric Transmission Substations**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Elétrica” – Área de Concentração: Automação e Sistemas de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Augusto de Souza Benedito.

CURITIBA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Curitiba**



ILTON DE LIMA JUNIOR

METODOLOGIA UNIFICADA PARA CÁLCULO DOS ESFORÇOS ELETROMECÂNICOS DE BARRAMENTOS FLEXÍVEIS EM SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS DE TRANSMISSÃO

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Automação E Sistemas De Energia.

Data de aprovação: 22 de Abril de 2021

Prof Raphael Augusto De S Benedito, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Roman Kuiava, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof Thiago De Paula Machado Bazzo, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 22/04/2021.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelas facilidades e dificuldades que encontrei pelo caminho, não apenas durante este período, mas desde sempre.

Ao professor orientador Dr. Raphael Benedito, pela sua dedicação ao trabalho, por ter aceitado orientar um tema trazido pelo aluno e pelas matérias que ministrou, ensinando tanto em tão pouco tempo.

Aos professores da banca, Dr. Thiago Bazzo e Dr. Roman Kuiava, por dedicarem seus tempos avaliando e contribuindo com este trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), que me acolheu durante a graduação e mais uma vez agora.

À minha esposa Dafnin, que me deu o suporte emocional necessário, além de dar à luz a duas lindas filhas durante este período, Ayla e Liara.

Aos meus pais, Ilton e Marisa, que sempre foram os maiores incentivadores da educação minha e dos meus irmãos. Meu irmão Mateus, que ajudou no tratamento gráfico de algumas figuras utilizadas, e minha irmã Mayara, contemporânea neste programa, em quem busquei ajuda e motivação diversas vezes.

Aos meus sogros, Rony e Eliane, e novamente à minha mãe, que ajudaram a cuidar da minha família quando tive que dedicar meu tempo a outras atividades de estudo ou trabalho durante este período.

Aos meus cunhados Ronnier e Pedro e à minha prima Ana Paula, todos mais experientes academicamente e, por isto, muito consultados por mim sobre dúvidas que tive.

À empresa Ensiste Engenharia, especialmente ao Cláudio e Davi por incentivarem o desenvolvimento pessoal, profissional e acadêmico. Também aos colegas Marlon, Eli, Bruno e Dalzoto, com quem conversei diversas vezes sobre a pesquisa e obtive boas ideias.

Por fim, aos colegas da UTFPR, que tornaram a jornada das matérias mais leve e produtiva.

RESUMO

LIMA JUNIOR, Ilton De. **Metodologia Unificada para Cálculo dos Esforços Eletromecânicos de Barramentos Flexíveis em Subestações Elétricas de Transmissão**. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

Os projetos executivos são necessários para construção de uma Subestação Elétrica (SE) de transmissão, e um destes é o projeto eletromecânico. Dentre as diversas atribuições da disciplina eletromecânica, destacam-se os requisitos para estruturas, constituídos por desenhos, diagramas e memoriais de cálculo dos esforços aplicados por barramentos rígidos ou flexíveis às estruturas suportes. São abordados os barramentos flexíveis, cujos esforços supramencionados, classificados em estáticos ou dinâmicos, ocorrem devido à tração, peso, incidência de vento e/ou curto-circuito. Os métodos para determinação de cada esforço constam principalmente em normas técnicas, mas também em outras referências bibliográficas. Ao analisá-las, nota-se uma carência de orientação sobre a forma de aplicação dessas em um dimensionamento completo. Além disto, verifica-se a inexistência de uma ferramenta computacional, disponível profissionalmente, que seja útil às empresas projetistas. Por isto, o objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia unificada e sua implementação computacional, para dimensionamento eletromecânico completo dos esforços de barramentos flexíveis em SEs. Detalham-se a metodologia proposta e a implementação do programa desenvolvido em MATLAB. Apresentam-se algumas simulações de dimensionamentos, baseadas em arranjos típicos de barramentos de SEs, além de exemplos de análises de sensibilidades de variáveis, utilizando uma funcionalidade implementada que auxilia o engenheiro na tomada de decisões para otimização dos esforços. A validação da metodologia unificada é realizada por meio de comparações com resultados de exemplos constantes nas normas técnicas e outras referências selecionadas. Portanto, o presente trabalho possui como principal contribuição a proposta de uma metodologia unificada, possuindo aplicação prática através de um programa computacional. A ferramenta apresenta potencial comercial e, inclusive, já vem sendo utilizada profissionalmente. Adicionalmente, esta pesquisa ajuda a preencher uma lacuna identificada na bibliografia atual, condensando diversas informações a respeito do dimensionamento dos esforços de barramentos flexíveis. Serve também como um guia profissional para os engenheiros da área.

Palavras-chave: Subestação, Projeto Eletromecânico, Barramento Flexível, Cálculo de Esticamento, Esforço de Curto-circuito, IEC 60865, NBR 5422, NBR 6123.

ABSTRACT

LIMA JUNIOR, Ilton De. **Unified Methodology for Calculating the Electromechanical Efforts of Flexible Busbars in Electric Transmission Substations**. 144 f. Master's thesis - Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

Executive design is necessary to build an electrical transmission substation (SE). One component of such work is the electromechanical design. Among the various attributions of the electromechanical subject, the requirements for structures stand out. They consist of drawings, diagrams, and memorials used to calculate the efforts applied by rigid or flexible busbars on their supporting structures. Flexible busbars, whose efforts mentioned above, are classified as static or dynamic. They occur due to busbar traction and weight, wind incidence and short-circuit situations. Even though, the methods to determine each effort are mainly contained in technical standards, plus are also brought by other bibliographic references. However, this information lacks guidance on how to combine them in a full design. Besides, there is no computational tool, professionally available, that is useful to design companies. This work's main objective is the development of a unified methodology, and its computational implementation, for the complete electromechanical design of flexible busbars efforts in SEs. The proposed methodology and the software's implementation are detailed. Some design simulations are presented, based on typical busbar arrangements of SEs, as well as examples of sensitivity analyses of variables, using an implemented functionality that assists the engineer in decisions to optimize the efforts' values. The unified methodology validation is performed through comparisons with results from examples contained in the technical standards and other selected references. Therefore, the present work has as main contribution the development of the unified methodology, with practical application through a software. The tool has commercial potential and has already been used professionally. In addition, this research helps to fill a gap identified in the current bibliography and cover several information regarding the design of flexible busbar efforts. This can also serve as a professional guide for engineers.

Keywords: Substation, Electromechanical Design, Flexible Busbar, Sag and Tension Calculation, Short-circuit Effort, IEC 60865, NBR 5422, NBR 6123.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama unifilar e arranjo físico de uma entrada de LT 230 kV na SE.....	18
Figura 1.2: Exemplo de diagrama de esforços.	19
Figura 2.1: Resumo geral das etapas de dimensionamento.	24
Figura 2.2: Etapas de cálculo para determinação dos esforços estáticos.....	25
Figura 2.3: Foto de um vão de barramento desnivelado.	26
Figura 2.4: Vão conceitual de barramento desnivelado sem cadeias de isoladores.	27
Figura 2.5: Foto de um vão de barramento nivelado.....	31
Figura 2.6: Vão conceitual de barramento nivelado com cadeias de isoladores.	32
Figura 2.7: Etapas de cálculo para determinação dos efeitos do vento.	34
Figura 2.8: Mapa de isopletas, para determinação de V0 em m/s.....	35
Figura 2.9: Consideração de taludes e morros para cálculo do fator topográfico.	37
Figura 2.10: Mapa de isopletas, para determinação de V0 em m/s.....	43
Figura 2.11: Fator de correção em função do período de integração.	44
Figura 2.12: Mapa com as médias das temperaturas mínimas diárias em °C.	46
Figura 2.13: Fator de efetividade de vento.	47
Figura 2.14: Etapas de cálculo para determinação dos esforços do curto-circuito.....	49
Figura 3.1: Etapas para desenvolvimento da metodologia unificada proposta.	62
Figura 3.2: Fluxograma da rotina “Principal”.	73
Figura 3.2: Interface de usuário para entrada de dados.	74
Figura 3.3: Comentário na planilha “Entradas.xlsx”.	75
Figura 3.4: Fluxograma da rotina “Vento”.	77
Figura 3.5: Fluxograma da rotina “Esticamento”.	81
Figura 3.6: Fluxograma da rotina “Curto_circuito”.	83
Figura 3.7: Exemplo de cabeçalho dos resultados de um dimensionamento.	87
Figura 3.8: Exemplo de tabela de esticamento para vão de barramento nivelado.....	87
Figura 3.9: Exemplo de tabela de esticamento para vão de barramento desnivelado. ...	88
Figura 3.10: Exemplo de resultados relacionados aos efeitos do vento.	89
Figura 3.11: Exemplo de resultados relacionados aos efeitos do curto-circuito.	89
Figura 3.12: Fluxograma da rotina “Analises”.	93
Figura 4.1: Gráficos para análises de sensibilidades de variáveis do vão “F12”.	99
Figura 4.2: Gráficos para análises de sensibilidades de variáveis do vão “F22”.	101

Figura 4.3: Gráficos para análises de sensibilidades de variáveis do vão “F52”.	103
Figura A.1: Entradas do usuário para simulações dos dimensionamentos 1 e 2.	113
Figura A.2: Entradas do usuário para simulações dos dimensionamentos 3 e 4.	114
Figura A.3: Entradas do usuário para simulações dos dimensionamentos 5 e 6.	115
Figura A.4: Entradas do usuário para simulações dos dimensionamentos 7 e 8.	116
Figura A.5: Entradas do usuário para simulações dos dimensionamentos 9 e 10.	117
Figura C.1: Entradas do usuário para simulações de análises do vão “F12”	138
Figura C.2: Entradas do usuário para simulações de análises do vão “F22”	139
Figura C.3: Entradas do usuário para simulações de análises do vão “F52”	140
Figura D.1: Validação da metodologia de esticamento.	141
Figura E.1: Validação da metodologia para efeitos do vento (Vão de 60 m).	142
Figura E.2: Validação da metodologia para efeitos do vento (Vão de 100 m).....	142
Figura E.3: Validação da metodologia para efeitos do vento (Vão de 140 m).....	143
Figura F.1: Validação da metodologia para efeitos do curto-circuito.	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Categoria de rugosidade do terreno.	38
Tabela 2.2: Classe do objeto quanto às dimensões.....	38
Tabela 2.3: Parâmetros meteorológicos.	39
Tabela 2.4: Fator estatístico.....	39
Tabela 2.5: Coeficiente de arrasto para cabos torcidos de fios.	40
Tabela 2.6: Fator de redução para barras prismáticas de comprimento finito.....	41
Tabela 2.7: Coeficiente de arrasto para barras prismáticas de seção circular.	41
Tabela 2.8: Coeficiente de rugosidade do terreno.	44
Tabela 2.9: Fator de correção aplicável à altura de instalação.	45
Tabela 2.10: Valores típicos para constante de <i>Spring</i>	51
Tabela 2.11: Coeficiente de dilatação térmica em função da corrente.....	54
Tabela 4.1: Seleção de vãos para as simulações de dimensionamento.	94
Tabela 4.2: Resultados das simulações de dimensionamentos.....	95
Tabela 4.3: Validação da metodologia relacionada aos efeitos do vento.....	106
Tabela 4.4: Validação da metodologia relacionada aos efeitos do curto-circuito.....	107

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BD4	Arranjo de barras tipo barra dupla a quatro chaves
CA	Cabo de alumínio
CAA	Cabo de alumínio com alma de aço
CAL	Cabo de liga de alumínio reforçada
CALA	Cabo de alumínio com alma de liga de alumínio reforçada
CIGRÈ	<i>Conseil International Des Grands Réseaux Électriques</i>
IEC	<i>International Elettrotechnical Commission</i>
kA	Quiloampère
kV	Quilovolt
SE	Subestação Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
LT	Linha de Transmissão
T-CA	Cabo de alumínio termorresistente
T-CAA	Cabo de alumínio termorresistente com alma de aço

LISTA DE VARIÁVEIS

Variáveis	Descrição	Unidade
a	Distância entre fases, eixo a eixo	m
A_c	Ação do vento nos cabos	N
A_i	Ação do vento na cadeia de isoladores	N
ALT	Altitude média do terreno ou região	m
a_{min}	Distância mínima entre fases durante e após o curto-circuito	m
a_s	Distância entre subcondutores, eixo a eixo	m
A_s	Seção transversal total do subcondutor	m ²
b	Parâmetro meteorológico para cálculo de S_2	-
b_h	Deslocamento horizontal máximo do barramento durante ou após o curto-circuito	m
c_{th}	Coefficiente de expansão térmica do cabo, em função da corrente elétrica	$\frac{m^4}{A^2s}$
C_{a-k}	Coefficiente de arrasto de vento para a cadeia de isoladores	-
C_{a-s}	Coefficiente de arrasto de vento para o subcondutor	-
C_D	Fator de expansão elástica e térmica do barramento devido ao curto-circuito	-
C_F	Fator de incremento da flecha do barramento, referente à deformação da catenária devido ao curto-circuito	-
d	Diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro	m
d_{esp}	Distância média entre espaçadores adjacentes	m
d_k	Diâmetro externo da cadeia de isoladores	m
d_s	Diâmetro externo do subcondutor	m
E_{eff}	Módulo de elasticidade corrigido para o barramento	N/m ²
E_s	Módulo de elasticidade final do subcondutor	N/m ²
f	Frequência fundamental do sistema elétrico	Hz
f_1	Parcela da flecha do barramento referente às cadeias de isoladores	m
f_2	Parcela da flecha do barramento referente ao condutor	m
F_{a-b}	Esforço transversal total, aplicado pelo barramento ao ponto de ancoragem devido ao vento	N
F_{a-k}	Força de arrasto de vento sobre a cadeia de isoladores	N
F_{a-s}	Força de arrasto de vento sobre o subcondutor	N
f_e	Flecha total do barramento referente ao vão nivelado equivalente	m
f_{ed}	Flecha dinâmica do barramento durante ou após o curto-circuito	m
f_{es}	Flecha estática do barramento considerada para aplicação do curto-circuito	m
$F_{f,d}$	Esforço de tração do barramento após o curto-circuito	N

Variáveis	Descrição	Unidade
F_m	Força eletromagnética característica entre fases	N/m
F_{m2}	Força eletromagnética característica entre fases devido ao curto-circuito bifásico	N/m
F_{m3}	Força eletromagnética característica entre fases devido ao curto-circuito trifásico	N/m
f_{max}	Flecha máxima de operação do barramento	m
f_{maxp}	Flecha máxima percentual de operação do barramento, referente ao comprimento X do vão	-
$F_{pi,d}$	Esforço de tração devido ao aperto, ou <i>pinch</i> , dos subcondutores durante o curto-circuito	N
F_r	Fator de rajada de vento	-
F_{st}	Esforço de tração estática do barramento, para cálculo dos esforços devido ao curto-circuito	N
f_t	Flecha total do barramento nivelado	m
$F_{t,d}$	Esforço de tração do barramento durante o curto-circuito	N
F_v	Força eletromagnética característica entre subcondutores	N/m
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
G_k	Peso da cadeia de isoladores por subcondutor	N
G_{k1}	Peso da cadeia de isoladores no estado 1 por subcondutor	N
G_{k2}	Peso da cadeia de isoladores no estado 2 por subcondutor	N
G_{kv}	Peso da cadeia de isoladores, por subcondutor, com carga de vento incorporada	N
h	Desnível entre os suportes de ancoragem	m
H	Componente horizontal da tração do barramento por subcondutor	N
H_1	Componente H referente ao estado 1	N
H_2	Componente H referente ao estado 2	N
I_k''	Corrente simétrica eficaz de curto-circuito	A
I_{k2}''	Corrente simétrica eficaz de curto-circuito bifásico	A
I_{k3}''	Corrente simétrica eficaz de curto-circuito trifásico	A
j	Parâmetro que determina a configuração do feixe de subcondutores durante o curto-circuito	-
K	Fator de redução do arrasto de vento	-
K_r	Coefficiente de rugosidade do terreno	-
K_d	Fator de correção da velocidade de vento em função do tempo de integração	-
l_s	Comprimento horizontal do subcondutor	m
L	Comprimento real do barramento, ao longo da catenária	m
L_k	Comprimento da cadeia de isoladores	m
$L_{k,x}$	Projeção horizontal de L_k	m
m_s	Densidade linear do subcondutor	kg/m

Variáveis	Descrição	Unidade
m_{s1}	Densidade linear do subcondutor no estado 1	kg/m
m_{s2}	Densidade linear do subcondutor no estado 2	kg/m
m_{skd}	Densidade linear do subcondutor mais massa das cadeias de isoladores distribuídas uniformemente	kg/m
m_{sv}	Densidade linear do subcondutor com carga de vento incorporada	kg/m
N	Coefficiente de rigidez do conjunto de estruturas suportes mais barramento flexível	1/N
n_{esp}	Número de espaçadores por fase do barramento	-
n_s	Número de subcondutores por fase do barramento	-
n_{sv}	Número de subcondutores, por fase do barramento, que recebe carga de vento	-
P_A, P_B	Esforços estáticos verticais por fase, aplicados no ponto de ancoragem dos suportes A ou B	N
p	Parâmetro meteorológico para cálculo de S_2	-
q	Pressão dinâmica de vento	N/m ²
r'	Raio do fio que constitui o cabo	m
r_f	Razão entre a força eletromagnética característica e o peso do barramento	-
Re_k	Número de Reynolds para a cadeia de isoladores	-
Re_s	Número de Reynolds para o subcondutor	-
S	Constante de <i>Spring</i> , ou elástica, para ambos os suportes do barramento	N/m
S_1	Fator topográfico para correção da velocidade de vento	-
S_2	Fator combinado para correção da velocidade de vento	-
S_3	Fator estatístico para correção da velocidade de vento	-
T	Período de oscilação do barramento sem curto-circuito	s
T_1	Temperatura do condutor no estado 1	°C
T_2	Temperatura do condutor no estado 2	°C
T_c	Temperatura coincidente	°C
T_{cv}	Tração estática com vento por fase	N
T_{k1}	Tempo de duração do curto-circuito	s
T_{pi}	Parâmetro para cálculo de v_2	-
T_{res}	Período de oscilação do barramento com curto-circuito	s
T_{sv}	Tração estática sem vento por fase	N
u	Fator de correção da velocidade de vento em função da altura	-
V	Componente vertical da tração do barramento por subcondutor aplicada a cada ponto de ancoragem do vão nivelado	N
V_0	Velocidade básica de vento	m/s
v_1, v_2, v_3, v_4 e v_e	Fatores para cálculo de $F_{pi,d}$	-

Variáveis	Descrição	Unidade
V_A, V_B	Esforços estáticos verticais por subcondutor, aplicados no ponto de ancoragem dos suportes A ou B	N
V_k	Velocidade característica de vento, ou de projeto	m/s
X	Comprimento horizontal real do vão	m
X_A	Distância horizontal entre o vértice da catenária do barramento e o ponto de ancoragem A	m
X_B	Distância horizontal entre o vértice da catenária do barramento e o ponto de ancoragem B	m
X_e	Comprimento horizontal do vão nivelado equivalente	m
z	Altura de instalação, em relação ao solo	m
α_{ef}	Fator de efetividade de vento	-
γ	Fator para estimativa da frequência natural relevante	-
ϵ_{ela}	Fator de expansão elástica do barramento devido ao curto-circuito	-
$\epsilon_{st}, \epsilon_{pi}$	Fatores que caracterizam a deformação do feixe de subcondutores	-
ϵ_t	Coefficiente de dilatação térmica linear do subcondutor	1/°C
ϵ_{th}	Fator de expansão térmica do barramento devido ao curto-circuito	-
η	Fator para cálculo de $F_{pi,d}$, no caso de subcondutores que não colidem	-
ζ	Fator de estresse do barramento flexível	-
δ_1	Ângulo de direção da resultante entre F_m e o peso do barramento	°
δ_{end}	Ângulo do barramento ao final do curto-circuito	°
δ_{max}	Ângulo máximo do barramento após o curto-circuito	°
θ	Ângulo médio de inclinação do talude ou morro	°
κ	Fator de assimetria da corrente de curto-circuito	-
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo	H/m
ξ	Fator para cálculo de $F_{pi,d}$, no caso de subcondutores que colidem	-
ρ_{ar}	Massa específica do ar	kg/m ³
σ_{fin}	Menor valor de tração no subcondutor quando E_s se torna constante	N/m ²
τ	Constante de tempo do sistema elétrico	s
φ	Parâmetro de carga para cálculo de $F_{t,d}$	-
χ	Parâmetro de quantidade para cálculo de δ_{max}	-
ψ	Fator, em função de φ e ζ , para cálculo de $F_{t,d}$	-

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS.....	20
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	23
2	REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	ESFORÇOS ESTÁTICOS.....	24
2.1.1	ESTICAMENTO PARA VÃOS DESNIVELADOS SEM CADEIAS DE ISOLADORES.....	26
2.1.2	ESTICAMENTO PARA VÃOS NIVELADOS COM CADEIAS DE ISOLADORES.....	31
2.1.3	EFEITOS DO VENTO	34
2.1.3.1	Método da norma NBR 6123:1988.....	34
2.1.3.2	Método da norma NBR 5422:1985.....	42
2.2	ESFORÇOS DINÂMICOS.....	47
2.2.1	EFEITOS DO CURTO-CIRCUITO	48
2.2.1.1	Método da norma IEC 60865-1:2011	48
2.2.1.1.1	Cálculos preliminares.....	49
2.2.1.1.2	Esforço durante o curto-circuito	53
2.2.1.1.3	Esforço após o curto-circuito	53
2.2.1.1.4	Mudança dinâmica da flecha do barramento	54
2.2.1.1.5	Esforço de aperto, ou de <i>pinch</i>	56
2.2.1.1.6	Esforços de curto-circuito para projeto dos elementos do barramento	60
2.3	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	61
3	METODOLOGIA UNIFICADA PROPOSTA E PROGRAMA COMPUTACIONAL	62
3.1	A METODOLOGIA UNIFICADA PROPOSTA.....	62
3.1.1	METODOLOGIA PROPOSTA PARA CÁLCULO DE ESTICAMENTO .	63
3.1.2	METODOLOGIA PROPOSTA PARA CÁLCULO DOS EFEITOS DO VENTO	68
3.1.3	METODOLOGIA PROPOSTA PARA CÁLCULO DOS EFEITOS DO CURTO-CIRCUITO.....	70
3.2	O ALGORITIMO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL	71

3.2.1	ROTINA “PRINCIPAL”	72
3.2.2	ROTINA “LEITOR_ENTRADAS”	73
3.2.3	ROTINA “LEITOR_DADOS_CABOS”	75
3.2.4	ROTINA “VENTO”	77
3.2.5	ROTINA “ESTICAMENTO”	80
3.2.6	ROTINA “CURTO_CIRCUITO”	83
3.2.7	ROTINA “SAIDAS”	86
3.2.8	ROTINA “ANALISES”	90
4	DIMENSIONAMENTOS, ANÁLISES E VALIDAÇÕES	94
4.1	SIMULAÇÕES DE DIMENSIONAMENTOS	94
4.2	SIMULAÇÕES PARA ANÁLISES DE SENSIBILIDADES DE VARIÁVEIS	97
4.2.1	VÃO “F12” – 138 kV – LONGO – NIVELADO.....	98
4.2.2	VÃO “F22” – 230 kV – LONGO – NIVELADO.....	100
4.2.3	VÃO “F52” – 525 kV – LONGO – NIVELADO.....	102
4.3	SIMULAÇÕES PARA VALIDAÇÕES	104
4.3.1	ESTICAMENTO	104
4.3.2	EFEITOS DO VENTO	105
4.3.3	EFEITOS DO CURTO-CIRCUITO	106
5	CONCLUSÕES	108
	REFERÊNCIAS	111
	APÊNDICE A - ENTRADA DE DADOS PARA AS SIMULAÇÕES DE DIMENSIONAMENTO.....	113
	APÊNDICE B - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE DIMENSIONAMENTO	118
	APÊNDICE C - ENTRADA DE DADOS DAS SIMULAÇÕES PARA ANÁLISES DE SENSIBILIDADES DE VARIÁVEIS	138
	APÊNDICE D - SAÍDA MATLAB PARA A VALIDAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA DE ESTICAMENTO	141

APÊNDICE E - SAÍDAS MATLAB PARA A VALIDAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA DE CÁLCULO DOS EFEITOS DO VENTO	142
--	------------

APÊNDICE F - SAÍDAS MATLAB PARA A VALIDAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA DE CÁLCULO DOS EFEITOS DO CURTO-CIRCUITO	144
---	------------

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica no Brasil é predominantemente através das usinas hidrelétricas, chegando a 64% do total durante o ano de 2019, o que faz com que uma porção relevante da potência gerada se encontre distante dos principais centros consumidores. Por isto, o país possui mais de 140 mil quilômetros de Linhas de Transmissão (LTs) (EPE, 2020). Consequentemente, necessita de um número proporcionalmente grande de Subestações Elétricas (SEs) de transmissão para prover a transformação da tensão, interligação, proteção, controle e supervisão do Sistema Interligado Nacional (SIN).

As concessões de transmissão da Rede Básica¹ são leiloadas em lotes, através de editais lançados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A concessionária vencedora é responsável por construir as LTs e SEs, e operá-las durante 30 anos. Assim, após o leilão, inicia-se a fase de planejamento das implantações, composta por diversas etapas, como: obtenção de licenças ambientais, projeto básico, projeto executivo, contratação de fornecedores e outras.

O projeto eletromecânico executivo pode ser dividido nos seguintes projetos (MCDONALD, 2003):

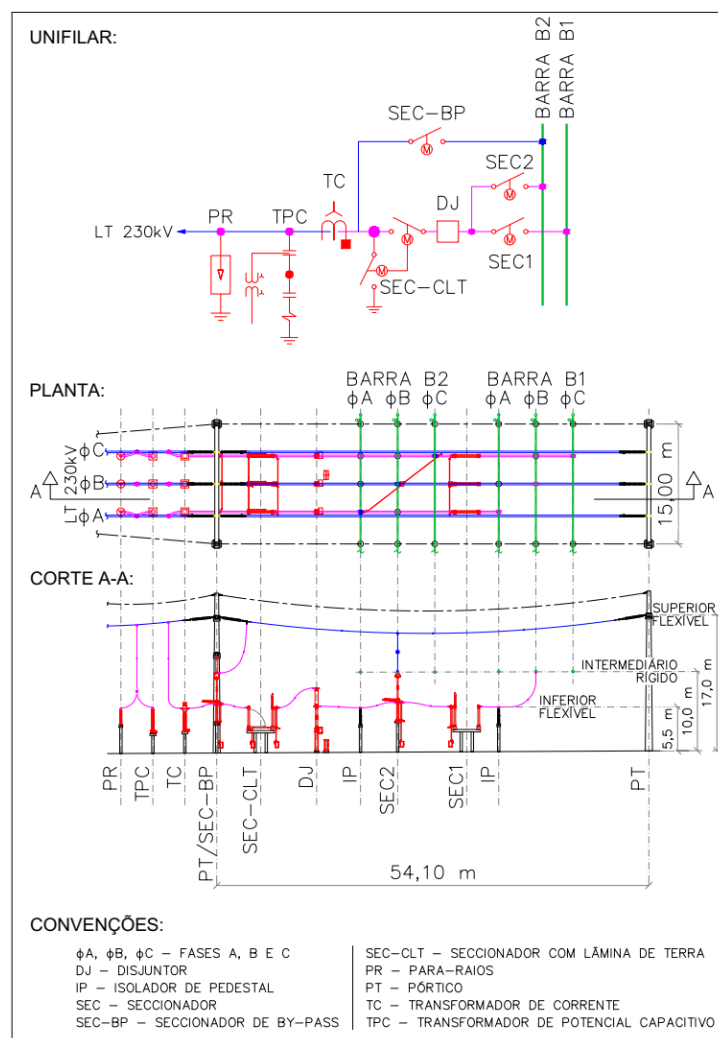
- Arranjo físico;
- Requisitos para estruturas;
- Malha de aterramento;
- Vias para cabos;
- Detalhes de instalação de equipamentos;
- Iluminação externa;
- Instalações prediais.

Este trabalho aborda o dimensionamento dos esforços eletromecânicos em barramentos flexíveis, necessário para a elaboração do projeto de requisitos para estruturas. A função deste é fornecer informações necessárias e suficientes para que projetistas estruturais, engenheiros civis, possam dimensionar as estruturas suportes de ancoragem e respectivas fundações.

¹ A Rede Básica é constituída por instalações que operam sob coordenação ou supervisão do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Normalmente, os arranjos físicos das SEs utilizam três níveis de barramentos: inferior, intermediário e superior. Os condutores podem ser do tipo rígido ou flexível, sendo que, nos dois primeiros níveis são ambos de comum aplicação, mas para o nível superior é exclusivamente utilizado o flexível. A Figura 1.1 ilustra um circuito de entrada de LT 230 kV em uma SE, através do diagrama unifilar simplificado e desenhos de arranjo físico, em planta e corte, nos quais podem ser identificados os três níveis supracitados. O arranjo é do tipo Barra Dupla Quatro Chaves (BD4), em que o barramento inferior efetua a interligação entre os equipamentos e o superior permite a transferência do circuito entre as duas barras principais, formadas pelos barramentos intermediários, ortogonais aos outros dois.

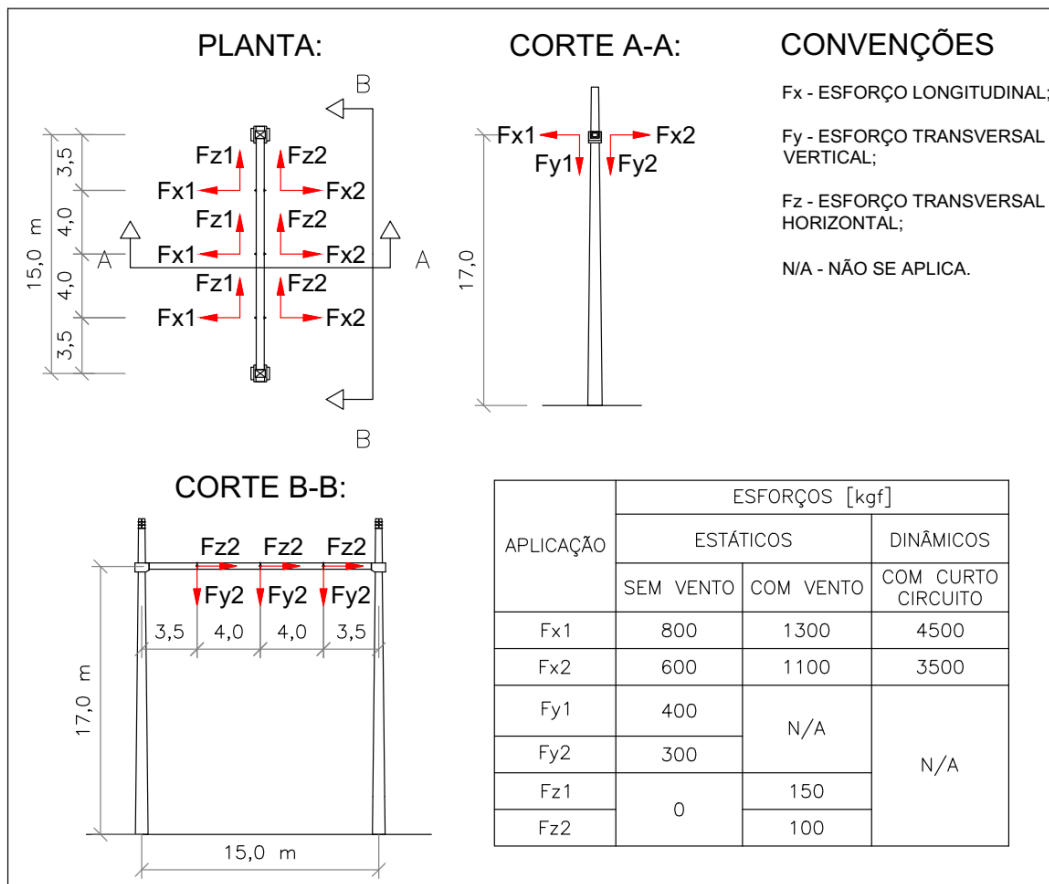
Figura 1.1: Diagrama unifilar e arranjo físico de uma entrada de LT 230 kV na SE.



Fonte: Autoria própria.

Uma apresentação comum do projeto de requisitos se faz por meio de diagramas de esforços sobre desenhos de silhuetas das estruturas, como mostrado no exemplo da Figura 1.2. O esforço F_x é de tração, longitudinal ao barramento, F_y e F_z são transversais vertical e horizontal, respectivamente. A metodologia de cálculo para determinação dos esforços deve constar no memorial cálculo do projeto.

Figura 1.2: Exemplo de diagrama de esforços.



Fonte: Autoria própria.

Os esforços de tração podem assumir valores estáticos e dinâmicos. Os estáticos são originários do esticamento dos condutores, efeito gravitacional e efeitos do vento. Os dinâmicos são causados pelo curto-circuito, mas também dependem dos valores estáticos. Devido ao maior dinamismo dos efeitos do curto-circuito, a classificação dos esforços devido ao vento como estáticos é comumente aplicada como critério de projeto, ainda que este efeito seja intrinsecamente dinâmico.

1.1 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

A atuação profissional, como engenheiro projetista eletromecânico de SEs, permitiu verificar que existem divergências de entendimento sobre a forma correta de aplicação dos cálculos para dimensionamento de barramentos flexíveis. De forma geral, pode-se relacionar as seguintes etapas de cálculo:

- Esforços estáticos: cálculo de esticamento e dos efeitos do vento;
- Esforços dinâmicos: cálculo dos efeitos do curto-circuito.

A metodologia do cálculo de esticamento é consolidada para projetos de LTs, entretanto, apresenta uma particularidade importante em relação aos barramentos de SEs, cujos comprimentos dos vãos, salvo exceções, são consideravelmente mais curtos. Para as LTs, as características das cadeias de isoladores são menos determinantes nos resultados, permitindo que a consideração de suas massas possa ser simplificada, distribuindo estas ao longo do vão, incrementando a densidade linear aparente do condutor. Já para os vãos de SEs, esta simplificação pode influenciar os resultados de forma relevante, sendo cauto que se considere as cadeias como cargas concentradas nas extremidades do barramento (KIESSLING *et al.*, 2003). Esta particularidade, somada à ocorrência de vãos desnivelados, estabelece uma configuração pouco abordada pela bibliografia de referência disponível.

Para o cálculo dos efeitos do vento, existem referências mais completas, não específicas para SEs, mas cujos conteúdos conseguem envolver a maior parte das situações usuais. São as normas: NBR 5422 (ABNT, 1985) e NBR 6123 (ABNT, 1988). A primeira é direcionada a projetos de LTs e a segunda a edificações e estruturas em geral. Uma pesquisa realizada por Silva (2018), com empresas projetistas nacionais, aponta maior utilização da norma de edificações em projetos de SEs. Esta norma considera um número maior de variáveis, como fator topográfico para instalações situadas no topo de morros ou próximas de taludes, o que corrobora a preferência identificada. Entretanto, nenhuma aborda sobre o incremento de tração causado pela resultante transversal de vento no barramento.

A respeito dos esforços dinâmicos, grande parte das empresas projetistas não considera os efeitos do curto-circuito no dimensionamento, ou utilizam os resultados de forma inconsistente (SILVA, 2018). Estes efeitos são determinados através do método de cálculo presente na norma IEC 60865-1 (IEC, 2011), cujo roteiro de equações e condições é especialmente mais extenso e complexo do que os demais dimensionamentos sob

responsabilidade profissional de uma equipe de projetos eletromecânicos. Esta extensão e complexidade pode constituir uma provável causa da não aderência dos projetistas à esta etapa do dimensionamento. Destaca-se ainda, a inexistência de uma ferramenta comercial, desenvolvida nacionalmente, economicamente viável para aquisição por empresas projetistas.

Apresentados os diversos métodos aplicáveis, verifica-se a carência de referências que orientem como combiná-los em uma metodologia para dimensionamento completo dos esforços de barramentos flexíveis. Em Silva (2018), uma outra dissertação de mestrado, compilam-se os métodos em uma proposta de roteiro unificado, suprimindo parte desta carência, mas essa se apresenta como uma das poucas pesquisas focadas neste problema. A presente dissertação possui similaridades com a supracitada, pois também organiza os métodos em um roteiro unificado, entretanto, destacam-se duas principais particularidades:

- Apresenta adaptações, combinações e interconexões entre os diferentes métodos existentes, originando soluções singulares para situações não abrangidas nas referências. Alguns engenheiros utilizam profissionalmente estas soluções, entretanto, academicamente, não foram encontradas pesquisas com esta abordagem específica;
- Apresenta a implementação computacional de forma mais detalhada, facilitando sua utilização como referência em trabalhos futuros.

Assim, o objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia unificada, implementada computacionalmente, para dimensionamento completo dos esforços eletromecânicos de barramentos flexíveis em SEs. Como objetivos específicos, destacam-se:

- Pesquisa sobre os métodos existentes;
- Proposição de modificações sobre os métodos existentes, para torná-los mais abrangentes e possíveis de serem interconectados;
- Organização dos métodos modificados em um roteiro único, para constituição da metodologia unificada;
- Implementação computacional da metodologia unificada, utilizando a ferramenta MATLAB¹;

¹ *Software* utilizado sob a licença acadêmica nº 41012215.

- Realização de simulações de dimensionamentos, simulações para as análises de sensibilidades de variáveis e para validações;
- Discussões, comparações e conclusões sobre os resultados obtidos.

Sobre a ferramenta computacional, é desejável que seja autossuficiente, confiável e eficiente. Ou seja, deve possuir uma funcionalidade para dimensionamento com:

- Possibilidade de dimensionar os esforços de barramentos flexíveis sem a necessidade de outras ferramentas de cálculo;
- Segurança de atendimento às normas e outras referências aplicáveis;
- Banco de dados com características dos diferentes tipos de cabos, evitando que o usuário necessite consultar catálogos durante o dimensionamento;
- Possibilidade de aproveitamento dos dados de entrada, para realização de dimensionamentos semelhantes em série;
- Facilidade para alteração dos dados de entrada, para correção do dimensionamento após finalizado.

Além da funcionalidade de dimensionamento, outra se apresenta útil para equipar a ferramenta. Variando os parâmetros do barramento individualmente, é possível plotar gráficos que representam o comportamento dos esforços. Através destes, o usuário pode realizar análises de sensibilidade de variáveis e identificar possíveis otimizações. Um problema prático atual e recorrente se refere ao custo das estruturas suportes na implantação de uma subestação. As possíveis otimizações dos esforços podem refletir diretamente neste custo, corroborando a importância desta funcionalidade para o programa.

Portanto, o presente trabalho contribui não apenas com o entendimento sobre as formas de aplicação dos diferentes métodos existentes, mas também com as possíveis adaptações, combinações e interconexões entre esses. Além de possuir aplicação prática através de um programa computacional, serve como um guia para engenheiros durante a prática profissional.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para atingir os objetivos propostos, esta dissertação é subdividida em cinco capítulos, como descrito a seguir.

O segundo capítulo reúne os métodos das referências bibliográficas relevantes, fundamentando-se em livros, normas, outros trabalhos acadêmicos e artigos científicos. Além da revisão bibliográfica, antecipam-se alguns pontos da análise crítica.

No terceiro capítulo, complementa-se a análise crítica das referências, e segue com a proposta da metodologia unificada para dimensionamento eletromecânico completo dos esforços de barramentos flexíveis. Adicionalmente, apresenta-se a implementação computacional de cada rotina do programa, utilizando algoritmos em linguagem natural e fluxogramas.

O quarto capítulo é constituído por simulações de dimensionamentos, análises de sensibilidades de variáveis e validações da metodologia proposta. Para tal, utilizam-se vãos típicos de barramentos 525 kV, 230 kV, 138 kV e cabos de blindagem atmosférica.

O quinto e último capítulo conclui sobre as discussões e contribuições do presente trabalho, além de apresentar sugestões para trabalhos futuros.

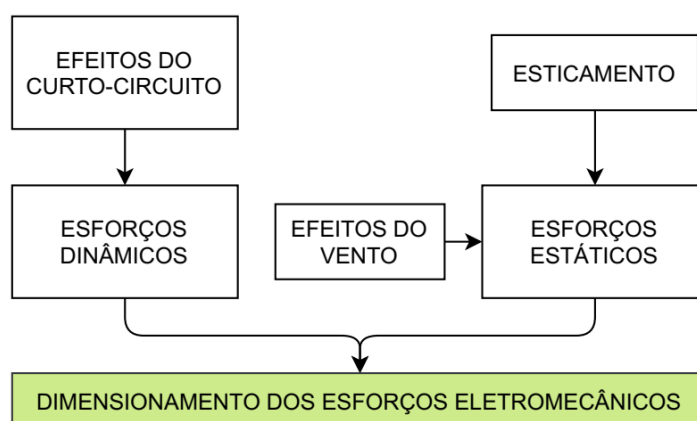
2 REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os métodos de cálculo, presentes em normas e outras referências, separando o assunto abordado em dois tópicos: esforços estáticos e esforços dinâmicos. Conforme citado no capítulo anterior, os efeitos do vento podem ser entendidos como estáticos ou dinâmicos. Considerar-se-ão como estáticos.

Algumas deduções matemáticas não são apresentadas, pois o objetivo não é alterar os métodos individuais, mas propor adaptações, combinações e interconexões.

A Figura 2.1 ilustra, de forma geral, as etapas de cálculo envolvidas no dimensionamento. O esticamento e os efeitos do vento constituem os esforços estáticos, e os efeitos do curto-circuito, os dinâmicos. Determinados ambos, pode-se considerar o barramento como dimensionado para os esforços eletromecânicos.

Figura 2.1: Resumo geral das etapas de dimensionamento.



Fonte: Autoria própria.

2.1 ESFORÇOS ESTÁTICOS

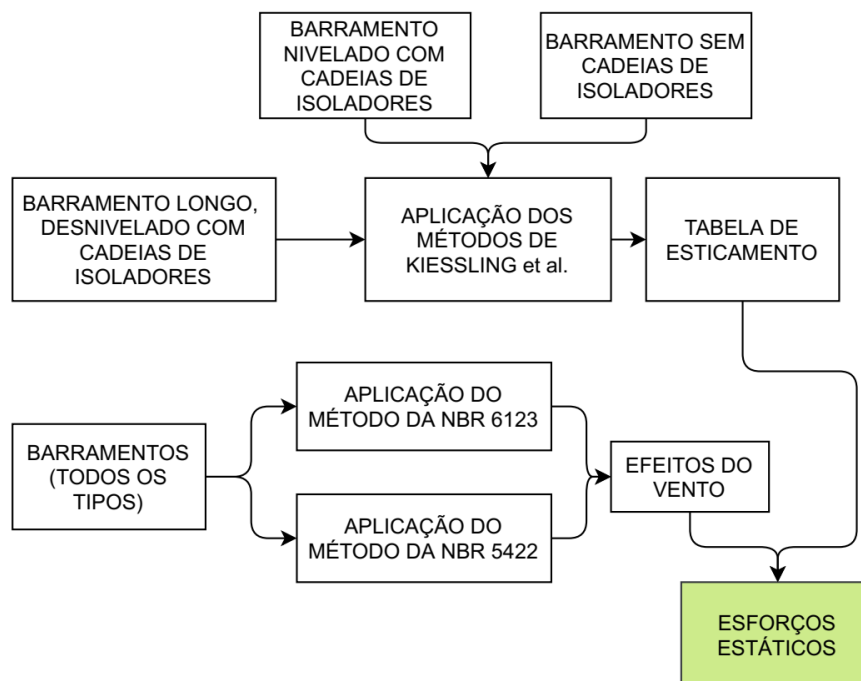
Os esforços estáticos são determinados por meio de duas etapas de dimensionamento: cálculo de esticamento e efeitos do vento. Estas são as etapas sob o escopo do projeto eletromecânico. Outras, como a determinação do peso próprio e vento próprio da estrutura, pertencem ao escopo do projeto civil e não são abordadas neste trabalho.

Em Kiessling *et al.* (2003), apresentam-se dois métodos para cálculo de esticamento. O primeiro é aplicável à barramentos desnivelados sem cadeia de isoladores,

ou longos suficientes para que o efeito destas possa ser desprezado. O segundo considera as cadeias como cargas concentradas, entretanto, não se aplica à vãos desnivelados. Não é apresentado um método, ou combinação, aplicável a vãos curtos de barramentos desnivelados com cadeias de isoladores. Optou-se pela referência supracitada por apresentar uma modelagem mais completa que outras referências. Como exemplo, no método apresentado em Labegalini *et al.* (1992), a massa da cadeia de isoladores é considerada distribuída uniformemente ao longo do vão, de forma simplificada, o que atende satisfatoriamente ao dimensionamento de vãos longos, como é o caso das LTs. Entretanto, para vãos curtos, como são tipicamente nas SEs, o efeito concentrado não pode ser desprezado (KIESSLING *et al.*, 2003).

A Figura 2.2 ilustra as etapas para determinação dos esforços estáticos. Nota-se que, com exceção da situação particular de barramento curto, desnivelado e com cadeias de isoladores, os métodos de Kiessling *et al.* (2003) determinam o esticamento. Para a exceção citada, uma metodologia é proposta e detalhada na subseção 3.1.1. Paralelamente, os efeitos do vento podem ser determinados por duas normas: NBR 5422 (ABNT, 1985) e NBR 6123 (ABNT, 1988). Neste trabalho, a segunda norma de vento constitui a base do cálculo, utilizando considerações pontuais da primeira.

Figura 2.2: Etapas de cálculo para determinação dos esforços estáticos.



Fonte: Autoria própria.

Os métodos, conforme constam nas referências, são apresentados de forma detalhada nas subseções 2.1.1, 2.1.2 e 2.1.3.

2.1.1 ESTICAMENTO PARA VÃOS DESNIVELADOS SEM CADEIAS DE ISOLADORES

O método apresentado nesta subseção consta em Kiessling *et al.* (2003), seção 14.2. As figuras e símbolos foram adaptados, com intuito de restringir o estudo para os pontos de interesse deste trabalho e evitar interferência de simbologia com os demais métodos, de outras referências.

Um barramento sem cadeias de isoladores, esticado entre dois pontos de ancoragem, sujeito à aceleração da gravidade, acomoda-se em uma curva denominada catenária. É admissível desprezar o efeito concentrado das cadeias de isoladores para vãos longos, podendo assim considerar que este seja descrito pela mesma catenária que um barramento sem cadeias de isoladores.

A foto da Figura 2.3 mostra um de vão desnivelado de barramento.

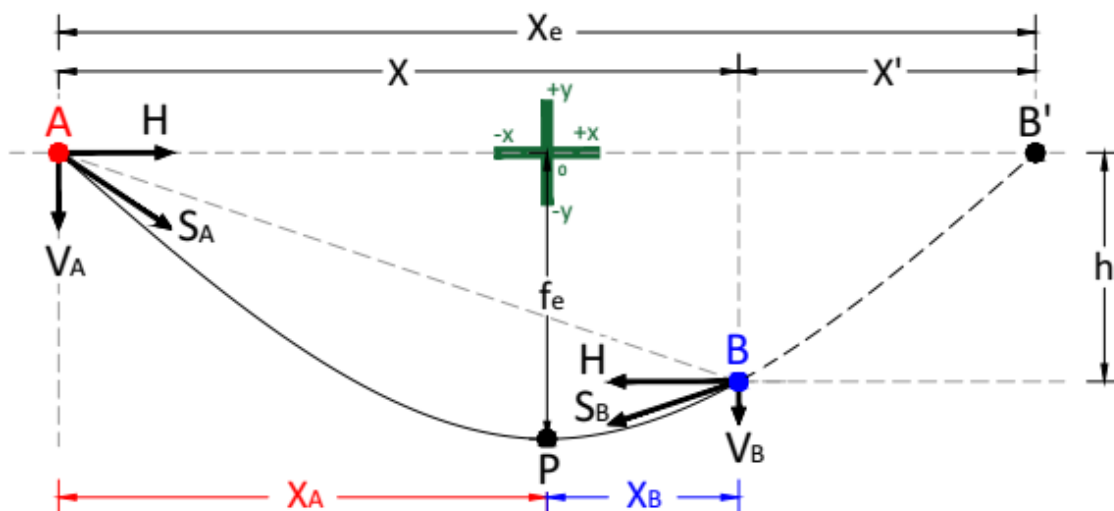
Figura 2.3: Foto de um vão de barramento desnivelado.



Fonte: Concedido pela empresa Ensiste Engenharia.

Desprezando as cadeias de isoladores, um barramento análogo é representado conceitualmente na Figura 2.4, de comprimento horizontal real X , esticado entre os pontos de ancoragem “A” e “B”, com desnível relativo h . Os suportes recebem os esforços S_A e S_B , por subcondutor, que podem ser divididos em componentes verticais (V_A e V_B) e horizontal (H). O valor da componente horizontal é considerado constante ao longo do barramento, por isto, resumida em uma única variável para os pontos “A” e “B”. O vértice “P” não se apresenta central ao vão, mas deslocado em direção ao suporte mais baixo. Projetando a curva, a partir do ponto “B”, ao encontro com o nível do suporte mais alto (ponto “B'”), determina-se o vão nivelado equivalente, cujo comprimento horizontal X_e apresenta-se através da soma do complemento X' com o comprimento real X . A catenária do vão nivelado equivalente possui o mesmo vértice do vão real, e a distância entre este e a linha imaginária que conecta “A” e “B'” é denominada flecha do vão nivelado equivalente (f_e).

Figura 2.4: Vão conceitual de barramento desnivelado sem cadeias de isoladores.



Fonte: Adaptado de Kiessling *et al.* (2003).

A partir de um valor arbitrário para a componente H , pode-se calcular a flecha f_e através da equação (2.1):

$$f_e = \frac{H}{m_s \cdot g} \left[\cosh \left(\frac{m_s \cdot g \cdot X_e}{2 \cdot H} \right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

na qual,

m_s é a densidade linear do subcondutor (kg/m);

g é a aceleração da gravidade (m/s²).

O valor de H pode ser atribuído pelo projetista, baseado em um percentual da carga de ruptura do condutor. Uma outra forma, é reorganizar a equação (2.1), deixando H em evidência, e atribuindo ao valor de f_e um percentual do comprimento do vão, que atenda as distâncias elétricas de isolamento do arranjo físico da subestação.

Assim, tem-se os valores de flecha e tração do barramento, que se apresentam simultâneos em um arbitrado estado inicial. A mudança de estado mais comum ocorre com a temperatura, que faz com que o condutor sofra contração ou dilatação térmica, refletindo em alteração da curva do barramento e dos respectivos esforços e flecha. À medida que a temperatura diminui a tração estática aumenta, a flecha diminui e o vértice da catenária se afasta do suporte mais alto. O inverso ocorre à medida que a temperatura aumenta.

Para calcular os efeitos das mudanças de estado, é necessário antes determinar o comprimento do vão equivalente (X_e), conforme segue:

$$L = \sqrt{h^2 + \left[\frac{2 \cdot H}{m_s \cdot g} \cdot \sinh \left(\frac{m_s \cdot g \cdot X}{2 \cdot H} \right) \right]^2}; \quad (2.2)$$

$$X_A = \frac{H}{m_s \cdot g} \ln \left\{ \frac{H}{m_s \cdot g \cdot (L - h)} \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{-m_s \cdot g \cdot X}{H} \right) \right] \right\}; \quad (2.3)$$

$$X_e = 2 \cdot |X_A| \quad (2.4)$$

sendo,

L o comprimento real do barramento, ao longo da catenária (m);

X_A a distância horizontal entre o vértice da catenária do barramento e o ponto de ancoragem A.

A equação (2.5) é um tipo chamado de equação de mudança de estado, e se aplica aos vãos nivelados de barramentos sem cadeias de isoladores, como se tem após determinar X_e .

$$H_2^2 \cdot \left[H_2 - H_1 + \frac{E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12} \cdot (X_e \cdot m_{s1} \cdot g)^2}{24 \cdot H_1^2} + E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12} \cdot \varepsilon_t \cdot (T_2 - T_1) \right] = \frac{E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12} \cdot (X_e \cdot m_{s2} \cdot g)^2}{24} \quad (2.5)$$

onde,

E_s é o módulo de elasticidade final do subcondutor (N/m²);

A_s é a seção transversal do subcondutor (m²);

ε_t é o coeficiente de dilatação térmica linear do subcondutor (1/°C);

T é a temperatura do subcondutor (°C).

Os índices “1” e “2”, atribuídos às variáveis m_s , H e T , correspondem a dois estados do barramento. Atribuindo valores conhecidos às variáveis do estado “1” e a duas do estado “2”, determina-se o valor da terceira do segundo estado. Se a variável calculada for H_2 , o resultado é um conjunto de três raízes, sendo uma real e um conjugado complexo. O valor de interesse se refere à raiz real.

É possível analisar as mudanças de estado de apenas duas variáveis simultaneamente. Um exemplo consiste em determinar os valores das componentes de tração (H), para uma amostragem discreta de temperaturas (T), mantendo a densidade linear do subcondutor (m_s) constante. De forma análoga, também é possível manter a temperatura constante, e determinar os valores da componente H para diferentes valores de m_s . Na prática, é incomum manter a componente H constante, pois esta é a variável de interesse a ser determinada.

Evidentemente, não ocorre variação relevante da massa do subcondutor durante a operação, entretanto, a mudança de estado sobre a variável m_s pode ser utilizada para consideração dos efeitos de acúmulo de gelo sobre o subcondutor e/ou carga de vento aplicada de forma distribuída. Em outras palavras, estes dois efeitos provocam alterações da tração e flecha do barramento como se o subcondutor recebesse incremento de massa. O acúmulo de gelo não é abordado neste trabalho, já a forma de se considerar os efeitos do vento na equação de mudança de estado é detalhada na subseção 3.1.2.

A cada mudança de estado, é possível calcular as componentes transversais verticais (V_A e V_B), aplicadas nos pontos de ancoragem das estruturas suportes, através das equações (2.6) e (2.7):

$$V_A = -H \cdot \sinh\left(\frac{m_s \cdot g \cdot X_A}{H}\right); \quad (2.6)$$

$$V_B = H \cdot \sinh\left(\frac{m_s \cdot g \cdot (X + X_A)}{H}\right) \quad (2.7)$$

onde,

V_A é a componente vertical da tração do barramento por subcondutor aplicada ao ponto de ancoragem A (N);

V_B é a componente vertical da tração do barramento por subcondutor aplicada ao ponto de ancoragem B (N).

A equação de mudança de estado pode ser aplicada repetidamente, até que se determine as características de todos os estados de interesse para o projeto. O estado de menor temperatura ocasiona o maior esforço de tração, cujo valor é útil para dimensionamento das estruturas suportes. Inversamente, na maior temperatura ocorre a flecha máxima, informação necessária para a validação das distâncias elétricas de segurança entre os níveis de barramentos do arranjo físico da SE. Os estados intermediários de temperatura são úteis para o lançamento dos barramentos, ou seja, para os ajustes durante a instalação. É necessário que o barramento seja lançado com tração e flecha correspondentes à temperatura ambiente medida durante à instalação, para que as demais mudanças de estado, que possam ocorrer durante a operação, estejam dentro dos limites considerados no projeto.

Este método é aplicável especificamente a vãos sem cadeias de isoladores, entretanto, para vãos longos, em que o peso e comprimento das cadeias possuem menor representatividade perante as características gerais do barramento, pode também apresentar resultados satisfatórios. A vantagem deste, em relação ao apresentado na subseção seguinte, que modela as cadeias de isoladores como cargas concentradas, é a consideração do desnível entre os suportes de ancoragem.

2.1.2 ESTICAMENTO PARA VÃOS NIVELADOS COM CADEIAS DE ISOLADORES

Em SEs, principalmente nos setores 230 kV e classes de tensão abaixo, é comum existirem vãos de barramentos com comprimento inferior à 20 metros. Visto que, nesta tensão as cadeias possuem um comprimento típico de aproximadamente três metros, verifica-se, como exemplo, uma relevância de 30% do comprimento do vão. Esta relevância se estende para os esforços e flechas do barramento. O método apresentado nesta subseção, que considera a influência das cadeias como cargas concentradas, consta na seção 14.7 de Kiessling *et al.* (2003). Com justificativa análoga à citada na subseção 2.1.1, as figuras e símbolos foram adaptados.

A foto da Figura 2.5 mostra um vão de nivelado de barramento com cadeias de isoladores.

Figura 2.5: Foto de um vão de barramento nivelado.

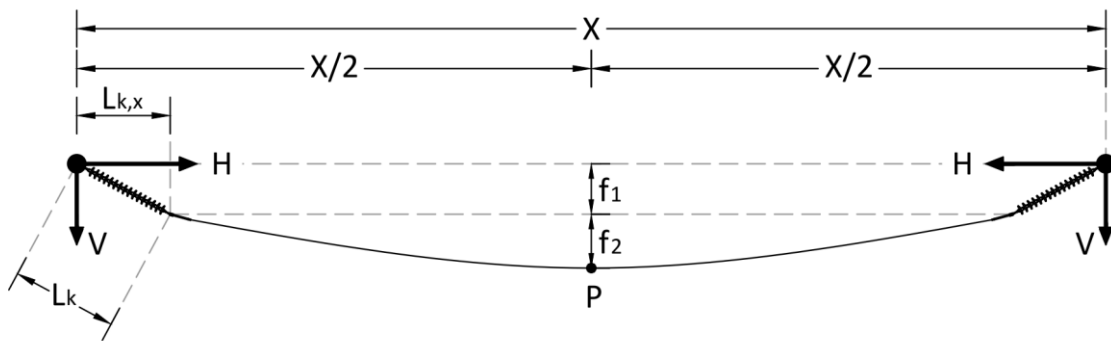


Fonte: Concedido pela empresa Ensiste Engenharia.

Um barramento análogo é conceitualmente representado Figura 2.6, de comprimento horizontal X , esticado entre dois pontos de ancoragens nivelados, com cadeias de isoladores, cada uma com comprimento L_k .

Os suportes de ancoragem recebem o esforço através de componentes horizontal (H) e vertical (V), por subcondutor, ambas iguais para os dois suportes. O vértice da catenária se apresenta central ao vão, no ponto P . A flecha total, distância entre o vértice e a linha imaginária que conecta os suportes, está representada em duas componentes, f_1 e f_2 , sendo a primeira relacionada à projeção vertical das cadeias de isoladores, e a segunda à projeção do condutor.

Figura 2.6: Vão conceitual de barramento nivelado com cadeias de isoladores.



Fonte: Adaptado de Kiessling *et al.* (2003).

A componente V se resume à metade do peso do barramento por subcondutor, devido aos suportes serem nivelados, e pode ser calculada através da equação (2.8):

$$V = \frac{1}{2} \cdot [m_s \cdot g \cdot (X - 2 \cdot L_{k,x}) + G_k] \approx \frac{1}{2} \cdot [m_s \cdot g \cdot (X - 2 \cdot L_k) + G_k] \quad (2.8)$$

na qual,

$L_{k,x}$ é a projeção horizontal de L_k (m);

G_k é o peso da cadeia de isoladores por subcondutor (N).

As equações (2.9) e (2.10) determinam as componentes parciais (f_1 e f_2) da flecha:

$$f_1 = \frac{V}{H} \cdot L_{k,x}; \quad (2.9)$$

$$f_2 = \frac{m_s \cdot g \cdot (X - 2 \cdot L_{k,x})^2}{8 \cdot H}. \quad (2.10)$$

Assumindo a simplificação $L_{k,x} \approx L_k$ e combinando as equações (2.9) e (2.10), a flecha total ($f_t = f_1 + f_2$) é dada por:

$$f_t = \frac{1}{2 \cdot H} \cdot \left(\frac{m_s \cdot g \cdot X^2}{4} + m_s \cdot g \cdot L_k^2 + G_k \cdot L_k \right). \quad (2.11)$$

Para consideração dos pesos das cadeias de isoladores concentrados nos extremos do barramento, o termo $(m_s \cdot g)^2 \cdot X^2 / 24$, da equação de mudança de estado (2.5), é substituído por:

$$(m_s \cdot g)^2 \cdot \frac{X^2}{24} + G_k \cdot m_s \cdot g \cdot \frac{L_k}{2} + G_k^2 \cdot \frac{L_k}{3 \cdot X}, \quad (2.12)$$

obtendo uma nova equação de mudança de estado:

$$\begin{aligned} & H_2^2 \left[H_2 - H_1 + E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12} \cdot \varepsilon_t \cdot (T_1 - T_2) \right. \\ & \left. + \frac{E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12}}{H_1^2} \cdot \left(\frac{(m_{s1} \cdot g)^2 \cdot X^2}{24} + \frac{G_{k1} \cdot m_{s1} \cdot g \cdot L_k}{2} + \frac{G_{k1}^2 \cdot L_k}{3 \cdot X} \right) \right] \\ & = E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{(m_{s2} \cdot g)^2 \cdot X^2}{24} + \frac{G_{k2} \cdot m_{s2} \cdot g \cdot L_k}{2} + \frac{G_{k2}^2 \cdot L_k}{3 \cdot X} \right). \end{aligned} \quad (2.13)$$

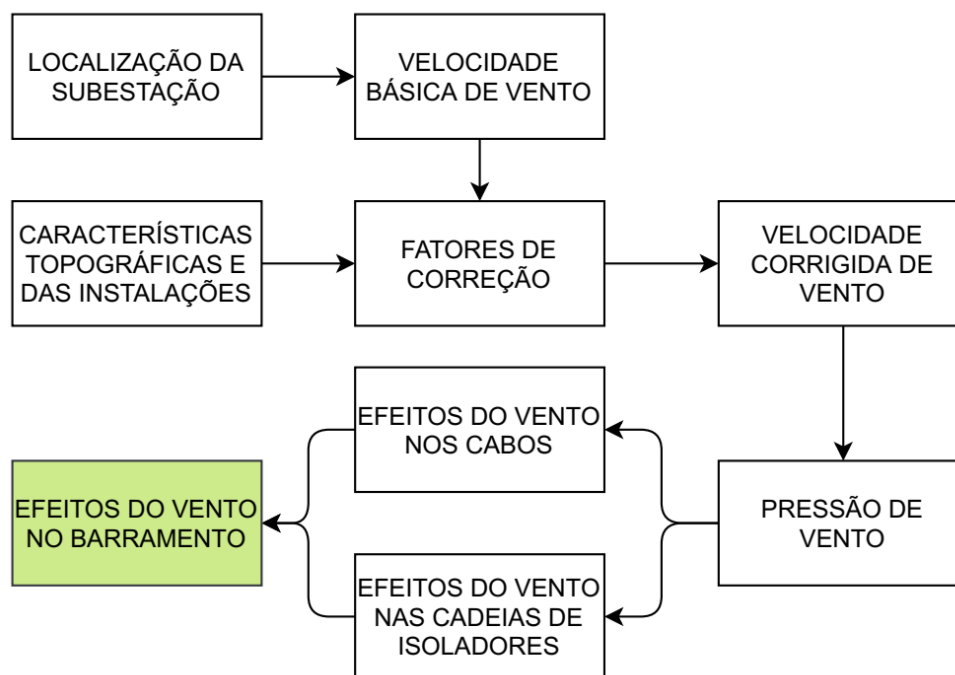
Este método permite determinar resultados mais precisos para vãos curtos, nivelados e com cadeias de isoladores, em comparação ao apresentado na subseção 2.1.1. Entretanto, nenhum dos dois, constantes em Kiessling *et al.* (2003), é aplicável diretamente aos vãos curtos, desnivelados e com cadeias de isoladores. Por isto, uma combinação é proposta na subseção 3.1.1.

2.1.3 EFEITOS DO VENTO

As normas NBR 6123 (ABNT, 1988) e NBR 5422 (ABNT, 1985) aplicam-se ao cálculo dos efeitos do vento. Cada qual possui particularidades perante a outra, por isto, ambas são aqui apresentadas e utilizadas na metodologia unificada, proposta na subseção 3.1.2.

Os roteiros de cálculo das duas normas supracitadas possuem etapas semelhantes, conforme Figura 2.7. Entretanto, existem algumas diferenças conceituais incorporadas às etapas, principalmente relacionadas aos fatores de correção da velocidade básica de vento. Como exemplos, podem ser destacados: fator topográfico, presente apenas na norma NBR 6123 e temperatura coincidente, exclusividade na norma NBR 5422. Os pormenores de cada etapa constam nas subseções 2.1.3.1 e 2.1.3.2.

Figura 2.7: Etapas de cálculo para determinação dos efeitos do vento.



Fonte: Autoria própria.

2.1.3.1 Método da norma NBR 6123:1988

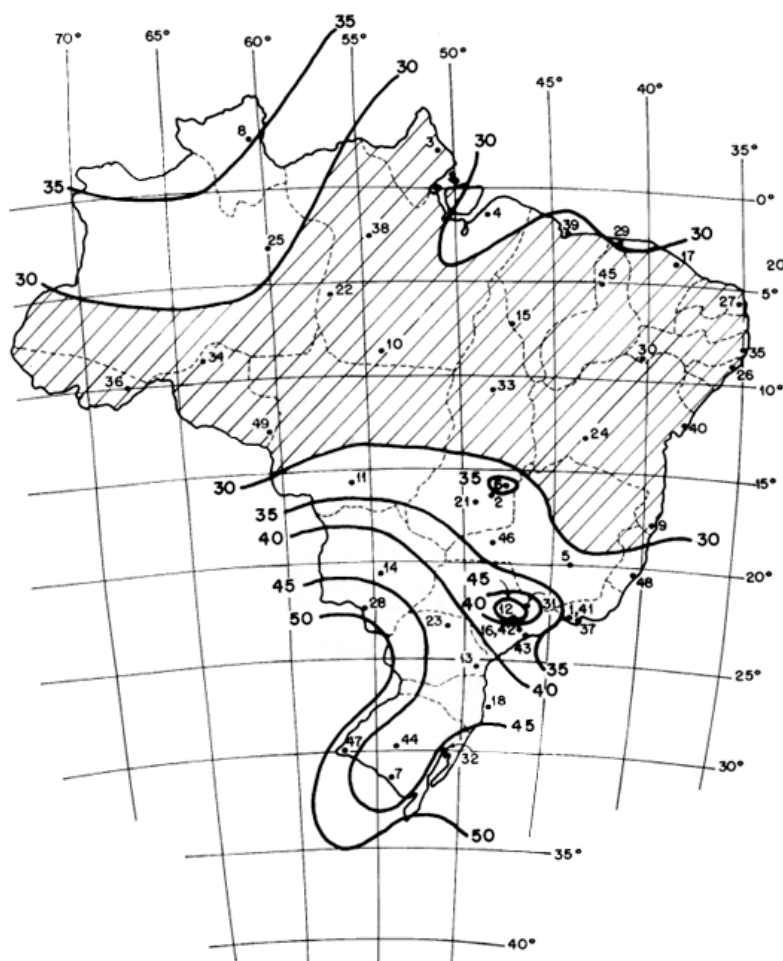
Esta norma é aplicável a edificações, entretanto, por basear-se em conceitos básicos sobre os efeitos do vento, e apresentar maior detalhamento em relação à norma

específica para LTs (NBR 5422:1985), é amplamente utilizada pelos projetistas e aceita por transmissoras (SILVA, 2018).

O objetivo do cálculo é a determinação da força de arrasto, causada pela incidência de vento no barramento. As variáveis que influenciam o resultado são, principalmente: velocidade do vento, características do terreno, como topografia e rugosidade, características do objeto, como formato e altura de instalação e, baseado em conceitos probabilísticos, o grau de segurança e importância social das instalações.

A velocidade básica do vento (V_0) é obtida graficamente, através do mapa de isopleias (Figura 2.8). Representa a máxima velocidade média medida sobre três segundos (período de integração), dez metros acima do solo (altura de instalação), podendo ser excedida uma vez a cada 50 anos (tempo de retorno) em terreno aberto e plano.

Figura 2.8: Mapa de isopleias, para determinação de V_0 em m/s.



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

A velocidade característica de vento (V_k), ou de projeto, é determinada através da equação (2.14):

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (2.14)$$

sendo,

S_1 o fator topográfico;

S_2 o fator combinado;

S_3 o fator estatístico.

O fator S_1 corrige a velocidade de vento em função da topografia do terreno, sendo unitário para os tipos plano, fracamente acidentado, localizado no ponto “A” de morros ou nos pontos “A” ou “C” de taludes (Figura 2.9). Na condição de protegido em todas as direções, como em um vale profundo, adota-se o valor de 0,9. Para as demais situações, S_1 deve ser calculado conforme segue:

$$S_1(z) = \begin{cases} 1, & \theta \leq 3^\circ \\ 1 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \cdot \text{tg}(\theta - 3^\circ), & 6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ \geq 0 \\ 1 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \cdot 0,31, & \theta \geq 45^\circ \end{cases} \quad (2.15)$$

onde,

θ é o ângulo médio de inclinação do talude ou morro ($^\circ$);

z é a altura de instalação do objeto, em relação à superfície do terreno (m);

d é a diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro (m).

Para valores de θ entre 3° e 6° , e entre 17° e 45° , deve-se interpolar linearmente os intervalos da equação (2.15).

Para objetos situados entre os pontos “A” e “B”, ou entre “B” e “C”, o valor de S_1 é determinado a partir de interpolação linear dos resultados referentes à cada ponto.

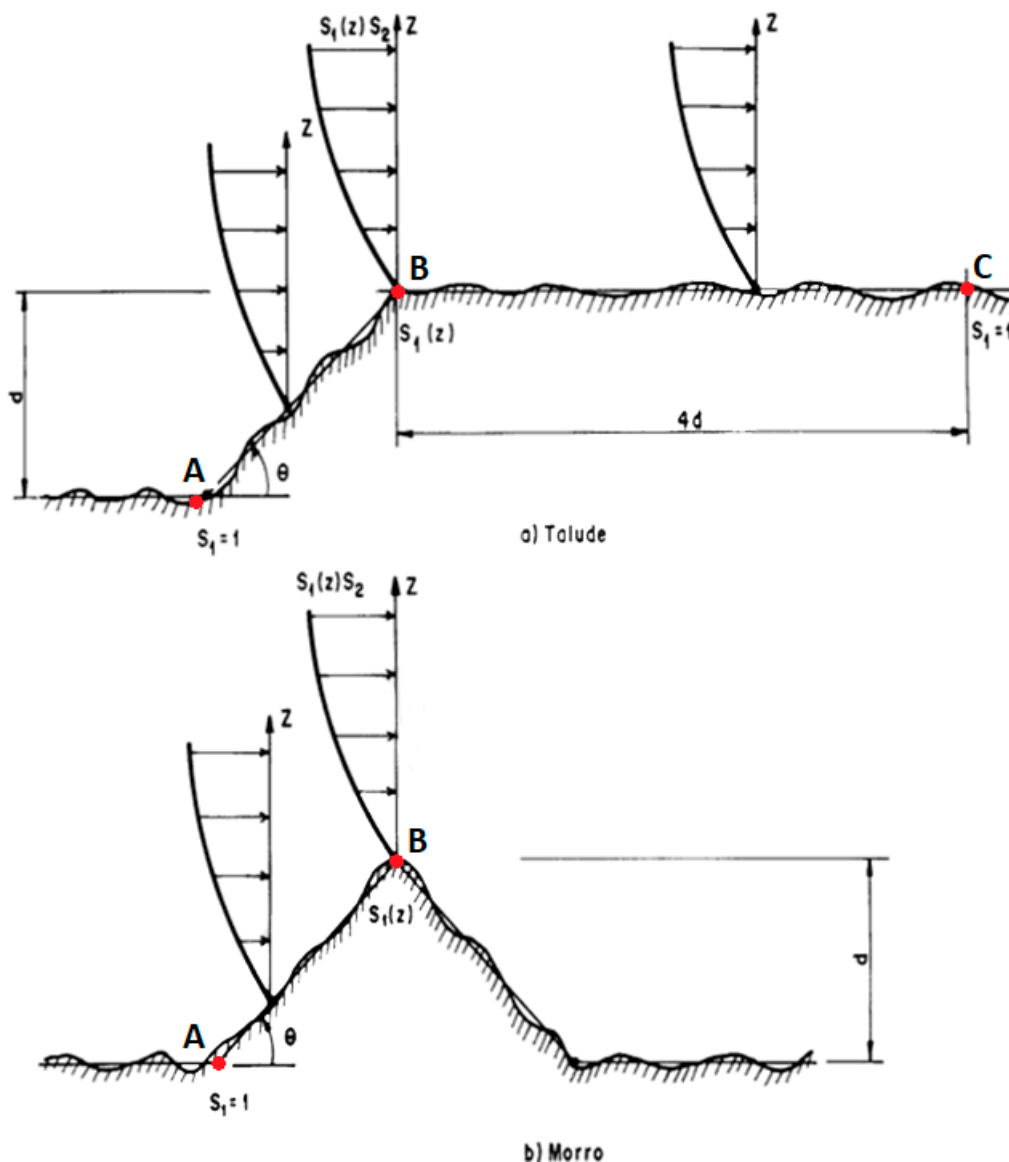
O fator combinado (S_2), da rugosidade do terreno, variação da velocidade do vento, altura de instalação e dimensões do objeto, é determinado pela equação (2.16):

$$S_2 = b \cdot F_r \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (2.16)$$

na qual,

F_r é o fator de rajada.

Figura 2.9: Consideração de taludes e morros para cálculo do fator topográfico.



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

As variáveis b e p são parâmetros meteorológicos, para ajuste de S_2 em função do período de integração. Para o tempo de 3 s, os valores para ambos os fatores se apresentam na Tabela 2.3, juntamente aos valores de F_r . Entretanto, deve-se

anteriormente identificar a categoria do terreno (Tabela 2.1) e classe do objeto (Tabela 2.2).

Tabela 2.1: 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 2.2: 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 2.3: Parâmetros meteorológicos.

Categoria	Parâmetro	Classes		
		A	B	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	0,085	0,090	0,100
	b	0,940	0,940	0,930
IV	p	0,100	0,105	0,115
	b	0,860	0,850	0,840
V	p	0,120	0,125	0,135
	b	0,740	0,730	0,710
	p	0,150	0,160	0,175

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988).

O fator de rajada (F_r) é sempre correspondente à categoria II.

O fator estatístico é obtido na

Tabela 2.4. Para SEs de transmissão, sempre é atribuído o valor de 1,1 (Grupo 1), devido à alta importância para o sistema elétrico e, conseqüentemente, para a sociedade.

Tabela 2.4: Fator estatístico.

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).

Com a velocidade característica, ou corrigida, determinada, através da equação (2.14), calcula-se a pressão dinâmica de vento:

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 \quad (2.17)$$

onde,

q é a pressão dinâmica de vento (N/m^2).

Para fios e cabos, perpendiculares à direção do vento, a norma apresenta a seguinte equação para cálculo da força de arrasto:

$$F_{a-s} = C_{a-s} \cdot q \cdot l_s \cdot d_s \quad (2.18)$$

sendo,

F_{a-s} a força de arrasto de vento sobre o subcondutor (N);

C_{a-s} o coeficiente de arrasto de vento para o subcondutor;

l_s o comprimento do subcondutor (m);

d_s o diâmetro externo do subcondutor (m).

Para cabos torcidos de fios com raio r' , o coeficiente de arrasto (C_{a-s}) é selecionado na Tabela 2.5, ou interpolando linearmente para os intervalos não abrangidos. Porém, antes é necessário calcular o número de Reynolds, através da equação (2.19).

$$Re_s = 70000 \cdot V_k \cdot d_s \quad (2.19)$$

na qual,

Re_s é o número de Reynolds para o subcondutor.

Tabela 2.5: Coeficiente de arrasto para cabos torcidos de fios.

Regime do fluxo	C_{a-s} para cabos em que $\frac{r'}{d_s} \leq \frac{1}{30}$	C_{a-s} para cabos em que $\frac{r'}{d_s} \geq \frac{1}{25}$
$Re_s \leq 2,5 \cdot 10^4$	1,2	1,3
$Re_s \geq 4,2 \cdot 10^4$	0,9	1,1

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988).

Para barras prismáticas de seção circular, como podem ser consideradas as cadeias de isoladores, a norma apresenta a seguinte equação para determinação da força de arrasto de vento (F_{a-k}):

$$F_{a-k} = C_{a-k} \cdot q \cdot K \cdot L_k \cdot d_k \quad (2.20)$$

sendo,

C_{a-k} o coeficiente de arrasto de vento para a cadeia de isoladores;

K o fator de redução do arrasto de vento;

d_k o diâmetro externo da cadeia de isoladores (m).

O fator K e o coeficiente C_{a-k} são selecionados na Tabela 2.6 e Tabela 2.7, respectivamente. Para tal, é necessário calcular anteriormente o número de Reynolds, através da equação (2.21):

$$Re_k = 70000 \cdot V_k \cdot d_k \quad (2.21)$$

onde,

Re_k é o número de Reynolds para a cadeia de isoladores.

Tabela 2.6: Fator de redução para barras prismáticas de comprimento finito.

Regime do fluxo	Fator de redução K para $L_k/d_k \leq$:			
	5	10	20	40
Subcrítico: $Re_k < 4,2 \cdot 10^5$	0,62	0,68	0,74	0,82
Acima do crítico: $Re_k \geq 4,2 \cdot 10^5$	0,80	0,82	0,90	0,98

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988).

Tabela 2.7: Coeficiente de arrasto para barras prismáticas de seção circular.

Regime do fluxo	Coeficiente de arrasto C_{a-k}
Subcrítico	1,2
	$Re_k < 4,2 \cdot 10^5$
	$4,2 \cdot 10^5 \leq Re_k < 8,4 \cdot 10^5$
Acima do crítico	0,6
	$8,4 \cdot 10^5 \leq Re_k < 2,3 \cdot 10^6$
	$Re_k \geq 2,3 \cdot 10^6$
	0,7
	0,8

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988).

Através do método apresentado, é possível se obter as forças de arrasto de vento sobre os Subcondutores¹ (F_{a-s}) e cadeias de isoladores (F_{a-k}). Como traduzir estas em esforços aplicados nas estruturas suportes é detalhado na subseção 3.1.2.

2.1.3.2 Método da norma NBR 5422:1985

Esta norma é aplicável a projetos de LTs com tensão entre 38 kV e 800 kV, e aborda diversos temas como esforços mecânicos, aterramento, distâncias de segurança e outros. É utilizada neste trabalho como referência secundária de método de cálculo para determinação dos efeitos dos ventos.

O método a seguir apresenta similaridades com o da norma NBR 6123 (ABNT, 1988), de edificações, possuindo menos refinamento quanto as características do próprio vento, porém, com algumas considerações adicionais relevantes à aplicação em questão, por se tratar de uma norma específica para sistemas de transmissão de energia elétrica. Assim como na norma de edificações, o roteiro transcorre pela determinação da velocidade de vento corrigida, pressão de vento e força de arrasto. Singularmente, faz considerações a respeito dos períodos de integração para condutores e cadeias de isoladores e temperatura coincidente, na qual se considera que ocorre a incidência mais relevante de vento. Para facilidade de comparação, o método é apresentado destacando as semelhanças e diferenças que possui com o anterior, da subseção 2.1.3.1.

A velocidade básica do vento (V_0) é também obtida graficamente, através do mapa de isopletas (Figura 2.10). Assim como anteriormente, a altura de instalação e tempo de retorno são de dez metros e 50 anos, respectivamente. A diferença encontra-se no período de integração, que passa de três segundos para dez minutos. Por isto, não se pode comparar diretamente os valores entre os dois mapas de isopletas.

A velocidade característica de vento (V_k), ou de projeto, é determinada através da equação (2.22):

$$V_k = K_r \cdot K_d \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{1/u} \cdot V_0 \quad (2.22)$$

¹ Subcondutor é o termo usado para se referir a um condutor entre múltiplos que formam um barramento.

na qual,

K_r é o coeficiente de rugosidade do terreno;

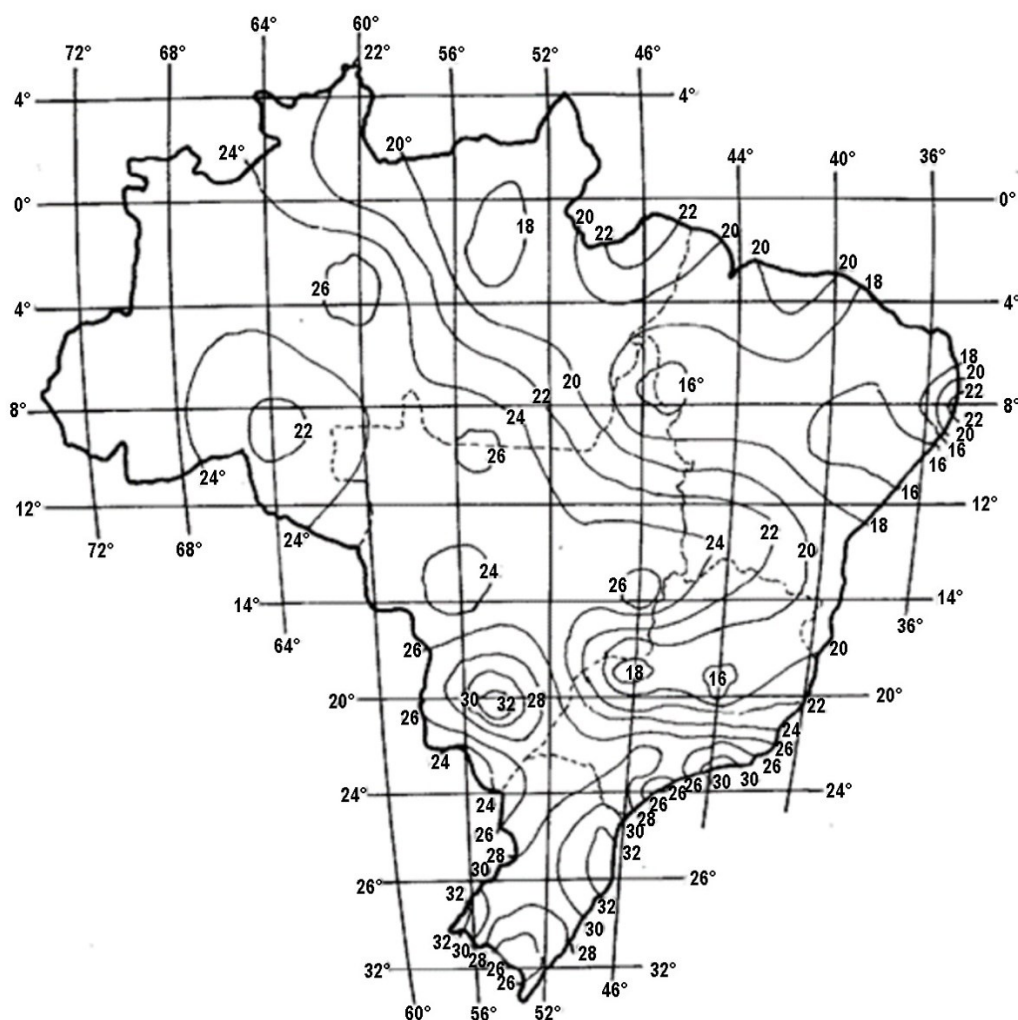
K_d é o fator de correção da velocidade de vento em função do período de integração;

u é o fator de correção da velocidade de vento aplicável à altura de instalação, em função da categoria do terreno;

z é a altura de instalação do objeto, em relação à superfície do terreno (m).

A variável K_r é obtida na Tabela 2.8, em função da categoria do terreno.

Figura 2.10: Mapa de isopletas, para determinação de V_0 em m/s.



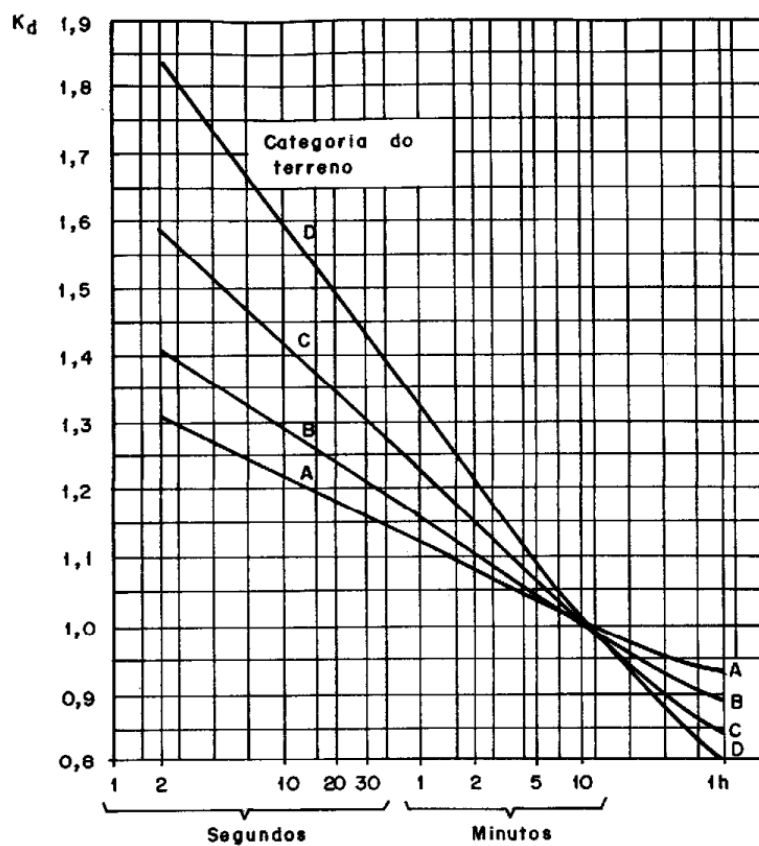
Fonte: Adaptado de NBR 5422 (ABNT, 1985).

Tabela 2.8: Coeficiente de rugosidade do terreno.

Categoria do Terreno	Características do terreno	Coeficiente de rugosidade K_r
A	Vastas extensões de água; áreas planas costeiras; desertos planos	1,08
B	Terreno aberto com poucos obstáculos	1,00
C	Terreno com obstáculos numerosos e pequenos	0,85
D	Áreas urbanizadas; terrenos com muitas árvores altas	0,67

Fonte: NBR 5422 (ABNT, 1985).

Com a categoria do terreno definida, o fator de correção da velocidade de vento em função do período de integração pode ser obtido através da Figura 2.11.

Figura 2.11: Fator de correção em função do período de integração.

Fonte: NBR 5422 (ABNT, 1985).

Recomenda-se adoção de períodos de integração de dois segundos para cadeias de isoladores e 30 segundos para cabos

Na Tabela 2.9 constam os valores de u para correção de V_0 aplicável à z , em função da categoria do terreno.

Tabela 2.9: Fator de correção aplicável à altura de instalação.

Categoria do Terreno	Fator de correção (u)	
	Período de integração = 2 s	Período de integração = 30 s
A	13	12
B	12	11
C	10	9,5
D	8,5	8

Fonte: NBR 5422 (ABNT, 1985).

Determinado V_k , pode-se calcular a pressão dinâmica de referência (q), ou pressão de vento, através da equação (2.23):

$$q = \frac{1}{2} \rho_{ar} \cdot V_k^2 \quad (2.23)$$

na qual,

ρ_{ar} é a massa específica do ar (kg/m^3).

A massa específica do ar pode ser calculada para a altitude e temperatura do local da instalação, através da equação (2.24):

$$\rho_{ar} = \left(\frac{1,293}{1 + 0,00367 \cdot T_c} \right) \left(\frac{16000 + 64 \cdot T_c - ALT}{16000 + 64 \cdot T_c + ALT} \right) \quad (2.24)$$

sendo,

ALT a altitude média do terreno ou região (m).

A variável T_c é denominada temperatura coincidente, na qual supostamente ocorre a velocidade de vento de projeto e coincide com a média das mínimas temperaturas diárias. Este valor pode ser obtido no mapa da Figura 2.12.

Figura 2.12: Mapa com as médias das temperaturas mínimas diárias em °C.



Fonte: Adaptado de NBR 5422 (ABNT, 1985).

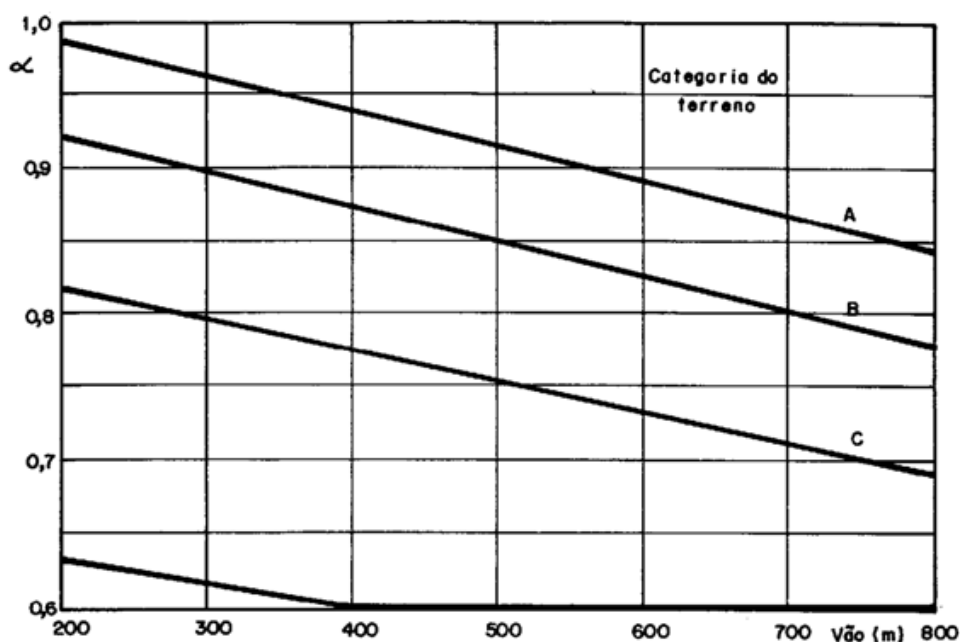
Por meio das equações (2.25) e (2.26), calculam-se os esforços de vento aplicáveis a cada ponto de ancoragem, referentes às ações do vento nos cabos (A_c) e cadeias de isoladores (A_i).

$$A_c = q \cdot C_{a-s} \cdot \alpha_{ef} \cdot d_s \cdot \frac{X}{2}; \quad (2.25)$$

$$A_i = q \cdot C_{a-k} \cdot L_k \cdot d_k \cdot \alpha \quad (2.26)$$

Para os coeficientes de arrasto nos cabos (C_{a-s}) e cadeia de isoladores (C_{a-k}), a norma sugere os valores de 1,0 e 1,2, respectivamente. O fator de efetividade (α_{ef}) pode ser obtido na Figura 2.13.

Figura 2.13: Fator de efetividade de vento.



Fonte: NBR 5422 (ABNT, 1985).

As forças de arrasto de vento (A_c e A_i), calculadas pelas equações (2.25) e (2.26), são transversais ao barramento. A tração com vento não é abordada pela norma de referência.

2.2 ESFORÇOS DINÂMICOS

Os esforços dinâmicos são aqui considerados exclusivamente provenientes dos efeitos mecânicos de curto-circuito. Os efeitos do vento, que poderiam ser classificados como estáticos ou dinâmicos, foram apresentados como estáticos na subseção 2.1.3.

2.2.1 EFEITOS DO CURTO-CIRCUITO

O método de cálculo de referência, para determinação dos esforços de curto-circuito, constitui o escopo principal da norma IEC 60865-1 (IEC, 2011), que aborda também os efeitos térmicos relacionados ao fenômeno elétrico. Esta norma se baseia em estudos realizados pelo CIGRÈ (*Conseil International Des Grands Réseaux Électriques*), principalmente na brochura 214 (CIGRÈ, 2002), onde constam, além das deduções matemáticas, ensaios práticos que contribuem para validação da metodologia teórica e aquisição de dados empíricos. Consultar os estudos de origem pode ser um meio de esclarecer e refinar modelagens específicas, nas quais a norma não é clara ou apresenta simplificações muito conservadoras que acabam por onerar o projeto.

Além da metodologia normativa, é possível realizar modelagens mais avançadas, utilizando métodos de elementos finitos, o que permite um melhor refinamento dos resultados. Entretanto, resultados de testes práticos realizados indicam que os resultados dos cálculos, obtidos por meio do roteiro analítico da norma, são conservadores e podem ser aplicados, ainda que não representem os efeitos físicos fielmente como ocorrem (STEIN *et. al.*, 2000).

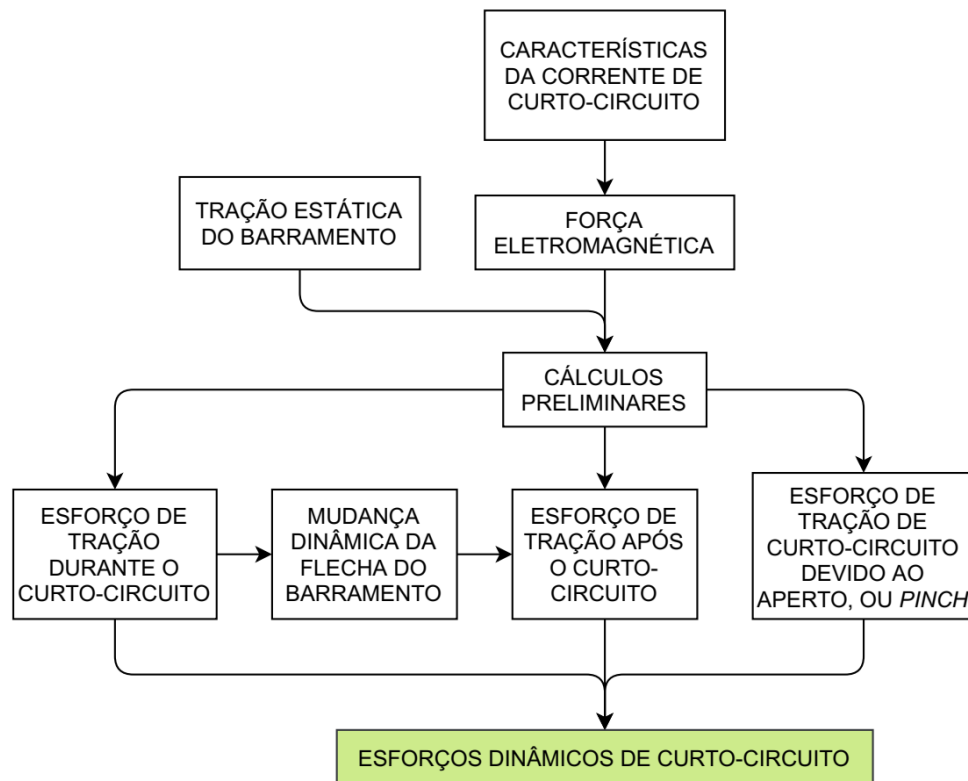
2.2.1.1 Método da norma IEC 60865-1:2011

Para barramentos flexíveis, o método de cálculo consta na seção seis da norma, e é apresentado a seguir com as adaptações de símbolos necessárias para evitar interferência com outras partes do trabalho.

Os três esforços dinâmicos a serem calculados são de tração, aplicados ao ponto de ancoragem do barramento. O primeiro, denominado esforço de aperto ($F_{pi,d}$), ou de *pinch*, ocorre no período sub-transitório da corrente de curto-circuito, e decorre da atração ou repulsão entre os subcondutores, causada pelos campos magnéticos induzidos. Estes campos também causam interação entre as fases, originando o segundo esforço ($F_{t,d}$), que permanece e evolui até a eliminação da falta, causando também o deslocamento do barramento em relação à posição de repouso. Quando cessa a passagem da corrente de falta o campo magnético se dispersa, fazendo com que o barramento volte para ação exclusiva da força peso. O retorno à posição de inicial causa do terceiro esforço ($F_{f,d}$), que ocorre após a eliminação do curto-circuito (SUDARSHAN; PUNEKAR, 2018).

As etapas do roteiro apresentado nas subseções 2.2.1.1.1 a 2.2.1.1.6 podem ser ilustradas através da Figura 2.14.

Figura 2.14: Etapas de cálculo para determinação dos esforços do curto-circuito.



Fonte: Autoria própria.

2.2.1.1.1 Cálculos preliminares

As forças eletromagnéticas características entre fases, para as situações de curto-circuito trifásico e bifásico, podem ser calculadas através das equações (2.27) e (2.28), respectivamente:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot 0,75 \cdot \frac{(I_{k3}'')^2}{a} \cdot \frac{l_s}{X}; \quad (2.27)$$

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{(I_{k2}'')^2}{a} \cdot \frac{l_s}{X} \quad (2.28)$$

onde,

- μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo (H/m);
 a é a distância entre fases, eixo a eixo (m);
 l_s é o comprimento do subcondutor (m);
 X é o comprimento horizontal real do vão (m);
 I_{k2}'' é a corrente simétrica eficaz de curto-circuito bifásico (A);
 I_{k3}'' é a corrente simétrica eficaz de curto-circuito trifásico (A).

Para que a sequência do roteiro de cálculo seja compatível com as situações de curto-circuito bifásico e trifásico, as duas alternativas de forças eletromagnéticas características serão unificadas na variável F_m , conceitualmente. De forma análoga, a variável I_k'' será utilizada para se referir à corrente simétrica de curto-circuito.

A razão (r_f) entre a força eletromagnética e o peso do barramento determina o ângulo de direção da resultante entre ambas (δ_1), e são calculados por meio das seguintes equações:

$$r_f = \frac{F_m}{n_s \cdot m_s \cdot g}; \quad (2.29)$$

$$\delta_1 = \text{atan}(r_f) \quad (2.30)$$

sendo,

n_s o número de subcondutores por fase do barramento.

O período de oscilação do barramento sujeito à força peso (T), em situação normal, sem curto-circuito, é determinado pela equação (2.31).

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{0,8 \cdot \frac{f_{es}}{g}}, \quad (2.31)$$

entretanto, é necessário dispor do valor da flecha estática (f_{es}), que, se desconhecido, pode ser calculado simplificadaamente através da equação (2.32):

$$f_{es} = \frac{n_s \cdot m_s \cdot g \cdot X}{8 \cdot F_{st}} \quad (2.32)$$

onde,

F_{st} é a força estática de tração do barramento para aplicação do curto-circuito (N).

Durante o curto-circuito, o período de oscilação é diferenciado, devido à razão r_f , evoluindo de T para T_{res} , conforme equação (2.33):

$$T_{res} = \frac{T}{\sqrt[4]{1 + r_f^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad (2.33)$$

O coeficiente de rigidez do conjunto de estruturas suportes mais o barramento flexível é dado por:

$$N = \frac{1}{S \cdot X} + \frac{1}{n_s \cdot E_{eff} \cdot A_s} \quad (2.34)$$

sendo,

E_{eff} o módulo de elasticidade corrigido para o barramento (N/m²).

A constante de *Spring* (S), ou elástica, se refere à deformação conjunta das duas estruturas suportes de ancoragem. Caso o valor seja desconhecido, os valores típicos da Tabela 2.10 podem ser aplicados.

Tabela 2.10: Valores típicos para constante de *Spring*.

Classe de Tensão	Constante de <i>Spring</i> (N/m)
123 kV	150.10 ³ a 1.300.10 ³
245 kV	400.10 ³ a 2.000.10 ³
420 kV	600.10 ³ a 3.000.10 ³

Fonte: IEC 60865-1 (IEC, 2011).

O módulo de elasticidade do subcondutor (E_s) evolui para E_{eff} , quando corrigido para a situação de tração e número de subcondutores específicos do barramento, conforme equação (2.35):

$$E_{eff} = \begin{cases} E_s \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \text{sen} \left(\frac{F_{st}}{n_s \cdot A_s \cdot \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ \right) \right], & \frac{F_{st}}{n_s \cdot A_s} \leq \sigma_{fin} \\ E_s, & \frac{F_{st}}{n_s \cdot A_s} > \sigma_{fin} \end{cases} \quad (2.35)$$

Para tal, considera-se:

$$\sigma_{fin} = 50 \cdot 10^6 \frac{N}{m^2} \quad (2.36)$$

onde,

σ_{fin} é o menor valor de tração no subcondutor quando E_s se torna constante (N/m²).

Observação: o valor final de E_s , constante em catálogos de fabricantes de cabos, pode ser utilizado.

O ângulo do barramento, visto em corte transversal, em relação à flecha estática, é variável durante o curto-circuito. Ao final do curto-circuito, este ângulo (δ_{end}) é dado pela equação (2.37):

$$\delta_{end} = \begin{cases} \delta_1 \left[1 - \cos \left(360^\circ \cdot \frac{T_{k1}}{T_{res}} \right) \right], & 0 \leq \frac{T_{k1}}{T_{res}} \leq 0,5 \\ 2 \cdot \delta_1, & \frac{T_{k1}}{T_{res}} > 0,5 \end{cases} \quad (2.37)$$

sendo,

T_{k1} o tempo de duração do curto-circuito (s).

Após o curto-circuito, durante o retorno à posição estática, o ângulo máximo (δ_{max}) pode ser calculado através da equação (2.39), que necessita antes obter o parâmetro de quantidade (χ), conforme equação (2.38):

$$\chi = \begin{cases} 1 - r_f \cdot \text{sen}(\delta_{end}), & 0 \leq \delta_{end} \leq 90^\circ \\ 1 - r_f, & \delta_{end} > 90^\circ \end{cases} ; \quad (2.38)$$

$$\delta_{max} = \begin{cases} 1,25 \cdot \text{acos}(\chi), & 0,766 < \chi \leq 1 \\ 10^\circ + \text{acos}(\chi), & -0,985 \leq \chi \leq 0,766 \\ 180^\circ, & \chi < -0,985 \end{cases} \quad (2.39)$$

2.2.1.1.2 Esforço durante o curto-circuito

O esforço durante o curto-circuito ($F_{t,d}$) é causado pela atração ou repulsão entre condutores de fases paralelas, e pode ser calculado da seguinte forma:

$$F_{t,d} = F_{st} \cdot (1 + \varphi \cdot \psi) \quad (2.40)$$

sendo necessário determinar antes o parâmetro de carga (φ), através da equação (2.41):

$$\varphi = \begin{cases} 3 \cdot (\sqrt{1 + r_f^2} - 1), & T_{k1} \geq T_{res}/4 \\ 3 \cdot [r_f \cdot \text{sen}(\delta_{end}) + \cos(\delta_{end}) - 1], & T_{k1} < T_{res}/4 \end{cases} \quad (2.41)$$

No caso de T_{k1} maior do que $0,4 \cdot T$, o segundo valor deve ser utilizado, em detrimento do primeiro, nas equações (2.37) e (2.41).

Determina-se o fator ψ solucionando a equação de terceiro grau (2.42):

$$\varphi^2 \cdot \psi^3 + \varphi \cdot (2 + \zeta) \cdot \psi^2 + (1 + 2 \cdot \zeta) \cdot \psi - \zeta \cdot (2 + \varphi) = 0 \quad (2.42)$$

onde, ζ é o fator de estresse do barramento determinado pela equação (2.43):

$$\zeta = \frac{(n_s \cdot m_s \cdot g \cdot X)^2}{24 \cdot F_{st}^3 \cdot N} \quad (2.43)$$

2.2.1.1.3 Esforço após o curto-circuito

O esforço após o curto-circuito ($F_{f,d}$) é causado pelo comportamento dinâmico de retorno do barramento à posição estática. É diretamente proporcional ao deslocamento sofrido durante a falta e ao peso do barramento, calculado da seguinte forma:

$$F_{f,d} = 1,2 \cdot F_{st} \cdot \sqrt{1 + 8 \cdot \zeta \cdot \frac{\delta_{max}}{180^\circ}}. \quad (2.44)$$

O esforço é relevante para $r_f > 0,6$ apenas se $\delta_{max} \geq 70^\circ$.

2.2.1.1.4 Mudança dinâmica da flecha do barramento

Durante o curto-circuito, a flecha do barramento sofre alteração em relação à posição estática, não apenas devido ao balanço dos condutores, mas também ao alongamento destes, em função da respectiva elasticidade e elevação de temperatura.

Os fatores de expansões elástica (ε_{ela}) e térmica (ε_{th}) do barramento são determinados por meio das equações (2.45) e (2.46), respectivamente:

$$\varepsilon_{ela} = N \cdot (F_{t,d} - F_{st}); \quad (2.45)$$

$$\varepsilon_{th} = \begin{cases} c_{th} \cdot \left(\frac{I_k''}{n_s \cdot A_s} \right)^2 \cdot \frac{T_{res}}{4}, & T_{k1} \geq \frac{T_{res}}{4} \\ c_{th} \cdot \left(\frac{I_k''}{n_s \cdot A_s} \right)^2 \cdot T_{k1}, & T_{k1} < \frac{T_{res}}{4} \end{cases}. \quad (2.46)$$

Para isto, é necessário conhecer o coeficiente de dilatação térmica do cabo em função da corrente elétrica (c_{th}), que pode ser obtido na Tabela 2.11.

Tabela 2.11: Coeficiente de dilatação térmica em função da corrente.

Tipo de Cabo	Razão entre as seções transversais do alumínio e o aço do cabo	Coeficiente c_{th} $\left(\frac{m^4}{A^2 \cdot s} \right)$
Alumínio	-	$0,27 \cdot 10^{-18}$
Alumínio com alma de aço	> 6	$0,27 \cdot 10^{-18}$
	≤ 6	$0,17 \cdot 10^{-18}$

Fonte: IEC 60865-1 (IEC, 2011).

O efeito das expansões elástica e térmica é concatenado em um único fator C_D , por meio da equação (2.47):

$$C_D = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{X}{f_{es}} \right)^2 \cdot (\varepsilon_{ela} + \varepsilon_{th})}. \quad (2.47)$$

Um outro fator, C_F , pode ser determinado pela equação (2.48), representando o incremento da flecha dinâmica, causado pela deformação na curva catenária do barramento:

$$C_F = \begin{cases} 1,05, & r_f \leq 0,8 \\ 0,97 + 0,1 \cdot r_f, & 0,8 < r_f < 1,8 \\ 1,15, & r_f \geq 1,8 \end{cases}. \quad (2.48)$$

Com a aplicação dos fatores C_D e C_F sobre a flecha estática, determina-se a flecha dinâmica (f_{ed}):

$$f_{ed} = C_D \cdot C_F \cdot f_{es}. \quad (2.49)$$

Além da mudança de amplitude da flecha durante o período dinâmico, a curva catenária não se encontra no plano vertical, como na situação estática. Para barramentos sem cadeias de isoladores, como o de interligação entre equipamentos ou cabos de blindagem atmosférica, o valor do maior deslocamento horizontal é obtido por meio da equação (2.50), e da equação (2.51) para barramentos com cadeias de isoladores:

$$b_h = \begin{cases} f_{ed}, & \delta_{max} \geq 90^\circ \\ f_{ed} \cdot \text{sen}(\delta_{max}), & \delta_{max} < 90^\circ \end{cases}; \quad (2.50)$$

$$b_h = \begin{cases} f_{ed} \cdot \text{sen}(\delta_1), & \delta_{max} \geq \delta_1 \\ f_{ed} \cdot \text{sen}(\delta_{max}), & \delta_{max} < \delta_1 \end{cases}. \quad (2.51)$$

Ao longo do condutor, a distância horizontal crítica de deslocamento (b_h) apresenta-se no centro do vão, e, como pode ocorrer para duas fases adjacentes simultaneamente, a distância mínima possível entre fases (a_{min}), é definida por meio da equação (2.52):

$$a_{min} = a - 2 \cdot b_h . \quad (2.52)$$

A norma não explica sobre o significado de valores negativos de a_{min} . Interpreta-se que, neste caso, pode ocorrer colisão entre condutores de fases adjacentes.

2.2.1.1.5 Esforço de aperto, ou de *pinch*

O esforço de aperto, ou de *pinch*, é de tração e se aplica ao ponto de ancoragem do barramento, assim como os esforços durante e após o curto-circuito. A diferença é que este não se origina da força eletromagnética entre as diferentes fases, mas sim entre os subcondutores da mesma fase. Evidentemente, para um barramento constituído por fases de um único subcondutor, o esforço de aperto não se aplica.

O referido esforço é relevante no período sub-transitório da falta e pode incrementar a tração estática do barramento em mais de seis vezes. Adicionalmente, e em conformidade com a ideia de sua denominação, este fenômeno é responsável pela compressão, ou aperto, dos espaçadores (CIGRÈ, 2002).

As distâncias entre subcondutores e entre espaçadores adjacentes são determinantes no cálculo do esforço de aperto ($F_{pi,d}$), ao ponto que, caso exista colisão efetiva entre os subcondutores, pode-se considerar incremento de apenas 10% sobre o esforço durante o curto-circuito ($F_{t,d}$), conforme equação (2.53):

$$F_{pi,d} = 1,1 \cdot F_{t,d} . \quad (2.53)$$

As condições necessárias para que possa se considerar colisão efetiva entre subcondutores são descritas pela equação (2.54):

$$\left\{ \begin{array}{ll} a_s/d_s \leq 2, & d_{esp} \geq 50 \cdot a_s \\ a_s/d_s \leq 2,5, & d_{esp} \geq 70 \cdot a_s \end{array} \right. \quad (2.54)$$

onde,

a_s é a distância entre subcondutores, eixo a eixo (m);

d_{esp} é a distância média entre espaçadores adjacentes (m);

d_s é o diâmetro externo do subcondutor (m).

O não atendimento a estas condições não significa que não ocorra alguma colisão, apenas que a intensidade é insuficiente para que o esforço $F_{pi,d}$ possa ser calculado por meio da equação (2.53).

Quando as condições acima não são atendidas, o esforço deve ser calculado conforme roteiro que segue, iniciando pela equação (2.55), que determina a força eletromagnética característica entre subcondutores (F_v):

$$F_v = (n_s - 1) \cdot \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{I_k''}{n_s} \right)^2 \cdot \frac{d_{esp}}{a_s} \cdot \frac{v_2}{v_3}. \quad (2.55)$$

As variáveis v_2 e v_3 são descritas apenas como fatores para cálculo de $F_{pi,d}$, assim como outros: v_1 , v_4 e v_e . Para determinação destes, a norma apresenta duas opções, onde a primeira consiste na consulta de gráficos, e a segunda na resolução de equações não lineares. Apenas a segunda é apresentada aqui, por ser mais completa e adequada para aplicação computacional.

O primeiro fator a ser calculado é v_1 , por meio da equação (2.56):

$$v_1 = f \frac{1}{\text{sen}\left(\frac{180^\circ}{n_s}\right)} \cdot \sqrt{\frac{(a_s - d_s) \cdot m_s}{\frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{I_k''}{n_s}\right)^2 \cdot \frac{(n_s - 1)}{a_s}}} \quad (2.56)$$

na qual,

f é a frequência fundamental do sistema elétrico (Hz).

Para determinar v_2 , utilizando a equação (2.57), deve-se resolver anteriormente as equações (2.58), (2.59) e (2.60):

$$\begin{aligned}
v_2 = & 1 - \frac{\text{sen}(4.\pi.f.T_{pi}-2.\gamma)+\text{sen}(2.\gamma)}{4.\pi.f.T_{pi}} + \frac{f.\tau}{f.T_{pi}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2.f.T_{pi}}{f.\tau}}\right) \cdot \text{sen}^2(\gamma) - \\
& \frac{8.\pi.f.\tau.\text{sen}(\gamma)}{1+(2.\pi.f.\tau)^2} \cdot \left\{ \left[2.\pi.f.\tau \cdot \frac{\cos(2.\pi.f.T_{pi}-\gamma)}{2.\pi.f.T_{pi}} + \frac{\text{sen}(2.\pi.f.T_{pi}-\gamma)}{2.\pi.f.T_{pi}} \right] \cdot e^{-\frac{f.T_{pi}}{f.\tau}} + \right. \\
& \left. \frac{\text{sen}(\gamma)-2.\pi.f.\tau.\cos(\gamma)}{2.\pi.f.T_{pi}} \right\} ;
\end{aligned} \tag{2.57}$$

$$\tau = -\frac{2.\pi.f}{3} \cdot \ln\left(\frac{\kappa - 1,02}{0,98}\right) ; \tag{2.58}$$

$$\gamma = \text{atan}(2.\pi.f.\tau) ; \tag{2.59}$$

$$v_1 = f.T_{pi} \cdot \sqrt{v_2} \tag{2.60}$$

nas quais,

- τ é a constante de tempo do sistema elétrico (s);
- T_{pi} é o parâmetro para cálculo de v_2 ;
- γ é o fator para estimativa da frequência natural relevante;
- κ é o fator de assimetria da corrente de curto-circuito.

O fator v_3 é obtido diretamente pela equação (2.61):

$$v_3 = \frac{d_s/a_s}{\text{sen}(180^\circ/n_s)} \cdot \frac{\sqrt{a_s/d_s - 1}}{\text{atan}\sqrt{a_s/d_s - 1}} . \tag{2.61}$$

A variável j , descrita pela equação (2.64), representa o parâmetro que determina a configuração do feixe de subcondutores durante a passagem da corrente de curto-circuito. Entretanto, primeiramente é necessário obter os fatores de deformação que caracterizam a contração do feixe (ε_{st} e ε_{pi}), por meio das equações (2.62) e (2.63):

$$\varepsilon_{st} = 1,5 \cdot \frac{F_{st} \cdot d_{esp}^2 \cdot N}{(a_s - d_s)^2} \cdot \left(\text{sen} \frac{180^\circ}{n_s}\right)^2 ; \tag{2.62}$$

$$\varepsilon_{pi} = 0,375 \cdot \frac{F_v \cdot d_{esp}^3 \cdot N}{(a_s - d_s)^3} \cdot \left(\text{sen} \frac{180^\circ}{n_s} \right)^3 ; \quad (2.63)$$

$$j = \sqrt{\frac{\varepsilon_{pi}}{1 + \varepsilon_{st}}} . \quad (2.64)$$

Se o valor de j for unitário ou maior, os subcondutores colidem durante a passagem da corrente de curto-circuito, caso contrário, apenas se aproximam sem contato. Para o primeiro caso, o esforço de aperto é calculado por meio da equação (2.65), necessitando solucionar anteriormente as equações (2.66) a (2.68):

$$F_{pi,d} = F_{st} \cdot \left(1 + \frac{v_e}{\varepsilon_{st}} \cdot \xi \right) ; \quad (2.65)$$

$$\xi^3 + \varepsilon_{st} \cdot \xi^2 - j^2 \cdot (1 + \varepsilon_{st}) = 0 ; \quad (2.66)$$

$$v_e = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} \cdot n_s \cdot (n_s - 1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{I_k}{n_s} \right)^2 \cdot N \cdot v_2 \cdot \left(\frac{d_{esp}}{a_s - d_s} \right)^4 \cdot \frac{\left(\text{sen} \frac{180^\circ}{n_s} \right)^4}{\xi^3} \cdot \left(1 - \frac{\text{atan} \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right) - \frac{1}{4} \right]^{1/2} ; \quad (2.67)$$

$$v_4 = \frac{a_s - d_s}{d_s} \quad (2.68)$$

onde,

ξ é o fator para cálculo de $F_{pi,d}$, no caso de subcondutores que colidem.

Para o segundo caso, em que os subcondutores não colidem, calcula-se $F_{pi,d}$ a partir da equação (2.69), solucionando anteriormente as equações (2.70) a (2.74):

$$F_{pi,d} = F_{st} \cdot \left(1 + \frac{v_e}{\varepsilon_{st}} \cdot \eta^2 \right) ; \quad (2.69)$$

$$\eta^3 + \varepsilon_{st} \cdot \eta - j^2 \cdot (1 + \varepsilon_{st}) \cdot \frac{v_3}{a_{sw}/a_s} = 0 ; \quad (2.70)$$

$$a_{sw}/a_s = \frac{2 \cdot y_a/a_s}{\text{sen } 180^\circ/n_s} \cdot \frac{\sqrt{\frac{1 - 2 \cdot y_a/a_s}{2 \cdot y_a/a_s}}}{\text{atan} \sqrt{\frac{1 - 2 \cdot y_a/a_s}{2 \cdot y_a/a_s}}} ; \quad (2.71)$$

$$2 \cdot y_a/a_s = 1 - \eta \cdot (1 - d_s/a_s) ; \quad (2.72)$$

$$v_e = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} \cdot n_s \cdot (n_s - 1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{I_k}{n_s}\right)^2 \cdot N \cdot v_2 \cdot \left(\frac{d_{esp}}{a_s - d_s}\right)^4 \cdot \frac{(\text{sen} \frac{180^\circ}{n_s})^4}{\eta^4} \cdot \left(1 - \frac{\text{atan} \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}}\right) - \frac{1}{4} \right]^{1/2} ; \quad (2.73)$$

$$v_4 = \eta \cdot \frac{a_s - d_s}{a_s - \eta \cdot (a_s - d_s)} \quad (2.74)$$

sendo,

η o fator para cálculo de $F_{pi,d}$, no caso de subcondutores que não colidem.

Ao final deste roteiro, o valor de interesse é o resultado da variável $F_{pi,d}$, que representa o esforço aplicado no ponto de ancoragem do barramento, originado do efeito de atração entre os subcondutores, devido à passagem da corrente de curto-circuito.

2.2.1.1.6 Esforços de curto-circuito para projeto dos elementos do barramento

Os esforços devido ao curto-circuito, denominados como durante ($F_{t,d}$), após ($F_{f,d}$) e devido ao aperto ($F_{pi,d}$), calculados nos itens acima, são os valores de tração a serem considerados para dimensionamento das estruturas suportes, isoladores e ferragens de conexão, segundo a norma IEC 60865-1 (IEC, 2011). Orienta-se, adicionalmente, que

sejam considerados como cargas estáticas, ocorrendo em apenas duas das três fases simultaneamente. Entretanto, no estudo de origem, constam ensaios práticos sugerindo que o esforço de aperto não seja relevante para as estruturas, devido ao alto valor de inércia destas. Assim, este esforço poderia ser utilizado para dimensionamento apenas dos elementos do próprio barramento, e desconsiderados para os suportes (CIGRÈ, 2002).

Para dimensionamento as fundações civis, a norma dispensa a consideração de quaisquer dos três esforços, assumindo que, atendendo aos esforços estáticos com vento, suportariam a parcela do esforço dinâmico de curto-circuito transferida às fundações por meio da reação da base das estruturas suportes.

2.3 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Este capítulo dedicou-se a apresentar os métodos de cálculos necessários para o dimensionamento eletromecânico completo para barramentos flexíveis de SEs de transmissão. É possível notar que as referências aplicáveis são diversas, e não possuem citações cruzadas entre si. Também inexiste uma referência formal que oriente como organizá-las em um roteiro único cálculo. Portanto, no capítulo seguinte, apresenta-se uma proposta de metodologia unificada e sua implementação computacional.

3 METODOLOGIA UNIFICADA PROPOSTA E PROGRAMA COMPUTACIONAL

A metodologia unificada proposta e o algoritmo do programa computacional são apresentados neste capítulo. Além das rotinas de cálculo, abordam-se as funcionalidades do programa, listadas como desejáveis na seção 1.1.

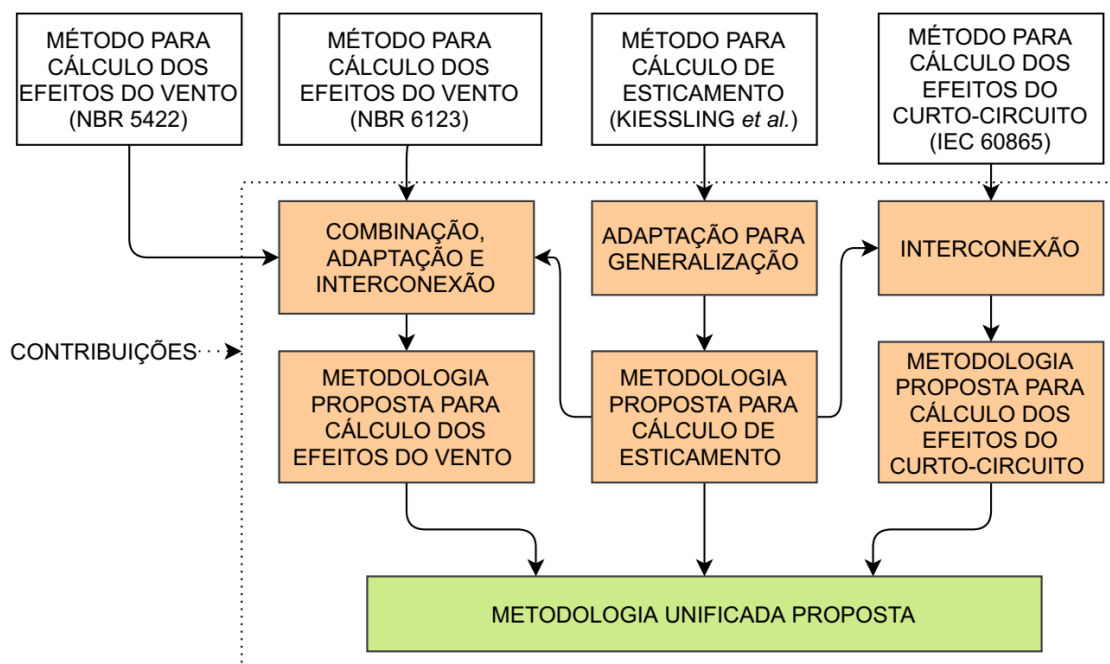
Este capítulo organiza-se em duas seções:

- 1) A Metodologia Unificada Proposta;
- 2) O Algoritmo do Programa Computacional.

3.1 A METODOLOGIA UNIFICADA PROPOSTA

A metodologia unificada é resultado de combinações, adaptações e interconexões sobre os métodos de referência, conforme ilustrado na Figura 3.1.

Figura 3.1: Etapas para desenvolvimento da metodologia unificada proposta.



Fonte: Autoria própria.

Os métodos existentes não são questionados neste trabalho, pois, considera-se que são confiáveis, visto que a maior parte das referências são normas técnicas e livros

com grande aceitação profissional. Por isto, os conceitos físicos não são discutidos, mas sim a forma de se preencher as lacunas identificadas, para aplicação em determinadas situações não abrangidas por essas referências.

Para o cálculo de esticamento é necessária uma adaptação, para generalizar a abrangência também à situação de barramento desnivelado com cadeias de isoladores, não contemplada na bibliografia de referência.

Os efeitos do vento, conforme referências, se resumem à força resultante de arrasto, aplicada transversalmente no ponto central do barramento. Como o barramento é flexível, não é correto apenas considerar que este esforço seja dividido entre os suportes, e aplicado transversalmente também ao ponto de ancoragem. A resultante transversal provoca incremento da tração, o que não é explicado nas normas. Por isto, uma adaptação, seguida da interconexão com o cálculo de esticamento, é apresentada na subseção 3.1.2. Adicionalmente, um entendimento constante na norma NBR 5422 (ABNT, 1985) é combinado ao roteiro principal da norma NBR 6123 (ABNT, 1988), suprimindo uma carência desta última quanto à temperatura de incidência mais relevante do vento.

Sobre o cálculo dos efeitos do curto-circuito, não se verifica necessidade de complementação, pois o método constante na norma de referência é abrangente e detalhado. Entretanto, é possível agregar precisão por meio da interconexão com o cálculo de esticamento, conforme apresentado na subseção 3.1.3.

3.1.1 METODOLOGIA PROPOSTA PARA CÁLCULO DE ESTICAMENTO

Conforme apresentado nas subseções 2.1.1 e 2.1.2, a referência de Kiessling *et al.* (2003) abrange duas situações: barramentos desnivelados sem cadeias de isoladores e nivelados com cadeias de isoladores. Admitiu-se também que, para vãos longos de barramentos desnivelados, nos quais os efeitos de carga concentrada das cadeias são menos relevantes, seria razoável estender o método da primeira situação, considerando a carga das cadeias como distribuídas ao longo do condutor.

Portanto, necessita-se adaptar a metodologia para que se aplique também à situação de vão curtos de barramentos desnivelados com cadeias de isoladores. Conseqüentemente, seria também aplicável aos vãos longos desnivelados, para os quais já havia uma adaptação razoável, citada acima, mas que deixaria de ser a melhor opção. Adicionalmente, atribuindo um valor nulo ao desnível, se aplicaria aos vãos nivelados.

Assim, a metodologia proposta é uma generalização, necessária para solucionar os vãos curtos desnivelados, mas que abrange todas as situações de barramentos flexíveis.

Profissionalmente, é comum desprezar o efeito das cadeias de isoladores ou o desnível entre os suportes, para que se possa utilizar um dos métodos existentes. Entretanto, estas simplificações são bastante questionadas entre projetistas, e a carência de uma metodologia mais completa é sentida. Com alguma frequência, verifica-se que engenheiros elaboram dimensionamentos utilizando adaptações e combinações, assemelhando-se com a metodologia proposta a seguir. Academicamente, após vasta pesquisa realizada nas principais fontes, não se identificou nenhuma solução para o problema de abrangência citado. Portanto, a metodologia unificada é introduzida academicamente por meio desta dissertação.

Analisando os roteiros de cálculo das subseções 2.1.1 e 2.1.2, nota-se que o primeiro dispõe de método para consideração dos desníveis entre os suportes, enquanto o segundo soluciona a modelagem das cadeias de isoladores como cargas concentradas. O primeiro é utilizado como base da metodologia proposta, e o segundo como referência para as adaptações.

Na subseção 2.1.2, o roteiro para determinação do esticamento de vãos nivelados e com cadeias de isoladores se inicia com o cálculo de flecha, a partir de um valor arbitrário da componente horizontal da tração (H), por meio da equação (2.11). Entretanto, quando se tem um arranjo físico pré-definido, a informação de entrada disponível é a flecha máxima, para a qual as distâncias elétricas entre os diferentes níveis de barramentos são atendidas. A flecha máxima (f_{max}) é critério de projeto, estabelecido durante a elaboração do arranjo físico, entretanto, é comum adotar valores entre 3% a 4% do comprimento horizontal real do vão do barramento (X), portanto:

$$f_{max} = X \cdot f_{maxp} \quad (3.1)$$

sendo,

f_{maxp} a flecha máxima percentual de operação do barramento, referente ao comprimento X do vão.

Com isto, a equação (2.11) pode ser reorganizada, posicionando a componente H isolada no primeiro membro e substituindo a variável f_t , referente à flecha total do

barramento em qualquer situação, para o valor específico da flecha máxima, utilizada como premissa. Tem-se assim a equação (3.2):

$$H = \frac{1}{2 \cdot f_{max}} \cdot \left(\frac{m_s \cdot g \cdot X^2}{4} + m_s \cdot g \cdot L_k^2 + G_k \cdot L_k \right). \quad (3.2)$$

O valor inicial de H representa a componente horizontal da tração do barramento para o estado de temperatura máxima de operação. Neste ponto, o roteiro original segue com a determinação das variáveis referentes aos demais estados de temperatura, aplicando repetidamente a equação (2.13), de mudança de estado, sem considerar a possibilidade de desnível entre os suportes de ancoragem. Por isto, interrompe-se aqui para inserção de três equações do outro roteiro, da subseção 2.1.1, que considera o desnível.

As equações (2.2) e (2.3) determinam o comprimento real do barramento, ao longo da catenária (L), e a distância horizontal entre o vértice desta e o ponto de ancoragem mais alto, respectivamente. Em seguida, calcula-se o comprimento horizontal do vão nivelado equivalente (X_e), por meio da equação (2.4). O valor de X_e obtido substitui o valor de X , ou seja, o cálculo de esticamento passa a ser feito utilizando o comprimento horizontal de um vão virtual, ao invés do real. Assim, as equações (2.11) e (2.13) evoluem para as equações (3.3) e (3.4), respectivamente:

$$f_t = \frac{1}{2 \cdot H} \cdot \left(\frac{m_s \cdot g \cdot X_e^2}{4} + m_s \cdot g \cdot L_k^2 + G_k \cdot L_k \right); \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} & H_2^2 \left[H_2 - H_1 + E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12} \cdot \varepsilon_t \cdot (T_1 - T_2) \right. \\ & \left. + \frac{E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12}}{H_1^2} \cdot \left(\frac{(m_{s1} \cdot g)^2 \cdot X_e^2}{24} + \frac{G_{k1} \cdot m_{s1} \cdot g \cdot L_k}{2} + \frac{G_{k1}^2 \cdot L_k}{3 \cdot X_e} \right) \right] \\ & = E_s \cdot A_s \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{(m_{s2} \cdot g)^2 \cdot X_e^2}{24} + \frac{G_{k2} \cdot m_{s2} \cdot g \cdot L_k}{2} + \frac{G_{k2}^2 \cdot L_k}{3 \cdot X_e} \right). \end{aligned} \quad (3.4)$$

Necessita-se aplicar a equação (3.3) para determinação da flecha inicial, utilizando o valor de H obtido na equação (3.2). O resultado de f_t é idêntico ao valor de f_{max} , caso o desnível entre os suportes de ancoragem seja nulo, ou seja, esta etapa é

necessária para a situação de barramento desnivelado, mas não influencia os resultados caso seja nivelado.

Determinadas as variáveis do estado inicial de temperatura máxima, aplica-se o cálculo descrito pelo Algoritmo 1, para obtenção dos valores de flecha e tração dos demais estados de temperatura.

Algoritmo 1: Metodologia desenvolvida para mudança de estado

- 1: Atribuição do valor inicial de H à variável de estado H_1 ;
 - 2: Atribuição da temperatura máxima de operação do barramento às variáveis de estado T_1 e T_2 ;
 - 3: Decremento discreto de T_2 ;
 - 4: Determinação da componente H_2 , por meio da equação (3.4);
 - 5: Determinação de X_e , por meio das equações (2.2), (2.3) e (2.4);
 - 6: Determinação de f_t , atribuindo à H o último valor obtido de H_2 ;
 - 7: Se $T_2 > T_{\min}$, sendo T_{\min} a menor temperatura de operação do barramento
 - 8: Retornar à linha 3;
 - 9: fim
 - 10: Fim.
-

Tem-se até aqui as flechas e trações estáticas sem vento, por subcondutor, para todos os estados de temperatura de operação do barramento. Para completar a etapa do esticamento, necessita-se determinar os esforços verticais aplicados nos pontos de ancoragem.

As equações (2.6) e (2.7), na subseção 2.1.1, permitem o cálculo dos esforços verticais aplicados aos suportes mais alto e mais baixo do barramento, respectivamente, porém, sem contabilizar a massa das cadeias de isoladores. De forma oposta, por meio da equação (2.8), na subseção 2.1.2, é possível calcular os esforços verticais considerando as cadeias, porém, se aplica apenas aos vãos nivelados. Assim, verifica-se a necessidade de adaptação sobre um dos dois métodos acima, para que sejam considerados simultaneamente o desnível e a massa das cadeias. Opta-se por adequar o primeiro.

A consideração da massa das cadeias como distribuídas uniformemente ao longo do barramento, descartada anteriormente na etapa de cálculo das flechas e trações, é vista como adequada e suficiente. Diferentemente da tração, que sempre é o maior esforço aplicado no ponto de ancoragem e gera momento fletor da estrutura, o peso é menos determinante, possuindo valor reduzido e atuando apenas na compressão da estrutura.

Para distribuir a massa das cadeias ao longo do barramento, é necessário somar as massas de ambas à densidade linear do subcondutor, dividindo pelo comprimento do vão e pela quantidade de subcondutores, ou seja:

$$m_{skd} = m_s + \frac{2 \cdot m_k}{X \cdot n_s} \quad (3.5)$$

sendo,

m_{skd} a densidade linear do subcondutor mais massa das cadeias de isoladores distribuídas uniformemente (kg/m).

Esta nova densidade deve substituir a variável m_s nas equações (2.6) e (2.7), portanto:

$$V_A = -H \cdot \sinh\left(\frac{m_{skd} \cdot g \cdot X_A}{H}\right); \quad (3.6)$$

$$V_B = H \cdot \sinh\left(\frac{m_{skd} \cdot g \cdot (X + X_A)}{H}\right). \quad (3.7)$$

À variável H , constante nas equações (3.6) e (3.7), pode-se atribuir os valores calculados para cada estado, determinando os respectivos esforços verticais (V_A e V_B).

Determinados os esforços por subcondutor, é interessante que se apresentem os esforços por fase, multiplicando os valores calculados até o momento pelo número de subcondutores (n_s). Assim, determina-se a tração estática sem vento (T_{sv}) e os esforços verticais por fase (P_A e P_B , respectivamente para os suportes mais alto e mais baixo) aplicados no ponto de ancoragem do barramento:

$$T_{sv} = H \cdot n_s; \quad (3.8)$$

$$P_A = V_A \cdot n_s; \quad (3.9)$$

$$P_B = V_B \cdot n_s. \quad (3.10)$$

3.1.2 METODOLOGIA PROPOSTA PARA CÁLCULO DOS EFEITOS DO VENTO

O método de cálculo constante na norma NBR 6123 (ABNT, 1988), e apresentado na subseção 2.1.3.1, é considerado adequado para determinação da força resultante de arrasto de vento, aplicada transversalmente no centro do subcondutor e de cada cadeia de isoladores. Entretanto, não há nessa referência orientações para determinação do novo valor de tração, que evidentemente recebe incremento devido à ação do vento.

Em Silva (2018), pode-se verificar uma adaptação, propondo que a tração seja calculada a partir do peso aparente, resultante de uma soma vetorial entre a força de arrasto de vento e o peso do barramento. Entretanto, não se detalha, matematicamente, como deve ser tratada a existência de múltiplos subcondutores. A adaptação apresentada a seguir é mais detalhada neste sentido.

As forças de arrasto de vento sobre o subcondutor (F_{a-s}) e sobre uma cadeia de isoladores (F_{a-k}) são calculadas por meio das equações (2.18) e (2.20), respectivamente. Sustentado pela norma aplicável, pode-se considerar que o vento sopra na direção horizontal e em apenas um sentido por instante. Assim, é possível somar vetorialmente os pesos e densidades lineares com as respectivas forças de arrasto de vento conforme equações (3.11) e (3.12):

$$m_{sv} = \sqrt{m_s^2 + \left(\frac{F_{a-s} \cdot n_{sv}}{g \cdot n_s}\right)^2}; \quad (3.11)$$

$$G_{kv} = \sqrt{G_k^2 + \left(\frac{F_{a-k}}{n_s}\right)^2} \quad (3.12)$$

nas quais,

m_{sv} é a densidade linear do subcondutor com a carga de vento incorporada (kg/m);

G_{kv} é o peso da cadeia de isoladores, por subcondutor, com a carga de vento incorporada (N);

n_{sv} é o número de subcondutores, por fase do barramento, que recebe a carga de vento.

A variável n_{sv} , presente na equação (3.11), limita a aplicação da força de arrasto apenas sobre os condutores expostos simultaneamente à ação do vento. O valor desta variável, portanto, é igual a quantidade de subcondutores que pode se identificar em uma vista lateral do barramento, pois os subcondutores ocultos nesta vista são protegidos contra a ação do vento.

A tração do barramento por subcondutor, considerando a carga de vento, pode ser determinada por meio da equação de mudança de estado (3.4), ou seja, realizando uma interconexão com o cálculo de esticamento. Primeiramente, é necessário atribuir um conjunto de valores conhecidos de esticamento às variáveis do estado “1”, e, ao estado “2”, os valores de m_{sv} e G_{kv} às variáveis m_2 e G_2 .

Em relação à temperatura do barramento, que se deve considerar para aplicação da carga de vento, existem diferentes critérios de projeto possíveis de se adotar. Pode-se utilizar a temperatura mínima, como critério conservador, uma vez que a tração estática sem vento é máxima neste estado. Entretanto, opta-se por utilizar um entendimento apresentado na subseção 2.1.3.2, combinando com a norma NBR 5422 (ABNT, 1985), o qual sugere que a velocidade de vento de projeto ocorre na temperatura coincidente com a média das mínimas diárias, conforme mapa da Figura 2.12. Este valor de temperatura deve ser atribuído à variável T_2 na equação de mudança de estado supracitada.

A variável de estado que resta como incógnita na equação é H_2 , representando a tração com vento por subcondutor. Assim, para determinar a tração estática com vento (T_{cv}) por fase, aplicada no ponto de ancoragem, basta multiplicar pelo número de subcondutores, como descrito na equação (3.13):

$$T_{cv} = H_2 \cdot n_s . \quad (3.13)$$

Por fim, necessita-se determinar o esforço transversal total, devido ao vento, aplicado pelo barramento em cada ponto de ancoragem da estrutura suporte ($F_{a,b}$). Portanto, deve-se multiplicar a força de arrasto sobre o subcondutor pela quantidade destes que recebem carga de vento, dividir entre os dois suportes e somar o arrasto sobre uma cadeia de isoladores, conforme equação (3.14):

$$F_{a,b} = \frac{F_{a-s} \cdot n_{sv}}{2} + F_{a-k} . \quad (3.14)$$

Determinadas as variáveis T_{cv} e $F_{a,b}$, admite-se concluído o dimensionamento dos esforços estáticos com vento.

3.1.3 METODOLOGIA PROPOSTA PARA CÁLCULO DOS EFEITOS DO CURTO-CIRCUITO

Como citado anteriormente, o método da IEC 60865-1 (IEC, 2011), apresentado na subseção 2.2.1.1, é abrangente e detalhado. Portanto, apenas uma oportunidade de refinamento é identificada, conforme descrito a seguir.

A norma supracitada calcula a flecha estática (f_{es}) do barramento de forma simplificada, por meio da equação (2.32). Entretanto, valores mais precisos de flechas e trações estáticas podem ser extraídos do cálculo de esticamento (subseção 3.1.1), mais especificamente das equações (3.3) e (3.8). Substituindo as variáveis f_{es} e F_{st} , do método original, por f_t e T_{sv} , do cálculo de esticamento, incrementa-se precisão ao dimensionamento dos esforços de curto-circuito. Tem-se assim as equações (3.15) e (3.16).

$$f_{es} = \frac{1}{2 \cdot H} \cdot \left(\frac{m_s \cdot g \cdot X_e^2}{4} + m_s \cdot g \cdot L_k^2 + G_k \cdot L_k \right) ; \quad (3.15)$$

$$F_{st} = H \cdot n_s . \quad (3.16)$$

Os esforços devido ao curto-circuito costumam ser os mais determinantes para o dimensionamento das estruturas suportes, por serem maiores. Visto que as simplificações da referência são conservadoras, quando se modifica, adicionando precisão, se reduz o superdimensionamento dos esforços e das estruturas suportes.

Por fim, é importante considerar que os maiores esforços de tração com curto-circuito podem ocorrer durante tração estática máxima ou flecha estática máxima. Como tração e flecha estáticas são inversamente proporcionais, necessita-se realizar o cálculo

de curto-circuito para as duas situações extremas, considerando válidos os maiores esforços obtidos.

3.2 O ALGORITMO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

Nesta subseção, apresentam-se os detalhes do algoritmo computacional e como foram estruturados os bancos de dados, a interface de entrada do usuário e o formato de saída dos resultados.

Com objetivo maior de evidenciar as discussões relacionadas ao processo de dimensionamento, utilizam-se a seguir principalmente fluxogramas e algoritmos em linguagem natural para expor a implementação.

Um conjunto de oito rotinas constituem o programa desenvolvido em MATLAB, com as respectivas funções:

- 1) Principal: declara variáveis globais, chama as outras rotinas na ordem adequada e executa laços de repetição, caso o usuário tenha entrado com dados de mais de um barramento para dimensionamento;
- 2) Leitor_entradas: acessa uma planilha eletrônica que contém as entradas do usuário e aloca os valores nas variáveis internas;
- 3) Leitor_dados_cabos: acessa as planilhas eletrônicas, que contém informações sobre os cabos que são utilizados nos dimensionamentos, e aloca os valores nas variáveis internas;
- 4) Vento: determina as forças de arrasto de vento sobre as cadeias e subcondutores;
- 5) Esticamento: determina os valores de flecha e tração estáticas, com e sem vento, esforços verticais e deslocamentos do vértice da catenária descrita pelo barramento, para os diversos estados de temperatura determinados pelo usuário;
- 6) Curto_circuito: determina as três trações devido ao curto-circuito: esforço de aperto, ou de *pinch*, esforço durante e após a falta;
- 7) Saídas: apresenta os resultados obtidos, de forma adequada a cada tipo de barramento dimensionado. Seleciona e apresenta avisos para auxílio da interpretação dos resultados por parte do usuário;

- 8) Análises: plota gráficos para análises de sensibilidade de variáveis. Não é chamada pela rotina “Principal”, mas a substitui quando o objetivo é analisar sensibilidade e não dimensionar o barramento.

As subseções a seguir apresentam os pormenores de cada rotina, além de detalhes sobre as planilhas em EXCEL utilizadas.

3.2.1 ROTINA “PRINCIPAL”

A rotina “Principal” tem a função de executar as seis rotinas descritas nas subseções seguintes, exceto a rotina “Análises”, além de declarar variáveis globais, executar laços de repetição, possibilitando a realização de dimensionamentos em série, estabelecer condições e efetuar ajustes diversos detalhados a seguir.

Inicia-se com a declaração de variáveis, optando por declarar todas como globais, ainda que diversas sejam específicas de apenas uma das rotinas. Assim, é possível verificar mais facilmente os possíveis conflitos durante a implementação inicial ou atualizações futuras.

Na sequência, inicializam-se constantes como: aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) e permeabilidade magnética do vácuo ($\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$).

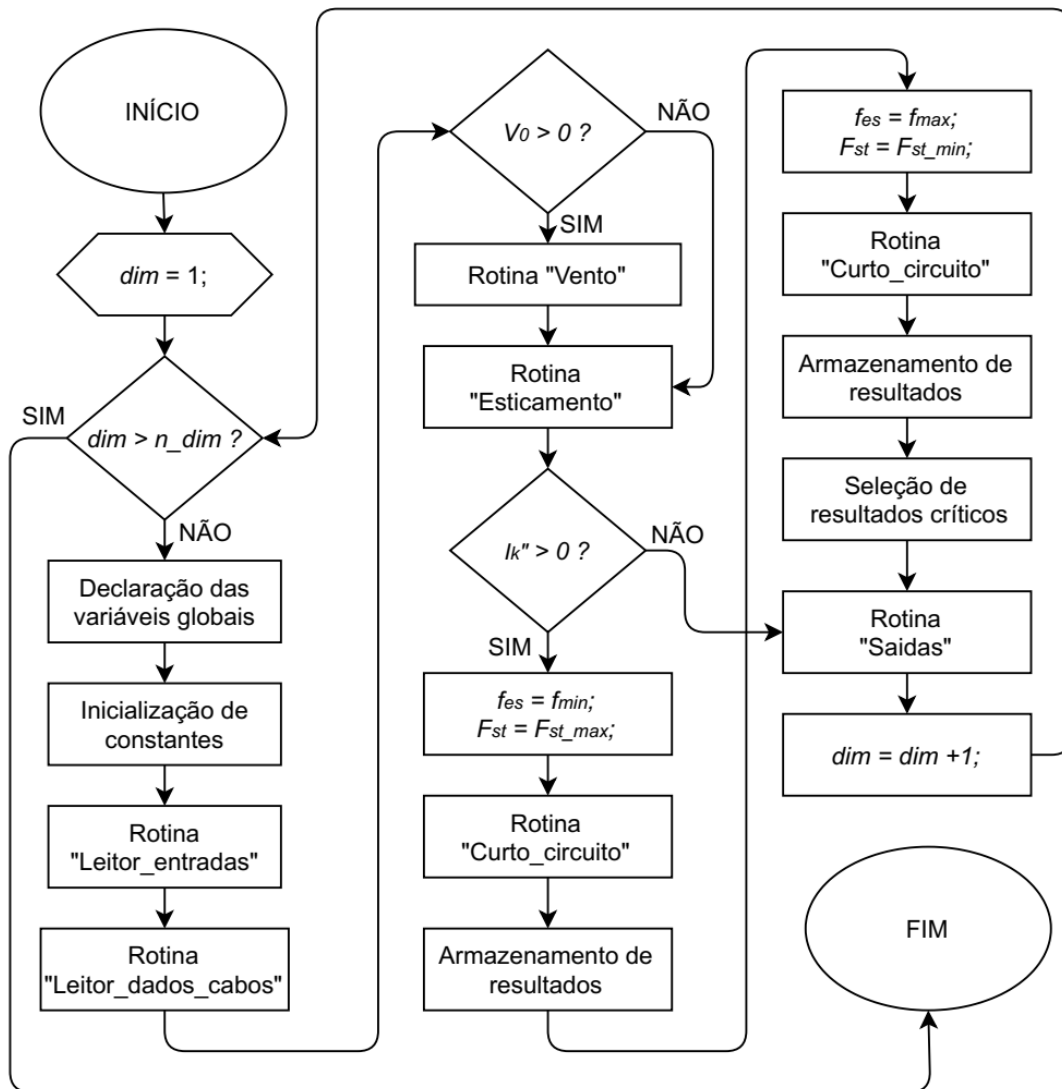
As chamadas para as demais rotinas são implementadas dentro de um laço de repetição, conforme mostrado no fluxograma da Figura 3.2. Neste, a variável dim representa o dimensionamento atual, e n_dim a quantidade total.

Também representadas na Figura 3.2, as rotinas “Vento” e “Curto_circuito” são executadas apenas se o usuário tiver informado valores não nulos para a velocidade básica de vento e a corrente de curto-circuito.

A rotina “Curto_circuito” é executada duas vezes, para os estados de flechas estáticas mínima e máxima. As flechas (f_{min} e f_{max}) e trações estáticas (F_{st_min} e F_{st_max}) referem-se aos valores obtidos no cálculo de esticamento, sendo f_{es} e F_{st} as respectivas variáveis temporárias para cada execução da rotina “Curto_circuito”. Por fim, selecionam-se os resultados críticos dentre estas duas situações.

Por fim, chama-se a rotina “Saidas”, que organiza os resultados para apresentação ao usuário, e o laço se repete até que o último dimensionamento seja concluído, ou seja, até que dim se torne maior que n_dim .

Figura 3.2: Fluxograma da rotina “Principal”.



Fonte: Autoria própria.

3.2.2 ROTINA “LEITOR_ENTRADAS”

A interface entre o usuário e o programa é uma planilha em EXCEL, e uma rotina em MATLAB faz a leitura desta. A planilha e a rotina denominam-se “Entradas” e “Leitor_entradas”, respectivamente.

A estrutura da planilha é mostrada na Figura 3.3, na qual as variáveis de entrada referentes ao cálculo de esticamento, efeitos do vento e curto-circuito estão identificadas, nesta ordem, pelas cores amarela, azul e verde. O conteúdo da coluna “A” não é editável, apenas descreve as variáveis que o usuário deve preencher em cada linha, informando a unidade entre colchetes e o nome da respectiva variável de MATLAB entre parênteses.

O preenchimento pelo usuário ocorre a partir da coluna “B”, sem limite para a quantidade de vãos de barramentos a serem dimensionados. A linha “1” não é editável em nenhuma das colunas, possuindo preenchimento sequencial automático, que serve de controle para a atual rotina em MATLAB identificar a presença de dados em cada coluna.

Utilizam-se alguns critérios de validação de dados que auxiliam o preenchimento, apresentando listas de seleção, como mostrado na linha “6” da coluna “C”, ou restringindo o preenchimento às entradas possíveis, permitindo apenas números inteiros para o número de espaçadores na linha “26”, por exemplo.

A linha “31” refere-se à entrada opcional da constante de *Spring*. Caso haja preenchimento pelo usuário, este valor é utilizado nos cálculos, caso contrário, o programa calcula na rotina “Curto_circuito”, conforme descrito na subseção 3.2.6.

Figura 3.3: Interface de usuário para entrada de dados.

	A	B	C
1	Dimensionamento	1	2
2	Tensão nominal do barramento (<i>tensao</i>) [kV]	138	138
3	Nomenclatura do vão (<i>vao</i>)	F11	F12
4	Número de subcondutores (<i>ns</i>)	2	2
5	Tipo de cabo (<i>cabo_tipo</i>)	CAA	CAA
6	Bitola do cabo (<i>cabo</i>)	Hawk - 477,0 MCM	Hawk - 477,0 MCM
7	Comprimento do vão, eixo a eixo (<i>X</i>) [m]	16	Hawk - 477,0 MCM
8	Largura das vigas, a ser deduzida do vão (<i>lviga</i>) [m]	0,4	Hen - 477,0 MCM
9	Desnível entre os suportes de ancoragem (<i>h</i>) [m]	0	Osprey - 556,5 MCM
10	Flecha máxima percentual, premissa (<i>fmaxp</i>) [%]	3,5	Parakeet - 556,5 MCM
11	Comprimento de uma cadeia de isoladores (<i>Lk</i>) [m]	2	Dove - 556,5 MCM
12	Diâmetro de uma cadeia de isoladores (<i>dk</i>) [mm]	255	Eagle - 556,5 MCM
13	Massa de uma cadeia de isoladores (<i>mk</i>) [m]	60	Peacock - 605,0 MCM
14	Temperatura máxima para esticamento (<i>Tmax</i>) [°C]	90	Squab - 605,0 MCM
15	Temperatura mínima para esticamento (<i>Tmin</i>) [°C]	-5	255
16	Temperatura coincidente, ou p/ tração c/ vento (<i>Tc</i>) [°C]	13	13
17	Velocidade básica de vento (<i>V0</i>) [m/s]	43	43
18	Tipo de relevo do terreno (<i>relevo_terreno</i>) [anotação]	1	1
19	Ângulo do talude (<i>theta</i>) [°]	0	0
20	Altura do talude (<i>d</i>) [m]	0	0
21	Distância objeto - crista do talude (<i>d_talude_objeto</i>) [m]	0	0
22	Altura de instalação, em relação ao solo (<i>z</i>) [m]	14	14
23	Categoria de rugosidade do terreno (<i>cat_terreno</i>) [anotação]	3	3
24	Distância entre fases, eixo a eixo (<i>a</i>) [m]	3	3
25	Distância entre subcondutores, eixo a eixo (<i>as</i>) [m]	0,2	0,2
26	Número de espaçadores (<i>n_esp</i>)	1	2
27	Corrente simétrica de curto circuito (<i>Ik</i>) [kAef]	40	40
28	Tempo de curto circuito (<i>Tk1</i>) [s]	0,3	0,3
29	Frequência elétrica do sistema (<i>f</i>) [hz]	60	60
30	Fator de assimetria (<i>kappa</i>) [anotação]	2,6	2,6
31	Constante de Spring (<i>S</i>) [N/m] - opcional	0	0

Fonte: Autoria própria.

Ainda como auxílio no preenchimento, existem comentários que surgem ao posicionar o cursor do *mouse* sobre determinadas células, esclarecendo tecnicamente as opções para algumas variáveis, como mostrado na Figura 3.4. Neste caso, o usuário deve preencher o número referente ao tipo de relevo do terreno.

Figura 3.4: Comentário na planilha “Entradas.xlsx”.

	A	B	C
1	Dimensionamento	1	2
16	Temperatura coincidente, ou p/ tração c/ vento (T_c) [°C]	13	13
17	Velocidade básica de vento (V_0) [m/s]	12	13
18	Tipo de relevo do terreno (<i>relevo_terreno</i>) [anotação]	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> Escolha entre: 1) plano ou fracamente acidentado. 2) taludes e morros. 3) vales profundos (NBR 6123:1988, item 5.2) </div>	
19	Ângulo do talude (θ) [°]		1
20	Altura do talude (d) [m]		0
21	Distância objeto - crista do talude (d_{talude_objeto}) [m]		0
22	Altura de instalação, em relação ao solo (z) [m]		4
23	Categoria de rugosidade do terreno (<i>cat_terreno</i>) [anotação]	3	3
24	Distância entre fases, eixo a eixo (a) [m]	3	3
25	Distância entre subcondutores, eixo a eixo (as) [m]	0,2	0,2

Fonte: Autoria própria.

A rotina “Leitura_entradas” é responsável, principalmente, pela alocação dos valores lidos na planilha “Entradas.xlsx” em variáveis internas do programa em MATLAB. Apenas um laço de repetição é usado, conforme Algoritmo 2, no qual as colunas alfabéticas da planilha são tratadas como números. Ao final deste, a variável n_dim representa a quantidade de dimensionamentos a serem realizados, conforme solicitado pelo usuário na planilha em EXCEL.

Algoritmo 2: Contagem dos dimensionamentos a serem realizados

```

1:   $n\_dim = 1;$ 
2:   $coluna = 3;$ 
3:  Enquanto célula (1,coluna) > 0
4:     $n\_dim = n\_dim + 1;$ 
5:     $coluna = coluna + 1;$ 
6:  fim
7:  Fim.

```

3.2.3 ROTINA “LEITOR_DADOS_CABOS”

O banco de dados de cabos é constituído por sete planilhas em EXCEL, uma para tipo de cabo nu tradicionalmente utilizado nas instalações de transmissão:

- 1) CAA_Nexans.xlsx: cabos de alumínio com alma de aço, conforme dados de catálogo do fabricante Nexans (NEXANS, 2013);
- 2) CA_Nexans.xlsx: cabos de alumínio, conforme dados de catálogo do fabricante Nexans (NEXANS, 2013);
- 3) CAL_Nexans.xlsx: cabos de liga de alumínio reforçada, conforme dados de catálogo do fabricante Nexans (NEXANS, 2013);
- 4) CALA_Nexans.xlsx: cabos de alumínio com alma de liga de alumínio reforçada, conforme dados de catálogo do fabricante Nexans (NEXANS, 2013);
- 5) T-CAA_Nexans.xlsx: cabos de alumínio termorresistente com alma de aço, conforme dados de catálogo do fabricante Nexans (NEXANS, 2013);
- 6) T-CA_Nexans.xlsx: cabos de alumínio termorresistente, conforme dados de catálogo do fabricante Nexans (NEXANS, 2013);
- 7) Aço_Belgo.xlsx: cordoalhas de aço galvanizado, conforme dados de catálogo do fabricante Belgo Bekaert Arames (BELGO BEKAERT ARAMES, 2021).

Cada tipo de cabo relacionado acima é disponível em diversas bitolas e formações. Para alguns tipos são atribuídas famílias de nomes, como flores para o tipo CA e aves para o CAA, ambos em inglês, diferenciando as bitolas e formações. Um exemplo é o cabo Rail (nome de ave), que pertence ao tipo CAA, com bitola 954 MCM¹ e formação 45/7, significando que possui 45 fios de alumínio e sete de aço na alma.

A rotina em MATLAB “Leitor_dados_cabos”, primeiramente localiza qual dos sete tipos de cabos se aplica ao atual dimensionamento, fazendo a leitura apenas da planilha referente ao tipo específico. A variável *cabo_tipo*, dado de entrada do usuário importado pela rotina “Leitor_entradas”, conforme descrito na subseção anterior, contém a informação do tipo aplicável. Outra variável conhecida, denominada *cabo_bitola*, é utilizada para localizar o cabo específico, cujas demais características são importadas para as variáveis internas por meio da atual rotina.

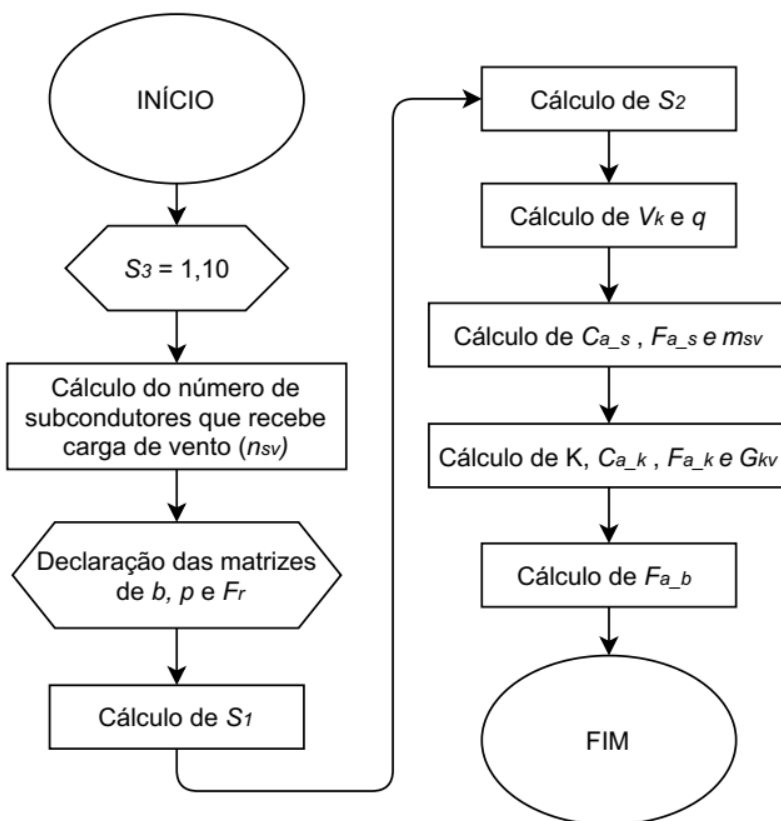
¹ MCM é abreviação para mil circular mil, unidade de medida usual para especificação da bitola de condutores, representando 0,5067 mm².

3.2.4 ROTINA “VENTO”

A rotina “Vento” determina as forças de arrasto de vento sobre as cadeias de isoladores e subcondutores, e não possui interface externa ao MATLAB, diferente das duas rotinas apresentadas anteriormente. É composta por roteiro de cálculo baseado principalmente na norma NBR 6123 (ABNT, 1988), com algumas modificações, conforme descrito na subseção 3.1.2.

O fluxograma ilustrado na Figura 3.5 representa a implementação da atual rotina. Sendo esta a primeira rotina de cálculo, todas as variáveis de entrada foram obtidas por meio das entradas do usuário ou selecionadas dos bancos de dados.

Figura 3.5: Fluxograma da rotina “Vento”.



Fonte: Autoria própria.

Como citado na subseção 2.1.3.1, o valor do fator estatístico (S_3) é apenas fixado em 1,10, pois subestações sempre são classificadas conforme nível mais alto de importância.

Na sequência, utiliza-se a seguinte lógica do Algoritmo 3 para atribuir à variável n_{sv} a quantidade de subcondutores do feixe que recebe carga de vento. Não abrange todas as situações teóricas, mas todas as práticas, pois quando se têm dois subcondutores, são sempre dispostos horizontalmente, fazendo com que apenas um receba carga de vento. Para três ou quatro subcondutores, dois recebem carga de vento. Não é permitida a entrada de n_s maior que quatro, pois não há aplicação prática em subestações para esta configuração.

Algoritmo 3: Determinação do número de subcondutores que recebem carga de vento (n_{sv})

- 1: Se o número de subcondutores (n_s) ≤ 2
 - 2: $n_{sv} = 1$;
 - 3: Senão
 - 4: $n_{sv} = 2$;
 - 5: Fim.
-

A rotina avança com a declaração das matrizes que contém os valores dos parâmetros meteorológicos (b , p e F_r). A referência é a Tabela 2.3, entretanto, é dividida em três matrizes, para maior facilidade de programação e rastreamento dos valores específicos utilizados nos cálculos. As linhas relacionam-se com a categoria do terreno ($cat_terreno$) e as colunas com a classe dos objetos ($classe_objeto$), permitindo assim que o programa encontre os valores dos parâmetros por meio destas duas características.

O cálculo do fator topográfico (S_1) ocorre por meio da equação (2.15), com as interpolações implementadas para os intervalos não abrangidos. Já o fator combinado (S_2) é determinado conforme Algoritmo 4, sendo o sufixo “ $_MAT$ ” utilizado para designar a matriz de cada parâmetro.

Algoritmo 4: Determinação do fator combinado (S_2)

- 1: $b = b_MAT(cat_terreno, classe_objeto)$;
 - 2: $p = p_MAT(cat_terreno, classe_objeto)$;
 - 3: $F_r = F_r_MAT(cat_terreno, classe_objeto)$;
 - 4: Determinação de S_2 por meio da equação (2.16);
 - 5: Fim.
-

Implementam-se as equações (2.14) e (2.17) para determinação da velocidade característica (V_k) e a pressão dinâmica de vento (q), nesta sequência. A partir disto,

determinam-se as forças de arrasto sobre os subcondutores (F_{a-s}) e cadeia de isoladores (F_{a-k}), conforme Algoritmo 5 e Algoritmo 6. Em ambos, necessita-se calcular o número de Reynolds (Re_s ou Re_k), o coeficiente de arrasto (C_{a-s} ou C_{a-k}) e, apenas para as cadeias de isoladores, o fator de redução de arrasto (K). As referências para seleção dos coeficientes de arrasto são a Tabela 2.5 e Tabela 2.7.

Algoritmo 5: Determinação da força de arrasto sobre os subcondutores (F_{a-s})

- 1: Determinação de Re_s , por meio da equação (2.19);
 - 2: Se $Re_s \leq 2,5 \cdot 10^4$
 - 3: $C_{a-s} = 1,3$;
 - 4: Senão, se $Re_s > 4,2 \cdot 10^4$
 - 5: $C_{a-s} = 1,1$;
 - 6: Senão, se $2,5 \cdot 10^4 < Re_s < 4,2 \cdot 10^4$
 - 7: $C_{a-s} = 1,3 - 0,2/(4,2 - 2,5) \cdot (Re_s/1000 - 2,5)$;
 - 8: fim
 - 9: Determinação de F_{a-s} , por meio da equação (2.18);
 - 10: Fim.
-

Nota-se que, na linha 7 do Algoritmo 5, implementou-se uma interpolação linear para os valores de C_{a-s} , em que a Tabela 2.5 não possui intervalo de correspondência com a variável Re_s .

Algoritmo 6: Determinação da força de arrasto sobre as cadeias de isoladores (F_{a-k})

- 1: Determinação de Re_k , por meio da equação (2.21);
 - 2: Se $Re_k < 4,2 \cdot 10^5$
 - 3: $C_{a-k} = 1,2$;
 - 4: Senão, se $8,4 \cdot 10^5 \leq Re_k < 2,3 \cdot 10^6$
 - 5: $C_{a-k} = 0,7$;
 - 6: Senão, se $Re_k \geq 2,3 \cdot 10^6$
 - 7: $C_{a-k} = 0,8$;
 - 8: fim
 - 9: Se $Re_k < 4,2 \cdot 10^5$
 - 10: Se $L_k/d_k < 10$
 - 11: $K = 0,68$;
 - 12: Senão, se $L_k/d_k < 20$
 - 13: $K = 0,74$;
 - 14: Senão
 - 15: $K = 0,82$;
 - 16: fim
 - 17: Senão
 - 18: Se $L_k/d_k < 10$
 - 19: $K = 0,82$;
 - 20: Senão, se $L_k/d_k < 20$
-

21:		$K = 0,92;$
22:		Senão
23:		$K = 0,98;$
24:	fim	
25:	fim	
26:	Determinação de F_{a-k} , por meio da equação (2.20);	
27:	Fim.	

Obtidas as forças de arrasto de vento, conclui-se a rotina “Vento” com a implementação das equações (3.11), (3.12) e (3.14), obtendo as variáveis m_{sv} , G_{kv} e $F_{a,b}$. As duas primeiras representam a massa do subcondutor e peso da cadeia de isoladores com os efeitos do vento incorporados, e a última o esforço transversal total de vento aplicado pelo barramento em cada ponto de ancoragem.

Na subseção 3.1.2, nota-se ainda um outro cálculo de esforço devido ao vento, que determina a tração estática com vento (T_{cv}), não implementado na atual rotina. Visto que possui interconexão com o cálculo de esticamento, está inserido nesta outra rotina (“Esticamento”, subseção 3.2.5), por conveniência de programação.

3.2.5 ROTINA “ESTICAMENTO”

A rotina “Esticamento” determina a tabela de esticamento, ou seja, as flechas e esforços estáticos para os diversos estados de temperatura no intervalo de interesse. Para os vãos de barramentos desnivelados, calcula-se também a posição do vértice da catenária, uma vez que este se apresenta deslocado do centro do vão.

A metodologia de cálculo que se apresenta na subseção 3.1.1 é implementada conforme Figura 3.6, que ilustra a rotina por meio de um fluxograma.

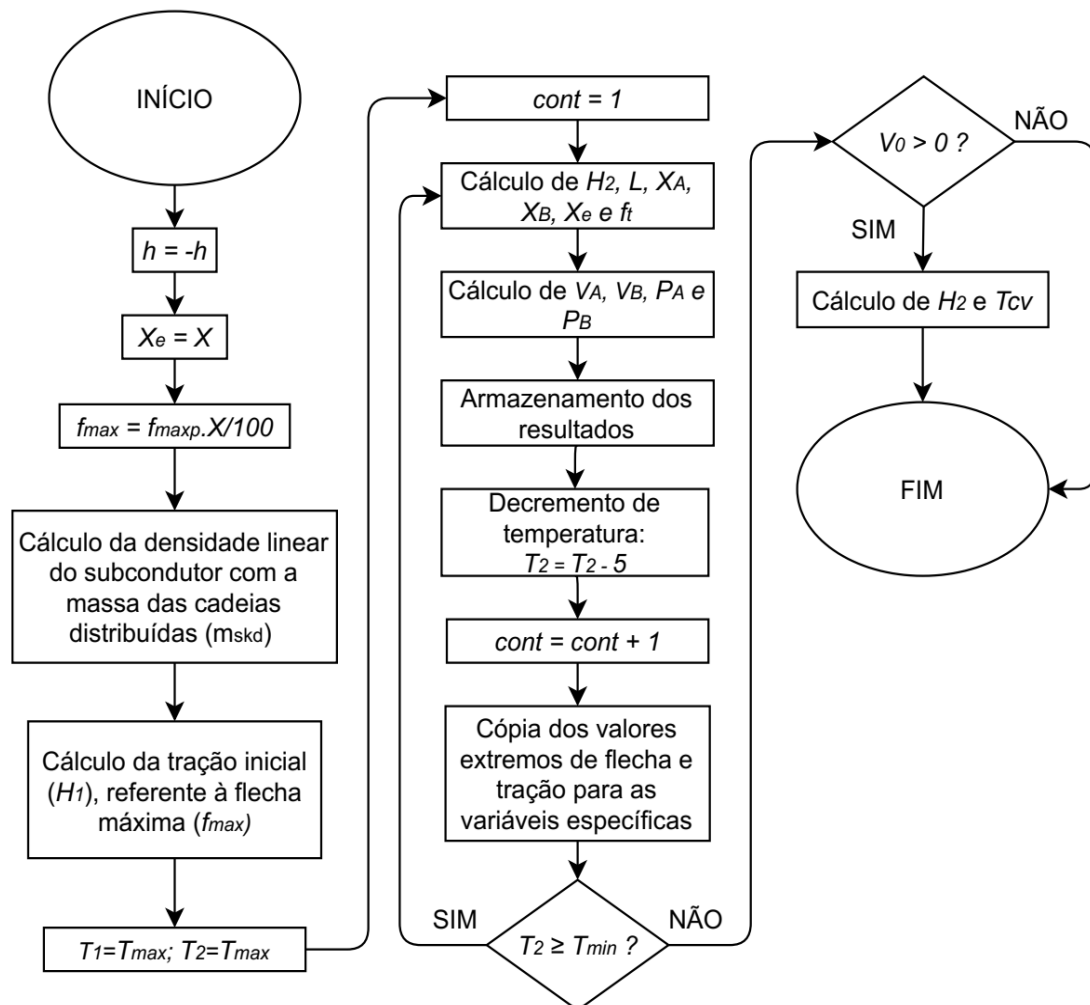
Inicialmente, realizam-se o ajuste das variáveis de entrada e a determinação dos estados iniciais do barramento:

- Troca-se o sinal do desnível entre suportes (h), pois o valor informado pelo usuário é sempre positivo e, adotando o ponto de ancoragem A como mais alto (conforme Figura 2.4), esta variável deve possuir sinal negativo para aplicação nas equações;
- Atribui-se, provisoriamente, o valor real do comprimento do vão (X) ao comprimento do vão equivalente (X_e), para que a equação de estado possa ser calculada pela primeira vez durante o laço de repetição;

- Calcula-se o valor da flecha máxima (f_{max}), a partir do valor percentual informado pelo usuário;
- Calcula-se a densidade linear do subcondutor, com a massa das cadeias distribuídas uniformemente (m_{skd}), por meio da equação (3.5);
- Calcula-se a tração inicial (H_1), com a equação (3.2);

Atribui-se o valor máximo de temperatura de operação contínua (T_{max}), informado pelo usuário, para ambos os estados desta variável.

Figura 3.6: Fluxograma da rotina “Esticamento”.



Fonte: Autoria própria.

Na sequência, executa-se um laço para determinar as flechas e esforços estáticos sem vento, para uma amostragem discreta de temperatura. Uma variável, denominada *cont*, possui a função de armazenar a quantidade de repetições. O Algoritmo 7 descreve as etapas e equações implementadas neste laço.

Algoritmo 7: Laço de repetição para o cálculo de esticamento

```

1:  Determinação de  $H_2$ , por meio da equação (3.4);
2:  Determinação de  $L$ , por meio da equação (2.2);
3:  Determinação de  $X_A$ , por meio da equação (2.3);
4:   $X_B = X + X_A$ ;
5:  Determinação de  $X_e$ , por meio da equação (2.4);
6:  Determinação de  $f_t$ , por meio da equação (3.3);
7:  Determinação de  $V_A$  e  $V_B$ , por meio das equações (3.6) e (3.7);
8:  Determinação de  $P_A$  e  $P_B$ , por meio das equações (3.9) e (3.10);
9:  Esticamento(cont,1) =  $T_2$ ;
10: Esticamento(cont,2) =  $H_2/g$ ;
11: Esticamento(cont,3) =  $n_s \cdot H_2/g$ ;
12: Esticamento(cont,4) =  $f_t$ ;
13: Esticamento(cont,5) =  $f_t \cdot 100/X$ ;
14: Esticamento(cont,6) =  $-X_A$ ;
15: Esticamento(cont,7) =  $f_t + h$ ;
16: Esticamento(cont,8) =  $(f_t + h) \cdot 100/X$ ;
17: Esticamento(cont,9) =  $X_B$ ;
18: Esticamento(cont,10) =  $P_A$ ;
19: Esticamento(cont,11) =  $P_B$ ;
20:  $T_2 = T_2 - 5$ ;
21:  $cont = cont + 1$ ;
22:   Se  $T_2 \geq T_{min}$ 
23:     Retonar à linha 1;
24:   fim
25: Fim.

```

Nota-se, entre as linhas 9 e 19 do Algoritmo 7, que os resultados são armazenados em uma matriz, denominada “*Esticamento*”, e que a condição de saída do laço de repetição é que o estado “2”, da variável temperatura, se torne menor que a mínima temperatura de operação contínua informada pelo usuário. Assim, este laço se repete até que se obtenhas as flechas e esforços estáticos para todas as temperaturas de operação do barramento, em uma amostragem discreta a cada cinco graus célsius.

Por fim, realiza-se o cálculo da tração estática com vento, por conveniência de programação como citado na subseção anterior. Implementa-se novamente a equação de estado (3.4), atribuindo à m_2 e G_{k2} os valores calculados de m_{sv} e G_{kv} na rotina “Vento”. Multiplicando o resultado de H_2 pela quantidade de subcondutores (n_s), implementa-se a equação (3.13), que determina a tração estática com vento, por fase, aplicada pelo barramento ao ponto de ancoragem (T_{cv}). Esta etapa, para cálculo de T_{cv} , apenas é realizada se o usuário entra com um valor de velocidade básica de vento (V_0) maior que zero. Conclui-se assim a rotina “*Esticamento*”.

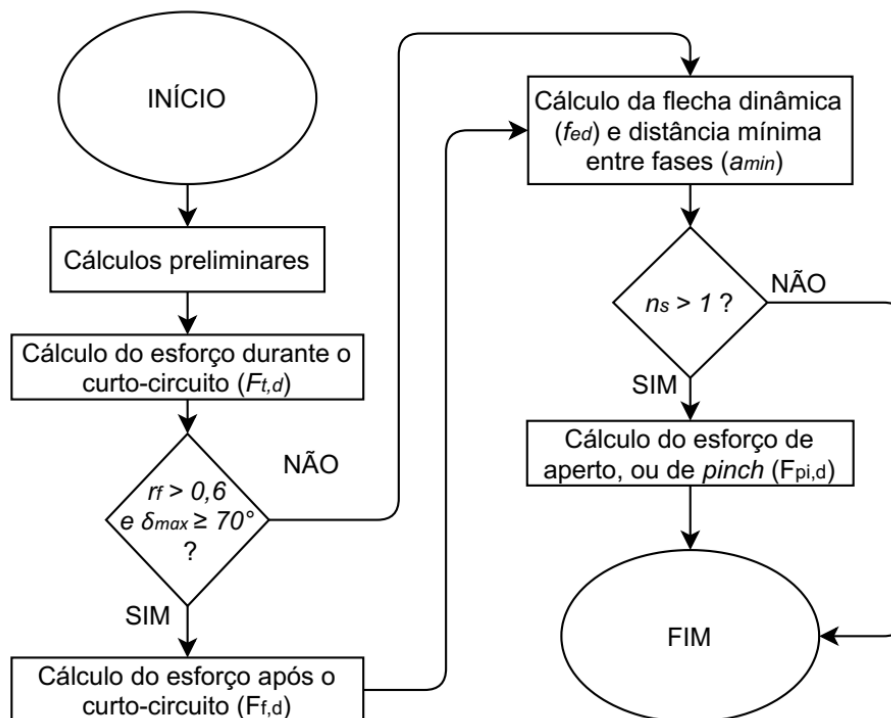
3.2.6 ROTINA “CURTO_CIRCUITO”

A última rotina de dimensionamento é a “Curto_circuito”, que determina os três esforços de tração devido ao curto-circuito, baseado principalmente no método da norma IEC 60865-1:2011, porém, implementada com as melhorias identificadas na subseção 3.1.3.

A atual rotina é particularmente mais extensa se comparada com as duas anteriores de cálculo, por isto, o fluxograma ilustrado na Figura 3.7 concentra uma maior quantidade de programação dentro de cada etapa, que é detalhada nesta subseção por meio de algoritmos.

A etapa de cálculos preliminares inicia-se com a determinação da força eletromagnética característica (F_m), razão entre F_m e o peso do barramento (r_f) e ângulo de direção de r_f (δ_1), por meio das equações (2.28), (2.29) e (2.30). A escolha da equação (2.28), que calcula F_{m2} , ao invés da equação (2.27), que calcula F_{m3} , ocorre devido ao sistema de transmissão sempre estar sujeito a faltas bifásicas, que constituem a variante mais crítica F_m .

Figura 3.7: Fluxograma da rotina “Curto_circuito”.



Fonte: Autoria própria.

Na sequência, implementa-se a melhoria citada na subseção 3.1.3, utilizando os valores máximo e mínimo de flechas estáticas obtidos na rotina “Esticamento”. Apesar de ambos os valores extremos de flecha estáticas serem utilizados, esta seleção ocorre na rotina “Principal”, detalhada na subseção 3.2.1. Por agora, apenas se dispensa da implementação da equação (2.32), que calcularia a flecha estática (f_{es}), e considera esta como variável de entrada para rotina atual.

São inseridas as equações (2.31), (2.33) e (2.35) para cálculo do período de oscilação do barramento sujeito apenas a força peso (T), o período corrigido para razão r_f (T_{res}) e o módulo de elasticidade corrigido do barramento (E_{ff}).

Antes do cálculo do coeficiente de rigidez do conjunto de estruturas suportes mais barramento flexível (N), é necessário definir o valor da constante de *Spring* (S). Tem-se como referência a Tabela 2.10, que apresenta faixas admissíveis para os valores de S , em função da classe de tensão do barramento (123 kV, 245 kV e 420 kV). Arbitrariamente, utiliza-se o valor médio de cada faixa para as tensões de 138 kV, 230 kV e 440 kV. A classe de tensão é dado de entrada do usuário (variável interna *tensao*), que ocorre na rotina “Leitor_entradas” descrita anteriormente, com a seguinte restrição de possibilidades: 138 kV, 230 kV, 345 kV, 440 kV, 525 kV e 762 kV. Nota-se que, algumas tensões de entrada podem ser diferentes dos três valores utilizados para delimitar a seleção de S , portanto, adota-se, para estas, a constante de *Spring* da tensão imediatamente inferior conhecida. O Algoritmo 8 descreve a etapa implementada que realiza a seleção de S descrita acima.

Algoritmo 8: Seleção da constante de *Spring* (S)

- 1: Se $tensao \leq 138$
 - 2: $S = 725.10^3$
 - 3: Senão, se $138 < tensao < 440$
 - 4: $S = 1200.10^3$
 - 5: Senão, se $tensao \geq 440$
 - 6: $S = 1800.10^3$
 - 7: Fim
-

Solucionada a seleção da constante de *Spring*, adiciona-se a equação (2.34) para cálculo do coeficiente de rigidez N .

Cumprindo exatamente o roteiro da norma de referência, adicionam-se as equações (2.37) a (2.39), (2.41) e (2.43), obtendo, respectivamente, o ângulo do barramento ao final do curto-circuito (δ_{end}), o parâmetro de quantidade (χ), o ângulo

máximo após o curto-circuito (δ_{max}), o parâmetro de carga (φ) e o fator de estresse do barramento (ζ). Conclui-se aqui a etapa de cálculos preliminares.

O fator ψ , em função de φ e ζ , para cálculo do esforço de tração do barramento durante o curto-circuito ($F_{t,d}$), é obtido por meio da equação de terceiro grau (2.42), implementada utilizando um método de otimização disponível no MATLAB, denominado Levenberg-Marquardt. A equação (2.40) encerra a etapa determinando $F_{t,d}$.

A próxima etapa se resume à equação (2.44), para determinação do esforço de tração do barramento após o curto-circuito ($F_{f,d}$). Entretanto, possui uma condição de entrada, ilustrada anteriormente na Figura 3.7. Ou seja, apenas se executa esta etapa de cálculo se $r_f > 0,6$ e $\delta_{max} \geq 70^\circ$.

Implementam-se as equações (2.45) a (2.49) para determinação da flecha dinâmica (f_{ed}), e o Algoritmo 9 para a distância mínima possível entre fases (a_{min}). Neste algoritmo é feita a seleção entre as equações (2.50) e (2.51), conforme a existência ou não de cadeias de isoladores. Sendo X o comprimento horizontal real do barramento e l_s o comprimento horizontal do subcondutor, se $X = l_s$ o barramento não possui cadeias de isoladores.

Algoritmo 9: Determinação da distância mínima possível entre fases (a_{min})

- 1: Se $X = l_s$
 - 2: Determinação da distância horizontal crítica de deslocamento (b_h) por meio da equação (2.50);
 - 3: Senão
 - 4: Determinação de b_h por meio da equação (2.51);
 - 5: fim
 - 6: Determinação de a_{min} por meio da equação (2.52);
 - 7: Fim
-

Chega-se na etapa de cálculo do esforço de aperto, ou de *pinch* ($F_{pi,d}$), que apenas é executada se o barramento for constituído por mais de um subcondutor por fase, ou seja, se $n_s > 1$. Atendida esta condição, calcula-se $F_{pi,d}$ conforme o Algoritmo 10.

Algoritmo 10: Determinação do esforço de aperto, ou de *pinch* ($F_{pi,d}$)

- 1: Se as condições da equação (2.54) são atendidas
 - 2: Determinação de $F_{pi,d}$ por meio da equação (2.53);
 - 3: Senão
 - 4: Determinação de v_1 por meio da equação (2.56);
 - 5: Determinação de τ por meio da equação (2.58);
 - 6: Determinação de γ por meio da equação (2.59);
-

7:	Determinação de v_2 por meio da equação (2.57);
8:	Determinação de v_3 por meio da equação (2.61);
9:	Determinação de F_v por meio da equação (2.55);
10:	Determinação de ε_{st} por meio da equação (2.62);
11:	Determinação de ε_{pi} por meio da equação (2.63);
12:	Determinação de j por meio da equação (2.64);
13:	Se $j \geq 1$
14:	Determinação de ξ por meio da equação (2.66);
15:	Determinação de v_4 por meio da equação (2.68);
16:	Determinação de v_e por meio da equação (2.67);
17:	Determinação de $F_{pi,d}$ por meio da equação (2.65);
18:	Senão
19:	Determinação de $2 \cdot y_a / a_s$ por meio da equação (2.72);
20:	Determinação de a_{sw} / a_s por meio da equação (2.71);
21:	Determinação de η por meio da equação (2.70);
22:	Determinação de v_4 por meio da equação (2.74);
23:	Determinação de v_e por meio da equação (2.73);
24:	Determinação de $F_{pi,d}$ por meio da equação (2.69);
25:	fim
26:	Fim.

Estruturada a determinação dos esforços de curto-circuito ($F_{t,d}$, $F_{f,d}$ e $F_{pi,d}$), está completa a última rotina “Curto_circuito”.

3.2.7 ROTINA “SAIDAS”

A rotina “Saidas” possui a função de apresentar os resultados dos dimensionamentos de forma organizada ao usuário. Como citado anteriormente, são diversas as possíveis configurações do barramento, por exemplo, em relação a existência de desnível entre os suportes de ancoragem, cadeias de isoladores e quantidade de subcondutores. Variações também podem ocorrer relacionadas aos três critérios de dimensionamento, que são esticamento, efeitos do vento e do curto-circuito, pois o usuário tem a opção de utilizar todos, apenas um ou dois. Por isto, implementam-se algumas condições para apresentação dos resultados, adequando o formato de saída do programa para cada dimensionamento.

Outro recurso, já citado anteriormente, é a possibilidade de realizar diversos dimensionamentos em série, executando o programa uma única vez. A atual rotina garante a organização através de cabeçalhos individuais, que informam o número de cada dimensionamento, nomenclatura e comprimento do vão, quantidade, tipo e bitola dos

subcondutores, desnível entre os suportes, flecha máxima percentual e corrente de curto-circuito.

A Figura 3.8 ilustra um exemplo de cabeçalho, do dimensionamento número 8 de uma simulação, de um vão de barramento 525 kV denominado “F52”, com comprimento de 121,5 metros, formado por quatro subcondutores do tipo “CAA” de bitola “Rail – 954 MCM”, sendo este nivelado, com flecha máxima de 3,5%, e sujeito a corrente de curto-circuito de 63 kA.

Figura 3.8: Exemplo de cabeçalho dos resultados de um dimensionamento.

```

*****
***** DIMENSIONAMENTO 8 *****
*****
Vão F52 (525 kV) - Comprimento(X): 121.50 m - 4xCAA Rail - 954,0 MCM
Desnível (h) = 0.00 m - Flecha máxima = 3.50/100 - Icc = 63.00 kA

```

Fonte: Autoria própria.

Em seguida, apresentam-se os resultados do primeiro critério de dimensionamento, o esticamento, em formato de tabela. Utiliza-se a matriz *Esticamento*, determinada na rotina “Esticamento”, conforme detalhado na subseção 3.2.5. Entretanto, é necessário selecionar quais colunas da matriz são relevantes para cada dimensionamento específico. Para tal, implementa-se uma condição referente à existência de desnível entre os suportes. Caso o barramento seja nivelado ($h = 0$), a tabela possui colunas referentes aos estados de temperatura (“°C”), trações por subcondutor (“H [kgf]/cabo”) e por fase (“Tsv [kgf]/fase”), esforços verticais nos pontos de ancoragem (“PA|PB [kgf]/fase”), medidas reais e percentuais das flechas (“f [m]” e “f [%]”), conforme Figura 3.9.

Figura 3.9: Exemplo de tabela de esticamento para vão de barramento nivelado.

'°C'	'H[kgf]/cabo'	'Tsv[kgf]/fase'	'PA PB[kgf]/fase'	'f[m]'	'f[%]'
[90]	[874.6832]	[3.4987e+03]	[885.2400]	[4.9875]	[3.5000]
[85]	[887.2272]	[3.5489e+03]	[884.9814]	[4.9170]	[3.4505]
[80]	[900.3063]	[3.6012e+03]	[884.7232]	[4.8456]	[3.4004]
[75]	[913.9584]	[3.6558e+03]	[884.4655]	[4.7732]	[3.3496]
[70]	[928.2250]	[3.7129e+03]	[884.2083]	[4.6998]	[3.2981]

Fonte: Autoria própria.

Se houver desnível entre os suportes, adiciona-se uma coluna que informa a distância (“XA”) entre o vértice da catenária do condutor e suporte mais alto. Diferenciam-se os esforços verticais (“PA” e “PB”) e as flechas (“fA e fB”) em relação aos suportes “A” e “B”. A informação de flecha percentual é suprimida, pois não tendo um dos suportes de ancoragem como referência, não se tem aplicação prática. A Figura 3.10 ilustra um exemplo de tabela de esticamento para este tipo de vão.

Realiza-se uma verificação sobre os valores da coluna “PB [kgf]/fase” e, caso algum seja negativo, o usuário recebe a seguinte frase para auxílio na interpretação dos resultados:

“OBS: HAVERÁ ESFORÇO DE ARRANCAMENTO NO SUPORTE B”.

Figura 3.10: Exemplo de tabela de esticamento para vão de barramento desnivelado.

'°C'	'H[kgf]/cabo'	'Tsv[kgf]/fase'	'PA[kgf]/fase'
[90]	[167.4550]	[334.9099]	[166.2160]
[85]	[168.5008]	[337.0015]	[166.5539]
[80]	[169.5584]	[339.1167]	[166.8961]
[75]	[170.6279]	[341.2558]	[167.2427]
[70]	[171.7094]	[343.4188]	[167.5938]

Columns 5 through 8

'PB[kgf]/fase'	'fA[m]'	'XA[m]'	'fB[m]'
[41.5818]	[3.3961]	[33.1576]	[0.3961]
[41.2056]	[3.3899]	[33.2347]	[0.3899]
[40.8253]	[3.3836]	[33.3127]	[0.3836]
[40.4409]	[3.3775]	[33.3915]	[0.3775]
[40.0523]	[3.3714]	[33.4712]	[0.3714]

Fonte: Autoria própria.

O segundo critério de dimensionamento, devido aos efeitos do vento, é opcional, sendo executado pela rotina “Principal” apenas se o usuário informar a velocidade básica de vento (V_0) nos dados de entrada. Este mesmo critério ($V_0 > 0$) define se os resultados são apresentados ou não. Caso positivo, o usuário recebe como saída os valores do esforço transversal horizontal no ponto de ancoragem (“Fa_b”), as trações com vento por subcondutor (“H [kgf]/cabo”) e por fase (“Tcv [kgf]/fase”), na respectiva temperatura coincidente (“Tc [°C]”), conforme ilustrado na Figura 3.11.

Figura 3.11: Exemplo de resultados relacionados aos efeitos do vento.

```

EFEITOS DO VENTO:

    Esforço transversal na ancoragem (Fa_b) = 801.71 kgf

TRACAO_COM_VENTO =

    'Tc[°C]'      'H[kgf]/cabo'      'Tcv[kgf]/fase'
    [      13]    [ 1.9234e+03]    [ 7.6935e+03]

```

Fonte: Autoria própria.

Os resultados do dimensionamento devido aos efeitos do curto-circuito, de forma análoga ao vento, apenas são apresentados se o usuário informar a corrente de curto-circuito nos dados de entrada ($I_k'' > 0$). Neste caso, apresentam-se cinco valores calculados: esforço de tração dinâmica durante o curto-circuito (“Ft,d”), após o curto-circuito (“Ff,d”), devido ao aperto (“Fpi,d”), máximo deslocamento horizontal dos condutores durante ou após o curto circuito (“bh”) e distância mínima entre fases (“a_min”), conforme exemplo da Figura 3.12.

Figura 3.12: Exemplo de resultados relacionados aos efeitos do curto-circuito.

```

EFEITOS DO CURTO CIRCUITO:

    Esforço de tração durante o curto (Ft,d) = 1425.26 kgf
    Esforço de tração após o curto (Ff,d) = 1188.11 kgf
    Esforço de tração de "pinch" (Fpi,d)= 2734.62 kgf
    Máximo deslocamento horizontal dos condutores (bh) = 0.77 m
    Distância mínima entre fases (a_min) = 1.46 m

```

Fonte: Autoria própria.

Caso o valor de “Ff,d” seja igual a zero, o usuário recebe a seguinte frase, ao invés do resultado nulo: “Esforço de tração após o curto (Ff,d) = N/A, conforme item 6.2.6 da norma IEC 60865-1_2011”, informando que o esforço não se aplica e referenciando o item normativo que justifica a afirmação.

Caso o valor de “Fpi,d” seja igual a zero, o usuário recebe a seguinte frase, ao invés do resultado nulo: “Esforço de tração de "pinch" (Fpi,d)= N/A, pois o condutor possui apenas um subcondutor”, informando que o esforço não se aplica quando se tem apenas um cabo por fase.

Realiza-se uma verificação sobre o valor de “a_min” e, caso seja negativo, o usuário recebe a seguinte frase de auxílio na interpretação do resultado: “OBS: OS CONDUTORES DE FASES DIFERENTES PODERÃO COLIDIR DEVIDO AO CURTO-CIRCUITO”.

3.2.8 ROTINA “ANALISES”

A última rotina, “Analises”, possui a função de plotar gráficos que possibilitam o engenheiro realizar análises de sensibilidades de variáveis. Diante de um dimensionamento com esforços atipicamente altos, é comum presenciar engenheiros realizando simulações diversas e aleatórias, a procura de ajustes para otimização dos resultados. Os gráficos plotados por esta rotina permitem identificar mais facilmente as possibilidades de otimização.

As variações são aplicadas, uma por vez, em variáveis que representam características construtivas da instalação (barramentos ou estruturas suportes de ancoragem), e os efeitos que estas variações provocam sobre esforços de tração estáticos e dinâmicos. Não se analisam as sensibilidades aos esforços transversais verticais ou horizontais, por reconhecê-los como menos determinantes para o dimensionamento das estruturas.

Definem-se seis variáveis a serem analisadas:

- 1) Densidade linear do subcondutor (m_s);
- 2) Distância entre fases, eixo a eixo (a);
- 3) Flecha máxima percentual de operação do barramento, referente ao comprimento X do vão (f_{maxp});
- 4) Constante de *Spring*, ou elástica, para ambos os suportes do barramento (S);
- 5) Corrente simétrica eficaz de curto-circuito (I_k'');
- 6) Número de espaçadores (n_{esp}).

Selecionam-se, como variáveis para análise, aquelas cujo valor pode ser manipulado pelo engenheiro durante o dimensionamento. Estas possíveis manipulações podem ser tanto representadas por uma simples escolha dos critérios de projeto, dentro dos limites permitidos e viáveis, quanto por um maior refinamento de uma característica específica. Como exemplo para o primeiro caso, tem-se m_s , pois pode-se optar por

diferentes condutores, com densidades diversas. Evidentemente, a escolha do condutor deve atender simultaneamente aos demais critérios aplicáveis, como ampacidade e outros não relativos aos esforços propriamente. Para o segundo caso, cita-se o exemplo da constante de *Spring*, para a qual a norma permite que se utilize um valor arbitrário dentro de uma faixa permitida, caso o valor real seja desconhecido. Portanto, se verificado que esta variável possui alta sensibilidade, pode-se julgar vantajoso obter o valor real de *S* por meio de outros estudos, pertencentes à disciplina civil.

As sensibilidades aos efeitos do vento não são analisadas, pois entende-se que as possibilidades de otimização são menores. A velocidade básica de vento é característica da região, não manipulável, e constitui a variável mais determinante para os esforços relacionados.

Os esforços de tração, cujos efeitos são analisados, são quatro:

- 1) Esforço de tração estática do barramento (F_{st});
- 2) Esforço de tração do barramento durante o curto-circuito ($F_{t,d}$);
- 3) Esforço de tração do barramento após o curto-circuito ($F_{f,d}$);
- 4) Esforço de tração devido ao aperto, ou *pinch*, dos subcondutores durante o curto-circuito ($F_{pi,d}$).

A atual rotina se assemelha à rotina “Principal”, uma vez que também chama uma rotina para leitura dos dados de entrada do usuário, outra que faz a leitura dos bancos de dados dos cabos e as rotinas para cálculo do esticamento e efeitos do curto-circuito. Entretanto, apresenta algumas adaptações:

- 1) A leitura dos dados de entrada do usuário é feita a partir de uma planilha denominada “Entradas_analises.xlsx”, semelhante à anteriormente detalhada “Entradas.xlsx”, na subseção 3.2.2. Entretanto, apresenta duas diferenças: permite entrada para apenas um dimensionamento por vez; não possui campos de entradas referentes aos efeitos do vento;
- 2) Chama uma versão adaptada da rotina “Curto_circuito”, denominada “Curto_circuito_analises”, cuja única diferença está na ausência do Algoritmo 8, que determina a constante de *Spring* (*S*). Esta adaptação se mostra necessária devido a *S* ser uma das variáveis selecionadas para análise de sensibilidade;
- 3) Não utiliza as rotinas “Vento” e “Saidas”;

- 4) Possui estruturação, baseada em laços de repetição, para executar a variação das variáveis selecionadas para análise de sensibilidade;
- 5) A programação para apresentação dos resultados é implementada na própria rotina, resumindo-se a plotagem de seis gráficos.

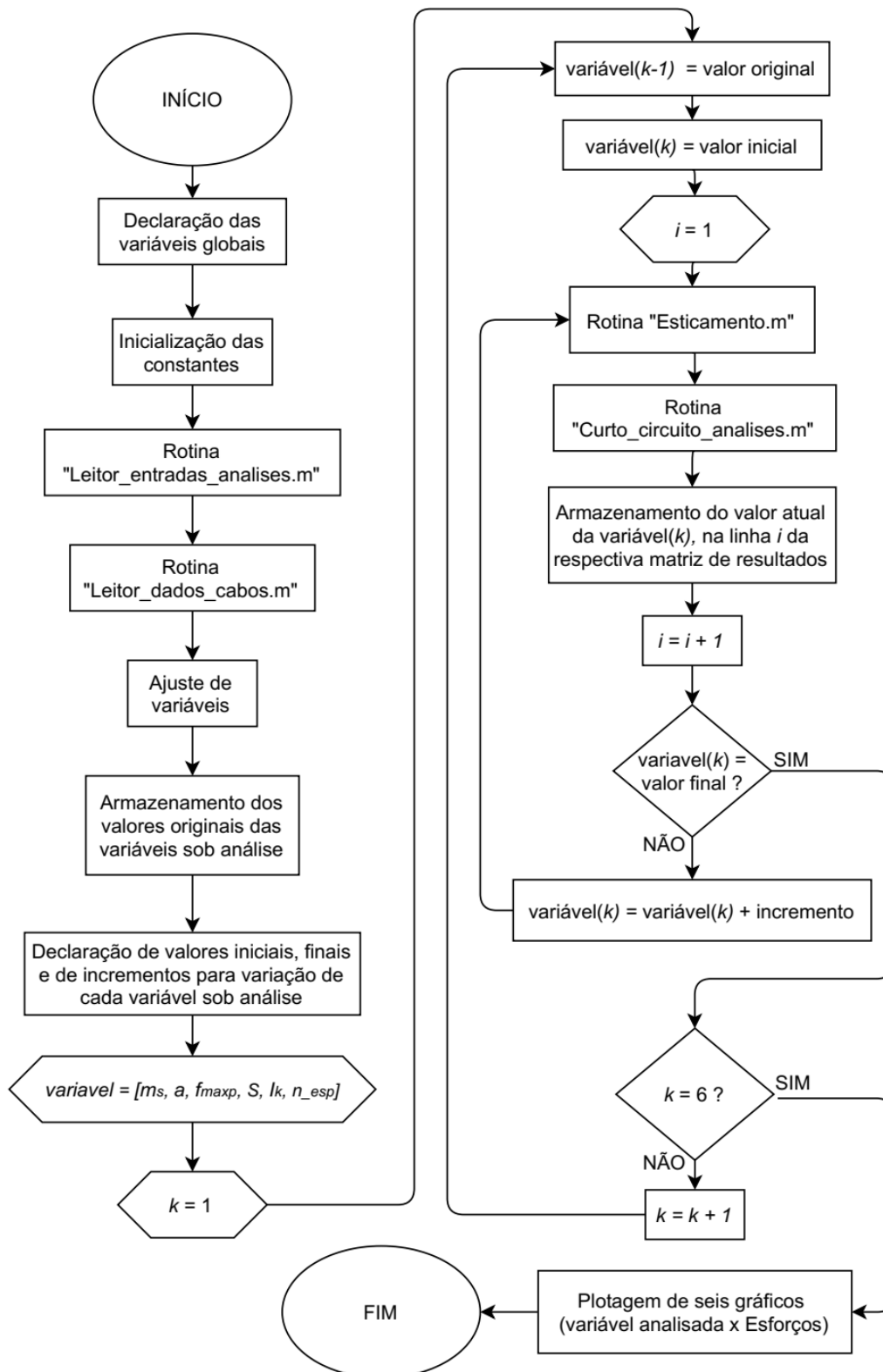
A Figura 3.13 ilustra o fluxograma da atual rotina, que se inicia da mesma forma que a rotina “Principal”. A diferença encontra-se na seleção da constante de *Spring*, representando a adaptação número 2, supracitada.

Na sequência, os valores originais das seis variáveis, selecionadas para análise, são armazenados, e os valores iniciais, finais e de incrementação são definidos. A criação do vetor *variavel*, é uma forma de atribuir um número sequencial, de um a seis, para cada variável sob análise, possibilitando que o roteiro de cálculo necessite ser implementado apenas uma vez, dentro de um laço de repetição controlado pelo avanço de k .

Neste laço de repetição maior, baseado em k , ocorre a determinação do esticamento e efeitos do curto-circuito, para todos os valores pré-definidos da faixa de variação de cada variável sob análise. Contém um laço de repetição menor, baseado no valor atual da variável analisada, que a incrementa até que o valor final seja atingido. O contador i apenas auxilia o armazenamento dos resultados de cada simulação nas linhas das matrizes de resultados de cada variável. Quando k atinge seis, todas as variáveis foram analisadas.

Os resultados são apresentados por meio de seis gráficos plotados na mesma figura, cada qual referente à uma variável analisada, com os valores desta no eixo das abscissas, e os valores dos quatro esforços de tração no eixo das ordenadas.

Figura 3.13: Fluxograma da rotina “Análises”.



Fonte: Autoria própria.

4 DIMENSIONAMENTOS, ANÁLISES E VALIDAÇÕES

Este capítulo se dedica às simulações de dimensionamento, utilizando o programa computacional implementado conforme subseção 3.2, às análises de sensibilidades de variáveis e à validação da metodologia proposta.

As simulações de dimensionamento são realizadas sobre vãos típicos de SEs, aplicados na blindagem atmosférica e barramentos de 138 kV, 230 kV e 525 kV. Sobre uma seleção parcial destes, fazem-se as análises de sensibilidades de variáveis. Apenas para a etapa de validação são simulados vãos diferentes, pois utilizam-se os mesmos presentes em cada referência utilizada para comparação.

4.1 SIMULAÇÕES DE DIMENSIONAMENTOS

Com intuito de abranger situações diversas, selecionam-se inicialmente nove vãos de barramentos, conforme Tabela 4.1. As nomenclaturas possuem lógica de três caracteres. O primeiro identifica o barramento como fase (“F”) ou blindagem atmosférica (“B”). O segundo se refere ao nível de tensão, sendo “0”, “1”, “2” ou “5” para 0 kV, 138 kV, 230 kV e 525 kV, respectivamente. O último é apenas sequencial, reiniciando em “1” para cada nível de tensão.

Tabela 4.1: 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: Autoria própria.

Para as nove simulações, considera-se a SE localizada em terreno plano com obstáculos baixos, em local cuja velocidade básica de vento é de 43 m/s e a temperatura coincidente é de 13 °C.

Todos os barramentos de fase são constituídos por subcondutores do tipo CAA, dois por fase para 138 kV e 230 kV e quatro para 525 kV. Para os 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. Os espaçamentos entre subcondutores são de 200 mm, 350 mm e 457 mm, respectivamente para os três níveis de tensão. Os condutores de blindagem são formados por apenas um cabo de aço cada, com bitola 3/8”.

Consideram-se as correntes de curto-circuito com fator de assimetria de 2,6 e tempo de atuação da proteção de 0,3 s. As flechas máximas percentuais de premissas são de 3,5% para os barramentos fase e 2,5% para blindagem atmosférica, referentes às temperaturas de 90 °C e 60 °C, respectivamente. A temperatura mínima de operação de ambos é de -5 °C.

Adicionalmente, simula-se também uma versão modificada do vão “F23”, nomeada “F23b”, para uma SE localizada no topo de um morro com 45 m de altura e inclinação de 10°.

Todas as situações são simuladas em uma única execução do programa, que retorna os resultados dos dez dimensionamentos, conforme Tabela 4.2. Nos Apêndices A e B, respectivamente, podem-se visualizar a entrada e saída de dados, conforme experiência do usuário.

Tabela 4.2: Resultados das simulações de dimensionamentos.

Vão	Tensão (kV)	X (m)	h (m)	P_A (kgf)	P_B (kgf)	T_{sv} (kgf)	T_{cv} (kgf)	$F_{a,b}$ (kgf)	$F_{t,d}$ (kgf)	$F_{f,d}$ (kgf)	$F_{pi,d}$ (kgf)
F11	138	16,0	0,0	77	77	269	358	52	1.425	1.188	2.735
F12	138	46,5	0,0	106	106	489	784	100	3.904	3.631	2.598
F21	230	18,0	0,0	134	134	630	783	83	1.933	2.386	7.812
F22	230	54,1	0,0	202	202	1.158	1.601	170	5.621	7.521	8.166
F23	230	54,1	11,0	581	-125	845	1.719	200	4.540	7.521	7.487
F23b	230	54,1	0,0	202	202	1.158	2.171	284	5.621	7.521	8.166
F51	525	60,0	0,0	616	616	2.462	3.180	331	4.919	7.724	24.735
F52	525	144,5	0,0	885	885	5.057	7.690	801	7.989	0	33.128
B01	0	144,5	0,0	29	29	378	1.207	132	0	0	0
B02	0	40,0	15,0	40	-22	82	369	33	0	0	0

Fonte: Autoria própria.

Analisando os resultados obtidos para os vãos de 138 kV e 230 kV, podem-se destacar alguns pontos:

- 1) Os esforços de tração são consideravelmente maiores do que os esforços transversais verticais (P_A e P_B) e horizontais (F_{a-b}) nos pontos de ancoragem;
- 2) As trações estáticas (T_{sv} e T_{cv}) são diretamente proporcionais ao comprimento do vão (X);
- 3) Para o vão desnivelado “F23”, em comparação ao vão nivelado semelhante “F22”, ocorre redução de T_{sv} junto ao aumento de P_A e redução de P_B . É coerente que, devido ao desnível, o suporte mais alto receba em seu esforço vertical, uma parcela do esforço horizontal e uma parcela do esforço vertical do suporte mais baixo;
- 4) Quando se considera a SE localizada no topo de um morro, como para o vão “F23b”, nota-se relevante aumento da tração estática com vento (T_{cv}) e de F_{a-b} . A tração sofre aumento de mais de 35%, e o esforço transversal horizontal de aproximadamente 70%, em relação ao vão semelhante de SE em terreno plano (“F23”);
- 5) Os esforços durante e após do curto-circuito ($F_{t,d}$ e $F_{f,d}$) aumentam com X , mas os esforços devido ao aperto ($F_{pi,d}$), ou *pinch*, não possuem relação clara de proporcionalidade com o comprimento do vão. Para estes últimos, notam-se aumentos importantes para os vãos de 230 kV, em comparação aos de 138 kV;
- 6) Os esforços P_A e P_B são iguais para vãos nivelados, e diferente para desnivelados. Os valores de P_B podem assumir valores negativos, significando que o suporte mais baixo sofre esforço de arrancamento no ponto de ancoragem, ou seja, esforço vertical para cima.

Ao analisar os resultados dos vãos de 525 kV, também constantes na Tabela 4.2, além de notar algumas ocorrências semelhantes aos vãos das duas tensões inferiores, acrescentam-se outros:

- 1) Os esforços de curto-circuito $F_{t,d}$ e $F_{f,d}$ para o vão curto (“F51”) são consideravelmente maiores que as trações estáticas (T_{sv} e T_{cv});
- 2) Para o vão longo (“F52”), o esforço $F_{t,d}$ é próximo da tração estática T_{cv} . Este resultado é coerente, uma vez que, para o setor 525 kV, a distância entre

fases aumentada contribui para redução da força eletromagnética entre as fases. Adicionalmente, o longo comprimento do vão provoca incremento das trações estáticas;

- 3) O esforço $F_{f,d}$ se apresenta nulo para o vão longo (“F52”), devido ao atendimento da condição baseada em r_f e δ_{max} ilustrada anteriormente na Figura 3.7.

Por fim, para os vãos de blindagem atmosférica, verifica-se que os esforços estáticos possuem valores consideravelmente reduzidos, o que é coerente visto à baixa densidade linear do condutor utilizado. Adicionalmente, os esforços de curto-circuito apresentam-se nulos, pois $I_k'' = 0$ nos dados de entrada do usuário.

4.2 SIMULAÇÕES PARA ANÁLISES DE SENSIBILIDADES DE VARIÁVEIS

As análises de sensibilidades de variáveis são realizadas sobre alguns dos vãos de barramentos utilizados para as simulações de dimensionamento, na seção 4.1. Selecionam-se apenas um vão de cada tensão: “F12”, “F22” e “F52”. O intuito é mostrar como ocorre a utilização desta funcionalidade e sua importância. Identificam-se pontos de possível otimização dos esforços e, conseqüentemente, otimização das fundações e estruturas suportes, itens com custo bastante relevante para o empreendimento.

As entradas do usuário ocorrem através de uma planilha EXCEL, denominada “Entradas_analises.xlsx”, constante no Apêndice C. Diferentemente da etapa de dimensionamentos, a atual processa apenas um vão de barramento a cada execução do programa.

Os resultados consistem em seis gráficos por barramento, apresentados nas subseções seguintes juntamente com as análises específicas. Entretanto, podem-se realizar ao menos duas análises comuns a todos. A primeira em relação ao esforço estático de tração (F_{st}), que é sensível apenas à variação da densidade linear do subcondutor (m_s) e da flecha máxima percentual (f_{maxp}). A segunda em relação ao esforço de aperto, ou *pinch* ($F_{pi,d}$), não sensibilizado pela distância entre fases (a) e único sensibilizado pelo número de espaçadores (n_{esp}).

Considera-se como esforço de tração aplicável ao dimensionamento das estruturas o maior entre F_{st} , $F_{t,d}$ e $F_{f,d}$. Evidentemente, o primeiro sempre será inferior

aos outros dois. Para o esforço $F_{pi,d}$ se aplica o entendimento apresentado na subseção 2.2.1.1.6, que o descreve como não aplicável às estruturas, mas apenas aos elementos do próprio barramento.

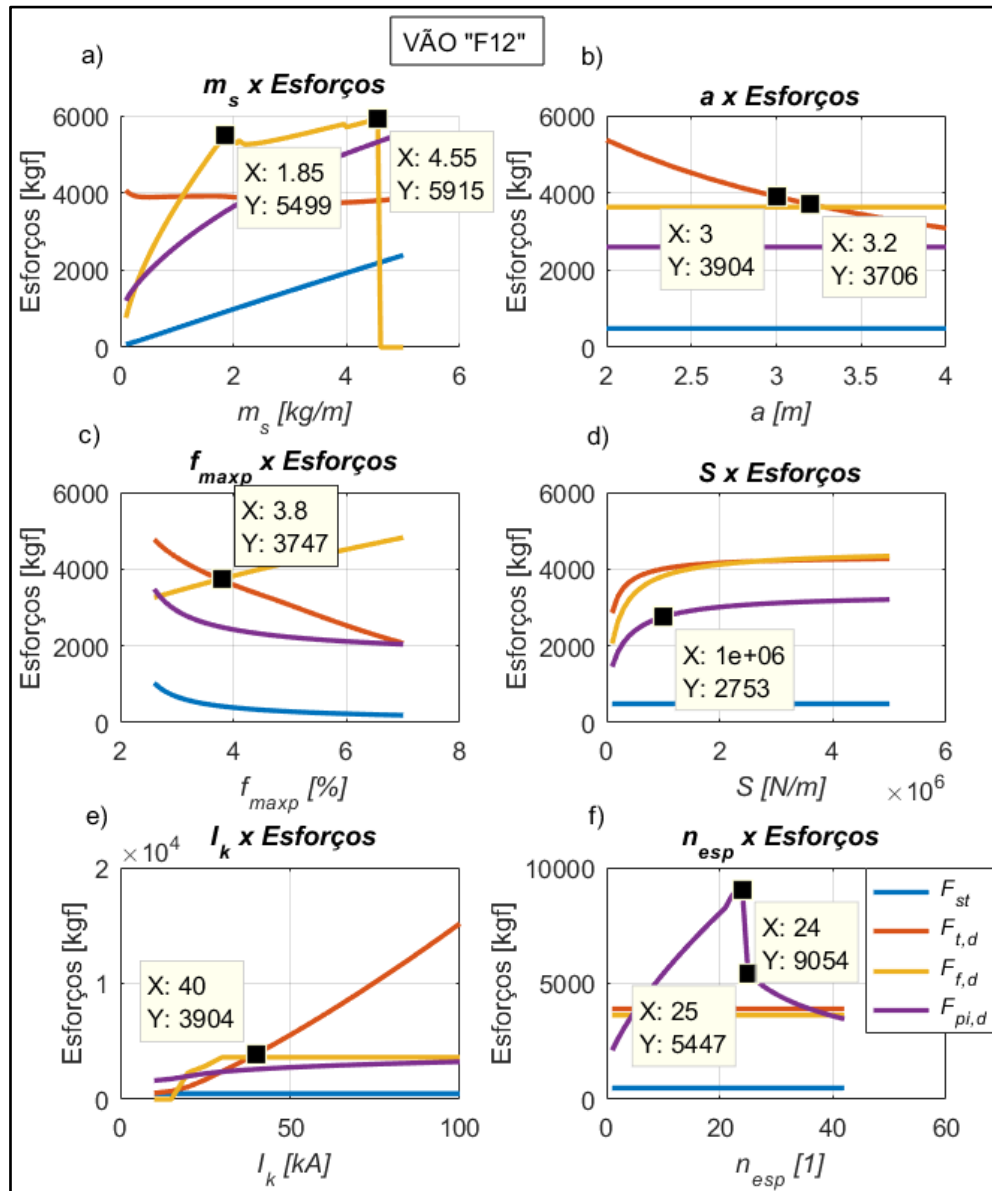
4.2.1 VÃO “F12” – 138 kV – LONGO – NIVELADO

A Figura 4.1 apresenta os gráficos para análises de variáveis do vão “F12”, longo e nivelado de 138 kV. Baseado nestes, destacam-se algumas análises mais relevantes:

- Considerando os valores originais das variáveis de entrada (por exemplo, a distância entre fases de 3 m no gráfico “b”), pode-se ler o esforço de tração aplicável ao dimensionamento das estruturas $F_{t,d}$ com valor de 3904 kgf;
- Para densidades lineares do subcondutor acima de 1,85 kg/m, o esforço após o curto-circuito ($F_{f,d}$) se torna menos sensível à variação desta característica, porém com valores acima de 5000 kgf, conforme gráfico “a”. Acima de 4,55 kg/m $F_{f,d}$ se tornaria insignificante, fazendo com que $F_{t,d}$ seja novamente o esforço aplicável às estruturas;
- Se a distância entre fases (a) for aumentada para 3,2 m, a tração aplicável ao dimensionamento das estruturas pode ser otimizada para 3706 kgf (5% de redução), conforme gráfico “b”;
- A flecha máxima percentual (f_{maxp}) ótima é 3,8%, representando redução de 4% da tração aplicável ao dimensionamento das estruturas, conforme gráfico “c”;
- Analisando o gráfico “d”, nota-se que os três esforços de curto-circuito são sensíveis à variação da constante de *Spring* até o valor de $1 \cdot 10^6$ N/m. Poderia ser vantajoso aqui, desenvolver um estudo civil para determinação do S real das estruturas;
- A corrente de falta de 40 kA faz com que o maior esforço aplicável ao dimensionamento das estruturas seja durante o curto-circuito ($F_{t,d}$), em um ponto de alta sensibilidade à variação da característica analisada. Neste ponto, o esforço após o curto-circuito ($F_{f,d}$) encontra-se em saturação, como pode verificado no gráfico “e”;

- Conforme gráfico “f”, o máximo valor possível do esforço de aperto, ou *pinch* ($F_{pi,d}$), ocorre com a utilização de 24 espaçadores. Como a distância comumente utilizada entre espaçadores consecutivos é entre dez e 15 m, a quantidade ideal seria de dois ou três. Assim, evitaria a utilização de espaçadores em excesso e o pico de $F_{pi,d}$.

Figura 4.1: Gráficos¹ para análises de sensibilidades de variáveis do vão “F12”.



Fonte: Autoria própria.

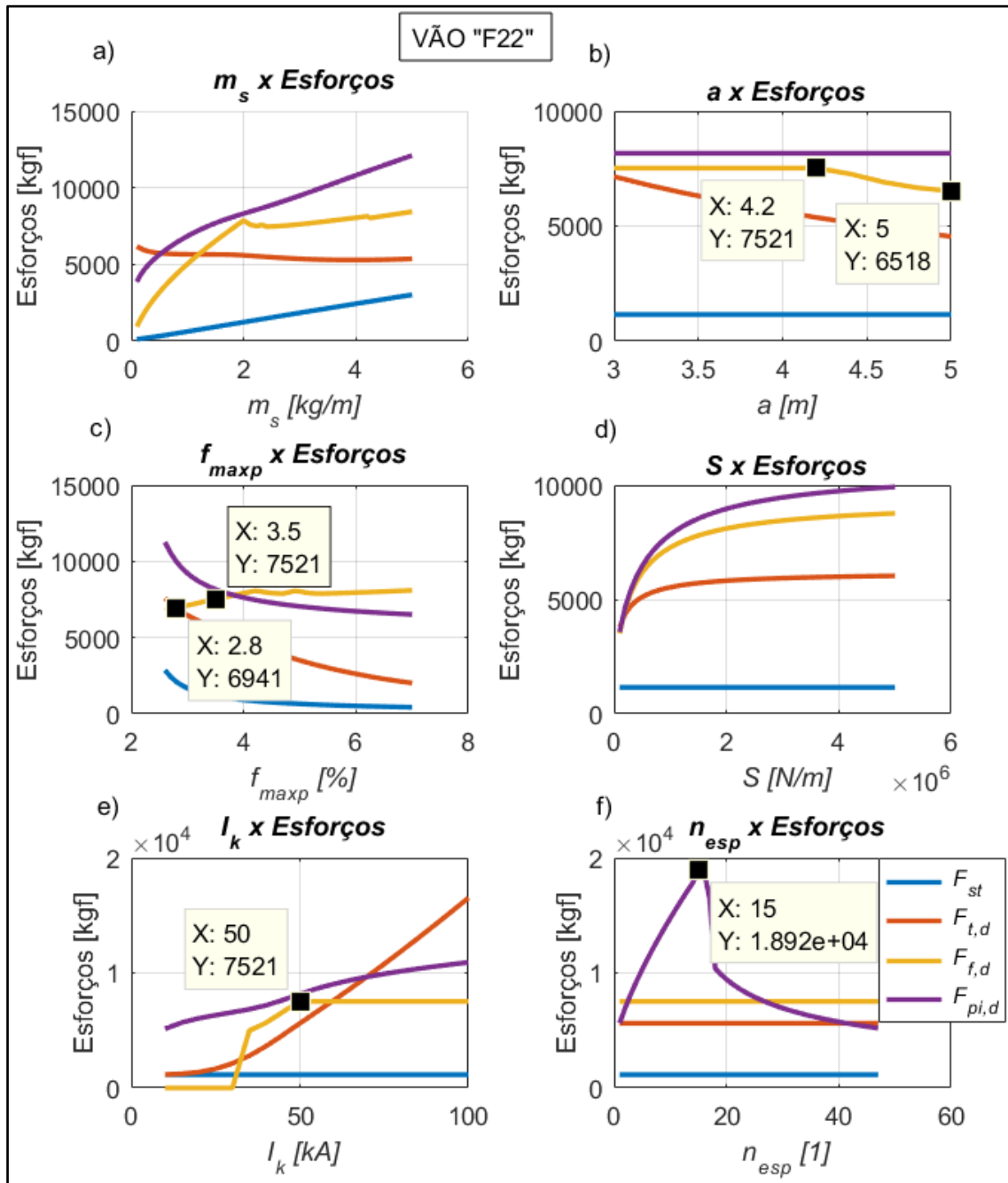
¹ A legenda, apresentada junto ao último gráfico, é comum a todos.

4.2.2 VÃO “F22” – 230 kV – LONGO – NIVELADO

A Figura 4.2 apresenta os gráficos para análises de variáveis do vão “F22”, longo e nivelado de 230 kV. Baseado nestes, destacam-se algumas análises mais relevantes:

- Considerando os valores originais das variáveis de entrada (por exemplo a flecha máxima percentual em 3,5% no gráfico “c”), pode-se ler o esforço de tração aplicável ao dimensionamento das estruturas $F_{f,d}$ com valor de 7521 kgf;
- Para densidades lineares do subcondutor acima de 2 kg/m, conforme gráfico “a”, o esforço após o curto-circuito ($F_{f,d}$) se torna menos sensível à variação desta característica, porém, com valores maiores do que o original;
- Se a distância entre fases (a) for aumentada para 5 m, a tração aplicável ao dimensionamento das estruturas pode ser otimizada para 6518 kgf (13,3% de redução), como pode-se verificar no gráfico “b”;
- A flecha máxima percentual (f_{maxp}) ótima é 2,8%, representando redução de 7,8% da tração aplicável ao dimensionamento das estruturas, conforme gráfico “c”. É interessante destacar que este ajuste provocaria um aumento da tração estática (F_{st}), mas, os esforços de curto-circuito são determinantes por possuírem maiores valores. A análise acima contraria a intuição dos projetistas, uma vez que é comum relacionar a redução da flecha com aumento dos esforços;
- Analisando o gráfico “d”, notam-se que os esforços de curto-circuito mais sensíveis à variação da constante de *Spring* são $F_{f,d}$ e $F_{pi,d}$. Poderia ser vantajoso aqui, desenvolver um estudo civil para determinação do S real das estruturas;
- A corrente de falta de 50 kA faz com que o maior esforço aplicável ao dimensionamento das estruturas seja o $F_{f,d}$, já em saturação, conforme gráfico “e”. Neste ponto o esforço $F_{t,d}$ é menor, ainda que mais sensível à variação de I_k'' ;
- Sob justificativa análoga à apresentada para o vão “F12”, a quantidade ideal de espaçadores seria entre três ou quatro, evitando o excesso destes e o pico de $F_{pi,d}$ igual a 15, conforme gráfico “f”.

Figura 4.2: Gráficos¹ para análises de sensibilidades de variáveis do vão “F22”.



Fonte: Autoria própria.

¹ A legenda, apresentada junto ao último gráfico, é comum a todos.

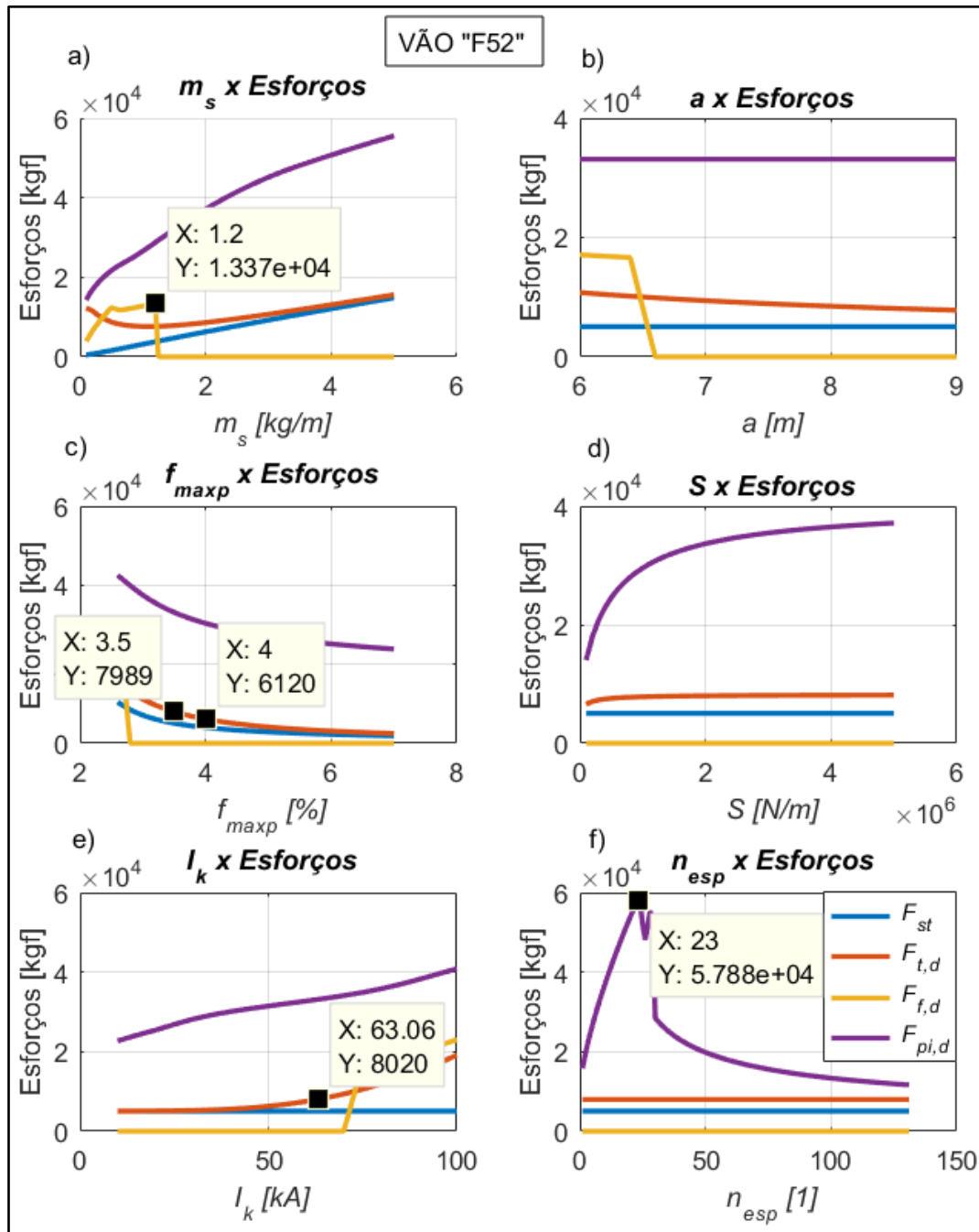
4.2.3 VÃO “F52” – 525 kV – LONGO – NIVELADO

A Figura 4.3 apresenta os gráficos para análises de variáveis do vão “F52”, longo e nivelado de 525 kV. Baseado nestes, destacam-se algumas análises mais relevantes:

- Considerando os valores originais das variáveis de entrada (por exemplo a flecha máxima percentual em 3,5% no gráfico “c”), é possível verificar que o esforço de tração aplicável ao dimensionamento das estruturas $F_{t,d}$ é de 8013 kgf;
- Para densidades lineares do subcondutor (m_s) acima de 1,2 kg/m, o esforço após o curto-circuito ($F_{f,d}$) se torna insignificante, como se pode concluir analisando o gráfico “a”. Em vãos de 525 kV são comumente aplicados subcondutores com m_s próximo de 1,75 kg/m. Portanto, m_s não deve apresentar possibilidades relevantes para otimização dos esforços em barramentos semelhantes ao atual;
- A distância entre fases original é de 8,7 m, e a mínima comumente aplicada a barramentos de 525 kV é de 7,5 m. Assim, o esforço de tração aplicável ao dimensionamento das estruturas suportes é $F_{t,d}$, pois $F_{f,d}$ é insignificante para os valores de a praticados, conforme gráfico “b”.
- Diferente dos vãos analisados anteriormente, o atual não possui um valor ótimo para a flecha máxima percentual (f_{maxp}), onde coincidem os esforços $F_{t,d}$ e $F_{f,d}$. Entretanto, analisando o gráfico “c”, nota-se possibilidade de redução de 23,4% de $F_{t,d}$ mediante ajuste de f_{maxp} para 4%.
- O gráfico “d” indica que o esforço de curto-circuito mais sensível à variação da constante de *Spring* é o de aperto, ou *pinch* ($F_{pi,d}$);
- A corrente de falta de 63 kA faz com que o maior esforço aplicável ao dimensionamento das estruturas seja o $F_{t,d}$, pois $F_{f,d}$ é insignificante para este valor de I_k , conforme gráfico “e”;
- O máximo valor possível do esforço de aperto, ou *pinch* ($F_{pi,d}$), ocorre com a utilização de 23 ou 28 espaçadores, como pode-se verificar no gráfico “f”. Como a distância tradicionalmente utilizada entre espaçadores consecutivos é entre dez e 15 m, a quantidade ideal seria de

oito ou nove. Assim, evitaria a utilização de espaçadores em excesso e o pico de $F_{pi,d}$.

Figura 4.3: Gráficos¹ para análises de sensibilidades de variáveis do vão “F52”.



Fonte: Autoria própria.

¹ A legenda, apresentada junto ao último gráfico, é comum a todos.

4.2.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS GRÁFICOS PARA ANÁLISES DE SENSIBILIDADES DE VARIÁVEIS

Nas subseções 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3 foram apresentados gráficos para análises de sensibilidades de variáveis. Estes foram plotados utilizando a metodologia unificada, baseada em métodos analíticos linearizados. As variações súbitas do esforço $F_{f,d}$ e $F_{pi,d}$ não representam fielmente o efeito físico, mas correspondem à modelagem recomendada pelas normas aplicáveis. As variações reais, fiéis aos efeitos físicos, tendem a ser mais suaves. Como exemplo, os gráficos identificados pela letra “f”, na Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3, possivelmente descreveriam o esforço $F_{pi,d}$ com o topo arredondado, se representassem o efeito físico precisamente.

4.3 SIMULAÇÕES PARA VALIDAÇÕES

O objetivo desta seção é validar a metodologia de cálculo proposta e sua implementação, a partir da comparação de resultados com outras referências. Validam-se as etapas de esticamento, efeitos do vento e do curto-circuito.

4.3.1 ESTICAMENTO

Em Kiessling *et al.* (2003), apresenta-se um exemplo de cálculo de esticamento, constante na página 553. Nesse, determina-se a tração do barramento à 40°C, a partir de características conhecidas à 10°C, utilizando o método da subseção 2.1.2.

As características do barramento são:

- Comprimento do vão (X): 50 m;
- Condutor: um cabo CAA por fase, com:
 - Densidade linear (m_s): 2,116 kg/m;
 - Módulo de elasticidade (E_s): 68 kN/mm²;
 - Coeficiente de dilatação térmica linear (ϵ_t): $1,94 \cdot 10^{-5}$ 1/°C;
 - Seção transversal (A_s): 635,5 mm².
- Cadeias de isoladores: 5 m de comprimento e massa de 150 kg;
- Tração à 10°C: 6355 N;
- Flecha à 10°C: 1,64 m.

Os resultados apresentados na referência são:

- Tração inicial à 40°C: 6005 N;
- Flecha à 40°C: 1,74 m.

Este mesmo vão de barramento foi simulado no programa implementado. Para isto, não se pode utilizar a entrada de dados do usuário por meio da planilha “Entradas.xlsx” ou o banco de dados, pois as características utilizadas pelo exemplo não correspondem a nenhum dos cabos catalogados. Por isto, realizou-se a entrada manual, dentro do programa em MATLAB. Obteve-se os seguintes resultados:

- Tração à 40°C: 6005,2 N;
- Flecha à 40°C: 1,736 m.

Visto a compatibilidade entre os resultados da referência com os obtidos por meio do programa, considera-se validada a metodologia quanto ao cálculo de esticamento.

Os resultados, conforme saída do programa em MATLAB, podem ser consultados no Apêndice D.

4.3.2 EFEITOS DO VENTO

A norma NBR 6123 (ABNT, 1988) não apresenta nenhum exemplo de cálculo aplicável à condutores tracionados, por isto, utilizam-se, para comparação, os resultados de um dimensionamento presente em (SILVA, 2018). Nesse, na página 119, constam dimensionamentos diversos sobre um barramento com as seguintes características:

- Conductor: quatro cabos CAA por fase, com bitola 954 MCM (Rail);
- Cadeias de isoladores: 6 m de comprimento e massa de 300 kg;
- Flecha percentual à 80°C: 3,5%;
- Velocidade básica de vento: 25 m/s;
- Fatores S_1 , S_2 e S_3 : 1,0, 1,0058 e 1,1, respectivamente;
- Temperatura coincidente: 22 °C.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados de tração com vento (T_{cv}) extraídos da referência e obtidos por meio do programa, com as respectivas diferenças percentuais. São realizadas três comparações, referentes aos comprimentos de vão de 60, 100 e 140 metros.

Tabela 4.3: Validação da metodologia relacionada aos efeitos do vento.

Esforços (kgf)	Referência			Programa em MATLAB			Diferença		
	60 m	100 m	140 m	60 m	100 m	140 m	60 m	100 m	140 m
T_{cv}	2779	4088	5505	2726	4087	5551	1,91%	0,02%	0,84%

Fonte: Autoria própria.

Visto a compatibilidade entre os resultados da referência com os obtidos por meio do programa, considera-se validada a metodologia quanto ao cálculo dos efeitos do vento.

Os resultados, conforme saída do programa em MATLAB, podem ser consultados no Apêndice E.

4.3.3 EFEITOS DO CURTO-CIRCUITO

O método de cálculo da norma IEC 60865-1 (IEC, 2011) possui exemplos em um relatório técnico, o IEC 60865-2 (IEC, 2015). O exemplo 5, nesse último, apresenta o cálculo dos esforços de curto-circuito de um barramento flexível, com tensão de 380 kV, adequado para validação da metodologia implementada no programa.

O barramento citado possui as seguintes características:

- Comprimento do vão: 48 m;
- Distância entre fases (a): 5 m;
- Condutor: dois cabos CAA por fase, com:
 - Densidade linear do subcondutor (m_s): 4,24 kg/m, com massa de espaçadores e cadeias de isoladores consideradas;
 - Módulo de elasticidade (E_s): 60 kN/mm²;
 - Seção transversal (A_s): 1090 mm²;
 - Diâmetro externo do subcondutor (d_s): 43 mm;
- Cadeias de isoladores: 5,3 m de comprimento;
- Constante de *Spring* dos suportes de ancoragem: 500 N/mm;

- Tração estática (F_{st}): 17,8 kN à 20 °C e 15,4 kN à 60 °C;
- Flecha estática (f_{es}): 1,35 m à 20 °C e 1,56 m à 60 °C;
- Número de espaçadores (n_{esp}): 3;
- Corrente de curto-circuito:
 - Amplitude: 63 kA;
 - Fator de assimetria: 1,81;
 - Duração: 0,5 s;
- Frequência fundamental do sistema: 60 Hz.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados extraídos do exemplo de referência, e obtidos por meio do programa, com as respectivas diferenças percentuais. A estas diferenças, atribui-se o arredondamento utilizado na referência, com apenas duas casas decimais a cada resultado parcial, contra as 15 casas decimais utilizadas pelo MATLAB.

Tabela 4.4: Validação da metodologia relacionada aos efeitos do curto-circuito.

Esforços (kN)	IEC 60865-2		Programa em MATLAB		Diferença	
	20 °C	60 °C	20 °C	60 °C	20 °C	60 °C
$F_{t,d}$	36,30	32,90	36,18	32,87	0,33%	0,09%
$F_{f,d}$	66,70	68,80	66,72	68,66	0,03%	0,20%
$F_{pi,d}$	39,90	36,20	39,80	36,16	0,25%	0,11%

Fonte: Autoria própria.

Visto a compatibilidade entre os resultados da referência com os obtidos por meio do programa, considera-se validada a metodologia quanto ao cálculo dos efeitos de curto-circuito.

Os resultados, conforme saída do programa em MATLAB, podem ser consultados no Apêndice F.

5 CONCLUSÕES

O SIN é constituído por muitas SEs de transmissão, cujas concessões de operação ao longo de 30 anos são normalmente leiloadas através de editais lançados pela ANEEL. Após vencer um lote do leilão, a concessionária necessita planejar a construção das SEs e LTs. Desenvolvem-se os projetos básico e executivo e, parte deste último é o projeto eletromecânico de requisitos para estruturas.

O projeto de requisitos abordado nesta pesquisa se refere aos barramentos flexíveis, constituído por desenhos, diagramas de esforços e memoriais de cálculo. Os esforços estáticos e dinâmicos, aplicados às estruturas suportes de ancoragem, ocorrem devido ao esticamento dos condutores, efeito gravitacional, incidência de vento e ocorrência de curto-circuito.

Identificam-se carências relacionadas a unificação dos métodos de cálculo existentes, em normas e outras referências, e a uma ferramenta acessível economicamente, para dimensionamento dos esforços. Com objetivo de solucionar estes problemas, uma metodologia unificada é proposta e implementada em um programa computacional, em MATLAB. Para o cálculo do esticamento, utilizou-se como base os métodos propostos em Kiessling *et al.* (2003), as normas NBR 5422 (ABNT, 1985) e NBR 6123 (ABNT, 1988) para o efeito dos ventos, e a norma IEC 60865-1 (IEC, 2011) para os efeitos do curto-circuito, complementando com algumas considerações da brochura 214 (CIGRÈ, 2002).

Além das simulações de dimensionamento, o programa oferece uma funcionalidade destinada às análises de sensibilidade de variáveis. Executam-se as variações individuais de cada parâmetro, e saída é apresentada através de gráficos que mostram o impacto de cada um sobre os quatro esforços de tração, sendo um estático, e três devido ao curto-circuito. As variáveis sob análise são: densidade linear do subcondutor, distância entre fases, flecha máxima percentual, constante de Spring, corrente de curto-circuito e número de espaçadores. Os esforços cuja sensibilidade é analisada são: tração estática do barramento, trações devido ao curto-circuito, sendo durante, após e devido ao aperto, ou *pinch*. Por meio dos gráficos, a identificação das possíveis otimizações de esforços é facilitada, que reflete em otimizações das fundações e estruturas suportes, itens relevantes no custo global do empreendimento.

A primeira funcionalidade, de dimensionamento, é testada para nove vãos típicos, apresentando resultados suficientes para elaboração do projeto eletromecânico de

requisitos para estruturas. Para a segunda, de análise de sensibilidade, selecionam-se três vãos, exemplificando como ocorre a utilização da funcionalidade e como identificar as possíveis otimizações. Esta funcionalidade contribui para minimizar o custo das estruturas suportes de barramentos, que representa um problema prático recorrente na implantação de uma SE.

A validação da metodologia unificada é realizada por meio de comparações com resultados de outras referências. Para o esticamento, utiliza-se um exemplo presente em Kiessling *et al.* (2003), para o vento, três dimensionamentos realizados por Silva (2018), e para o curto-circuito, um exemplo do relatório técnico IEC 60865-2 (IEC, 2015). Todas as comparações apresentam compatibilidades aceitáveis. Ou seja, para as situações abrangidas pelos métodos existentes, a metodologia proposta apresenta resultados convergentes, destacando-se pela vantagem de ser unificada. Para as situações não abrangidas, a falta de referências dificulta a validação, mas os resultados apresentados servirão para comparações em trabalhos futuros correlacionados.

Portanto, desenvolveu-se uma metodologia unificada, principal contribuição deste trabalho, e um programa computacional autossuficiente, confiável e eficiente, cumprindo os objetivos gerais e específicos relacionados na seção 1.1. Adicionalmente, a ferramenta apresenta potencial comercial e, inclusive, já vem sendo utilizada profissionalmente pela empresa de atuação do autor. Projetos elaborados com esta ferramenta já foram aprovados por concessionárias do setor de transmissão.

- Adicionalmente, esta pesquisa ajuda a preencher uma lacuna identificada na bibliografia atual, condensando diversas informações a respeito do dimensionamento dos esforços de barramentos flexíveis. Profissionalmente, o trabalho possui como contribuição a função de guia de dimensionamento para os engenheiros da área.

Como sugestão para trabalhos futuros, relacionam-se:

- Implementação de programa computacional para dimensionamento dos esforços de barramentos rígidos;
- Atualização do programa, acrescentando as etapas de dimensionamento elétrico dos barramentos, como ampacidade, efeito térmico do curto-circuito e efeito corona;
- Inclusão de otimização computacional baseada em lógicas multivaloradas, levando em consideração aspectos técnicos e

econômicos, que auxiliem o projetista a identificar os critérios de projetos mais adequados à cada situação específica de barramento;

- Refinamento da parte computacional do programa, visando obter uma versão comercial que possibilite a disseminação da ferramenta entre as empresas projetistas nacionais.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5422 :1985 - Projeto de Linhas Aéreas de Trasmissão de Energia Elétrica** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123:1988 - Forças devidas ao vento em edificações** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988.

BELGO BEKAERT ARAMES. **Fios e cordoalhas de aço zincados para Eletrificação e Telefonia** Catálogo de produtos, 2021. Disponível em: <https://www.belgobekaert.com.br/wp-content/uploads/2019/02/Folder-eletrificacao.pdf>.

CIGRÈ, INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS. **The Mechanical Effects Of Short-Circuit Currents in Open Air Substations (Part II)**, 2002.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020; ano base 2019**. Brasília. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>.

INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60865-1: Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 1: Definitions and calculation methods**, 2011.

INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60865-2: Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 2: Examples of Calculation**. Geneva.

KIESSLING, Friedrich; NEFZGER, Peter; NOLASCO, João F.; KAJNTZYK, Ulf. **Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction**. 1. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2003.

LABEGALINI, Paulo Roberto; LABEGALINI, Jose Ayrton; FUCHS, Rubens Dario; ALMEIDA, Marcio Tadeu De. **Projetos Mecânicos Das Linhas Aéreas de Transmissão**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.

MCDONALD, John D. **Electric Power Substations Engineering**. [s.l.] : CRC Press LLC, 2003. DOI: 10.1109/mpae.2004.1293602.

NEXANS, Company. **Alumínio - Condutores Nus**, 2013. Disponível em: http://www.nexans.com.br/eservice/Brazil-pt_BR/fileLibrary/Download_540134436/Brazil/files/catalogo_nus_maio_2013.pdf.

SILVA, Rafael Faria Da. **Análise de Metodologia de Cálculo de Esforços Estáticos e Dinâmicos para Dimensionamento de Estruturas de Subestações Isoladas a Ar com Barramentos Flexíveis**. 2018. Universidade Federal de Itajubá, [S. l.], 2018. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/1489>.

STEIN, N.; RIEYER, W.; MIRI, A. M. Tests and calculations of short-circuit forces and displacements in high-voltage substations with strained conductors and droppers. **European Transactions on Electrical Power**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 131–138, 2000. DOI: 10.1002/etep.4450100302.

SUDARSHAN, V. J.; PUNEKAR, Gururaj S. Short circuit force in an AIS with special reference to L-L and L-L-L faults. **2018 20th National Power Systems Conference (NPSC)**, [S. l.], p. 1–4, 2018.

APÊNDICE A - ENTRADA DE DADOS PARA AS SIMULAÇÕES DE DIMENSIONAMENTO

Neste apêndice, apresentam-se as figuras que mostram as entradas de dados do usuário para as simulações de dimensionamento da seção 4.1. As entradas dos dimensionamentos de um a dez são feitas em uma única planilha e preenchimento, apenas se separa abaixo em cinco figuras para melhor visualização.

Figura A.1: Entradas do usuário para simulações dos dimensionamentos 1 e 2.

Dimensionamento	1	2
Tensão nominal do barramento (<i>tensao</i>) [kV]	138	138
Nomenclatura do vão (<i>vao</i>)	F11	F12
Número de subcondutores (<i>ns</i>)	2	2
Tipo de cabo (<i>cabo_tipo</i>)	CAA	CAA
Bitola do cabo (<i>cabo</i>)	Hawk - 477,0 MCM	Hawk - 477,0 MCM
Comprimento do vão, eixo a eixo (<i>X</i>) [m]	16	46,5
Largura das vigas, a ser deduzida do vão (<i>lviga</i>) [m]	0,4	0,4
Desnível entre os suportes de ancoragem (<i>h</i>) [m]	0	0
Flecha máxima percentual, premissa (<i>fmaxp</i>) [%]	3,5	3,5
Comprimento de uma cadeia de isoladores (<i>Lk</i>) [m]	2	2
Diâmetro de uma cadeia de isoladores (<i>dk</i>) [mm]	255	255
Massa de uma cadeia de isoladores (<i>mk</i>) [m]	60	60
Temperatura máxima para esticamento (<i>Tmax</i>) [°C]	90	90
Temperatura mínima para esticamento (<i>Tmin</i>) [°C]	-5	-5
Temperatura coincidente, ou p/ tração c/ vento (<i>Tc</i>) [°C]	13	13
Velocidade básica de vento (<i>VO</i>) [m/s]	43	43
Tipo de relevo do terreno (<i>relevo_terreno</i>) [anotação]	1	1
Ângulo do talude (<i>theta</i>) [°]	0	0
Altura do talude (<i>d</i>) [m]	0	0
Distância objeto - crista do talude (<i>d_talude_objeto</i>) [m]	0	0
Altura de instalação, em relação ao solo (<i>z</i>) [m]	14	14
Categoria de rugosidade do terreno (<i>cat_terreno</i>) [anotação]	3	3
Distância entre fases, eixo a eixo (<i>a</i>) [m]	3	3
Distância entre subcondutores, eixo a eixo (<i>as</i>) [m]	0,2	0,2
Número de espaçadores (<i>n_esp</i>)	1	2
Corrente simétrica de curto circuito (<i>Ik</i>) [kAef]	40	40
Tempo de curto circuito (<i>Tk1</i>) [s]	0,3	0,3
Frequência elétrica do sistema (<i>f</i>) [hz]	60	60
Fator de assimetria (<i>kappa</i>) [anotação]	2,6	2,6
Constante de Spring (<i>S</i>) [N/m] - opcional	0	0

Fonte: Autoria própria.

Figura A.2: Entradas do usuário para simulações dos dimensionamentos 3 e 4.

Dimensionamento	3	4
Tensão nominal do barramento (<i>tensao</i>) [kV]	230	230
Nomenclatura do vão (<i>vao</i>)	F21	F22
Número de subcondutores (<i>ns</i>)	2	2
Tipo de cabo (<i>cabo_tipo</i>)	CAA	CAA
Bitola do cabo (<i>cabo</i>)	Bluejay - 1,113,0 MCM	Bluejay - 1,113,0 MCM
Comprimento do vão, eixo a eixo (<i>X</i>) [m]	18	54,1
Largura das vigas, a ser deduzida do vão (<i>lviga</i>) [m]	0,4	0,4
Desnível entre os suportes de ancoragem (<i>h</i>) [m]	0	0
Flecha máxima percentual, premissa (<i>fmaxp</i>) [%]	3,5	3,5
Comprimento de uma cadeia de isoladores (<i>Lk</i>) [m]	2,9	2,9
Diâmetro de uma cadeia de isoladores (<i>dk</i>) [mm]	255	255
Massa de uma cadeia de isoladores (<i>mk</i>) [m]	100	100
Temperatura máxima para esticamento (<i>Tmax</i>) [°C]	90	90
Temperatura mínima para esticamento (<i>Tmin</i>) [°C]	-5	-5
Temperatura coincidente, ou p/ tração c/ vento (<i>Tc</i>) [°C]	13	13
Velocidade básica de vento (<i>VO</i>) [m/s]	43	43
Tipo de relevo do terreno (<i>relevo_terreno</i>) [anotação]	1	1
Ângulo do talude (<i>theta</i>) [°]	0	0
Altura do talude (<i>d</i>) [m]	0	0
Distância objeto - crista do talude (<i>d_talude_objeto</i>) [m]	0	0
Altura de instalação, em relação ao solo (<i>z</i>) [m]	17	17
Categoria de rugosidade do terreno (<i>cat_terreno</i>) [anotação]	3	3
Distância entre fases, eixo a eixo (<i>a</i>) [m]	4	4
Distância entre subcondutores, eixo a eixo (<i>as</i>) [m]	0,35	0,35
Número de espaçadores (<i>n_esp</i>)	1	3
Corrente simétrica de curto circuito (<i>Ik</i>) [kAef]	50	50
Tempo de curto circuito (<i>Tk1</i>) [s]	0,3	0,3
Frequência elétrica do sistema (<i>f</i>) [hz]	60	60
Fator de assimetria (<i>kappa</i>) [anotação]	2,6	2,6
Constante de Spring (<i>S</i>) [N/m] - opcional	0	0

Fonte: Autoria própria.

Figura A.3: Entradas do usuário para simulações dos dimensionamentos 5 e 6.

Dimensionamento	5	6
Tensão nominal do barramento (<i>tensao</i>) [kV]	230	230
Nomenclatura do vão (<i>vao</i>)	F23	F23b
Número de subcondutores (<i>ns</i>)	2	2
Tipo de cabo (<i>cabo_tipo</i>)	CAA	CAA
Bitola do cabo (<i>cabo</i>)	Bluejay - 1,113,0 MCM	Bluejay - 1,113,0 MCM
Comprimento do vão, eixo a eixo (<i>X</i>) [m]	54,1	54,1
Largura das vigas, a ser deduzida do vão (<i>lviga</i>) [m]	0,4	0,4
Desnível entre os suportes de ancoragem (<i>h</i>) [m]	11	0
Flecha máxima percentual, premissa (<i>fmaxp</i>) [%]	3,5	3,5
Comprimento de uma cadeia de isoladores (<i>Lk</i>) [m]	2,9	2,9
Diâmetro de uma cadeia de isoladores (<i>dk</i>) [mm]	255	255
Massa de uma cadeia de isoladores (<i>mk</i>) [m]	100	100
Temperatura máxima para esticamento (<i>Tmax</i>) [°C]	90	90
Temperatura mínima para esticamento (<i>Tmin</i>) [°C]	-5	-5
Temperatura coincidente, ou p/ tração c/ vento (<i>Tc</i>) [°C]	13	13
Velocidade básica de vento (<i>VO</i>) [m/s]	43	43
Tipo de relevo do terreno (<i>relevo_terreno</i>) [anotação]	1	2
Ângulo do talude (<i>theta</i>) [°]	0	10
Altura do talude (<i>d</i>) [m]	0	45
Distância objeto - crista do talude (<i>d_talude_objeto</i>) [m]	0	0
Altura de instalação, em relação ao solo (<i>z</i>) [m]	28	17
Categoria de rugosidade do terreno (<i>cat_terreno</i>) [anotação]	3	3
Distância entre fases, eixo a eixo (<i>a</i>) [m]	4	4
Distância entre subcondutores, eixo a eixo (<i>as</i>) [m]	0,35	0,35
Número de espaçadores (<i>n_esp</i>)	3	3
Corrente simétrica de curto circuito (<i>Ik</i>) [kAef]	50	50
Tempo de curto circuito (<i>Tk1</i>) [s]	0,3	0,3
Frequência elétrica do sistema (<i>f</i>) [hz]	60	60
Fator de assimetria (<i>kappa</i>) [anotação]	2,6	2,6
Constante de Spring (<i>S</i>) [N/m] - opcional	0	0

Fonte: Autoria própria.

Figura A.4: Entradas do usuário para simulações dos dimensionamentos 7 e 8.

Dimensionamento	7	8
Tensão nominal do barramento (<i>tensao</i>) [kV]	525	525
Nomenclatura do vão (<i>vao</i>)	F51	F52
Número de subcondutores (<i>ns</i>)	4	4
Tipo de cabo (<i>cabo_tipo</i>)	CAA	CAA
Bitola do cabo (<i>cabo</i>)	Rail - 954,0 MCM	Rail - 954,0 MCM
Comprimento do vão, eixo a eixo (<i>X</i>) [m]	60	144,5
Largura das vigas, a ser deduzida do vão (<i>lviga</i>) [m]	2	2
Desnível entre os suportes de ancoragem (<i>h</i>) [m]	0	0
Flecha máxima percentual, premissa (<i>fmaxp</i>) [%]	3,5	3,5
Comprimento de uma cadeia de isoladores (<i>Lk</i>) [m]	5,3	5,3
Diâmetro de uma cadeia de isoladores (<i>dk</i>) [mm]	280	280
Massa de uma cadeia de isoladores (<i>mk</i>) [m]	420	420
Temperatura máxima para esticamento (<i>Tmax</i>) [°C]	90	90
Temperatura mínima para esticamento (<i>Tmin</i>) [°C]	-5	-5
Temperatura coincidente, ou p/ tração c/ vento (<i>Tc</i>) [°C]	13	13
Velocidade básica de vento (<i>VO</i>) [m/s]	43	43
Tipo de relevo do terreno (<i>relevo_terreno</i>) [anotação]	1	1
Ângulo do talude (<i>theta</i>) [°]	0	0
Altura do talude (<i>d</i>) [m]	0	0
Distância objeto - crista do talude (<i>d_talude_objeto</i>) [m]	0	0
Altura de instalação, em relação ao solo (<i>z</i>) [m]	15,5	28
Categoria de rugosidade do terreno (<i>cat_terreno</i>) [anotação]	3	3
Distância entre fases, eixo a eixo (<i>a</i>) [m]	7,5	8,7
Distância entre subcondutores, eixo a eixo (<i>as</i>) [m]	0,457	0,457
Número de espaçadores (<i>n_esp</i>)	3	8
Corrente simétrica de curto circuito (<i>Ik</i>) [kAef]	63	63
Tempo de curto circuito (<i>Tk1</i>) [s]	0,3	0,3
Frequência elétrica do sistema (<i>f</i>) [hz]	60	60
Fator de assimetria (<i>kappa</i>) [anotação]	2,6	2,6
Constante de Spring (<i>S</i>) [N/m] - opcional	0	0

Fonte: Autoria própria.

Figura A.5: Entradas do usuário para simulações dos dimensionamentos 9 e 10.

Dimensionamento	9	10
Tensão nominal do barramento (<i>tensao</i>) [kV]	0	0
Nomenclatura do vão (<i>vao</i>)	B01	B02
Número de subcondutores (<i>ns</i>)	1	1
Tipo de cabo (<i>cabo_tipo</i>)	AÇO	AÇO
Bitola do cabo (<i>cabo</i>)	EHS - 3/8"	EHS - 3/8"
Comprimento do vão, eixo a eixo (<i>X</i>) [m]	144,5	40
Largura das vigas, a ser deduzida do vão (<i>lviga</i>) [m]	0	0
Desnível entre os suportes de ancoragem (<i>h</i>) [m]	0	15
Flecha máxima percentual, premissa (<i>fmaxp</i>) [%]	2,5	2,5
Comprimento de uma cadeia de isoladores (<i>Lk</i>) [m]	0	0
Diâmetro de uma cadeia de isoladores (<i>dk</i>) [mm]	0	0
Massa de uma cadeia de isoladores (<i>mk</i>) [m]	0	0
Temperatura máxima para esticamento (<i>Tmax</i>) [°C]	60	60
Temperatura mínima para esticamento (<i>Tmin</i>) [°C]	-5	-5
Temperatura coincidente, ou p/ tração c/ vento (<i>Tc</i>) [°C]	13	13
Velocidade básica de vento (<i>VO</i>) [m/s]	43	43
Tipo de relevo do terreno (<i>relevo_terreno</i>) [anotação]	1	1
Ângulo do talude (<i>theta</i>) [°]	0	0
Altura do talude (<i>d</i>) [m]	0	0
Distância objeto - crista do talude (<i>d_talude_objeto</i>) [m]	0	0
Altura de instalação, em relação ao solo (<i>z</i>) [m]	34	20
Categoria de rugosidade do terreno (<i>cat_terreno</i>) [anotação]	3	3
Distância entre fases, eixo a eixo (<i>a</i>) [m]		
Distância entre subcondutores, eixo a eixo (<i>as</i>) [m]		
Número de espaçadores (<i>n_esp</i>)		
Corrente simétrica de curto circuito (<i>Ik</i>) [kAef]	0	0
Tempo de curto circuito (<i>Tk1</i>) [s]		
Frequência elétrica do sistema (<i>f</i>) [hz]		
Fator de assimetria (<i>kappa</i>) [anotação]		
Constante de Spring (<i>S</i>) [N/m] - opcional		

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE B - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE DIMENSIONAMENTO

Consta abaixo a saída do programa após as simulações dos dez dimensionamentos, realizadas em uma única execução, conforme descrito na seção 4.1. Este resultado especificamente não é exposto em formato de figura, mas de texto com formatação especial (fonte Lucida Console, que possui espaçamento constante e, portanto, adequada para manter a formatação de tabela). O intuito é mostrar como se espera que o conteúdo seja copiado para os apêndices dos memoriais de cálculo.

```
*****
***** DIMENSIONAMENTO 1 *****
*****
```

```
Vão: F11 (138 kV) - Comprimento(X): 16.0 m
Condutor: 2xCAA Hawk - 477,0 MCM
Desnível (h): 0.0 m - Flecha máxima: 3.5/100
Icc: 40 kA - Duração: 0.3s
```

ESTICAMENTO =

Columns 1 through 4

'°C'	'H[kgf]/cabo'	'Tsv[kgf]/fase'	'PA PB[kgf]/fase'
[90]	[112.9210]	[225.8421]	[76.6310]
[85]	[113.8062]	[227.6125]	[76.6092]
[80]	[114.7125]	[229.4250]	[76.5874]
[75]	[115.6406]	[231.2813]	[76.5656]
[70]	[116.5916]	[233.1832]	[76.5438]
[65]	[117.5663]	[235.1325]	[76.5220]
[60]	[118.5657]	[237.1314]	[76.5003]
[55]	[119.5909]	[239.1818]	[76.4785]
[50]	[120.6430]	[241.2860]	[76.4567]
[45]	[121.7233]	[243.4465]	[76.4350]
[40]	[122.8329]	[245.6658]	[76.4133]
[35]	[123.9732]	[247.9465]	[76.3915]
[30]	[125.1458]	[250.2915]	[76.3698]
[25]	[126.3520]	[252.7040]	[76.3481]
[20]	[127.5936]	[255.1871]	[76.3264]
[15]	[128.8722]	[257.7445]	[76.3047]
[10]	[130.1899]	[260.3797]	[76.2830]
[5]	[131.5485]	[263.0970]	[76.2613]
[0]	[132.9502]	[265.9005]	[76.2396]
[-5]	[134.3974]	[268.7949]	[76.2179]

Columns 5 through 6

'f[m]'	'f[%]'
[0.5460]	[3.5000]
[0.5418]	[3.4728]
[0.5375]	[3.4453]
[0.5332]	[3.4177]
[0.5288]	[3.3898]
[0.5244]	[3.3617]
[0.5200]	[3.3334]
[0.5155]	[3.3048]
[0.5111]	[3.2760]
[0.5065]	[3.2469]
[0.5019]	[3.2176]
[0.4973]	[3.1880]
[0.4927]	[3.1581]
[0.4880]	[3.1280]
[0.4832]	[3.0975]
[0.4784]	[3.0668]
[0.4736]	[3.0357]
[0.4687]	[3.0044]
[0.4637]	[2.9727]
[0.4588]	[2.9407]

Esforço vertical máximo na ancoragem = 76.63 kgf

EFEITOS DO VENTO:

Esforço transversal na ancoragem (Fa_b) = 120.01 kgf

TRACAO_COM_VENTO =

'Tc[°C]'	'H[kgf]/cabo'	'Tcv[kgf]/fase'
[13]	[405.5083]	[811.0167]

EFEITOS DO CURTO CIRCUITO:

Esforço de tração durante o curto (Ft,d) = 1425.26 kgf

Esforço de tração após o curto (Ff,d) = 1188.11 kgf

Esforço de tração de "pinch" (Fpi,d)= 2734.62 kgf

Máximo deslocamento horizontal dos condutores (bh) = 0.77 m

Distância mínima entre fases (a_min) = 1.46 m

RESUMO_PARCIAL =

columns 1 through 6

'vão'	'[kV]'	'x[m]'	'h[m]'	'PA[kgf]'	'PB[kgf]'
'F11'	[138]	[16]	[0]	[76.6310]	[76.6310]

columns 7 through 10

'Tsv[kgf]'	'Tcv[kgf]'	'Fa_b[kgf]'	'Ft,d[kgf]'
------------	------------	-------------	-------------

[268.7949] [811.0167] [120.0114] [1.4253e+03]

Columns 11 through 12

'Ff,d[kgf]' 'Fpi,d[kgf]'
[1.1881e+03] [2.7346e+03]

***** DIMENSIONAMENTO 2 *****

Vão: F12 (138 kV) - Comprimento(X): 46.5 m
Condutor: 2xCAA Hawk - 477,0 MCM
Desnível (h): 0.0 m - Flecha máxima: 3.5/100
Icc: 40 kA - Duração: 0.3s

ESTICAMENTO =

Columns 1 through 4

'°C'	'H[kgf]/cabo'	'Tsv[kgf]/fase'	'PA PB[kgf]/fase'
[90]	[180.5607]	[361.1214]	[106.4983]
[85]	[182.7714]	[365.5428]	[106.4624]
[80]	[185.0644]	[370.1287]	[106.4266]
[75]	[187.4448]	[374.8896]	[106.3907]
[70]	[189.9183]	[379.8367]	[106.3549]
[65]	[192.4912]	[384.9823]	[106.3191]
[60]	[195.1700]	[390.3400]	[106.2833]
[55]	[197.9622]	[395.9245]	[106.2476]
[50]	[200.8760]	[401.7521]	[106.2119]
[45]	[203.9204]	[407.8407]	[106.1762]
[40]	[207.1051]	[414.2103]	[106.1406]
[35]	[210.4413]	[420.8826]	[106.1050]
[30]	[213.9411]	[427.8823]	[106.0694]
[25]	[217.6182]	[435.2364]	[106.0339]
[20]	[221.4878]	[442.9756]	[105.9984]
[15]	[225.5669]	[451.1339]	[105.9629]
[10]	[229.8750]	[459.7499]	[105.9275]
[5]	[234.4337]	[468.8673]	[105.8922]
[0]	[239.2678]	[478.5356]	[105.8569]
[-5]	[244.4057]	[488.8114]	[105.8217]

Columns 5 through 6

'f[m]'	'f[%]'
[1.6135]	[3.5000]
[1.5940]	[3.4577]
[1.5742]	[3.4148]
[1.5542]	[3.3715]
[1.5340]	[3.3275]

[1.5135]	[3.2831]
[1.4927]	[3.2380]
[1.4717]	[3.1923]
[1.4503]	[3.1460]
[1.4287]	[3.0991]
[1.4067]	[3.0514]
[1.3844]	[3.0030]
[1.3618]	[2.9539]
[1.3387]	[2.9040]
[1.3154]	[2.8533]
[1.2916]	[2.8017]
[1.2674]	[2.7492]
[1.2427]	[2.6957]
[1.2176]	[2.6412]
[1.1920]	[2.5857]

Esforço vertical máximo na ancoragem = 106.50 kgf

EFEITOS DO VENTO:

Esforço transversal na ancoragem (Fa_b) = 326.70 kgf

TRACAO_COM_VENTO =

'Tc[°C]'	'H[kgf]/cabo'	'Tcv[kgf]/fase'
[13]	[1.2295e+03]	[2.4590e+03]

EFEITOS DO CURTO CIRCUITO:

Esforço de tração durante o curto (Ft,d) = 3904.34 kgf

Esforço de tração após o curto (Ff,d) = 3630.53 kgf

Esforço de tração de "pinch" (Fpi,d)= 2597.85 kgf

Máximo deslocamento horizontal dos condutores (bh) = 2.51 m

Distância mínima entre fases (a_min) = -2.03 m

***** OBS: OS CONDUTORES DE FASES DIFERENTES PODERÃO COLIDIR DEVIDO AO CURTO CIRCUITO !!! *****

RESUMO_PARCIAL =

Columns 1 through 5

'vão'	'[kV]'	'x[m]'	'h[m]'	'PA[kgf]'
'F12'	[138]	[46.5000]	[0]	[106.4983]

Columns 6 through 9

'PB[kgf]'	'Tsv[kgf]'	'Tcv[kgf]'	'Fa_b[kgf]'
[106.4983]	[488.8114]	[2.4590e+03]	[326.7004]

Columns 10 through 12

'Ft,d[kgf]' 'Ff,d[kgf]' 'Fpi,d[kgf]'
 [3.9043e+03] [3.6305e+03] [2.5979e+03]

 ***** DIMENSIONAMENTO 3 *****

Vão: F21 (230 kV) - Comprimento(X): 18.0 m
 Condutor: 2xCAA Bluejay - 1,113,0 MCM
 Desnível (h): 0.0 m - Flecha máxima: 3.5/100
 Icc: 50 kA - Duração: 0.3s

ESTICAMENTO =

Columns 1 through 4

'°C'	'H[kgf]/cabo'	'Tsv[kgf]/fase'	'PA PB[kgf]/fase'
[90]	[247.8356]	[495.6712]	[134.4667]
[85]	[250.3620]	[500.7241]	[134.4346]
[80]	[252.9668]	[505.9337]	[134.4024]
[75]	[255.6541]	[511.3083]	[134.3702]
[70]	[258.4284]	[516.8567]	[134.3381]
[65]	[261.2943]	[522.5885]	[134.3059]
[60]	[264.2570]	[528.5139]	[134.2738]
[55]	[267.3220]	[534.6441]	[134.2417]
[50]	[270.4954]	[540.9909]	[134.2096]
[45]	[273.7837]	[547.5674]	[134.1775]
[40]	[277.1939]	[554.3878]	[134.1455]
[35]	[280.7336]	[561.4672]	[134.1134]
[30]	[284.4113]	[568.8225]	[134.0814]
[25]	[288.2360]	[576.4719]	[134.0493]
[20]	[292.2177]	[584.4354]	[134.0173]
[15]	[296.3674]	[592.7349]	[133.9853]
[10]	[300.6972]	[601.3945]	[133.9534]
[5]	[305.2204]	[610.4408]	[133.9214]
[0]	[309.9515]	[619.9031]	[133.8895]
[-5]	[314.9070]	[629.8141]	[133.8576]

Columns 5 through 6

'f[m]'	'f[%]'
[0.6160]	[3.5000]
[0.6098]	[3.4647]
[0.6035]	[3.4290]
[0.5972]	[3.3930]
[0.5908]	[3.3565]
[0.5843]	[3.3197]
[0.5777]	[3.2825]
[0.5711]	[3.2449]
[0.5644]	[3.2068]

[0.5576]	[3.1683]
[0.5508]	[3.1293]
[0.5438]	[3.0898]
[0.5368]	[3.0499]
[0.5297]	[3.0094]
[0.5224]	[2.9684]
[0.5151]	[2.9269]
[0.5077]	[2.8847]
[0.5002]	[2.8420]
[0.4926]	[2.7986]
[0.4848]	[2.7545]

Esforço vertical máximo na ancoragem = 134.47 kgf

EFEITOS DO VENTO:

Esforço transversal na ancoragem (Fa_b) = 183.23 kgf

TRACAO_COM_VENTO =

'Tc[°C]'	'H[kgf]/cabo'	'Tcv[kgf]/fase'
[13]	[804.6391]	[1.6093e+03]

EFEITOS DO CURTO CIRCUITO:

Esforço de tração durante o curto (Ft,d) = 1933.02 kgf

Esforço de tração após o curto (Ff,d) = 2385.67 kgf

Esforço de tração de "pinch" (Fpi,d)= 7811.52 kgf

Máximo deslocamento horizontal dos condutores (bh) = 0.75 m

Distância mínima entre fases (a_min) = 2.50 m

RESUMO_PARCIAL =

Columns 1 through 6

'Vão'	'[kV]'	'X[m]'	'h[m]'	'PA[kgf]'	'PB[kgf]'
'F21'	[230]	[18]	[0]	[134.4667]	[134.4667]

Columns 7 through 10

'Tsv[kgf]'	'Tcv[kgf]'	'Fa_b[kgf]'	'Ft,d[kgf]'
[629.8141]	[1.6093e+03]	[183.2301]	[1.9330e+03]

Columns 11 through 12

'Ff,d[kgf]'	'Fpi,d[kgf]'
[2.3857e+03]	[7.8115e+03]

 ***** DIMENSIONAMENTO 4 *****

Vão: F22 (230 kV) - Comprimento(X): 54.1 m
 Condutor: 2xCAA Bluejay - 1,113,0 MCM
 Desnível (h): 0.0 m - Flecha máxima: 3.5/100
 Icc: 50 kA - Duração: 0.3s

ESTICAMENTO =

Columns 1 through 4

'°C'	'H[kgf]/cabo'	'Tsv[kgf]/fase'	'PA PB[kgf]/fase'
[90]	[400.9315]	[801.8629]	[202.3793]
[85]	[406.5907]	[813.1813]	[202.3214]
[80]	[412.4929]	[824.9859]	[202.2635]
[75]	[418.6560]	[837.3120]	[202.2057]
[70]	[425.0994]	[850.1987]	[202.1479]
[65]	[431.8447]	[863.6893]	[202.0902]
[60]	[438.9159]	[877.8317]	[202.0325]
[55]	[446.3397]	[892.6795]	[201.9748]
[50]	[454.1461]	[908.2922]	[201.9173]
[45]	[462.3684]	[924.7368]	[201.8598]
[40]	[471.0443]	[942.0886]	[201.8024]
[35]	[480.2163]	[960.4325]	[201.7450]
[30]	[489.9325]	[979.8650]	[201.6878]
[25]	[500.2479]	[1.0005e+03]	[201.6306]
[20]	[511.2253]	[1.0225e+03]	[201.5736]
[15]	[522.9368]	[1.0459e+03]	[201.5166]
[10]	[535.4659]	[1.0709e+03]	[201.4598]
[5]	[548.9097]	[1.0978e+03]	[201.4031]
[0]	[563.3817]	[1.1268e+03]	[201.3466]
[-5]	[579.0154]	[1.1580e+03]	[201.2902]

Columns 5 through 6

'f[m]'	'f[%]'
[1.8795]	[3.5000]
[1.8533]	[3.4513]
[1.8268]	[3.4019]
[1.7999]	[3.3518]
[1.7726]	[3.3010]
[1.7450]	[3.2495]
[1.7168]	[3.1971]
[1.6883]	[3.1439]
[1.6593]	[3.0899]
[1.6298]	[3.0349]
[1.5997]	[2.9790]
[1.5692]	[2.9221]
[1.5381]	[2.8642]
[1.5064]	[2.8051]
[1.4740]	[2.7449]
[1.4410]	[2.6834]

[1.4073]	[2.6206]
[1.3728]	[2.5564]
[1.3375]	[2.4908]
[1.3014]	[2.4235]

Esforço vertical máximo na ancoragem = 202.38 kgf

EFEITOS DO VENTO:

Esforço transversal na ancoragem (Fa_b) = 542.21 kgf

TRACAO_COM_VENTO =

'Tc[°C]'	'H[kgf]/cabo'	'Tcv[kgf]/fase'
[13]	[2.2644e+03]	[4.5289e+03]

EFEITOS DO CURTO CIRCUITO:

Esforço de tração durante o curto (Ft,d) = 5621.14 kgf

Esforço de tração após o curto (Ff,d) = 7521.34 kgf

Esforço de tração de "pinch" (Fpi,d)= 8165.54 kgf

Máximo deslocamento horizontal dos condutores (bh) = 2.52 m

Distância mínima entre fases (a_min) = -1.05 m

***** OBS: OS CONDUTORES DE FASES DIFERENTES PODERÃO COLIDIR DEVIDO AO CURTO CIRCUITO !!! *****

RESUMO_PARCIAL =

Columns 1 through 5

'Vão'	'[kV]'	'X[m]'	'h[m]'	'PA[kgf]'
'F22'	[230]	[54.1000]	[0]	[202.3793]

Columns 6 through 9

'PB[kgf]'	'Tsv[kgf]'	'Tcv[kgf]'	'Fa_b[kgf]'
[202.3793]	[1.1580e+03]	[4.5289e+03]	[542.2129]

Columns 10 through 12

'Ft,d[kgf]'	'Ff,d[kgf]'	'Fpi,d[kgf]'
[5.6211e+03]	[7.5213e+03]	[8.1655e+03]

 ***** DIMENSIONAMENTO 5 *****

Vão: F23 (230 kV) - Comprimento(X): 54.1 m
 Condutor: 2xCAA Bluejay - 1,113,0 MCM

Desnível (h): 11.0 m - Flecha máxima: 3.5/100
 Icc: 50 kA - Duração: 0.3s

ESTICAMENTO =

Columns 1 through 4

'°C'	'H[kgf]/cabo'	'Tsv[kgf]/fase'	'PA[kgf]/fase'
[90]	[400.9315]	[801.8629]	[563.6098]
[85]	[402.0428]	[804.0856]	[564.4992]
[80]	[403.1561]	[806.3123]	[565.3905]
[75]	[404.2714]	[808.5428]	[566.2836]
[70]	[405.3886]	[810.7771]	[567.1784]
[65]	[406.5076]	[813.0153]	[568.0750]
[60]	[407.6286]	[815.2572]	[568.9734]
[55]	[408.7514]	[817.5028]	[569.8735]
[50]	[409.8760]	[819.7520]	[570.7753]
[45]	[411.0025]	[822.0050]	[571.6788]
[40]	[412.1307]	[824.2615]	[572.5840]
[35]	[413.2608]	[826.5215]	[573.4908]
[30]	[414.3925]	[828.7851]	[574.3993]
[25]	[415.5260]	[831.0521]	[575.3094]
[20]	[416.6613]	[833.3225]	[576.2211]
[15]	[417.7982]	[835.5964]	[577.1344]
[10]	[418.9368]	[837.8735]	[578.0492]
[5]	[420.0770]	[840.1540]	[578.9657]
[0]	[421.2189]	[842.4377]	[579.8836]
[-5]	[422.3623]	[844.7247]	[580.8031]

Columns 5 through 8

'PB[kgf]/fase'	'fA[m]'	'xA[m]'	'fB[m]'
[-125.1592]	[11.7473]	[70.4109]	[0.7473]
[-126.0728]	[11.7545]	[70.5323]	[0.7545]
[-126.9880]	[11.7618]	[70.6538]	[0.7618]
[-127.9049]	[11.7692]	[70.7756]	[0.7692]
[-128.8233]	[11.7765]	[70.8976]	[0.7765]
[-129.7434]	[11.7840]	[71.0198]	[0.7840]
[-130.6651]	[11.7914]	[71.1422]	[0.7914]
[-131.5884]	[11.7989]	[71.2648]	[0.7989]
[-132.5132]	[11.8065]	[71.3877]	[0.8065]
[-133.4395]	[11.8140]	[71.5107]	[0.8140]
[-134.3674]	[11.8216]	[71.6339]	[0.8216]
[-135.2968]	[11.8293]	[71.7572]	[0.8293]
[-136.2277]	[11.8370]	[71.8808]	[0.8370]
[-137.1600]	[11.8447]	[72.0046]	[0.8447]
[-138.0938]	[11.8525]	[72.1285]	[0.8525]
[-139.0291]	[11.8603]	[72.2527]	[0.8603]
[-139.9658]	[11.8681]	[72.3770]	[0.8681]
[-140.9038]	[11.8760]	[72.5015]	[0.8760]
[-141.8433]	[11.8839]	[72.6262]	[0.8839]
[-142.7841]	[11.8919]	[72.7510]	[0.8919]

Esforço vertical máximo na ancoragem A = 580.80 kgf
 Esforço vertical máximo na ancoragem B = -125.16 kgf

***** OBS: HAVERÁ ESFORÇO DE ARRANCAMENTO NO SUPORTE B !!! *****

EFEITOS DO VENTO:

Esforço transversal na ancoragem (Fa_b) = 542.21 kgf

TRACAO_COM_VENTO =

'Tc[°C]'	'H[kgf]/cabo'	'Tcv[kgf]/fase'
[13]	[2.2644e+03]	[4.5289e+03]

EFEITOS DO CURTO CIRCUITO:

Esforço de tração durante o curto (Ft,d) = 4539.55 kgf
 Esforço de tração após o curto (Ff,d) = 7521.34 kgf
 Esforço de tração de "pinch" (Fpi,d) = 7486.73 kgf
 Máximo deslocamento horizontal dos condutores (bh) = 2.52 m
 Distância mínima entre fases (a_min) = -1.05 m

***** OBS: OS CONDUTORES DE FASES DIFERENTES PODERÃO COLIDIR DEVIDO AO CURTO CIRCUITO !!! *****

RESUMO_PARCIAL =

Columns 1 through 5

'Vão'	'[kV]'	'X[m]'	'h[m]'	'PA[kgf]'
'F23'	[230]	[54.1000]	[11]	[580.8031]

Columns 6 through 9

'PB[kgf]'	'Tsv[kgf]'	'Tcv[kgf]'	'Fa_b[kgf]'
[-125.1592]	[844.7247]	[4.5289e+03]	[542.2129]

Columns 10 through 12

'Ft,d[kgf]'	'Ff,d[kgf]'	'Fpi,d[kgf]'
[4.5395e+03]	[7.5213e+03]	[7.4867e+03]

 ***** DIMENSIONAMENTO 6 *****

Vão: F23b (230 kV) - Comprimento(X): 54.1 m
 Condutor: 2xCAA Bluejay - 1,113,0 MCM
 Desnível (h): 0.0 m - Flecha máxima: 3.5/100

Icc: 50 kA - Duração: 0.3s

ESTICAMENTO =

Columns 1 through 4

'°C'	'H[kgf]/cabo'	'Tsv[kgf]/fase'	'PA PB[kgf]/fase'
[90]	[400.9315]	[801.8629]	[202.3793]
[85]	[406.5907]	[813.1813]	[202.3214]
[80]	[412.4929]	[824.9859]	[202.2635]
[75]	[418.6560]	[837.3120]	[202.2057]
[70]	[425.0994]	[850.1987]	[202.1479]
[65]	[431.8447]	[863.6893]	[202.0902]
[60]	[438.9159]	[877.8317]	[202.0325]
[55]	[446.3397]	[892.6795]	[201.9748]
[50]	[454.1461]	[908.2922]	[201.9173]
[45]	[462.3684]	[924.7368]	[201.8598]
[40]	[471.0443]	[942.0886]	[201.8024]
[35]	[480.2163]	[960.4325]	[201.7450]
[30]	[489.9325]	[979.8650]	[201.6878]
[25]	[500.2479]	[1.0005e+03]	[201.6306]
[20]	[511.2253]	[1.0225e+03]	[201.5736]
[15]	[522.9368]	[1.0459e+03]	[201.5166]
[10]	[535.4659]	[1.0709e+03]	[201.4598]
[5]	[548.9097]	[1.0978e+03]	[201.4031]
[0]	[563.3817]	[1.1268e+03]	[201.3466]
[-5]	[579.0154]	[1.1580e+03]	[201.2902]

Columns 5 through 6

'f[m]'	'f[%]'
[1.8795]	[3.5000]
[1.8533]	[3.4513]
[1.8268]	[3.4019]
[1.7999]	[3.3518]
[1.7726]	[3.3010]
[1.7450]	[3.2495]
[1.7168]	[3.1971]
[1.6883]	[3.1439]
[1.6593]	[3.0899]
[1.6298]	[3.0349]
[1.5997]	[2.9790]
[1.5692]	[2.9221]
[1.5381]	[2.8642]
[1.5064]	[2.8051]
[1.4740]	[2.7449]
[1.4410]	[2.6834]
[1.4073]	[2.6206]
[1.3728]	[2.5564]
[1.3375]	[2.4908]
[1.3014]	[2.4235]

Esforço vertical máximo na ancoragem = 202.38 kgf

EFEITOS DO VENTO:

Esforço transversal na ancoragem (Fa_b) = 861.60 kgf

TRACAO_COM_VENTO =

'Tc[°C]'	'H[kgf]/cabo'	'Tcv[kgf]/fase'
[13]	[3.3580e+03]	[6.7160e+03]

EFEITOS DO CURTO CIRCUITO:

Esforço de tração durante o curto (Ft,d) = 5621.14 kgf

Esforço de tração após o curto (Ff,d) = 7521.34 kgf

Esforço de tração de "pinch" (Fpi,d)= 8165.54 kgf

Máximo deslocamento horizontal dos condutores (bh) = 2.52 m

Distância mínima entre fases (a_min) = -1.05 m

***** OBS: OS CONDUTORES DE FASES DIFERENTES PODERÃO COLIDIR DEVIDO AO CURTO CIRCUITO !!! *****

RESUMO_PARCIAL =

Columns 1 through 5

'vão'	'[kV]'	'X[m]'	'h[m]'	'PA[kgf]'
'F23b'	[230]	[54.1000]	[0]	[202.3793]

Columns 6 through 9

'PB[kgf]'	'Tsv[kgf]'	'Tcv[kgf]'	'Fa_b[kgf]'
[202.3793]	[1.1580e+03]	[6.7160e+03]	[861.6046]

Columns 10 through 12

'Ft,d[kgf]'	'Ff,d[kgf]'	'Fpi,d[kgf]'
[5.6211e+03]	[7.5213e+03]	[8.1655e+03]

 ***** DIMENSIONAMENTO 7 *****

Vão: F51 (525 kV) - Comprimento(X): 60.0 m

Condutor: 4xCAA Rail - 954,0 MCM

Desnível (h): 0.0 m - Flecha máxima: 3.5/100

Icc: 63 kA - Duração: 0.3s

ESTICAMENTO =

Columns 1 through 4

'°C'	'H[kgf]/cabo'	'Tsv[kgf]/fase'	'PA PB[kgf]/fase'
[90]	[479.6103]	[1.9184e+03]	[615.7325]
[85]	[484.6749]	[1.9387e+03]	[615.5213]
[80]	[489.9010]	[1.9596e+03]	[615.3103]
[75]	[495.2973]	[1.9812e+03]	[615.0994]
[70]	[500.8730]	[2.0035e+03]	[614.8886]
[65]	[506.6382]	[2.0266e+03]	[614.6780]
[60]	[512.6038]	[2.0504e+03]	[614.4676]
[55]	[518.7815]	[2.0751e+03]	[614.2573]
[50]	[525.1839]	[2.1007e+03]	[614.0472]
[45]	[531.8248]	[2.1273e+03]	[613.8373]
[40]	[538.7191]	[2.1549e+03]	[613.6276]
[35]	[545.8830]	[2.1835e+03]	[613.4180]
[30]	[553.3345]	[2.2133e+03]	[613.2087]
[25]	[561.0927]	[2.2444e+03]	[612.9997]
[20]	[569.1791]	[2.2767e+03]	[612.7908]
[15]	[577.6168]	[2.3105e+03]	[612.5822]
[10]	[586.4316]	[2.3457e+03]	[612.3739]
[5]	[595.6517]	[2.3826e+03]	[612.1659]
[0]	[605.3087]	[2.4212e+03]	[611.9581]
[-5]	[615.4370]	[2.4617e+03]	[611.7507]

Columns 5 through 6

'f[m]'	'f[%]'
[2.0300]	[3.5000]
[2.0088]	[3.4634]
[1.9874]	[3.4265]
[1.9657]	[3.3891]
[1.9438]	[3.3514]
[1.9217]	[3.3133]
[1.8993]	[3.2747]
[1.8767]	[3.2357]
[1.8538]	[3.1963]
[1.8307]	[3.1564]
[1.8073]	[3.1160]
[1.7835]	[3.0751]
[1.7595]	[3.0337]
[1.7352]	[2.9917]
[1.7105]	[2.9492]
[1.6856]	[2.9061]
[1.6602]	[2.8625]
[1.6345]	[2.8182]
[1.6085]	[2.7732]
[1.5820]	[2.7276]

Esforço vertical máximo na ancoragem = 615.73 kgf

EFEITOS DO VENTO:

Esforço transversal na ancoragem (Fa_b) = 568.62 kgf

TRACAO_COM_VENTO =

'Tc[°C]'	'H[kgf]/cabo'	'Tcv[kgf]/fase'
[13]	[1.2000e+03]	[4.8001e+03]

EFEITOS DO CURTO CIRCUITO:

Esforço de tração durante o curto (Ft,d) = 4919.00 kgf

Esforço de tração após o curto (Ff,d) = 7724.28 kgf

Esforço de tração de "pinch" (Fpi,d)= 24734.83 kgf

Máximo deslocamento horizontal dos condutores (bh) = 1.96 m

Distância mínima entre fases (a_min) = 3.57 m

RESUMO_PARCIAL =

Columns 1 through 6

'Vão'	'[kV]'	'x[m]'	'h[m]'	'PA[kgf]'	'PB[kgf]'
'F51'	[525]	[60]	[0]	[615.7325]	[615.7325]

Columns 7 through 10

'Tsv[kgf]'	'Tcv[kgf]'	'Fa_b[kgf]'	'Ft,d[kgf]'
[2.4617e+03]	[4.8001e+03]	[568.6226]	[4.9190e+03]

Columns 11 through 12

'Ff,d[kgf]'	'Fpi,d[kgf]'
[7.7243e+03]	[2.4735e+04]

 ***** DIMENSIONAMENTO 8 *****

Vão: F52 (525 kV) - Comprimento(x): 144.5 m

Condutor: 4xCAA Rail - 954,0 MCM

Desnível (h): 0.0 m - Flecha máxima: 3.5/100

Icc: 63 kA - Duração: 0.3s

ESTICAMENTO =

Columns 1 through 4

'°C'	'H[kgf]/cabo'	'Tsv[kgf]/fase'	'PA PB[kgf]/fase'
[90]	[874.6832]	[3.4987e+03]	[885.2400]
[85]	[887.2272]	[3.5489e+03]	[884.9814]
[80]	[900.3063]	[3.6012e+03]	[884.7232]
[75]	[913.9584]	[3.6558e+03]	[884.4655]

[70]	[928.2250]	[3.7129e+03]	[884.2083]
[65]	[943.1521]	[3.7726e+03]	[883.9517]
[60]	[958.7903]	[3.8352e+03]	[883.6956]
[55]	[975.1956]	[3.9008e+03]	[883.4401]
[50]	[992.4301]	[3.9697e+03]	[883.1853]
[45]	[1.0106e+03]	[4.0423e+03]	[882.9311]
[40]	[1.0297e+03]	[4.1187e+03]	[882.6778]
[35]	[1.0498e+03]	[4.1994e+03]	[882.4253]
[30]	[1.0712e+03]	[4.2847e+03]	[882.1737]
[25]	[1.0938e+03]	[4.3751e+03]	[881.9231]
[20]	[1.1178e+03]	[4.4710e+03]	[881.6735]
[15]	[1.1433e+03]	[4.5731e+03]	[881.4251]
[10]	[1.1705e+03]	[4.6819e+03]	[881.1780]
[5]	[1.1996e+03]	[4.7982e+03]	[880.9324]
[0]	[1.2307e+03]	[4.9228e+03]	[880.6883]
[-5]	[1.2642e+03]	[5.0567e+03]	[880.4460]

Columns 5 through 6

'f[m]'	'f[%]'
[4.9875]	[3.5000]
[4.9170]	[3.4505]
[4.8456]	[3.4004]
[4.7732]	[3.3496]
[4.6998]	[3.2981]
[4.6254]	[3.2459]
[4.5500]	[3.1930]
[4.4734]	[3.1393]
[4.3958]	[3.0847]
[4.3169]	[3.0294]
[4.2368]	[2.9732]
[4.1554]	[2.9160]
[4.0726]	[2.8580]
[3.9885]	[2.7989]
[3.9029]	[2.7389]
[3.8158]	[2.6777]
[3.7271]	[2.6155]
[3.6367]	[2.5521]
[3.5447]	[2.4875]
[3.4509]	[2.4217]

Esforço vertical máximo na ancoragem = 885.24 kgf

EFEITOS DO VENTO:

Esforço transversal na ancoragem (Fa_b) = 1346.59 kgf

TRACAO_COM_VENTO =

'Tc[°C]'	'H[kgf]/cabo'	'Tcv[kgf]/fase'
[13]	[2.9031e+03]	[1.1613e+04]

EFEITOS DO CURTO CIRCUITO:

Esforço de tração durante o curto ($F_{t,d}$) = 7989.30 kgf
 Esforço de tração após o curto ($F_{f,d}$) = N/A, conforme item 6.2.6 da norma IEC 60865-1_2011
 Esforço de tração de "pinch" ($F_{pi,d}$) = 33127.63 kgf
 Máximo deslocamento horizontal dos condutores (b_h) = 4.18 m
 Distância mínima entre fases (a_{min}) = 0.34 m

RESUMO_PARCIAL =

Columns 1 through 5

'vão'	'[kV]'	'x[m]'	'h[m]'	'PA[kgf]'
'F52'	[525]	[144.5000]	[0]	[885.2400]

Columns 6 through 9

'PB[kgf]'	'Tsv[kgf]'	'Tcv[kgf]'	'Fa_b[kgf]'
[885.2400]	[5.0567e+03]	[1.1613e+04]	[1.3466e+03]

Columns 10 through 12

'Ft,d[kgf]'	'Ff,d[kgf]'	'Fpi,d[kgf]'
[7.9893e+03]	[0]	[3.3128e+04]

```
*****
***** DIMENSIONAMENTO 9 *****
*****
```

Vão: B01 (0 kV) - Comprimento(X): 144.5 m
 Condutor: 1xAÇO EHS - 3/8"
 Desnível (h): 0.0 m - Flecha máxima: 2.5/100
 Icc: 0 kA - Duração: NaNs

ESTICAMENTO =

Columns 1 through 4

'°C'	'H[kgf]/cabo'	'Tsv[kgf]/fase'	'PA PB[kgf]/fase'
[60]	[294.0575]	[294.0575]	[29.4548]
[55]	[298.8001]	[298.8001]	[29.4532]
[50]	[303.7577]	[303.7577]	[29.4517]
[45]	[308.9457]	[308.9457]	[29.4502]
[40]	[314.3807]	[314.3807]	[29.4486]
[35]	[320.0811]	[320.0811]	[29.4471]
[30]	[326.0670]	[326.0670]	[29.4456]
[25]	[332.3604]	[332.3604]	[29.4441]
[20]	[338.9855]	[338.9855]	[29.4426]
[15]	[345.9688]	[345.9688]	[29.4412]

[10]	[353.3396]	[353.3396]	[29.4397]
[5]	[361.1299]	[361.1299]	[29.4383]
[0]	[369.3753]	[369.3753]	[29.4368]
[-5]	[378.1146]	[378.1146]	[29.4354]

Columns 5 through 6

'f[m]'	'f[%]'
[3.6125]	[2.5000]
[3.5552]	[2.4603]
[3.4971]	[2.4202]
[3.4384]	[2.3795]
[3.3790]	[2.3384]
[3.3188]	[2.2967]
[3.2579]	[2.2546]
[3.1962]	[2.2119]
[3.1337]	[2.1687]
[3.0705]	[2.1249]
[3.0064]	[2.0806]
[2.9416]	[2.0357]
[2.8759]	[1.9902]
[2.8094]	[1.9442]

Esforço vertical máximo na ancoragem = 29.45 kgf

EFEITOS DO VENTO:

Esforço transversal na ancoragem (Fa_b) = 475.16 kgf

TRACAO_COM_VENTO =

'Tc[°C]'	'H[kgf]/cabo'	'Tcv[kgf]/fase'
[13]	[3.0558e+03]	[3.0558e+03]

RESUMO_PARCIAL =

Columns 1 through 5

'Vão'	'[kV]'	'x[m]'	'h[m]'	'PA[kgf]'
'B01'	[0]	[144.5000]	[0]	[29.4548]

Columns 6 through 9

'PB[kgf]'	'Tsv[kgf]'	'Tcv[kgf]'	'Fa_b[kgf]'
[29.4548]	[378.1146]	[3.0558e+03]	[475.1551]

Columns 10 through 12

'Ft,d[kgf]'	'Ff,d[kgf]'	'Fpi,d[kgf]'
[0]	[0]	[0]

```
*****
***** DIMENSIONAMENTO 10 *****
*****
```

Vão: B02 (0 kv) - Comprimento(X): 40.0 m
 Condutor: 1xAÇO EHS - 3/8"
 Desnível (h): 15.0 m - Flecha máxima: 2.5/100
 Icc: 0 kA - Duração: NaNs

ESTICAMENTO =

Columns 1 through 4

'°C'	'H[kgf]/cabo'	'Tsv[kgf]/fase'	'PA[kgf]/fase'
[60]	[81.4000]	[81.4000]	[39.3329]
[55]	[81.4646]	[81.4646]	[39.3570]
[50]	[81.5292]	[81.5292]	[39.3812]
[45]	[81.5938]	[81.5938]	[39.4053]
[40]	[81.6584]	[81.6584]	[39.4294]
[35]	[81.7230]	[81.7230]	[39.4536]
[30]	[81.7876]	[81.7876]	[39.4777]
[25]	[81.8522]	[81.8522]	[39.5018]
[20]	[81.9168]	[81.9168]	[39.5259]
[15]	[81.9813]	[81.9813]	[39.5500]
[10]	[82.0459]	[82.0459]	[39.5741]
[5]	[82.1104]	[82.1104]	[39.5982]
[0]	[82.1749]	[82.1749]	[39.6223]
[-5]	[82.2395]	[82.2395]	[39.6464]

Columns 5 through 8

'PB[kgf]/fase'	'fA[m]'	'xA[m]'	'fB[m]'
[-21.9204]	[21.7287]	[93.2280]	[6.7287]
[-21.9446]	[21.7386]	[93.2863]	[6.7386]
[-21.9688]	[21.7485]	[93.3446]	[6.7485]
[-21.9930]	[21.7585]	[93.4029]	[6.7585]
[-22.0171]	[21.7684]	[93.4612]	[6.7684]
[-22.0413]	[21.7783]	[93.5195]	[6.7783]
[-22.0654]	[21.7883]	[93.5778]	[6.7883]
[-22.0896]	[21.7982]	[93.6361]	[6.7982]
[-22.1137]	[21.8081]	[93.6944]	[6.8081]
[-22.1379]	[21.8181]	[93.7526]	[6.8181]
[-22.1620]	[21.8280]	[93.8109]	[6.8280]
[-22.1862]	[21.8379]	[93.8691]	[6.8379]
[-22.2103]	[21.8479]	[93.9273]	[6.8479]
[-22.2345]	[21.8578]	[93.9856]	[6.8578]

Esforço vertical máximo na ancoragem A = 39.65 kgf
 Esforço vertical máximo na ancoragem B = -21.92 kgf

***** OBS: HAVERÁ ESFORÇO DE ARRANCAMENTO NO SUPORTE B !!! *****

EFEITOS DO VENTO:

Esforço transversal na ancoragem (Fa_b) = 131.53 kgf

TRACAO_COM_VENTO =

'Tc[°C]'	'H[kgf]/cabo'	'Tcv[kgf]/fase'
[13]	[1.1364e+03]	[1.1364e+03]

RESUMO_PARCIAL =

Columns 1 through 6

'Vão'	'[kV]'	'x[m]'	'h[m]'	'PA[kgf]'	'PB[kgf]'
'B02'	[0]	[40]	[15]	[39.6464]	[-21.9204]

Columns 7 through 10

'Tsv[kgf]'	'Tcv[kgf]'	'Fa_b[kgf]'	'Ft,d[kgf]'
[82.2395]	[1.1364e+03]	[131.5308]	[0]

Columns 11 through 12

'Ff,d[kgf]'	'Fpi,d[kgf]'
[0]	[0]

 ***** RESUMO GERAL *****

RESUMO_GERAL =

Columns 1 through 5

'Vão'	'[kV]'	'x[m]'	'h[m]'	'PA[kgf]'
'F11'	[138]	[16]	[0]	[76.6310]
'F12'	[138]	[46.5000]	[0]	[106.4983]
'F21'	[230]	[18]	[0]	[134.4667]
'F22'	[230]	[54.1000]	[0]	[202.3793]
'F23'	[230]	[54.1000]	[11]	[580.8031]
'F23b'	[230]	[54.1000]	[0]	[202.3793]
'F51'	[525]	[60]	[0]	[615.7325]
'F52'	[525]	[144.5000]	[0]	[885.2400]
'B01'	[0]	[144.5000]	[0]	[29.4548]
'B02'	[0]	[40]	[15]	[39.6464]

Columns 6 through 9

'PB[kgf]'	'Tsv[kgf]'	'Tcv[kgf]'	'Fa_b[kgf]'
[76.6310]	[268.7949]	[811.0167]	[120.0114]
[106.4983]	[488.8114]	[2.4590e+03]	[326.7004]
[134.4667]	[629.8141]	[1.6093e+03]	[183.2301]
[202.3793]	[1.1580e+03]	[4.5289e+03]	[542.2129]
[-125.1592]	[844.7247]	[4.5289e+03]	[542.2129]
[202.3793]	[1.1580e+03]	[6.7160e+03]	[861.6046]
[615.7325]	[2.4617e+03]	[4.8001e+03]	[568.6226]
[885.2400]	[5.0567e+03]	[1.1613e+04]	[1.3466e+03]
[29.4548]	[378.1146]	[3.0558e+03]	[475.1551]
[-21.9204]	[82.2395]	[1.1364e+03]	[131.5308]

Columns 10 through 12

'Ft,d[kgf]'	'Ff,d[kgf]'	'Fpi,d[kgf]'
[1.4253e+03]	[1.1881e+03]	[2.7346e+03]
[3.9043e+03]	[3.6305e+03]	[2.5979e+03]
[1.9330e+03]	[2.3857e+03]	[7.8115e+03]
[5.6211e+03]	[7.5213e+03]	[8.1655e+03]
[4.5395e+03]	[7.5213e+03]	[7.4867e+03]
[5.6211e+03]	[7.5213e+03]	[8.1655e+03]
[4.9190e+03]	[7.7243e+03]	[2.4735e+04]
[7.9893e+03]	[0]	[3.3128e+04]
[0]	[0]	[0]
[0]	[0]	[0]

APÊNDICE C - ENTRADA DE DADOS DAS SIMULAÇÕES PARA ANÁLISES DE SENSIBILIDADES DE VARIÁVEIS

Neste apêndice, apresentam-se as figuras que mostram as entradas de dados do usuário das simulações para análises de sensibilidades de variáveis, referente à seção 4.2.

Figura C.1: Entradas do usuário para simulações de análises do vão “F12”.

Dimensionamento	2
Tensão nominal do barramento (tensao) [kV]	138
Nomenclatura do vão (vao)	F12
Número de subcondutores (ns)	2
Tipo de cabo (cabo_tipo)	CAA
Especificação do cabo (cabo)	Hawk - 477,0 MCM
Comprimento do vão, eixo a eixo (lvao) [m]	46,5
Largura das vigas, a ser deduzida do vão (lviga) [m]	0,4
Desnível entre os suportes de ancoragem (h) [m]	0
Flecha máxima percentual, premissa (fmaxp) [%]	3,5
Comprimento de uma cadeia de isoladores (Lk) [m]	2
Diâmetro de uma cadeia de isoladores (dk) [mm]	255
Massa de uma cadeia de isoladores (mk) [m]	60
Temperatura máxima para esticamento (Tmax) [°C]	90
Temperatura mínima para esticamento (Tmin) [°C]	-5
Distância entre fases, eixo a eixo (a) [m]	3
Distância entre subcondutores, eixo a eixo (as) [m]	0,2
Número de espaçadores (n_esp)	2
Corrente simétrica de curto circuito (Ik) [kAef]	40
Tempo de curto circuito (Tk1) [s]	0,3
Frequência elétrica do sistema (f) [hz]	60
Fator de assimetria (kappa) [anotação]	2,6

Fonte: Autoria própria.

Figura C.2: Entradas do usuário para simulações de análises do vão “F22”.

Dimensionamento	4
Tensão nominal do barramento (tensao) [kV]	230
Nomenclatura do vão (vao)	F22
Número de subcondutores (ns)	2
Tipo de cabo (cabo_tipo)	CAA
Especificação do cabo (cabo)	Bluejay - 1,113,0 MCM
Comprimento do vão, eixo a eixo (lvao) [m]	54,1
Largura das vigas, a ser deduzida do vão (lviga) [m]	0,4
Desnível entre os suportes de ancoragem (h) [m]	0
Flecha máxima percentual, premissa (fmaxp) [%]	3,5
Comprimento de uma cadeia de isoladores (Lk) [m]	2,9
Diâmetro de uma cadeia de isoladores (dk) [mm]	255
Massa de uma cadeia de isoladores (mk) [m]	100
Temperatura máxima para esticamento (Tmax) [°C]	90
Temperatura mínima para esticamento (Tmin) [°C]	-5
Distância entre fases, eixo a eixo (a) [m]	4
Distância entre subcondutores, eixo a eixo (as) [m]	0,35
Número de espaçadores (n_esp)	3
Corrente simétrica de curto circuito (Ik) [kAef]	50
Tempo de curto circuito (Tk1) [s]	0,3
Frequência elétrica do sistema (f) [hz]	60
Fator de assimetria (kappa) [anotação]	2,6

Fonte: Autoria própria.

Figura C.3: Entradas do usuário para simulações de análises do vão “F52”.

Dimensionamento	6
Tensão nominal do barramento (tensao) [kV]	525
Nomenclatura do vão (vao)	F52
Número de subcondutores (ns)	4
Tipo de cabo (cabo_tipo)	CAA
Especificação do cabo (cabo)	Rail - 954,0 MCM
Comprimento do vão, eixo a eixo (lvao) [m]	144,5
Largura das vigas, a ser deduzida do vão (lviga) [m]	2
Desnível entre os suportes de ancoragem (h) [m]	0
Flecha máxima percentual, premissa (fmaxp) [%]	3,5
Comprimento de uma cadeia de isoladores (Lk) [m]	5,3
Diâmetro de uma cadeia de isoladores (dk) [mm]	280
Massa de uma cadeia de isoladores (mk) [m]	420
Temperatura máxima para esticamento (Tmax) [°C]	90
Temperatura mínima para esticamento (Tmin) [°C]	-5
Distância entre fases, eixo a eixo (a) [m]	8,7
Distância entre subcondutores, eixo a eixo (as) [m]	0,457
Número de espaçadores (n_esp)	8
Corrente simétrica de curto circuito (Ik) [kAef]	63
Tempo de curto circuito (Tk1) [s]	0,3
Frequência elétrica do sistema (f) [hz]	60
Fator de assimetria (kappa) [anotação]	2,6

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE D - SAÍDA MATLAB PARA A VALIDAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA DE ESTICAMENTO

Neste apêndice, apresenta-se a saída do MATLAB para a validação da implementação da metodologia de cálculo de esticamento realizada na subseção 4.3.1.

Figura D.1: Validação da metodologia de esticamento.

```

*****
***** DIMENSIONAMENTO 1 *****
*****

***** DADOS DE ENTRADA *****
Vão: KIESSLING (230 kV) - Comprimento(X): 50.00 m
Densidade linear do subcondutor (ms) = 2.12 kg/m
Seção transversal do subcondutor = 635.50 mm2
Módulo de elasticidade do subcondutor (Es) = 68 kN/mm2
Coef. de expansão linear do subcondutor = 0.0000194 1/°C

***** DADOS DE SAÍDA *****

ESTICAMENTO =
|
|   '°C'      'H[N]/cabo'          'f [m] '
|   [ 40]     [6.005234447004608e+03]  [1.7359999999999996]
|   [ 10]     [6.354840568410345e+03]  [1.640495444027758]
|
*****

```

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE E - SAÍDAS MATLAB PARA A VALIDAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA DE CÁLCULO DOS EFEITOS DO VENTO

Neste apêndice, apresentam-se as saídas do MATLAB para a validação da implementação da metodologia de cálculo dos efeitos do vento, conforme subseção 4.3.2.

Figura E.1: Validação da metodologia para efeitos do vento (Vão de 60 m).

```

*****
***** DIMENSIONAMENTO 1 *****
*****

***** DADOS DE ENTRADA *****
Vão: SILVA, R. - 1 (525 kV) - Comprimento(X): 60.0 m
Condutor: 4xCAA Rail - 954,0 MCM
Velocidade básica de vento (V0) = 25 m/s
Temperatura coincidente (Tc) = 22 °C
Flecha máxima percentual = 3.50/100
Cadeia de isoladores: 6.0 de comprimento e massa de 300 kg

***** DADOS DE SAÍDA *****
Tração com vento (Tcv) = 2725.72 kgf
*****

```

Fonte: Autoria própria.

Figura E.2: Validação da metodologia para efeitos do vento (Vão de 100 m).

```

*****
***** DIMENSIONAMENTO 2 *****
*****

***** DADOS DE ENTRADA *****
Vão: SILVA, R. - 2 (525 kV) - Comprimento(X): 100.0 m
Condutor: 4xCAA Rail - 954,0 MCM
Velocidade básica de vento (V0) = 25 m/s
Temperatura coincidente (Tc) = 22 °C
Flecha máxima percentual = 3.50/100
Cadeia de isoladores: 6.0 de comprimento e massa de 300 kg

***** DADOS DE SAÍDA *****
Tração com vento (Tcv) = 4087.37 kgf
*****

```

Fonte: Autoria própria.

Figura E.3: Validação da metodologia para efeitos do vento (Vão de 140 m).

```

*****
*****  DIMENSIONAMENTO 3  *****
*****

*****  DADOS DE ENTRADA  *****
Vão: SILVA, R. - 3 (525 kV) - Comprimento(X): 140.0 m
Condutor: 4xCAA Rail - 954,0 MCM
Velocidade básica de vento (V0) = 25 m/s
Temperatura coincidente (Tc) = 22 °C |
Flecha máxima percentual = 3.50/100
Cadeia de isoladores: 6.0 de comprimento e massa de 300 kg

*****  DADOS DE SAÍDA  *****
Tração com vento (Tcv) = 5550.62 kgf
*****

```

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE F - SAÍDAS MATLAB PARA A VALIDAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA DE CÁLCULO DOS EFEITOS DO CURTO-CIRCUITO

Figura F.1: Validação da metodologia para efeitos do curto-circuito.

```

*****
***** DIMENSIONAMENTO 1 *****
*****

***** DADOS DE ENTRADA *****
Vão: IEC 60865-2 (345 kV) - Comprimento(X): 48.00 m
Dist. entre fases (a) = 5.00 m - Dist. entre subcondutores = 0.10 m
Número de espaçadores (n_esp) = 3
Densidade linear do subcondutor (ms) = 4.24 kg/m - Diâmetro externo = 43.00 mm
Seção transversal do subcondutor = 1090.00 mm2
Módulo de elasticidade do subcondutor (Es) = 60 kN/mm2
Curto-circuito = 63 kA - 0.50 s (F.A.= 1.81)

***** DADOS DE SAÍDA P/ 20°C *****
Esforço de tração durante o curto (Ft,d) = 36.18 kN
Esforço de tração após o curto (Ff,d) = 66.72 kN
Esforço de tração de "pinch" (Fpi,d)= 39.80 kN
|

***** DADOS DE SAÍDA P/ 60°C *****
Esforço de tração durante o curto (Ft,d) = 32.87 kN
Esforço de tração após o curto (Ff,d) = 68.66 kN
Esforço de tração de "pinch" (Fpi,d)= 36.16 kN
*****

```

Fonte: Autoria própria.