

**CRITÉRIOS DE PROJETO DE ESTRUTURAS DE LINHAS AÉREAS  
DE TRANSMISSÃO EM MINAS GERAIS**

**Elvys Dias Reis**

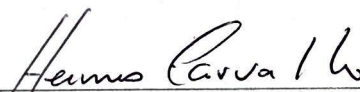
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

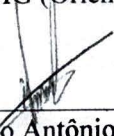
**"CRITÉRIOS DE PROJETO DE ESTRUTURAS DE LINHAS  
AÉREAS DE TRANSMISSÃO EM MINAS GERAIS"**


Elvys Dias Reis

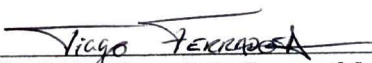
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Hermes Carvalho  
DEES - UFMG (Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. João Antônio de Vasconcelos  
DEE-UFMG (Coorientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ricardo Luiz da Silva Adriano  
DEE-UFMG

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Tiago João Fazeris Marques Ferradosa  
Universidade do Porto

Belo Horizonte, 21 de fevereiro de 2020

R375c	<p>Reis, Elvys Dias.          Critérios de Projeto de Estruturas de Linhas Aéreas de Transmissão em Minas Gerais [recurso eletrônico] / Elvys Dias Reis. - 2020.          1 recurso online (128 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Hermes Carvalho.          Coorientador: João Antônio de Vasconcelos.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f.102-107.</p> <p>Bibliografia: f. 97-101.</p> <p>Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Linhas aéreas elétricas - Teses. 3. Estática - Teses. 4. Modelos matemáticos - Teses.          I. Carvalho, Hermes. II. Vasconcelos, João Antônio. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p>
	CDU: 624(043)

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado saúde, coragem e inspiração, e a todas as pessoas que me ajudaram a realizar este trabalho e me incentivaram ao longo desta jornada:

Aos meus pais, Eliane e Geraldo, pelo amor incondicional, educação, princípios e por inúmeras vezes abdicarem de seus sonhos para a realização dos meus. Aos meus irmãos, Egle e Elger, e ao meu cunhado, Aysser, pelo encorajamento, carinho e amizade. À Clarinha, por tornar a vida mais alegre. Aos meus avós, Dona Pepita, Seu Gusto (*in memoriam*), Vó Lelete e Vô Cimino (*in memoriam*), grandes exemplos de fé, luta e determinação.

Ao professor Hermes Carvalho, pela orientação segura e objetiva, ensinamentos, confiança, apoio e amizade.

Ao professor João Antônio de Vasconcelos, pela coorientação, oportunidades concedidas e exemplo de profissionalismo.

Ao professor Ricardo Luiz da Silva Adriano, pelo acompanhamento e revisão constante das atividades desenvolvidas.

Aos amigos do Laboratório de Computação Evolucionária, pelo aprendizado, convívio intenso e companheirismo, em especial ao Pedro Henrique da Cruz Santos.

À Camila, pela presteza e constante ajuda com as análises numéricas no ANSYS.

À Dona Norma, pela acolhida, amizade e relação de mãe e filho desde a minha chegada a Belo Horizonte.

Aos amigos de longa data, pela constante presença, conversas, conselhos e momentos de descontração.

Aos amigos do mestrado, de apartamento, do grupo de oração, do dia a dia e do forró, por tornarem a minha vida mais leve e divertida.

Aos tios, padrinhos e primos, pelo incentivo e compreensão da minha ausência em momentos importantes.

Aos colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, pela convivência, colaboração e viabilização do mestrado.

A todos aqueles que contribuíram para esta conquista, o meu muito obrigado.

## **AGRADECIMENTO ESPECIAL**

À CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A. e à ANEEL, pelo apoio técnico e financeiro durante o desenvolvimento deste trabalho, o qual esteve vinculado ao P&D D0592 “Desenvolvimento de estruturas para linhas de distribuição aéreas específicas, otimizadas para cada macrorregião de Minas Gerais, de acordo com a norma IEC 60826”.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo da climatologia do vento do estado de Minas Gerais e a avaliação do comportamento não linear geométrico de estruturas frequentemente empregadas em linhas aéreas de transmissão (LTs). Para isso, construiu-se um banco de dados com as velocidades do vento das principais redes meteorológicas nacionais (INMET, ICEA e INPE), o qual foi tratado para obter séries consistentes de velocidades máximas anuais. Essa base de dados é muito mais ampla do que a utilizada na elaboração das normas ABNT NBR 6123:1988 e ABNT NBR 5422:1985. Conforme recomendado pela norma IEC 60826:2017, a distribuição Generalizada de Valores Extremos (GVE) e o método de interpolação de Ponderação pelo Inverso da Distância (IDW - *Inverse Distance Weight*) foram utilizados na determinação dos valores extremos de velocidade do vento e no traçado dos mapas de isopletas para Minas Gerais, respectivamente. Além das isopletas, foi proposto um mapa de calor, o qual permite uma determinação mais precisa do valor da velocidade básica do vento a ser adotada como referência. A utilização desses mapas é crucial no desenvolvimento de projetos de estruturas e as velocidades deles obtidas foram empregadas na avaliação do comportamento não linear geométrico de uma estrutura de suspensão típica empregada em LTs, quando submetida à ação do vento. Modelos numéricos contemplando as não linearidades geométricas presentes no sistema estrutural (torre, isoladores e cabos) foram desenvolvidos e permitiram, após seu processamento, avaliar a influência dessas não linearidades geométricas nas solicitações da estrutura suporte. Os resultados do modelo completo proposto foram comparados com os resultados obtidos através da análise de uma torre isolada, com forças externas aplicadas no ponto de suspensão dos cabos, modelo este frequentemente utilizado no projeto de LTs e recomendado pela norma americana ASCE 10-15. Para a quantificação da influência das não linearidades geométricas no sistema, foram avaliados diferentes comprimentos de cabos, velocidades médias do vento e desníveis entre torres adjacentes. O entendimento do comportamento não linear do sistema estrutural permitiu identificar alguns padrões e verificar os limites para os quais as simplificações propostas pelas normas de referência são aceitáveis. Em outras palavras, diante dos resultados obtidos neste trabalho foi possível estabelecer critérios práticos a serem empregados por projetistas no dimensionamento de estruturas de LTs.

Palavras-chaves: Estruturas de linhas de transmissão, Isopletas, Teoria Generalizada de Valores Extremos, Modelagem tridimensional de linhas de transmissão, Análise estática não linear geométrica.

## **ABSTRACT**

*This work presents a study of wind climatology in the state of Minas Gerais and the evaluation of the nonlinear geometric behavior of structures often used in overhead transmission lines (OHLs). For this purpose, a database was built with the wind speeds of the main national meteorological networks (INMET, ICEA, and INPE), which was treated to obtain consistent series of annual maximum speeds. This database is much broader than the one used in the elaboration of ABNT NBR 6123:1988 and ABNT NBR 5422:1985 standards. As recommended by IEC 60826:2017, the Generalized Extreme Values (GEV) distribution and the Inverse Distance Weight (IDW) interpolation method were used in the determination of extreme wind speed values and the mapping of isopleths for Minas Gerais, respectively. Besides the isopleths, a heat map was proposed, which allows a more precise determination of the basic wind speed value to be adopted as reference. The use of these maps is crucial in the development of structure designs and the speeds obtained from them were employed in the evaluation of the nonlinear geometric behavior of a typical suspension structure used in OHLs, when subjected to wind action. Numerical models contemplating the geometric nonlinearities present in the structural system (tower, insulators, and cables) were developed and allowed, after their processing, to evaluate the influence of these nonlinearities on the forces acting on the supporting structure. The results of the proposed complete model were compared with the results obtained through the analysis of an isolated tower, with external forces applied to the suspension point of the cables, a model frequently used in OHL design and recommended by the American standard ASCE 10-15. To quantify the influence of geometric nonlinearities on the system, different cable lengths, average wind speeds and unevenness between adjacent towers were evaluated. The understanding of the nonlinear behavior of the structural system allowed the identification of some standards and verification of the limits for which the simplifications proposed by the reference standards are acceptable. In other words, given the results obtained in this work, it was possible to establish practical criteria to be used by designers in the design of OHL structures.*

*Keywords: Transmission lines structures, Isopleths, Generalized Extreme Value theory, Tridimensional modeling of transmission lines, Geometric nonlinear static analysis.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fator combinado do vento ( $GC$ ) para condutores em várias categorias de terreno e altura sobre o solo (Adaptado da IEC 60826:2017). .....	21
Figura 2.2 – Fator do vão ( $GL$ ) (Adaptado da IEC 60826:2017).....	21
Figura 2.3 – Fator combinado do vento ( $Gt$ ) aplicável a isoladores (Adaptado da IEC 60826:2017).....	22
Figura 2.4 – Estações convencionais do INMET (Imagem obtida via INMET).....	24
Figura 2.5 – Aeródromos com estações meteorológicas da FAB (Imagem obtida via REDEMET).....	25
Figura 3.1 – Fluxograma das medidas corretivas aplicadas ao banco de dados.....	39
Figura 3.2 – Base cartográfica composta pelos limites interestaduais de Minas Gerais. ....	41
Figura 3.3 – Composição de uma camada <i>raster</i> (Imagem obtida via documentação do QGIS). .....	42
Figura 3.4 – Fundamentos do método de interpolação IDW (Imagem obtida via documentação do QGIS). ....	43
Figura 3.5 – Fundamentos do método de interpolação TIN (Imagem obtida via documentação do QGIS). ....	43
Figura 3.6 – Posição geográfica de cada estação meteorológica considerada.....	46
Figura 3.7 – Mapa de isopletras considerando um espaçamento de 2 m/s. ....	47
Figura 3.8 – Mapa de isopletras considerando um espaçamento de 5 m/s. ....	47
Figura 3.9 – Mapa de calor de velocidade básica do estado de Minas Gerais. ....	48
Figura 4.1 – Geometria e dimensões gerais da torre em análise [m] (Adaptado de Carvalho (2010)). ....	51
Figura 4.2 – Esquema do trecho da LT com vãos adjacentes nivelados e de comprimento igual a 400 metros (sem escala).....	52
Figura 4.3 – Esquema do trecho da LT com vãos adjacentes nivelados e de comprimentos iguais a 400 e a 800 metros, respectivamente (sem escala), avaliados para as velocidades de 30, 35 e 40 m/s.....	53
Figura 4.4 – Esquema do trecho da LT com vãos adjacentes desnivelados (acima da torre em estudo) e de comprimento igual a 400 metros, (sem escala). ....	54



Figura 4.5 – Esquema do trecho da LT com vãos adjacentes desnivelados (abaixo da torre em estudo) e de comprimento igual a 400 metros, (sem escala). .....	55
Figura 4.6 – Esquema do trecho da LT com vãos adjacentes desnivelados (menor vão acima e maior vão abaixo da torre em estudo) e de comprimento igual a 400 e a 800 metros, respectivamente (sem escala). .....	55
Figura 4.7 – Esquema do trecho da LT com vãos adjacentes desnivelados (menor vão abaixo e maior vão acima da torre em estudo) e de comprimento igual a 400 e a 800 metros, respectivamente (sem escala). .....	56
Figura 4.8 – Modelo tridimensional da torre de transmissão. ....	57
Figura 4.9 – (a) Elemento BEAM 188; (b) Elemento LINK180 (ANSYS Inc, 2017). ....	58
Figura 4.10 – Condições de contorno aplicadas às bases da torre. ....	59
Figura 4.11 – Modelo tridimensional completo. ....	63
Figura 4.12 – Modelagem da cadeia de isoladores inclinada para o vão de menor comprimento. ....	64
Figura 4.13 – Reações aplicadas na extremidade dos cabos do trecho estudado. ....	66
Figura 4.14 – Modelo numérico dos cabos com a força do vento atuando na direção positiva do eixo Z. ....	67
Figura 4.15 – Numeração das bases da torre. ....	69
Figura 4.16 – Reações de apoio transversais e longitudinais que aparecem nos nós da base do modelo. ....	70
Figura 4.17 – Forças normais no modelo simplificado com peso próprio e vento sem a consideração das não linearidades geométricas [N]. ....	71
Figura 4.18 – Forças normais no modelo simplificado com peso próprio e vento com a consideração das não linearidades geométricas [N]. ....	72
Figura 4.19 – Deslocamentos laterais (z) com a atuação do peso próprio e vento com a consideração das não linearidades geométricas [mm]. ....	72
Figura 4.20 – Forças normais na torre do modelo simplificado (vãos adjacentes iguais a 400 e 800 metros) devidas às forças de peso próprio e vento (35 m/s) conforme a IEC 60826 [N].	74
Figura 4.21 – Forças normais na torre do modelo completo (vãos adjacentes iguais a 400 e 800 metros) devidas às forças de peso próprio e de vento (35 m/s) conforme a IEC 60826 [N]. .....	74
Figura 4.22 – Configuração deslocada da estrutura, das cadeias de isoladores e dos cabos (vista em planta). ....	79

Figura 4.23 – Forças normais na torre do modelo completo (vãos adjacentes iguais a 400 e 800 metros) devidas às forças de peso próprio e de vento a 30 m/s.....	81
Figura 4.24 – Forças normais na torre do modelo completo (vãos adjacentes iguais a 400 e 800 metros) devidas às forças de peso próprio e de vento a 40 m/s.....	82
Figura 4.25 – Forças axiais nos elementos da torre e nos cabos na configuração deformada [N] para o caso de vão adjacentes iguais a 400 metros e velocidade do vento igual a 35 m/s. ....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Definições dos tipos de distribuição Generalizada de Valores Extremos.....	9
Tabela 2.2 – Valores iniciais dos parâmetros para cada tipo de distribuição GVE .....	14
Tabela 2.3 – Pontos percentuais $\chi\alpha$ , 12 da distribuição qui-quadrado para 1 grau de liberdade (Adaptado de Montgomery et al. (2010)). .....	16
Tabela 2.4 – Fator de correção da massa específica do ar (Adaptado da IEC 60826:2017)....	19
Tabela 2.5 – Classificação das categorias de terrenos (Adaptado da IEC 60826:2017).....	20
Tabela 3.1 – Códigos EPSG referentes aos SGRs. ....	40
Tabela 4.1 – Análises considerando vãos nivelados e velocidade básica do vento igual a 35 m/s.....	52
Tabela 4.2 – Análises considerando vãos nivelados e velocidade básica do vento igual a 30, 35 e 40 m/s. ....	53
Tabela 4.3 – Análises considerando vãos desnivelados e velocidade básica do vento igual a 35 m/s.....	54
Tabela 4.4 – Forças verticais na torre devidas ao peso próprio dos seus elementos considerando as torres adjacentes niveladas [N].....	60
Tabela 4.5 – Forças verticais na torre devidas ao peso próprio dos seus elementos considerando as torres adjacentes desniveladas [N]. ....	61
Tabela 4.6 – Forças transversais aplicadas na torre devidas à ação do vento nos cabos [N]...	62
Tabela 4.7 – Tração inicial ( $T_0$ ) [N] aplicada aos modelos para cada comprimento de vão...	65
Tabela 4.8 – Forças devidas ao vento aplicadas aos nós dos $n$ elementos que compõem os cabos.....	67
Tabela 4.9 – Forças normais máximas nas bases dos modelos completo e simplificado. ....	76
Tabela 4.10 – Reações verticais máximas nas bases dos modelos completo e simplificado...	77
Tabela 4.11 – Momento transversal nas bases dos modelos completo e simplificado. ....	78
Tabela 4.12 – Momento longitudinal nas bases do modelo completo. ....	80
Tabela 4.13 – Forças normais máximas de compressão nos montantes do modelo completo para diferentes velocidades do vento [kN].....	82
Tabela 4.14 – Forças normais máximas de tração nos montantes do modelo completo conforme velocidade do vento [kN].....	83

Tabela 4.15 – Reações verticais máximas de compressão nas bases dos modelos completo e simplificado conforme velocidade do vento [kN].	83
Tabela 4.16 – Reações verticais máximas de tração nas bases dos modelos completo e simplificado conforme velocidade do vento [kN].	84
Tabela 4.17 – Momento transversal nas bases dos modelos completo e simplificado conforme velocidade do vento [kN.m].	85
Tabela 4.18 – Deslocamento longitudinal médio dos isoladores [cm].	86
Tabela 4.19 – Momento longitudinal nas bases do modelo completo conforme velocidade do vento [kN.m].	86
Tabela 4.20 – Forças axiais máximas nas bases dos modelos completo e simplificado para diferentes combinações de desnível.	87
Tabela 4.21 – Comparação das forças axiais dos modelos com desnível com os valores de referência (0%).	88
Tabela 4.22 – Reações verticais máximas nas bases dos modelos completo e simplificado para diferentes combinações de desnível.	89
Tabela 4.23 – Comparação das reações de apoio verticais dos modelos com desnível com os valores de referência (0%).	90
Tabela 4.24 – Momentos nas bases dos modelos completo e simplificado para diferentes combinações de desnível.	91
Tabela 4.25 – Deslocamento médio dos isoladores e momento longitudinal nas bases do modelo completo.	92
Tabela A.1 – Estações desconsideradas no cálculo das isopletras.	102
Tabela A.2 – Estações excluídas por apresentarem valor extremo inferior a 28 m/s.	105
Tabela A.3 – Estações meteorológicas consideradas na determinação do mapa de velocidades.	106

# SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO .....	v
<i>ABSTRACT</i> .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	x
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xvii
1. Introdução.....	1
1.1 Aspectos gerais.....	1
1.2 Objetivos .....	4
1.3 Justificativa.....	4
1.4 Metodologia geral.....	5
1.5 Organização do trabalho.....	7
2. Revisão Bibliográfica .....	8
2.1 Generalidades .....	8
2.2 Teoria Generalizada de Valores Extremos .....	8
2.2.1 Hipótese de independência dos dados .....	11
2.2.2 Estimção dos parâmetros da distribuição GVE.....	12
2.2.3 Seleção da distribuição de valores extremos .....	15
2.2.4 Diagnóstico do ajuste da distribuição GVE.....	16
2.3 Caracterização fenológica do vento.....	17
2.3.1 Características gerais do vento .....	17
2.3.2 Determinação da ação do vento segundo a IEC 60826:2017.....	18
2.4 Sistema de observações meteorológicas do Brasil .....	22
2.4.1 Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.....	23
2.4.2 Instituto de Controle do Espaço Aéreo – ICEA.....	24
2.4.3 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE .....	25
2.5 Análise não linear de estruturas.....	26
2.5.1 Histórico de análises em estruturas de linhas de transmissão.....	26
2.5.2 Estudo analítico do comportamento mecânico dos cabos.....	29
2.5.3 Determinação das flechas iniciais dos cabos .....	31
2.5.4 Análise não linear de estruturas com grandes gradientes de deslocamentos .....	33

2.5.5	Análise de linhas de transmissão via método dos elementos finitos .....	35
3.	Definição do Mapa de Velocidades Básicas do Vento Para o Estado de Minas Gerais.....	37
3.1	Metodologia .....	37
3.1.1	Aquisição dos dados de velocidade do vento .....	37
3.1.2	Medidas corretivas dos dados de velocidade do vento e aplicação da teoria GVE .....	38
3.1.3	Interpolação espacial no pacote computacional Quantum GIS .....	39
3.2	Resultados e discussões.....	44
4.	Análise Não Linear Geométrica de uma Estrutura do Tipo Suspensão .....	50
4.1	Metodologia .....	50
4.1.1	Avaliação da influência do comprimento dos vãos .....	52
4.1.2	Avaliação da influência da velocidade média do vento.....	53
4.1.3	Avaliação da influência do desnível das torres adjacentes.....	53
4.1.4	Modelagem da estrutura treliçada em elementos finitos .....	56
4.1.5	Modelo simplificado: somente a estrutura da torre de transmissão.....	57
4.1.6	Modelo completo: torre, cadeia de isoladores e cabos .....	62
4.1.7	Obtenção das reações nas bases da estrutura.....	67
4.2	Resultados e discussões.....	70
4.2.1	Avaliação da deslocabilidade da estrutura de suporte .....	70
4.2.2	Avaliação da influência do comprimento dos vãos .....	73
4.2.3	Avaliação da influência da velocidade média do vento.....	81
4.2.4	Avaliação da influência do desnível das torres adjacentes.....	87
5.	Considerações Finais.....	93
5.1	Generalidades.....	93
5.2	Mapa de velocidades básicas do vento para o estado de Minas Gerais.....	93
5.3	Comportamento não linear geométrico de estruturas de LTs.....	94
5.4	Recomendações práticas para o dimensionamento de estruturas de LTs frente à análise dos resultados obtidos.....	95
5.5	Principais conclusões .....	95
5.6	Sugestões para trabalhos futuros .....	96
6.	Referências Bibliográficas .....	97
A.	Anexo A .....	102

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Letras romanas

$A$	Distância horizontal entre duas torres genéricas
$A_c$	Força devida ao vento sobre os cabos
$A_i$	Força devida ao vento sobre os isoladores
$A_t$	Força devida ao vento sobre o centro de gravidade de um painel composto por diversos elementos estruturais
$C_{1,cat}$	Coeficiente de caracterização da catenária
$C_1$	Coeficiente dado por: $C_1 = T_{o1}/p$
$C_2$	Coeficiente dado por: $C_2 = T_{o2}/p$
$C_{XC}$	Coeficiente de arrasto dos cabos
$C_{x,i}$	Coeficiente de arrasto dos isoladores
$C_{xt1}$ e $C_{xt2}$	Coeficientes de arrasto correspondentes às faces 1 (paralela ao eixo da linha) e 2 (transversal ao eixo da linha), respectivamente
$d$	Diâmetro do cabo
$d_{base}$	Distância entre duas bases da torre
$E$	Módulo de elasticidade longitudinal do cabo
$E(R)$	Esperança da amostra $R$
$\hat{E}(R)$	Estimativa de $E(R)$
$\bar{E}$	Tensor de Green-Lagrange
$\bar{e}$	Tensor de Almansi
$[F]$	Tensor gradiente de deformações
$F(x)$	Função de distribuição acumulada de probabilidade
$F_{l,CC}$ e $F_{l,CG}$	Força nodal equivalente longitudinal devida ao desequilíbrio dos cabos aplicada ao ponto de fixação do cabo condutor e do cabo guarda, respectivamente
$F_{v,CC}$ e $F_{v,CG}$	Força nodal equivalente transversal devida ao vento nos cabos aplicada ao ponto de fixação do cabo condutor e do cabo guarda, respectivamente
$f(x)$	Função densidade de probabilidade
$f_o$	Flecha máxima da catenária
$f_s$	Distância vertical máxima da linha reta que une os vértices da catenária à corda do cabo
$G_C$	Fator relacionado ao vento combinado para condutores
$G_L$	Fator relacionado ao vão
$G_t$	Fator combinado do vento

$H_0$	Hipótese nula
$h$	Desnível entre os suportes
$h_{CG}$	Altura do ponto de fixação do cabo guarda
$h_{CCI}$	Altura do ponto de fixação do cabo condutor $i$
$I(x_i)$	Função indicadora
$[I]$	Matriz identidade
$J$	Jacobiano
$K_R$	Fator de multiplicação para correção da rugosidade do terreno
$L_1$	Comprimento inicial do cabo, correspondente à $t_1$
$L_2$	Comprimento final do cabo, correspondente à $t_2$
$L$	Vão de vento
$L_{des}$	Comprimento do cabo desenvolvido para suportes desnivelados
$L(\mathbf{x} \boldsymbol{\theta})$	Função de verossimilhança
$l(\mathbf{x} \boldsymbol{\theta})$	Logaritmo de $L(\mathbf{x} \boldsymbol{\theta})$
$M_d$	Mediana dos dados
$M_t$	Momento transversal (em torno do eixo X)
$M_l$	Momento longitudinal ( $M_l$ ) (em torno do eixo Z)
$N_1$ e $N_2$	Número total de ocorrências de $x_i > M_d$ e $x_i < M_d$
$n$	Tamanho de dados de uma amostra aleatória
$n_1$ e $n_2$	Valores observados na amostra com $N_1$ e $N_2$ ocorrências
$p_1$ e $p_2$	Pesos virtuais do estado de referência e do novo estado
$p(\mathbf{x} \boldsymbol{\theta})$	Distribuição de probabilidade
$p_{cabo}$	Peso próprio do cabo por unidade de comprimento
$q_o$	Pressão dinâmica de referência do vento
$q_r$	Quartil da distribuição normal padrão de ordem $\alpha/2$
$R$	Amostra de dados
$R_x, R_y$ e $R_z$	Reações das bases da torre nas direções X, Y e Z, respectivamente
$r$	Sequência de valores observados em uma amostra
$r_1$ e $r_2$	Pares de valores críticos exatos ao nível de significância $\alpha$
$S$	Área da seção transversal do cabo
$S_i$	Área do isolador projetado horizontalmente no plano vertical paralelo ao eixo do isolador
$S_{t1}$	Área total da superfície projetada normal à face 1 (paralela ao eixo da linha) do painel da torre
$S_{t2}$	Área total da superfície projetada normal à face 2 (transversal ao eixo da linha) do painel da torre
$T$	Período de recorrência
$T_{LR}$	Estatística de razão de verossimilhança
$T_{LR}^*$	Estatística de razão de verossimilhança modificada



$T_o$	Componente horizontal de tração axial num cabo
$T_{o1}$	Tração inicial no cabo, correspondente à $t_1$
$T_{o2}$	Tração final no cabo, correspondente à $t_2$
$t_1$	Temperatura inicial
$t_2$	Temperatura final
$t$	Período de integração
$Var(R)$	Variância da amostra $R$
$V\hat{a}r(R)$	Estimativa de $Var(R)$
$V_A$ e $V_B$	Reação vertical devido ao peso próprio para os suportes superior e inferior
$V_R$	Velocidade de referência do vento para um período de recorrência $T$ , com intervalo de integração de 10 minutos, a 10 metros acima do terreno
$V_{RB}$	Velocidade de referência do vento para terreno de rugosidade B
$V_{x,t}$	Velocidade máxima do vento ao longo de $t$ segundos
$V_{x,10min}$	Velocidade média do vento ao longo de 10 minutos
$x$	Variável aleatória
$x_o$	Distância horizontal do vértice da catenária
$x_p$	Distância horizontal de um ponto P qualquer a um ponto de suspensão de um cabo
$y_c$	Distância vertical de um ponto P qualquer a um ponto de suspensão de um cabo

### Letras gregas

$\alpha$	Nível de significância
$\alpha_e$	Coefficiente de dilatação térmica linear do elemento
$\theta$	Ângulo de incidência da direção do vento com a direção perpendicular da face 1 (paralela ao eixo da linha) do painel da torre no plano horizontal
$\boldsymbol{\theta}$	Vetor de parâmetros de verossimilhança
$\hat{\boldsymbol{\theta}}$	Vetor de estimadores de verossimilhança
$\Theta$	Espaço paramétrico do vetor $\boldsymbol{\theta}$
$\mu$	Parâmetro de locação
$\mu_{ar}$	Massa específica do ar
$\xi$	Parâmetro de forma
$\sigma$	Parâmetro de escala
$\tau_{ar}$	Fator de correção da massa específica do ar
$\omega$	Ângulo formado entre a direção de incidência do vento e o eixo longitudinal da linha de transmissão

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APDL	<i>ANSYS Programming Design Language</i>
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
ASTM	<i>American Section of the International Association for Testing Materials</i>
BDC	Banco de Dados Climatológicos
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CSV	<i>Comma Separated Values</i>
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
EDS	<i>Every Day Stress</i>
EPSG	<i>European Petroleum Survey Group</i>
FAB	Força Aérea Brasileira
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GVE	Generalizada de Valores Extremos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICEA	Instituto de Controle do Espaço Aéreo
IDW	<i>Inverse Distance Weighting</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ITRS	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
LTs	Linhas de Transmissão
MEF	Método dos elementos finitos
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
OSGeo	<i>Open Source Geospatial Foundation</i>
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
SAD	<i>South American Datum</i>
SGR	Sistema Geodésico de Referência
SISCEAB	Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro
TIN	<i>Triangulated Irregular Networks</i>
WGS	<i>World Geodetic System</i>



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Aspectos gerais

A crescente demanda de energia elétrica e a riqueza de recursos hídricos do Brasil indicam a necessidade da instalação de redes de distribuição de energia baseadas em linhas aéreas de transmissão (LTs), que são compostas, basicamente, por cabos (condutores e para-raios), torres e cadeias de isoladores. Segundo Luzardo (2015), sua função é transmitir a eletricidade gerada nas fontes de produção até o consumidor final através de uma rede de distribuição.

Com a modernidade observam-se estruturas mais arrojadas e esbeltas e, devido a essa tendência, o vento começa a se tornar mais relevante. Dentro desta classe de estruturas, existem aquelas que por natureza são muito leves, por serem de baixo custo, nas quais o vento tem importância primordial no dimensionamento.

Neste sentido, as alterações climáticas e as intervenções humanas na ocupação do solo (mudança da rugosidade superficial e/ou topografia) alteram substancialmente as velocidades do vento que devem ser utilizadas no projeto.

O desenvolvimento de projetos de LTs leva à necessidade de uma melhor caracterização regionalizada das ações climáticas. No Brasil, como as dimensões do território são continentais, os estudos são mais generalistas e podem apresentar resultados conservadores. Como a ideia é melhorar o projeto de estruturas, deve-se utilizar valores mais reais e representativos das ações climáticas.

Dentro deste contexto, o tema da segurança de estruturas metálicas merece atenção crescente por parte da comunidade técnica e científica, principalmente devido à ocorrência de acidentes graves nessas estruturas, cujas consequências podem exceder os custos de reconstrução. Nesta perspectiva, apontam-se como principais responsáveis pelo colapso as ações ocasionadas por

eventos meteorológicos, principalmente os relacionados com ventos de alta intensidade. Diversos autores desenvolveram trabalhos nos quais relatam o colapso de torres de sistemas de transmissão no Brasil e no mundo devido a estas ações, entre eles Monk (1980), Blessmann (2001), Klein (2004) e Rippel (2005).

A interrupção do fornecimento de energia pode gerar graves problemas em alguns setores específicos da sociedade, como os mencionados por Carvalho (2010): desligamento de equipamentos hospitalares de funcionamento contínuo, desativação de alarmes e falta de iluminação nas cidades, semáforos inoperantes, parada repentina de elevadores entre andares, desligamento de equipamentos elétricos industriais, além dos custos gerados pela reparação dos danos causados pelo vento na LT e dos custos de compra de energia de outras distribuidoras para repor temporariamente o fornecimento de energia.

Diante destes fatos, justifica-se a necessidade de que a comunidade científica desenvolva ferramentas que atualizem automaticamente os bancos de velocidade de vento, os quais são utilizados para se estimar bem as forças devidas ao vento. Além disso, as estruturas de LTs devem ser projetadas de forma a resistir aos esforços aos quais serão submetidas, com o intuito de não interromper o processo contínuo de fornecimento de energia elétrica.

As normas brasileiras aplicáveis ao cálculo de forças devidas ao vento em estruturas, ABNT NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações e ABNT NBR 5422:1985 – Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, apresentam a velocidade básica do vento em mapas de isopleias, que devem ser consultados para a elaboração de projetos estruturais. No entanto, estes mapas são uma fonte de incerteza associada ao projeto de estruturas no Brasil, pois a base de dados utilizada para determiná-los é muito antiga e desatualizada. Vários trabalhos na literatura apontam para a necessidade de atualização e revisão desses procedimentos normativos, como Carvalho (2010), Beck e Corrêa (2013), Carvalho (2015), Vallis *et al.* (2017), Oliveira (2019) e Reis *et al.* (2019).

De maneira geral, os mapas de isopleias são determinados a partir de um banco de dados com as velocidades de vento das principais redes meteorológicas do território em estudo. Este banco de dados deve ser tratado para obter séries consistentes de velocidades máximas anuais e, após o tratamento, devem ser estimados os valores extremos. Pode-se empregar métodos estatísticos para a determinação dos valores extremos de vento, porém é comumente

observada nas normas, como na europeia IEC 60826:2017 – *Overhead transmission lines – Design criteria*, a utilização da teoria Generalizada dos Valores Extremos (GVE). Essa teoria é muito utilizada para se estimar várias grandezas de engenharia, tanto em problemas univariados, como dados de precipitação, quanto em multivariados, como dados de altura de onda e velocidade do vento na indústria offshore.

Ressalta-se que uma ferramenta que utiliza a teoria GVE poderia ser exagerada para tratar dados de todo o Brasil, que é muito extenso, mas para uma macrorregião isso é totalmente apropriado. Além disso, a IEC 60826:2017 apresenta uma metodologia para calcular as velocidades, porém é mais comum que o projetista utilize apenas os mapas das normas, que podem estar ultrapassadas.

Nesse aspecto, os ganhos financeiros que podem ser proporcionados pelo tratamento adequado dos dados têm grande relevância, os quais estão diretamente relacionados com a correta estimativa das diversas variáveis envolvidas em um projeto de estruturas de LTs, como os dados de velocidade do vento e ângulo de incidência, temperaturas mínima, média e máxima, entre outras. Além dos ganhos associados ao projeto, outra vantagem está relacionada à avaliação mais precisa do potencial eólico de uma região, que permite às indústrias planejar melhor a locação de parques eólicos e a instalação de seus aerogeradores. Destaca-se também que um banco de dados confiável auxilia as empresas em seu planejamento estratégico, gerenciamento do risco de sua infraestrutura e na tomada de decisões rápidas e assertivas quando acidentes são registrados, otimizando custos envolvidos em suas operações

Em relação ao projeto de LTs, outro fator relevante acerca da IEC 60826:2017 e de outros procedimentos normativos, como a ASCE 10-15 – *Design of Latticed Steel Transmission Structures*, é que eles desconsideram o comportamento altamente linear dos cabos, que estão susceptíveis aos efeitos das não linearidades geométricas sobretudo quando submetidos à ação do vento. Em outras palavras, eles se baseiam em uma análise estática equivalente, porém já foram propostas pela comunidade científica análises mais representativas de uma LT.

Neste cenário, este trabalho está vinculado ao projeto de P&D D0592 – “Desenvolvimento de estruturas para linhas de distribuição aéreas específicas, otimizadas para cada macrorregião de Minas Gerais, de acordo com a norma IEC 60826”, uma parceria entre a Universidade Federal

de Minas Gerais (UFMG) e a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Sendo assim, uma equipe esteve envolvida em seu desenvolvimento, sobretudo no que diz respeito ao estudo da climatologia do vento e à determinação de um mapa de velocidades para o estado de Minas Gerais. Nestas atividades, os membros da equipe que contribuíram diretamente para este trabalho foram o doutorando Pedro Henrique da Cruz Santos, no desenvolvimento de códigos para tratamento, correções e aplicação de testes estatísticos e da teoria GVE aos dados de velocidade do vento, e a aluna de graduação em Engenharia Civil Carolina de Oliveira Soares, na aquisição dos dados das estações meteorológicas e em seu tratamento inicial. Portanto, fica a eles autorizada a reprodução dos resultados deste trabalho.

## **1.2 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo geral estabelecer critérios de projeto para o desenvolvimento de estruturas de LTs localizadas em Minas Gerais. Para alcançar o objetivo geral, objetivos específicos foram definidos, a saber:

- determinar um mapa de velocidades básicas do vento atualizado para o estado de Minas Gerais, cujo banco de dados possa ser constantemente incrementado e atualizado com novos dados;
- avaliar o comportamento não linear geométrico das estruturas frequentemente empregadas em LTs da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), considerando modelos numéricos em elementos finitos que contemplem a torre de maneira isolada e também o sistema completo (torre, cabos e cadeias de isoladores);
- estabelecer critérios práticos a serem empregados por projetistas no dimensionamento de estruturas de suspensão de LTs.

## **1.3 Justificativa**

As normas brasileiras aplicáveis à determinação do vento incidente em estruturas, ABNT NBR 6123:1988 e ABNT NBR 5422:1985, apresentam mapas de isopletas que foram propostos com base no banco de dados disponível em 1977. Considerando a época em que estes procedimentos se tornaram vigentes no país (final da década de 1980) e que até então eles não foram revisados, entende-se que seus mapas de velocidades podem estar desatualizados. Ademais, levando em conta que alguns projetos realizados em conformidade com estas normas conduziram a colapsos estruturais, esta afirmação se torna ainda mais

consistente. Com o presente trabalho, pretende-se apresentar um mapa de velocidades atualizado para o estado de Minas Gerais, baseado na norma europeia IEC 60826:2017 e em um banco de dados muito mais amplo do que o disponível em 1977. A utilização deste mapa permitirá desenvolver estruturas com maior nível de confiabilidade para todas as regiões do estado.

Além disso, os procedimentos normativos para a determinação do vento sobre os cabos são baseados em uma análise estática equivalente, ou seja, considera-se que o movimento dos cabos não produz forças de inércia significativas no sistema, levando-se em conta somente as ações estáticas (Oliveira, 2019). Todavia, acidentes envolvendo LTs podem ocorrer com velocidades de vento inferiores às máximas recomendadas nas normas de projeto, inferindo-se que tais problemas podem estar associados aos efeitos da não linearidade geométrica do sistema (Carvalho *et al.*, 2018). Assim, este trabalho propõe também uma modelagem numérica mais representativa de uma estrutura de suspensão, segundo a qual é possível analisar a influência das não linearidades geométricas no sistema, devido ao novo posicionamento das cargas no sistema estrutural deformado. Serão avaliados diferentes comprimentos de cabos, velocidades médias do vento e desníveis entre torres adjacentes, sendo que o entendimento do comportamento destas estruturas em face a todas essas variações permitirá identificar alguns padrões e verificar até quais limites as simplificações propostas pelas normas de referência são aceitáveis.

É importante ressaltar que os cabos têm um comportamento altamente não linear, sendo assim, os efeitos destes elementos sobre a estrutura suporte são menos previsíveis, constituindo uma fonte de incerteza no projeto de LTs (Oliveira, 2019). Além disso, Carvalho (2010) concluiu que as estruturas suportes de suspensão típicas (alturas totais inferiores a 30 metros) são muito rígidas e pouco susceptíveis aos efeitos das não linearidades geométricas. Como o estudo destes efeitos é um dos focos do presente trabalho e que estão predominantemente presentes nos cabos, as forças de arrasto na direção do vento serão consideradas atuantes somente nos cabos.

## **1.4 Metodologia geral**

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, as seguintes etapas foram desenvolvidas:

- I. Determinação de um mapa de velocidades para o estado de Minas Gerais



- a) estudo da climatologia do vento no Brasil de acordo com as normas vigentes e com trabalhos encontrados na literatura;
  - b) construção de um banco de dados com as velocidades do vento das principais redes meteorológicas nacionais;
  - c) tratamento estatístico do banco de dados e obtenção de séries consistentes de velocidades máximas anuais;
  - d) aplicação da teoria Generalizada de Valores Extremos (GVE) às séries de velocidades máximas anuais e obtenção dos valores extremos de velocidade do vento para todas as estações meteorológicas selecionadas;
  - e) interpolação espacial e determinação do mapa de velocidades básicas para o estado de Minas Gerais.
- II. Avaliação da influência das não linearidades geométricas em estruturas de linha de transmissão
- a) definição de uma estrutura do tipo suspensão frequentemente empregada em LTs da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG);
  - b) construção de dois modelos numéricos em elementos finitos representativos da estrutura, a saber:
    - (i) modelo simplificado: contém somente a torre. A utilização deste modelo visa avaliar os esforços solicitantes nos elementos estruturais provocados pelas ações do vento segundo a análise estática equivalente sugerida pela norma IEC 60826:2017;
    - (ii) modelo completo: contém a torre, os cabos e as cadeias de isoladores. A utilização deste modelo visa analisar a influência das não linearidades geométricas por meio da aplicação das forças de peso próprio dos cabos e de vento nos cabos distribuídas ao longo de seu comprimento.
  - c) comparação dos resultados do modelo completo com os obtidos no modelo simplificado para diversas configurações de comprimentos de cabos, velocidades médias do vento (extraídas do mapa proposto neste mesmo trabalho) e desníveis entre torres adjacentes, podendo-se verificar a influência da modelagem completa do sistema no dimensionamento da torre de transmissão;

- d) proposta de recomendações práticas (ou critérios) a serem empregadas por projetistas no dimensionamento de estruturas de suspensão de LTs.

## **1.5 Organização do trabalho**

Este trabalho está organizado em capítulos, sendo: o Capítulo 2 composto pelo estudo teórico da teoria Generalizada de Valores Extremos (GVE), da caracterização fenológica do vento, dos principais sistemas de observações meteorológicas do Brasil e da análise não linear de estruturas frequentemente empregadas em LTs; no Capítulo 3 apresentada a metodologia para determinação do mapa de velocidades básicas do vento do estado de Minas Gerais, os resultados obtidos e as considerações a seu respeito; no Capítulo 4 apresentada a metodologia para avaliação da influência das não linearidades geométricas em estruturas de LTs, os resultados alcançados e respectivas discussões; no Capítulo 5 apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

# 2

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Generalidades

Conforme mencionado anteriormente, é comumente recomendada nas normas aplicáveis ao cálculo de forças devidas ao vento em estruturas, como na norma IEC 60826:2017, a utilização da teoria Generalizada dos Valores Extremos (GVE) para determinar a velocidade básica do vento.

Os modelos probabilísticos baseados na teoria GVE visam prever, a partir de dados máximos registrados num período de tempo relativamente curto, os valores extremos de uma variável aleatória para um determinado período de retorno. De acordo com Bautista (2002), no caso específico das velocidades máximas do vento, esses modelos são fundamentais nos projetos de edificações e, geralmente, consideram um período de retorno mínimo igual a 50 anos. Tal período corresponde ao intervalo de tempo em que o valor extremo da velocidade do vento pode ser excedido apenas uma vez.

As distribuições GVE, no cálculo probabilístico da ocorrência de velocidades máximas do vento, devem ser realizadas após análise exploratória do banco de dados obtido das principais redes de observações meteorológicas da região em estudo. Em outras palavras, os dados anemométricos disponibilizados devem ser analisados, processados e validados mediante uma rotina de análises que consiste, essencialmente, em adquirir os dados brutos, aplicar medidas corretivas e a estatística descritiva a esses dados.

### 2.2 Teoria Generalizada de Valores Extremos

Um artigo decisivo para o avanço dos estudos referentes às distribuições assintóticas de valores extremos foi o de Fréchet (1927). No ano seguinte, Fisher e Tippett (1928) publicaram os resultados de uma investigação independente sobre esse mesmo assunto. Eles concluíram

que as caudas da distribuição GVE seguíam um dos três tipos de distribuições: Gumbel (Tipo I), Fréchet (Tipo II) ou Weibull (Tipo III). Os estudos teóricos entre as décadas de 1920 a 1930 foram seguidos por diversos artigos, com aplicações práticas da estatística de valores extremos, em problemas relacionados ao tempo de vida humana, às emissões radioativas, ao mercado financeiro, às variáveis meteorológicas, entre outros.

A reformulação da teoria dos Valores Extremos proposta por Fisher e Tippett (1928) combinou os três tipos de distribuição em uma única família, definida como distribuição Generalizada de Valores Extremos (GVE), cuja função de distribuição acumulada de probabilidade ( $F(x)$ ) é dada pela seguinte equação:

$$F(x) = \exp\left\{-\left[1 + \xi \cdot \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{1}{\xi}}\right\} \quad (2.1)$$

Onde  $x$  é a variável aleatória,  $\xi$  é o parâmetro de forma,  $\mu$  é o parâmetro de locação e  $\sigma$  é o parâmetro de escala. A função descrita na Equação (2.1) é definida no conjunto  $\{x: x > \mu - \sigma/\xi\}$ , em que os parâmetros satisfazem  $-\infty < \mu < \infty$ ,  $\sigma > 0$  e  $-\infty < \xi < \infty$ .

Nos casos em que  $\xi \rightarrow 0$ ,  $\xi > 0$  e  $\xi < 0$ , a distribuição GVE corresponde, respectivamente, às famílias de distribuição do Tipo I, II e III. Dessa forma é possível notar que os três tipos de distribuição são casos particulares da distribuição GVE e são obtidos em função do domínio do parâmetro de forma ( $\xi$ ), como se verifica na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Definições dos tipos de distribuição Generalizada de Valores Extremos

Tipo de Distribuição	Parâmetro de forma ( $\xi$ )	Intervalo de definição
Gumbel (Tipo I)	$\xi \rightarrow 0$	$-\infty < x < +\infty$
Fréchet (Tipo II)	$\xi > 0$	$-\infty < x < \mu - \sigma/\xi$
Weibull (Tipo III)	$\xi < 0$	$\mu - \sigma/\xi < x < +\infty$

No caso particular em que  $\xi \rightarrow 0$ , a função de distribuição acumulada de Gumbel é definida em  $-\infty < x < \infty$ , e os parâmetros de locação e escala satisfazem  $-\infty < \mu < \infty$  e  $\sigma > 0$ .

De acordo com Coles (2001), a unificação das três famílias originais das distribuições de valores extremos simplifica bastante a implementação estatística. Por meio da inferência do parâmetro de forma, torna-se possível verificar e determinar qual é o tipo de distribuição que

possui melhor ajuste ao o conjunto de dados da variável aleatória. Logo, não há necessidade de fazer levantamentos a priori sobre qual tipo de família adotar para os valores extremos.

Além disso, a velocidade do vento é tradicionalmente modelada como um processo estocástico estacionário, caracterizado por sua função densidade de probabilidade ( $f(x)$ ) e por sua função de autocorrelação (ACF). A função  $f(x)$  descreve todos os valores e probabilidades possíveis de que a velocidade do vento pode tomar dentro de um determinado intervalo. A função ACF indica como a velocidade do vento muda com o tempo, ou seja, dá uma medida da relação entre o valor atual da velocidade do vento e os valores já registrados (Jónsdóttir e Milano, 2019). Em análises estacionárias com dados realistas, basta considerar a função densidade de probabilidade. No entanto, quando se analisa dados de vento de séries sintéticas, o modelo utilizado também deve considerar a função de autocorrelação (Villanueva *et al.*, 2011).

Se a função de distribuição acumulada de probabilidade ( $F$ ) é diferenciável, então é possível definir a função densidade de probabilidade ( $f(x)$ ) da variável aleatória derivando a função da Equação (2.1) em relação a  $x$ , conforme a equação a seguir:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \cdot \left[1 + \xi \cdot \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-\left(\frac{1+\xi}{\xi}\right)} \cdot \exp\left\{-\left[1 + \xi \cdot \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]^{\frac{1}{\xi}}\right\} \quad (2.2)$$

As características e as propriedades dos tipos de distribuição GVE são determinadas pelas caudas extremas (inferior ou superior) da distribuição. As caudas da distribuição de Weibull seguem uma distribuição uniforme, já as de Gumbel expressam uma distribuição exponencial, gama, normal ou log-normal, e as da distribuição de Fréchet seguem uma distribuição de Cauchy, Pareto ou t-Student.

Nas pesquisas mais recentes relacionadas aos estudos do comportamento dos ventos, a distribuição mais utilizada é a de Gumbel. Ela é intermediária entre as outras duas distribuições e em diversos estudos desenvolvidos sobre o comportamento dos ventos é a que possui melhor ajuste aos dados da variável aleatória (Beck e Corrêa, 2013).

### 2.2.1 Hipótese de independência dos dados

A primeira etapa para a determinação dos valores extremos é a verificação da hipótese de independência dos dados observados, o que pode ser feito por meio do teste de Chorrilho (*run test*). Este teste é útil na detecção de desvios na aleatoriedade de uma sequência de medições quantitativas no tempo, ocasionadas por tendências ou periodicidade. De acordo com Silva (2008), o teste consiste em, inicialmente, definir uma sequência dicotômica de tamanho  $n$ , a partir da amostra aleatória  $x_1, x_2, \dots, x_n$  aplicando-se a cada  $x_i$  a função indicadora  $I(x_i)$  e se omitindo os casos em que  $x_i = M_d$ , sendo  $M_d$  a mediana dos dados.

O valor da mediana ( $M_d$ ) é obtido pela Equação (2.3) e a função indicadora ( $I(x_i)$ ), com  $i = 1, 2, \dots, n$ , pela Equação (2.4):

$$\begin{cases} M_d = x_{(n+1)/2}, \text{ se } n \text{ for ímpar} \\ M_d = \frac{x_{n/2} + x_{(n/2)+1}}{2}, \text{ se } n \text{ for par} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$I(x_i) = \begin{cases} 1, \text{ se } x_i > M_d \\ 0, \text{ se } x_i < M_d \end{cases} \quad (2.4)$$

Pela Equação (2.4) são geradas sequências de zeros e uns ao longo da amostra  $R$ , sendo  $r$  os valores observados, para os quais é testada a aleatoriedade dos dados. Segundo Bautista (2002), as variáveis aleatórias  $N_1$  e  $N_2$  são definidas como o número total de ocorrências de  $x_i > M_d$  e  $x_i < M_d$ , respectivamente, e seus valores observados são designados como  $n_1$  e  $n_2$ .

Segundo o procedimento adotado por Silva (2008), para  $n_1 < 30$  ou  $n_2 < 30$ , são definidos pares de valores críticos exatos ( $r_1$  e  $r_2$ ) ao nível de significância  $\alpha$ . Dessa forma, a hipótese nula ( $H_0$ ) é rejeitada se  $r \leq r_1$  ou  $r \leq r_2$ . No caso em que  $n_1 \geq 30$  ou  $n_2 \geq 30$ , sob a hipótese nula de independência, tem-se que  $R$  segue assintoticamente uma distribuição normal com esperança ( $E(R)$ ) e variância ( $Var(R)$ ) dadas pelas formulações a seguir:

$$E(R) = \frac{2 \cdot N_1 \cdot N_2}{N} + 1 \quad (2.5)$$

$$Var(R) = \frac{2 \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot (2 \cdot N_1 \cdot N_2 - n)}{n^2 \cdot (n - 1)} \quad (2.6)$$

As estimativas da esperança ( $\hat{E}(R)$ ) e da variância ( $V\hat{a}r(R)$ ) podem ser obtidas por:

$$\hat{E}(R) = \frac{2 \cdot n_1 \cdot n_2}{n} + 1 \quad (2.7)$$

$$V\hat{a}r(R) = \frac{2 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot (2 \cdot n_1 \cdot n_2 - n)}{n^2 \cdot (n - 1)} \quad (2.8)$$

Vale ressaltar que, sob a hipótese de uma sequência aleatória, Zar *et al.* (1999) construíram uma tabela utilizando os procedimentos descritos por Swed *et al.* (1943) e Brownlee (1965), que contém os pares de valores críticos, para  $n_1 = 30$  e  $n_2 = 30$  a um determinado nível de significância. Em suma, os valores críticos definem os limites da região de não rejeição da hipótese de aleatoriedade para um determinado número de sequências. Assim, essa hipótese é rejeitada se as observações da sequência estiverem fora desse intervalo.

Para efetuar o teste do Chorrilho, deve-se calcular a mediana ( $M_d$ ) da amostra de velocidades máximas do vento ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ), obter uma sequência dicotômica dessa mesma amostra ( $I(x_1), \dots, I(x_n)$ ), além de  $n_1, n_2, r, \hat{E}(R)$  e  $V\hat{a}r(R)$ . Por fim, calcula-se o *valor-p* conforme a seguinte expressão:

$$P\left(\frac{|r - \hat{E}(R)| - 0,5}{\sqrt{V\hat{a}r(R)}}\right) > q_r \quad (2.7)$$

Em que  $q_r$  é o quartil da distribuição normal padrão de ordem  $\alpha/2$  e  $\alpha$  é o nível de significância adotado para o teste. Uma vez testada a independência das observações, a próxima etapa é a estimação dos parâmetros da distribuição GVE.

### 2.2.2 Estimação dos parâmetros da distribuição GVE

Diversas técnicas foram propostas para fazer inferências sobre os parâmetros da distribuição GVE, sendo o método da máxima verossimilhança o mais difundido e amplamente utilizado. Para aplicá-lo é necessário que os dados da amostra sejam independentes e identicamente distribuídos ao longo do tempo, condição verificada previamente pelo teste de aleatoriedade.

Considere-se uma amostra aleatória independente e identicamente distribuída de um conjunto de dados ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ), com distribuição de probabilidade  $p(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta})$ , em que  $\boldsymbol{\theta}$  é o vetor de

parâmetros a ser estimado. O método da máxima verossimilhança visa dar uma estimativa do valor de  $\boldsymbol{\theta}$  ou de uma função  $p(\boldsymbol{\theta})$  a partir de valores observados  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

Segundo Viola *et al.* (2006), dada uma amostra  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , o método consiste em maximizar a função de verossimilhança, definida pelo produto das funções de probabilidade (Equação (2.8)), e em encontrar  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$  tal que obedeça a formulação matemática da Equação (2.9):

$$L(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x}) = p(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta}) = p(x_1|\boldsymbol{\theta}) \times p(x_2|\boldsymbol{\theta}) \times \dots \times p(x_n|\boldsymbol{\theta}) \quad (2.8)$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \underset{\boldsymbol{\theta} \in \Theta}{\operatorname{argmax}} L(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x}) \quad (2.9)$$

Em que  $\Theta$  representa o espaço paramétrico do vetor  $\boldsymbol{\theta}$  e o vetor de estimativas  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$  é o vetor dos estimadores de máxima verossimilhança de  $\boldsymbol{\theta}$ . Como o valor de  $\boldsymbol{\theta}$  que maximiza  $L(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x})$  é o mesmo que maximiza  $l(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x}) = \ln[L(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x})]$  e  $l(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x})$  sempre está definida, pois  $L(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x})$  é positiva, então, por simplicidade, a função a ser maximizada é  $l(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x})$ .

Seja uma amostra aleatória  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  e supondo que há independência entre as observações, então a função de verossimilhança é dada por:

$$L(\mu, \sigma, \xi|\mathbf{x}) = \frac{1}{\sigma^n} \cdot \prod_{i=1}^n \left[ 1 + \xi \cdot \left( \frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\left(\frac{1+\xi}{\xi}\right)} \cdot \exp \left\{ \sum_{i=1}^n - \left[ 1 + \xi \cdot \left( \frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\frac{1}{\xi}} \right\} \quad (2.10)$$

Desse modo, o logaritmo da função de verossimilhança (log-verossimilhança),  $T$ , é calculado conforme a expressão:

$$T = l(\mu, \sigma, \xi|\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \left\{ -\ln \sigma - \left( \frac{1+\xi}{\xi} \right) \cdot \ln \left[ 1 + \xi \cdot \left( \frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) \right] - \left[ 1 + \xi \cdot \left( \frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\frac{1}{\xi}} \right\} \quad (2.11)$$

Sendo a equação acima definida para  $\xi < 0$  e  $x_i < \mu - \sigma/\xi$  (ou seja,  $\mu - \sigma/\xi > x_{(n)}$ ) ou para  $\xi > 0$  e  $x_i > \mu - \sigma/\xi$  (ou seja,  $\mu - \sigma/\xi > x_{(1)}$ ). Os estimadores de máxima verossimilhança,  $\mu$ ,  $\sigma$  e  $\xi$ , são obtidos pela solução do sistema de equações não lineares formado pelas derivadas de primeira ordem da Equação (2.11) em relação a cada parâmetro, iguais a



zero. Em outras palavras, os estimadores são obtidos pela solução do seguinte sistema de equações não lineares, em que  $w_i = 1 + \hat{\xi} \cdot \left(\frac{x_i - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right)$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT}{d\mu} = \frac{1}{\hat{\sigma}} \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{1 + \hat{\xi} - w_i^{-\frac{1}{\hat{\xi}}}}{\hat{\sigma}} \right) = 0 \\ \frac{dT}{d\sigma} = -\frac{n}{\hat{\sigma}} + \frac{1}{\hat{\sigma}^2} \cdot \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{(x_i - \hat{\mu}) \cdot \left[ (1 + \hat{\xi}) - w_i^{-\frac{1}{\hat{\xi}}} \right]}{w_i} \right\} = 0 \\ \frac{dT}{d\xi} = \sum_{i=1}^n \left\{ \left( 1 - w_i^{-\frac{1}{\hat{\xi}}} \right) \cdot \left[ \frac{1}{\hat{\xi}^2} \cdot \ln(w_i) - \frac{(x_i - \hat{\mu})}{\hat{\xi} \cdot \hat{\sigma} \cdot w_i} \right] - \frac{(x_i - \hat{\mu})}{\hat{\sigma} \cdot w_i} \right\} = 0 \end{array} \right. \quad (2.12)$$

Conforme Ferrari (2011), o sistema (2.12) geralmente não possui soluções exatas, pois se trata de equações não lineares. Uma solução aproximada é calculada por meio do método iterativo de Newton-Raphson, que, para iniciar o processo iterativo do algoritmo, especifica uma estimativa inicial para os parâmetros. Em Bautista *et al.* (2004), os valores iniciais dos parâmetros são definidos conforme a Tabela 2.2, na qual  $s$  e  $\bar{x}$  são o desvio padrão amostral e a média amostral da variável aleatória, respectivamente.

Tabela 2.2 – Valores iniciais dos parâmetros para cada tipo de distribuição GVE

Tipo de Distribuição	$\mu$	$\sigma$	$\xi$
Gumbel (I)	$\bar{x} - 0,4501 \cdot s$	$-0,77970 \cdot s$	-
Fréchet (II) e Weibull (III)	$\bar{x} - 0,4250 \cdot s$	$-0,87369 \cdot s$	$-0,10$

O processo de estimativa dos parâmetros determina o modelo de distribuição probabilística e o método utilizado para o seu ajuste às séries de dados disponíveis. Todavia, é preciso verificar ainda a precisão dos registros obtidos das estações meteorológicas, o que se faz por meio da aplicação de diferentes tipos de distribuição GVE. Dessa forma, torna-se possível comparar e avaliar os parâmetros estimados para as diferentes distribuições probabilísticas aplicadas, o que permite verificar diferenças significativas entre os parâmetros obtidos para uma mesma estação.

Estas dispersões são atribuídas às anomalias nas séries de registros, tais como: registros interrompidos durante alguns anos; mau funcionamento dos instrumentos de medição; mudanças de localização dos aparelhos dentro da mesma estação; manutenção dos aparelhos;

mudanças no tipo de exposição devido ao desenvolvimento urbano e ao reflorestamento ou desmatamento da área; entre outras. Por conseguinte, estações que apresentam problemas desta natureza devem ser descartadas dos estudos, exceto nos casos em que há a possibilidade de aproveitamento pelo menos parcial dos registros.

Na presença de séries com um número reduzido de registros, os estimadores dos parâmetros das distribuições de valores extremos, segundo o estudo realizado por Padaratz (1977), apresentam grande variabilidade, principalmente os parâmetros de forma. O autor aplica o método Monte Carlo para a análise das propriedades dos estimadores máximo-verossímeis e verifica a grande variabilidade dos parâmetros estimados para reduzidos números de registros, exceto para o parâmetro de locação (designado pelo autor como estimador da velocidade característica), que não apresentou acentuada variação. Deste estudo, entende-se que as estações com menos de 5 anos de registro devem ser desconsideradas.

### 2.2.3 Seleção da distribuição de valores extremos

Para verificar se as observações seguem uma distribuição de valores extremos de Gumbel, Fréchet ou Weibull, basta testar se o parâmetro de forma ( $\xi$ ) é igual a zero na distribuição GVE, o que pode ser realizado por meio do teste da razão de verossimilhança modificado.

Considere-se uma série de  $n$  observações  $(x_1, \dots, x_n)$ . O máximo do logaritmo da função de máxima verossimilhança das distribuições GVE e de Gumbel são designados como  $l(\hat{\boldsymbol{\theta}}_{GVE})$  e  $l(\hat{\boldsymbol{\theta}}_G)$ , em que  $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{GVE} = (\hat{\mu}, \hat{\sigma}, \hat{\xi})$  e  $\hat{\boldsymbol{\theta}}_G = (\hat{\mu}, \hat{\sigma})$  são os vetores de estimativas de máxima verossimilhança. A estatística de razão de verossimilhança ( $T_{LR}$ ) é calculada por:

$$T_{LR} = 2 \cdot [l(\hat{\boldsymbol{\theta}}_{GVE}) - l(\hat{\boldsymbol{\theta}}_G)] \quad (2.13)$$

A razão apresentada na Equação (2.13) possui distribuição assintótica Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) com 1 grau de liberdade. Hosking (1984) sugere a utilização da estatística de razão de verossimilhança modificada, cujo objetivo principal é obter uma melhor aproximação à distribuição assintótica para a Equação (2.13). Sendo  $n$  o tamanho da amostra da variável aleatória, a estatística de razão de verossimilhança modificada ( $T_{LR}^*$ ) é calculada pela seguinte equação:

$$T_{LR}^* = \left(1 - \frac{2,8}{n}\right) \cdot T_{LR} \quad (2.14)$$

A fim de testar a hipótese nula  $H_0: \xi = 0$  versus  $H_1: \xi \neq 0$ , basta comparar o valor da estatística do teste ( $T_{LR}^*$ ) com o valor tabelado da distribuição qui-quadrado com 1 grau de liberdade e um determinado nível de significância ( $\alpha$ ),  $\chi_{(\alpha,1)}^2$ . Se  $T_{LR}^* \geq \chi_{(\alpha,1)}^2$ , a hipótese nula é rejeitada, ou seja, há fortes evidências de que as observações não são de uma distribuição do Tipo I (Gumbel). A tabela dos valores  $\chi_{(\alpha,1)}^2$  da distribuição  $\chi^2$  é apresentada por Montgomery *et al.* (2010) e condensada para apenas 1 grau de liberdade na Tabela X.

Tabela 2.3 – Pontos percentuais  $\chi_{(\alpha,1)}^2$  da distribuição qui-quadrado para 1 grau de liberdade (Adaptado de Montgomery *et al.* (2010)).

$\alpha$	0,995	0,990	0,975	0,950	0,900	0,500	0,100	0,050	0,025	0,010	0,005
$\chi_{(\alpha,1)}^2$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,45	2,71	3,84	5,02	6,63	7,88

#### 2.2.4 Diagnóstico do ajuste da distribuição GVE

A validação dos ajustes das distribuições é geralmente realizada por testes de aderência, sendo o teste de Kolmogorov-Smirnov, descrito a seguir, frequentemente empregado para se tratar dados do vento. Este teste é amplamente adotado na avaliação de dados, sendo utilizado por Silva (2008) e Jónsdóttir e Milano (2019).

Ao se ajustar uma distribuição de probabilidade a um conjunto de dados, parte-se da hipótese de que a distribuição representa adequadamente tal conjunto. Considere-se, então, que  $x_1, x_2, \dots, x_n$  é uma série de dados observados ordenados de forma crescente e que a função de distribuição acumulada para os dados é definida por  $F(x_{(i)})$ . Uma formulação empírica para essa função é dada por:

$$\hat{F}(x_{(i)}) = \frac{i}{n+1}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2.15)$$

Para testar a suposição de que os dados seguem a distribuição GVE selecionada, pode ser utilizada a estatística  $D$  do teste Kolmogorov-Smirnov. Desta maneira, a diferença entre a função de densidade acumulada estimada e o seu valor empírico é definida como a maior

distância entre  $F$  e seu valor empírico ( $\hat{F}$ ) para as  $n$  observações, de acordo com a equação a seguir:

$$D = \max |F(x_{(i)}) - \hat{F}(x_{(i)})|, i = 1, 2, \dots, n \quad (2.16)$$

Sendo  $F(x_{(i)})$  a distribuição teórica GVE obtida por meio dos parâmetros estimados e  $\hat{F}(x_{(i)})$  a distribuição empírica dada pela Equação (2.15). Em uma população de função de densidade acumulada  $F$ , espera-se que o valor empírico  $\hat{F}$  esteja bem próximo do valor da função  $F$ . A hipótese nula ( $H_0$ ) de que os dados seguem uma distribuição GVE é rejeitada se  $D \geq D_{n,\alpha}$ , em que  $D_{n,\alpha}$  é o valor crítico para os valores de  $n$  a um nível de significância predeterminado, podendo ser consultado na tabela construída por Massey *et al.* (1951).

## 2.3 Caracterização fenológica do vento

### 2.3.1 Características gerais do vento

O vento é o movimento do ar sobre a superfície terrestre, proveniente das diferenças de pressão atmosférica entre duas regiões distintas. As diferenças de pressão têm origem térmica, diretamente relacionada à radiação solar e aos processos de aquecimento das massas de ar.

De acordo com Blessmann (1983), pode-se considerar o vento com uma componente média sobreposta a uma componente flutuante. A velocidade média do vento é avaliada a partir de dados climatológicos existentes e geralmente é estimada a partir de um intervalo de integração entre 10 minutos e 1 hora, sendo este intervalo de tempo suficiente para apresentar valores médios estáveis. As velocidades médias são relacionadas sempre a ações estáticas, enquanto as flutuações de velocidade em torno da média são associadas a ações dinâmicas.

Denomina-se altura gradiente a altura medida a partir da superfície da Terra na qual a velocidade do vento atinge a velocidade gradiente. Segundo Blessmann (1995), esta altura situa-se, em geral, entre 250 e 600 metros. Entretanto, há indícios de que em certas situações esta altura pode chegar a valores bem superiores.

Abaixo da altura gradiente situa-se a camada limite atmosférica, na qual a velocidade do vento é modificada por diversas causas. Nesta região, as características do vento dependem

principalmente da topografia do terreno, da forma, dimensões, da rugosidade artificial e da variação vertical da temperatura. Todos estes fatores originam turbulência, que se dissemina por toda a camada atmosférica (Blessmann, 2011).

Então, a velocidade do vento varia desde zero, junto à superfície, até a velocidade gradiente, na altura gradiente. Quanto maior a rugosidade superficial, maior a turbulência da camada limite atmosférica e, conseqüentemente, maior a altura gradiente.

### 2.3.2 Determinação da ação do vento segundo a IEC 60826:2017

De acordo com a norma IEC 60826:2017, a velocidade de referência para obtenção das ações devidas ao vento é a velocidade do vento considerando um período de integração igual a 10 minutos, 10 metros de altura do terreno e com período de recorrência dado conforme o nível de confiabilidade estipulado para a linha de transmissão. Assim, a referida norma propõe três níveis de confiabilidade: nível 1, cujo período de retorno do evento climático é de 50 anos; nível 2, cujo período de retorno é de 150 anos; e nível 3, para o qual o período de recorrência é de 500 anos.

A norma indica explicitamente a preferência pela distribuição de probabilidade de Gumbel para o cálculo dos valores extremos da velocidade básica do vento. Como visto anteriormente, a velocidade de projeto calculada pela função de distribuição de Gumbel depende somente do período de retorno, do valor médio da série de velocidades médias máximas anuais, do desvio padrão da série e do número de observações.

Para o cálculo das forças devidas ao vento, a norma sugere a correção do período de integração por meio da razão  $V_{x,t}/V_{x,10min}$  (sendo  $V_{x,t}$  a velocidade máxima do vento ao longo de  $t$  segundos e  $V_{x,10min}$  a velocidade média do vento ao longo de 10 minutos), que representa a relação entre os valores médios de vento a 10 metros de altura do solo para diferentes períodos de integração e rugosidade de terreno.

A pressão dinâmica de referência do vento ( $q_o$ ), em  $N/m^2$ , deve ser calculada por:

$$q_o = \frac{1}{2} \cdot \tau_{ar} \cdot \mu_{ar} \cdot V_R^2 \quad (2.17)$$

Em que  $\mu_{ar}$  é a massa específica do ar igual a 1,225 (kg/m<sup>3</sup>), à temperatura 15 °C e pressão atmosférica de 101,3 kPa ao nível do mar;  $\tau_{ar}$  é o fator de correção da massa específica do ar; e  $V_R$  é a velocidade de referência do vento.

Para a determinação da pressão dinâmica do vento, deve-se verificar a localização da estrutura, uma vez que as velocidades do vento estão fortemente correlacionadas com a altitude e/ou temperatura. A norma pressupõe como referência uma temperatura de 15 °C e altitude ao nível do mar. Caso o ponto de interesse se localize em uma região com altitude ou temperaturas muito diferentes da referência, deve-se considerar o fator de correção  $\tau_{ar}$ , indicado pela Tabela 2.4, para o cálculo da pressão dinâmica do vento  $q_o$ . Caso contrário, o fator é considerado como sendo igual a 1.

Tabela 2.4 – Fator de correção da massa específica do ar (Adaptado da IEC 60826:2017).

Temperatura [°C]	Altitude [m]			
	0	1000	2000	3000
30	0,95	0,84	0,75	0,66
15	1,00	0,89	0,79	0,69
0	1,04	0,94	0,83	0,73
-15	1,12	0,99	0,88	0,77
-30	1,19	1,05	0,93	0,82

A velocidade de referência ( $V_R$ ) do vento deve ser calculada por:

$$V_R = K_R \cdot V_{RB} \quad (2.18)$$

Onde  $V_R$  é a velocidade de referência do vento para um período de recorrência  $T$ , com intervalo de integração de 10 minutos, a 10 metros acima do terreno (m/s);  $K_R$  é o fator de rugosidade do terreno;  $V_{RB}$  é a velocidade de referência do vento para categoria de terreno B, determinado para um intervalo de integração de 10 minutos, a 10 metros acima do terreno (m/s).

A ação do vento é fortemente influenciada pela rugosidade do terreno. Quanto maior a rugosidade, mais turbulento e mais lento é o escoamento do vento. A IEC 60826:2017 define quatro categorias de terreno de crescente rugosidade, como indicado na Tabela 2.5. Nesta mesma tabela, é apresentado o fator de rugosidade  $K_R$  que representa um multiplicador da velocidade do vento de referência para conversão da velocidade de uma categoria de terreno para outra.

Tabela 2.5 – Classificação das categorias de terrenos (Adaptado da IEC 60826:2017).

Categoria	Classe de Rugosidade	$K_R$
A	Grandes extensões de água, área costeira plana	1,00
B	Campos abertos com pequenos obstáculos	1,00
C	Terreno com poucos obstáculos de pequena altura	0,85
D	Área suburbana ou com muitas árvores altas	0,67

As forças devidas à incidência do vento sobre os cabos ( $A_c$ ), aplicadas perpendicularmente ao cabo no seu ponto de fixação em cada suporte, são mensuradas por:

$$A_c = q_o \cdot C_{XC} \cdot G_C \cdot G_L \cdot d \cdot L \cdot \sin^2 \omega \quad (2.19)$$

Em que  $C_{XC}$  é o coeficiente de arrasto;  $G_C$  é o fator relacionado ao vento combinado para cabos;  $G_L$  é o fator relacionado ao vão;  $d$  é o diâmetro do cabo (m);  $L$  é o vão de vento do suporte, igual a metade da soma dos comprimentos dos vãos adjacentes ao suporte (m); e  $\omega$  é o ângulo formado entre a direção de incidência do vento e o eixo longitudinal da LT (graus).

O coeficiente de correção  $G_C$  é determinado conforme as características do terreno e a altura acima do solo, conforme a Figura 2.1. A altura considerada deve ser tomada como aquela correspondente ao centro de gravidade dos condutores suspensos e teoricamente localizada no terço inferior da catenária.

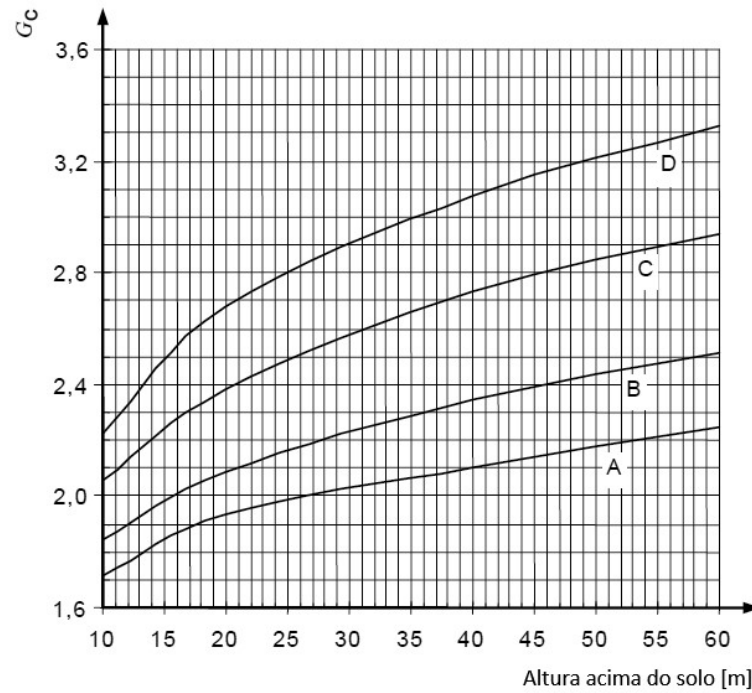


Figura 2.1 – Fator combinado do vento ( $G_C$ ) para condutores em várias categorias de terreno e altura sobre o solo (Adaptado da IEC 60826:2017).

O coeficiente de correção  $G_L$  corresponde ao fator de efetividade do vento sobre todo o comprimento do cabo, e é função do comprimento dos vãos adjacentes ao suporte dos condutores, conforme a Figura 2.2:

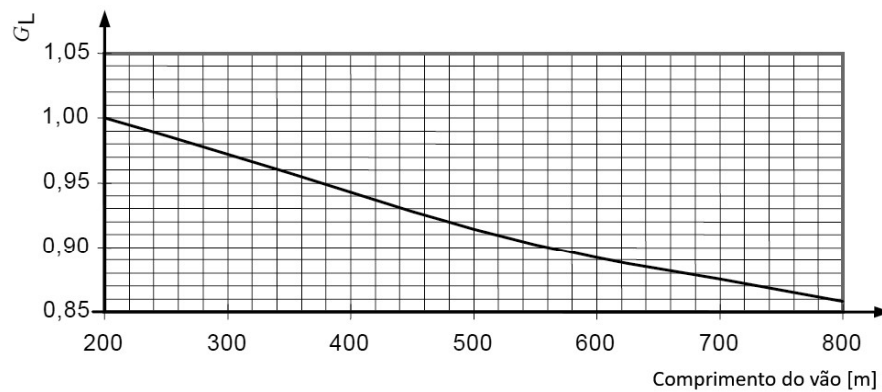


Figura 2.2 – Fator do vão ( $G_L$ ) (Adaptado da IEC 60826:2017).

A força devida à incidência do vento diretamente sobre os isoladores ( $A_i$ ) é dada por:

$$A_i = q_o \cdot C_{xi} \cdot G_t \cdot S_i \quad (2.20)$$

Em que  $C_{xi}$  é o coeficiente de arrasto dos isoladores, tomado igual a 1,20 pela norma;  $G_t$  é o fator combinado do vento;  $S_i$  é a área do isolador projetado horizontalmente no plano vertical paralelo ao eixo do isolador ( $m^2$ ).



O coeficiente de correção  $G_t$  é dado em função da categoria de rugosidade do terreno e da altura do centro de gravidade do isolador em relação ao nível do solo, conforme a Figura 2.3:

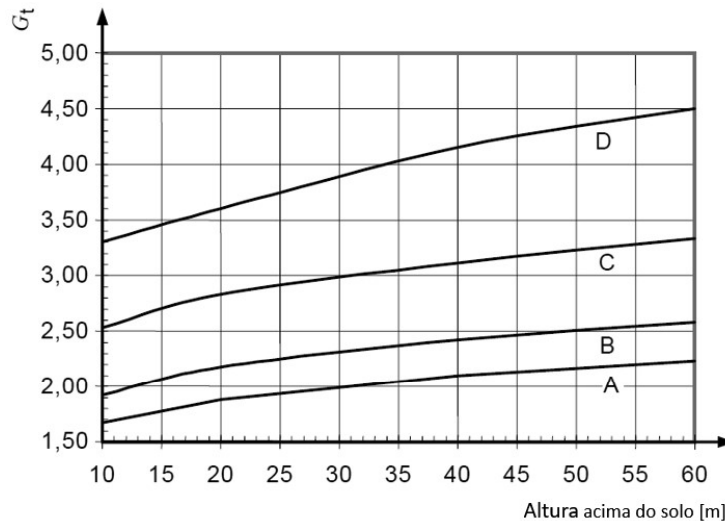


Figura 2.3 – Fator combinado do vento ( $G_t$ ) aplicável a isoladores (Adaptado da IEC 60826:2017).

A força de arrasto na direção do vento atuante sobre o centro de gravidade de um painel composto por diversos elementos estruturais ( $A_t$ ) pode ser calculada por:

$$A_t = q_o \cdot \{[1 + 0,2 \cdot \sin^2(2 \cdot \theta)] \cdot (S_{t1} \cdot C_{xt1} \cdot \cos^2 \theta) + S_{t2} \cdot C_{xt2} \cdot \sin^2 \theta\} \cdot G_t \quad (2.21)$$

Onde  $\theta$  é o ângulo de incidência da direção do vento com a direção perpendicular da face 1 (paralela ao eixo da linha) do painel no plano horizontal (graus);  $S_{t1}$  é a área total da superfície projetada normal à face 1 do painel da torre ( $m^2$ );  $S_{t2}$  é a área total da superfície projetada normal à face 2 (transversal ao eixo da linha), correspondente aos elementos estruturais da mesma face da torre ( $m^2$ );  $C_{xt1}$ ,  $C_{xt2}$  são os coeficientes de arrasto correspondentes às faces 1 e 2, respectivamente, para o vento incidindo perpendicularmente às faces.

## 2.4 Sistema de observações meteorológicas do Brasil

O projeto de linhas de transmissão está atrelado aos esforços provocados pelo vento, cujo comportamento é variável de acordo com a localidade onde acontecem. Este estudo enfoca basicamente estruturas localizadas no estado de Minas Gerais, tornando necessária a verificação específica das velocidades básicas de vento nele registradas e também nos estados

que com ele fazem divisa, a saber: São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Bahia, Goiás e Mato Grosso do Sul.

Existem, no Brasil, dois sistemas de observações meteorológicas principais: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), os quais são administrados pelo poder público e cujas estações estão distribuídas por todo o território nacional. Cada um destes sistemas possui sua própria base de dados, que foram coletadas paralelamente a uma terceira fonte, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

#### **2.4.1 Instituto Nacional de Meteorologia – INMET**

O INMET, Instituto Nacional de Meteorologia, é um órgão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, criado em 1909, que monitora, analisa e faz previsões de tempo e clima, provendo informações meteorológicas de todo o território brasileiro. O sistema de coleta e distribuição de dados meteorológicos da instituição é composto por radiossondas ou estações de sondagem de ar superior, estações convencionais ou estações de superfície operadas manualmente e, ainda, estações automáticas, sendo cada uma delas identificada por um número de cinco dígitos.

O portal BDMEP, Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa, abriga todas as informações meteorológicas históricas de estações convencionais a partir do ano 1961, as quais podem ser extraídas como “dados horários”, “dados diários” ou “dados mensais”. A Figura 2.4 apresenta a distribuição de tais estações no país.



Figura 2.4 – Estações convencionais do INMET (Imagem obtida via INMET).

Nos estados de interesse supracitados, somam-se 107 estações, cujos registros foram feitos em períodos variados, não tendo início, necessariamente, em 1961, e com períodos intermediários sem medições.

Os valores de velocidade de vento são fornecidos pelo INMET em metros por segundo, e resumidos em três medições diárias: 09:00, 15:00 e 21:00, de forma que os números equivalem à média dos 10 minutos que antecedem tais horários. Os equipamentos utilizados nas medições são anemógrafos a 10 metros de altura, na maioria das estações convencionais, todavia podem variar de acordo com a cidade, caracterizando-se como cata-ventos e outros.

#### 2.4.2 Instituto de Controle do Espaço Aéreo – ICEA

O DECEA, Departamento de Controle do Espaço Aéreo, é uma organização governamental militar da Força Aérea Brasileira (FAB), subordinada ao Ministério da Defesa, que provém serviços e controla a navegação aérea no país. O sistema que realiza as observações meteorológicas é o SISCEAB (Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro), gerenciado pelo ICEA (Instituto de Controle do Espaço Aéreo), que por sua vez é controlado pelo DECEA.

Os dados do ICEA são fornecidos *online* pelo Sistema de Geração e Disponibilização de Informações Climatológicas. O Banco de Dados Climatológicos do Comando da Aeronáutica (BDC) contém informações de 42 estações nos estados de interesse, as quais são classificadas

como estações de superfície e estão localizadas em aeródromos, distribuídos pelo território brasileiro, conforme apresenta a Figura 2.5. Tais aeródromos são identificados pela terminologia ICAO, ou seja, um número indicativo de quatro letras atribuído a cada aeroporto pela Organização Internacional da Aviação Civil, ou então por um número sinótico composto por cinco algarismos.

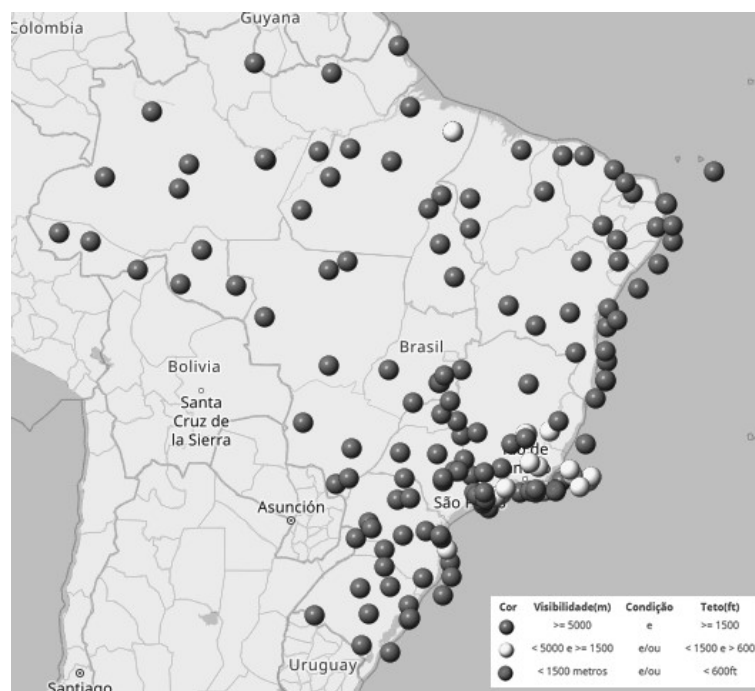


Figura 2.5 – Aeródromos com estações meteorológicas da FAB (Imagem obtida via REDEMET).

Dentre os segmentos de pesquisas de superfície, “vento máximo” é o tipo de informação numérica procurada e está disponível nos formatos: “meses seguidos”; “mesmo mês, anos seguidos”; “anos seguidos”. Os valores fornecidos são resultados da média de amostras em 10 minutos, com medições realizadas por equipamentos a 10 metros de altura.

### 2.4.3 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

O INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, criado em 1961, é uma entidade do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação que visa, resumidamente, realizar pesquisas de ciências espaciais e atmosféricas e gerenciar o Sistema Brasileiro de Coleta de Dados. Este, por sua vez, é composto por satélites que abrangem, dentre outros sistemas, uma rede de Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) instaladas no território nacional e um centro de processamento e repasse de dados das PCDs, denominado SINDA. O portal *online* do SINDA, Sistema Integrado de Dados Ambientais, disponibiliza os dados históricos anuais de

todas as PCDs, que nada mais são do que estações ambientais automáticas, identificadas por um número de cinco dígitos, sendo 3 o primeiro algarismo.

Os dados são referidos a uma estação por cidade, somando 130 no total, com coordenadas geográficas conhecidas, e as medições são realizadas 8 vezes por dia, ou seja, uma a cada 3 horas, iniciando-se às 00:00. Os valores de velocidade do vento provindos do INPE são divididos em “VelVento2m”, “VelVento3m”, “VelVento5m”, “VelVento10m”, “VelVento” e “VelVentoMax”, podendo haver ou não dados correspondentes a mais de um tipo.

“VelVento3m” é a média, em metros por segundo, de 600 amostras com 1 segundo de intervalo entre as mesmas, coletadas durante 10 minutos, com altura do sensor de 3 metros em relação ao solo. A diferença dessa para “VelVento2m”, “VelVento5m” e “VelVento10m” é apenas a altura do equipamento. Já os dados indicados por “VelVentoMax” nada mais são do que as rajadas, caracterizando-se como a velocidade de vento máxima, em metros por segundo, com média de 3 amostras e intervalo de amostragem de 1 segundo. Ressalta-se que a disponibilidade de dados para uma PCD corresponde ao período entre sua instalação e a data atual ou, em alguns casos, à data em que ela deixou de operar. Para algumas PCDs, ainda pode haver intervalos sem dados devido a serviços de manutenção da estação.

## **2.5 Análise não linear de estruturas**

### **2.5.1 Histórico de análises em estruturas de linhas de transmissão**

Estudos históricos e experimentais sobre estruturas treliçadas visando avaliar o seu comportamento quando expostas a ações devidas ao vento têm sido realizados há mais de um século. Indicações históricas apontam que Eiffel (1911), apud Klein (2004), realizou os primeiros estudos neste assunto, seguidos por diversos outros autores ao longo dos anos, como Flachsbarth (1932), apud Rippel (2005), Gould *et al.* (1972), Davenport (1979), Monk (1980), Kempner Jr e Laursen (1981) e Krishnasamy (1981). A partir da década de 1990, os estudos acerca de estruturas de linhas de transmissão submetidas a forças de vento ganharam maior atenção por parte dos pesquisadores.

Vibrações induzidas pelo vento em torres de LTs foram estudadas em um modelo real desenvolvido por Momomura *et al.* (1995). Eles consideraram velocidades inferiores a 25 m/s ocorridas em uma região montanhosa, característica da região onde a torre se localizava. Os

resultados obtidos pelos autores mostraram que o amortecimento aerodinâmico tem grande contribuição no amortecimento total e que as características de vibrações do sistema estrutural são mais influenciadas pela ação do vento nos cabos condutores. Além disso, eles concluíram que a direção preferencial do vento exerce uma forte influência sobre as características do escoamento.

No ano seguinte, Loredou-Souza (1996) avaliou experimentalmente modelos reduzidos de LTs em túnel de vento. Além do trabalho experimental, o autor comparou duas metodologias para análise dinâmica da ação do vento, sendo uma baseada no método estatístico usando linhas de influência e outra baseada no método do fator de rajada de Davenport. Este trabalho teve grande relevância na época em que foi desenvolvido e ainda hoje é referência na área de pesquisa em linhas de transmissão.

Blessmann (2001) confrontou as prescrições normativas das normas ABNT NBR 6123:1988 e ABNT NBR 5422:1985 ao estudar e investigar acidentes provocados pelo vento. O autor conclui que a NBR 6123 considera uma probabilidade de ruína pequena em relação à NBR 5422, o que leva a forças devidas ao vento mais elevadas. Para ele, a NBR 5422 parece ser embasada em normas europeias que permitem uma probabilidade de ruína bem maior, em zonas não-povoadas, devido à existência de uma malha de distribuição de energia mais densa. Estes fatos explicam, para o autor, a queda de linhas de transmissão em São Paulo, no Rio Grande do Sul e na Argentina.

Na década de 2000, estudos numéricos computacionais a partir de modelos tridimensionais em elementos finitos passaram a se destacar e a auxiliar os pesquisadores em análises sobre o comportamento de estruturas de linhas de transmissão. Diversos autores desenvolveram trabalhos sobre a resposta estática e dinâmica de trechos reais de LTs, bem como sobre o comportamento do sistema ao se considerar o rompimento de cabos, a inclinação das cadeias de isoladores, vibrações eólicas, tormentas elétricas e ventos de alta intensidade. Alguns exemplos são Rodrigues (2004), Cappellari (2005), Oliveira (2006), Clark *et al.* (2006), Santos (2008) e Silva e Carvalho (2009).

Carvalho (2010) realizou comparações entre esforços solicitantes estáticos devidos à ação do vento em uma torre de transmissão, obtidas utilizando-se as recomendações das duas normas brasileiras vigentes e aplicáveis: ABNT NBR 6123:1988 e ABNT NBR 5422:1985. Para a

obtenção dos esforços solicitantes provenientes dos carregamentos de vento, o autor construiu modelos tridimensionais através do método de elementos finitos, contemplando análise não linear geométrica dos cabos e de toda a estrutura. Os resultados mostraram que os esforços solicitantes devidos à atuação de forças de vento conforme a NBR 6123 são superiores em 46% em relação aos obtidos com a NBR 5422, principalmente devido às forças nos cabos e períodos de integração sugeridos por esta norma.

Carvalho *et al.* (2015) apresentaram uma metodologia para a análise estática e dinâmica de sistemas estruturais com cabos submetidos ao vento, considerando as não linearidades geométricas e o amortecimento aerodinâmico. Os resultados obtidos pelos autores mostraram uma redução da magnitude das respostas para a situação com amortecimento aerodinâmico e não linearidades geométricas, mas que ainda assim os valores máximos das reações de apoio na direção horizontal apresentaram-se um pouco superiores aos valores obtidos por meio da análise estática com forças equivalentes conforme a ABNT NBR 6123:1988.

No ano subsequente, Oliveira e Silva (2016) desenvolveram um estudo do comportamento estrutural de torres de aço de telecomunicações submetidas à ação dinâmica não determinística do vento. Os autores elaboraram um modelo de torre em elementos finitos no programa ANSYS® e o submeteu ação dinâmica não determinística do vento, obtida matematicamente de acordo com espectro de potência do vento proposto por Kaimal. No mesmo ano, Carvalho *et al.* (2016) destacaram que é fundamental a consideração do amortecimento aerodinâmico nas análises de sistemas estruturais completos de LTs, uma vez que os cabos assumem velocidades consideráveis em relação às velocidades do vento.

Outros trabalhos investigativos sobre o comportamento estático e dinâmico de torres treliçadas e de cabos em linhas de transmissão submetidos à ação do vento foram e seguem sendo desenvolvidos numérica e experimentalmente pela comunidade científica nos últimos anos, como os produzidos por Carlos e Kaminski Jr. (2015), Luzardo (2015), Stengel *et al.* (2017), Xie *et al.* (2017), Vallis *et al.* (2017), Hamada *et al.* (2017) e Carvalho *et al.* (2018).

Oliveira (2019) desenvolveu uma metodologia numérica no programa de elementos finitos ANSYS® para avaliar o comportamento estrutural de LTs submetidas à ação dinâmica não determinística do vento sobre os cabos, considerando a não linearidade geométrica e o amortecimento aerodinâmico conforme as formulações propostas por Davenport (1988) e por

Stengel *et al.* (2017). Os resultados das análises dinâmicas obtidos pela autora considerando o amortecimento aerodinâmico proposto por Stengel *et al.* (2017) apresentaram resultados superiores aos obtidos considerando amortecimento aerodinâmico proposto por Davenport (1988). Ademais, as diferenças entre os resultados das análises dinâmicas e estáticas equivalentes foram significativas e demonstraram a importância da realização de uma análise dinâmica não linear do sistema estrutural completo, e não apenas da torre isolada.

### 2.5.2 Estudo analítico do comportamento mecânico dos cabos

Em linhas aéreas de transmissão, os pontos de suspensão de cabos condutores e cabos guarda podem estar localizados a uma mesma altura ou em alturas diferentes, como ocorre mais comumente. De acordo com Labegalini *et al.* (1992), um cabo suspenso entre dois pontos de mesma altura e sujeito apenas à ação do peso próprio apresenta a forma de uma catenária simétrica em relação ao centro do vão onde se localiza o vértice, local de maior flecha, o que não acontece quando os suportes têm alturas diferentes.

Quando os pontos de fixação de um cabo na estrutura são desnivelados, o posicionamento do seu centro de gravidade se desloca, então a catenária deixa de ser simétrica e a flecha máxima não ocorre no centro do vão. Conseqüentemente, as reações de apoio devidas ao peso próprio apresentam variações em função do desnível.

A norma brasileira específica para o cálculo de linhas de transmissão, ABNT NBR 5422:1985, não apresenta de forma explícita a consideração desta variação com a elevação de torres adjacentes. É necessário, então, recorrer a formulações propostas por outros autores.

A reação vertical devida ao peso próprio dos cabos do suporte superior, para torres em alturas diferentes, é dada pela equação a seguir, proposta por Labegalini *et al.* (1992):

$$V_A = \frac{Ap}{2} + \frac{hT_o}{A} \quad (2.22)$$

A reação vertical para o suporte inferior terá o segundo termo negativo, uma vez que o somatório das forças verticais deve permanecer constante e igual ao peso total do cabo ( $Ap$ ), conforme exposto na seguinte equação:



$$V_B = \frac{Ap}{2} - \frac{hT_o}{A} \quad (2.23)$$

Labegalini *et al.* (1992) apresentam ainda algumas formulações para a determinação das variáveis envolvidas nas catenárias, associadas ao peso próprio dos cabos, como o comprimento do cabo desenvolvido e a flecha máxima.

O comprimento do cabo desenvolvido ( $L_{des}$ ), para suportes desnivelados, pode ser obtido por:

$$L_{des} = \sqrt{h^2 + A^2 \left( 1 + \frac{A^2}{12C_{1,cat}^2} \right)} \quad (2.24)$$

A equação matemática da catenária de um cabo devida ao peso próprio é dada por:

$$y_c = C_1 \left( \cosh \frac{x_p - x_o}{C_{1,cat}} - \cosh \frac{x_o}{C_{1,cat}} \right) \quad (2.25)$$

A flecha máxima da catenária devida ao peso próprio, para vãos desnivelados, pode ser calculada por:

$$f_o = f_s \left( 1 - \frac{h}{4f_s} \right)^2 \quad (2.26)$$

Sendo  $f_s$  definido através da seguinte expressão:

$$f_s = \frac{A^2 p_{cabo}}{8T_o} \quad (2.27)$$

Nas equações acima, tem-se:

$V_A$	Reação vertical devido ao peso próprio para o suporte superior [kN]
$A$	Distância horizontal entre duas torres genéricas [m]
$p_{cabo}$	Peso próprio do cabo [kN/m]
$h$	Desnível entre os suportes [m]
$T_o$	Componente horizontal de tração axial num cabo [kN]
$V_B$	Reação vertical devido ao peso próprio para o suporte inferior [kN]
$L$	Comprimento do cabo desenvolvido para suportes desnivelados [m]

$C_{1,cat}$	Coefficiente de caracterização da catenária [m]
$y_c$	Distância vertical de um ponto P qualquer a um ponto de suspensão de um cabo [m]
$x_p$	Distância horizontal de um ponto P qualquer a um ponto de suspensão de um cabo [m]
$x_o$	Distância horizontal do vértice da catenária [m]
$f_o$	Flecha máxima da catenária [m]
$f_s$	Distância vertical máxima da linha reta que une os vértices da catenária à corda do cabo [m]

De acordo com Luzardo (2015), os cabos possuem um comportamento altamente não linear, o que torna complexa a sua modelagem numérica. Segundo o autor, o fator determinante no comportamento não linear geométrico dos cabos está associado à variação da sua rigidez em função da variação das forças de tração, efeito este que deve ser considerado no cálculo dos esforços nas estruturas de suporte.

### 2.5.3 Determinação das flechas iniciais dos cabos

A determinação das flechas iniciais dos cabos é feita por meio da equação da mudança de estado, apresentada por Labegalini *et al.* (1992). Considera-se inicialmente um vão isolado de uma linha de transmissão, de comprimento  $A$ , e admite-se que o cabo esteja apoiado entre as duas estruturas niveladas. A deformação linear em um elemento de barra (ou cabo) devido à variação de temperatura pode ser representada pela seguinte equação:

$$L_2 - L_1 = L_1 \cdot \alpha_e \cdot (t_2 - t_1) \quad (2.28)$$

Estando o cabo preso aos suportes, a variação de comprimento que irá sofrer é acompanhada da variação da tração, que passará ao valor  $T_{o2}$ . Um aumento da temperatura provoca um aumento no comprimento do cabo e, conseqüentemente, uma redução na tração, e vice-versa. Essa variação obedece à lei de Hooke: “as deformações elásticas são proporcionais às tensões aplicadas”.

Assim, a deformação elástica em virtude da variação da força de tração é obtida conforme a Equação (2.29):

$$L_2 - L_1 = L_1 \cdot \frac{(T_{o2} - T_{o1})}{E \cdot S} \quad (2.29)$$

Aplicando o princípio da superposição dos efeitos e utilizando as Equações (2.28) e (2.29), o comprimento final do cabo pode ser mensurado através da Equação (2.30):

$$L_2 - L_1 = L_1 \cdot \alpha_e \cdot (t_2 - t_1) + L_1 \cdot \frac{(T_{o2} - T_{o1})}{E \cdot S} \quad (2.30)$$

Antes da variação de temperatura, o comprimento do cabo seria determinado conforme a equação da catenária de cabos, dado pela Equação (2.31). Após essa variação, o comprimento deve ser obtido pela Equação (2.32):

$$L_1 = 2 \cdot C_1 \cdot \sinh\left(\frac{A}{2 \cdot C_1}\right) \quad (2.31)$$

$$L_2 = 2 \cdot C_2 \cdot \sinh\left(\frac{A}{2 \cdot C_2}\right) \quad (2.32)$$

Combinando as equações acima, tem-se:

$$t_2 - t_1 = \frac{1}{\alpha_e} \cdot \left\{ \left[ \frac{C_2 \cdot \sinh\left(\frac{A}{2 \cdot C_2}\right)}{C_1 \cdot \sinh\left(\frac{A}{2 \cdot C_1}\right)} - 1 \right] - \frac{1}{E \cdot S} \cdot (T_{o2} - T_{o1}) \right\} \quad (2.33)$$

A Equação (2.33) possibilita avaliar a mudança de uma condição ou estado inicial, em que os parâmetros dos cabos são conhecidos (como temperatura ( $t_1$ ) e tração ( $T_{o1}$ ), tomadas como referência), para outra condição ou estado final, quando o cabo for submetido à variação destes parâmetros, correspondentes à nova temperatura ( $t_2$ ) e tração ( $T_{o2}$ ).

Nas equações acima, têm-se:

$L_1$	Comprimento inicial do cabo, correspondente à $t_1$ ;
$L_2$	Comprimento final do cabo, correspondente à $t_2$ ;
$t_1$	Temperatura inicial [°C];
$t_2$	Temperatura final [°C];
$T_{o1}$	Tração inicial no cabo, correspondente à $t_1$ ;
$T_{o2}$	Tração final no cabo, correspondente à $t_2$ ;
$\alpha_e$	Coefficiente de dilatação térmica linear do elemento [1/°C];
$E$	Módulo de elasticidade longitudinal do cabo [kgf/mm <sup>2</sup> ];
$S$	Área da seção transversal do cabo [mm <sup>2</sup> ];
$A$	Comprimento do cabo de um vão isolado [m];

$C_1$	Coeficiente dado por: $C_1 = T_{o1}/p$ ;
$C_2$	Coeficiente dado por: $C_2 = T_{o2}/p$ ;
$p_{cabo}$	Peso por unidade de comprimento do cabo [kgf/m].

De acordo com Labegalini *et al.* (1992), a pressão do vento sobre os cabos pode ser representada por um aumento virtual em seu peso, levando ao aumento das trações nos cabos. Em função disso, é necessário calcular os novos valores da tração quando se considera o efeito da pressão do vento, a partir de uma condição ou “estado” conhecido.

Dessa forma, a equação de mudança de estado pode ser adaptada para levar em consideração o peso virtual do cabo em diferentes estados, admitindo-se um peso virtual  $p_1$  para um estado de referência e  $p_2$  para um novo estado. Assim, considerando a influência da temperatura e da pressão dinâmica do vento, a equação de mudança de estado se torna:

$$t_2 - t_1 = \frac{1}{\alpha_t} \cdot \left\{ \left[ \frac{C_2 \cdot \sinh\left(\frac{A \cdot p_2}{2 \cdot T_{o2}}\right)}{C_1 \cdot \sinh\left(\frac{A \cdot p_1}{2 \cdot T_{o1}}\right)} - 1 \right] - \frac{1}{E \cdot S} \cdot (T_{o2} - T_{o1}) \right\} \quad (2.34)$$

Em que os parâmetros  $C_1$  e  $C_2$  foram modificados, sendo  $C_1 = T_{o1}/p_1$ ;  $C_2 = T_{o2}/p_2$ ; e  $p_1$  e  $p_2$  são os pesos virtuais do estado de referência e do novo estado, respectivamente.

#### 2.5.4 Análise não linear de estruturas com grandes gradientes de deslocamentos

Em concordância com Carvalho (2010), as rotações e deformações de uma estrutura decorrem dos gradientes de deslocamentos. Quando estes gradientes se tornam elevados, não se pode mais desprezar a mudança de geometria. Nesse caso, o equilíbrio do sistema tem que ser feito na posição deformada e a análise é geometricamente não linear. Ainda segundo o autor, algumas estruturas podem apresentar pequenas deformações, porém rotações excessivas, como é o caso de cabos.

De acordo com Kaminski (2007), as principais fontes de não linearidade que podem influenciar na resposta do sistema estrutural de uma LT são a não linearidade geométrica, associada à mudança na geometria da estrutura frente aos grandes deslocamentos e rotações, e a não linearidade física, associada ao comportamento não linear da relação *tensão x deformação* do aço empregado. Esta última não é considerada neste trabalho.

Neste sentido, Mal e Singh (1991) apresentam uma das formulações que permitem analisar estruturas sujeitas a grandes gradientes de deslocamento. De acordo com os autores, admite-se que as partes de um corpo ocupam posições  $\{X\}$  no espaço da configuração de referência (indeformada), definidas pelas coordenadas Lagrangianas, e posições  $\{x\}$  na configuração deformada, definidas pelas coordenadas Eulerianas. Então, o vetor deslocamento  $\{u\}$  é dado pela seguinte equação:

$$\{u\} = \{x\} - \{X\} \quad (2.35)$$

O tensor gradiente de deformações ( $[F]$ ) é então obtido ao se diferenciar as coordenadas Eulerianas em relação às coordenadas Lagrangianas, chegando-se à seguinte expressão:

$$[F] = \frac{\partial\{x\}}{\partial\{X\}} \quad (2.36)$$

Escrevendo-se este vetor em termos do vetor deslocamento e da matriz identidade ( $[I]$ ), obtém-se:

$$[F] = [I] + \frac{\partial\{u\}}{\partial\{X\}} \quad (2.37)$$

Ainda segundo Mal e Singh (1991), as informações contidas no tensor gradiente de deformação incluem mudança de volume, rotação rígida e mudança de forma das partículas do corpo deformado. O determinante do gradiente de deformação (Jacobiano,  $J$ ) representa a mudança de volume em um determinado ponto do corpo, conforme Equação (2.38):

$$J = \det[F] = \frac{\partial V}{\partial V_0} \quad (2.38)$$

O tensor  $\frac{\partial\{u\}}{\partial\{X\}}$  da Equação (2.37) é denominado tensor gradiente de deslocamentos e poderia ser definido também em função das coordenadas Eulerianas  $\{x\}$ , isto é,  $\frac{\partial\{u\}}{\partial\{x\}}$ .

Existem dois procedimentos para a análise não linear nesta formulação, a saber: Formulação Lagrangiana Total e Formulação Lagrangiana Atualizada (Carvalho, 2010).

Na Formulação Lagrangiana Total, o tensor de deformações utilizado é o tensor de Green-Lagrange ( $\bar{E}$ ), definido pela seguinte formulação:

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\partial\{u\}}{\partial\{X\}} \right) + \left( \frac{\partial\{u\}}{\partial\{X\}} \right)^T + \left( \frac{\partial\{u\}}{\partial\{X\}} \right)^T \times \left( \frac{\partial\{u\}}{\partial\{X\}} \right) \right) \quad (2.39)$$

O tensor de tensões conjugado energeticamente com este tensor de deformações é o segundo tensor de Piola, cuja definição pode ser encontrada na bibliografia clássica (Mal e Singh, 1991). O tensor de Piola não tem uma interpretação física e, após a solução do problema, o tensor de tensões de Cauchy, referente à geometria final, deve ser determinado.

Na Formulação Lagrangiana Atualizada, o tensor de deformações utilizado é o tensor de Almansi ( $\bar{e}$ ), que utiliza gradientes de deslocamento referidos às coordenadas finais  $\{x\}$ , definido por:

$$\bar{e} = \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\partial\{u\}}{\partial\{x\}} \right) + \left( \frac{\partial\{u\}}{\partial\{x\}} \right)^T - \left( \frac{\partial\{u\}}{\partial\{x\}} \right)^T \times \left( \frac{\partial\{u\}}{\partial\{x\}} \right) \right) \quad (2.40)$$

Como a geometria deve ser atualizada a cada iteração, o tensor de tensões utilizado é o tensor de Cauchy, determinado com base nas geometrias atualizadas a cada iteração.

### 2.5.5 Análise de linhas de transmissão via método dos elementos finitos

As não linearidades geométricas previamente explicitadas são classificadas pelo pacote computacional do ANSYS, programa utilizado neste trabalho, em duas classes:

- a) *large strain*: assume que as deformações são finitas. Mudanças de forma (como na espessura, área, etc.) são contabilizadas nos cálculos e os deslocamentos e as rotações podem assumir valores extremamente altos;
- b) *large rotation*: assume que as rotações podem ser grandes, embora não se tenham grandes deformações, e as deformações são calculadas utilizando expressões linearizadas.

Na solução de todos os casos de problemas não lineares, o ANSYS emprega o método de “Newton-Raphson”. As forças são aplicadas incrementalmente em “loads steps” e o processo

é iterativo. Para cada iteração verifica-se se o critério de convergência estabelecido foi atendido até que esta meta seja atingida. Então, passa-se para o “*load step*” seguinte, até o valor final da força (Carvalho, 2010).

Existem diversos estudos sobre o tipo de modelagem utilizado em análises de estruturas de linhas de transmissão submetidas a esforços como vento, neve, terremoto e ruptura de cabos. Alguns destes estudos foram apresentados por El-Ghazaly e Al-Khaiat (1995), Wahba *et al.* (1998), Rodrigues (2004), Lee e McClure (2007) e Oliveira *et al.* (2007). Como acidentes envolvendo torres de transmissão continuam ocorrendo e suas causas muitas vezes não são identificadas, é necessário o prosseguimento dos estudos nesta área.

# 3

## DEFINIÇÃO DO MAPA DE VELOCIDADES BÁSICAS DO VENTO PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS

### 3.1 Metodologia

As isopletas são linhas curvas que delimitam pontos de igual velocidade de vento. Os dados necessários para o cálculo das velocidades devem ser georreferenciados, de acordo com as coordenadas geográficas de latitude e longitude das estações em que foram realizadas as respectivas medições.

Enquanto mapas, as isopletas caracterizam regiões que apresentam comportamentos de vento semelhantes, e são constituídas por legendas, escala, orientação e projeção cartográfica, sendo estes fundamentais para a representação adequada de pontos na superfície do planeta Terra de forma plana.

O traçado das isopletas de Minas Gerais requer, portanto, a interpolação dos valores de velocidades básicas obtidos para cada estação meteorológica selecionada, considerando-se a extrapolação dos limites da Unidade Federativa com o intuito de manter a continuidade e assiduidade dos resultados. Antes, porém, é necessário aplicar algumas medidas corretivas sobre os dados de velocidade do vento adquiridos. A materialização das curvas de igual velocidade foi realizada com o auxílio dos recursos computacionais do *software* QGIS 2.18.3, ou QuantumGIS.

#### 3.1.1 Aquisição dos dados de velocidade do vento

A aquisição de dados relativos ao tempo é um objetivo fundamental do ramo da ciência nomeada meteorologia. Os fenômenos meteorológicos são estudados a partir das observações, experiências e métodos científicos de análise. Essas observações podem ser sensoriais, quando são obtidas por um observador sem o auxílio de instrumentos de medição, e instrumentais, em geral chamadas de medições meteorológicas, quando são adquiridas por



meio de instrumentos meteorológicos. A reunião desses instrumentos em um mesmo local é denominada estação meteorológica e o conjunto dessas estações distribuídas por uma região é designada rede de estações meteorológicas.

As estações meteorológicas disponibilizam os dados em diversos formatos, dependentes da altura de instalação dos instrumentos de medição e do período de integração. Em geral, a velocidade básica do vento adotada como referência para projetos estruturais de linhas de transmissão é definida para altura de instalação igual a 10 metros e período de integração igual a 10 minutos. No caso em que as estações disponibilizam mais de uma medida diária, todas as medidas disponíveis devem ser corrigidas para a altura e o período de integração especificados, e então a maior velocidade corrigida será selecionada para a composição de um banco de dados, ao qual serão aplicados os modelos probabilísticos da distribuição Generalizada de Valores Extremos (GVE).

Por meio deste procedimento, foi construído um banco de dados compilado em blocos temporais de base diária. Este banco é inspecionado por análises de consistência, visando classificar as séries de dados entre corrigíveis e descartáveis quanto às suas possíveis falhas e não conformidades. Além das correções referentes ao período de integração e à altura de instalação dos medidores, os dados são corrigidos quanto à categoria de rugosidade do terreno onde estão localizadas as estações meteorológicas, para que todos os valores extremos sejam determinados sob a mesma condição.

### **3.1.2 Medidas corretivas dos dados de velocidade do vento e aplicação da teoria GVE**

A verificação da consistência do banco de dados é uma etapa fundamental para qualquer análise estatística. No entanto, esse processo muitas vezes não é realizado devido à sua natureza demorada e tediosa. O uso de dados não verificados pode gerar modelos estatísticos inconsistentes, que no caso da estimativa das velocidades máximas do vento, pode facilmente levar a estruturas sub ou superdimensionadas. Sendo assim, os dados inconsistentes serão expurgados da base de dados objeto de tratamento estatístico.

O fluxograma da Figura 3.1 ilustra as etapas do processo corretivo adotado para a determinação do conjunto de velocidades máximas anuais, visando aplicar a distribuição GVE.

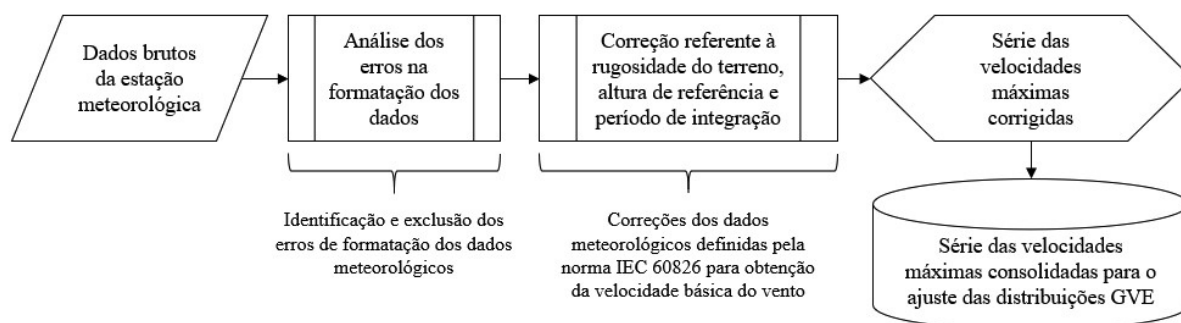


Figura 3.1 – Fluxograma das medidas corretivas aplicadas ao banco de dados.

Após o tratamento estatístico e a aplicação das medidas corretivas apresentadas no fluxograma da Figura 3.1, realiza-se o ajuste das distribuições GVE conforme as formulações apresentadas no Capítulo 2.1 e então se obtém o valor extremo de velocidade do vento de cada estação meteorológica considerada.

### 3.1.3 Interpolação espacial no pacote computacional Quantum GIS

O portal online do *software* Quantum GIS (QGIS) o caracteriza como um Sistema de Informação Geográfica (SIG), um compilado de informações geográficas processadas e analisadas com a finalidade de produzir mapas temáticos e cartas topográficas, fundamentais para o estudo de fenômenos geográficos, bem como o planejamento territorial. Neste estudo, em especial, utiliza-se o SIG para a determinação o mapa de velocidades do vento através de interpolação espacial.

O QGIS, como ferramenta técnica para elaboração das isopletas de Minas Gerais, é um *software* livre, com código-fonte aberto e é considerado um projeto oficial da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo). A OSGeo é uma organização não-governamental cujo objetivo é promover o desenvolvimento de tecnologias e compartilhamento de dados geoespaciais. Dessa forma, por meio do processamento dos valores de velocidade de vento inseridos no programa, é possível compor mapas de isopletas, mapas de calor, entre outros, no formato de uma camada *raster*, a ser definida posteriormente.

#### 3.1.3.1 Sistema Geodésico de Referência

Visto que os dados de entrada são georreferenciados, o QGIS requer a definição do Sistema Geodésico de Referência (SGR), conceituado como um referencial apropriado para atribuição das posições de pontos sobre a superfície terrestre, baseado em um conjunto de parâmetros e

convenções e associados à figura de um elipsoide adequado às dimensões da Terra (Monico, 2008). O desconhecimento ou subestimação do SGR pode ocasionar erros nos produtos cartográficos e nas análises decorrentes se os dados espaciais forem transformados de maneira inadequada (Borges *et al.*, 2016).

Nesse contexto, vale ressaltar que o termo *datum* também pode ser utilizado para fazer alusão a qualquer sistema referencial. Segundo Rubira *et al.* (2016), os principais sistemas geodésicos brasileiros são: Córrego Alegre, SAD 69 (*South American Datum*) e SIRGAS 2000. Este último, por sua vez, é reconhecido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) como o *datum* oficial vigente.

Em nível mundial, o *datum* padrão é o *World Geodetic System*, do ano 1984 (WGS 84), utilizado no Sistema GPS (*Global Positioning System*). Por esse motivo, e por ser o mais próximo ao ITRS (*International Terrestrial Reference Frame*), adota-se o WSG 84 como o sistema geodésico de partida para o traçado das isopletas.

Sabe-se que existem inúmeros sistemas de referência no mundo e, por isso, o Grupo de Pesquisa Petrolífera Europeia (EPSG, do inglês *European Petroleum Survey Group*) organizou-os e sistematizou-os por códigos, chamados códigos EPSG. Assim, toda e qualquer projeção pode ser identificada através de um número EPSG de 4 dígitos. Para fins exemplificativos, a Tabela 3.1 informa os sistemas geodésicos citados anteriormente e seus respectivos códigos EPSG.

Tabela 3.1 – Códigos EPSG referentes aos SGRs.

Estação Meteorológica	Córrego Alegre	SAD 69	SIRGAS 2000	WSG 84
Código EPSG	4225	4618	4674	4326

Para a elaboração do mapa de isopletas, seleciona-se no *software* QGIS o sistema geodésico de referência de interesse: WSG 84 – EPSG 4326.

### 3.1.3.2 *Base cartográfica*

Dado o objetivo de localizar os pontos correspondentes às estações meteorológicas no espaço geográfico, servindo como referência para o traçado das linhas curvas, é estabelecida uma base cartográfica, a qual dá forma ao mapa desejado. A base escolhida equivale somente aos

limites interestaduais de Minas Gerais, sem identificação dos municípios, e é provinda diretamente do IBGE, garantindo confiabilidade adequada do contorno do mapa. Ademais, por pertencer à Base Cartográfica Contínua do Brasil, sua modelagem está de acordo com as Especificações Técnicas para Estruturação de Dados Georreferenciados Vetoriais. A Figura 3.2 ilustra a base cartográfica inserida na interface do QGIS.



Figura 3.2 – Base cartográfica composta pelos limites interestaduais de Minas Gerais.

A base de Minas Gerais, com arquivo no formato *shapefile*, tem como sistema de referência o SIRGAS 2000, o qual é creditado pela norma vigente. O SIRGAS 2000 e o sistema WGS 84 são compatíveis, uma vez que possuem o mesmo elipsoide de referência (GRS 80), logo não implicam em quaisquer distorções indesejadas.

### 3.1.3.3 *Informações de entrada*

Conforme já explicitado, os dados inseridos no programa computacional são georreferenciados, ou seja, existem uma latitude e uma longitude associadas a cada valor de velocidade, indicando assim as coordenadas geográficas de cada estação meteorológica. Considerando que após o tratamento estatístico cada estação é representada apenas por um valor de velocidade do vento, é possível inserir uma planilha de dados com tantas linhas quantas forem as estações utilizadas para o traçado das isopletras.

Logo, as informações de entrada necessárias são organizadas nas seguintes colunas: ID: número de 5 dígitos, identificador da estação meteorológica; Cidade: cidade onde a estação meteorológica está localizada; S: latitude, em graus decimais; W: longitude, em graus decimais; Velocidade: valor de velocidade do vento para o respectivo período de integração.

Além disso, o QGIS reconhece apenas arquivos de texto delimitado, portanto, é preciso adequar o formato dos dados de maneira que estejam configurados como arquivos CSV (*Comma Separated Values*), formato de separação das colunas por vírgulas.

### 3.1.3.4 *Interpolação Espacial*

O guia do *software* QGIS define interpolação espacial como o processo de utilização de pontos com valores conhecidos para estimar os valores em outros pontos desconhecidos. O mapeamento das velocidades básicas do vento, por exemplo, é realizado por meio da interpolação espacial dos valores de velocidade básica em estações meteorológicas conhecidas, tornando possível aproximar o valor da velocidade do vento em um local sem registros, a princípio. A superfície utilizada para fazer a interpolação é denominada superfície estatística e, no caso, engloba toda a região envolvida pelas estações meteorológicas selecionadas.

O produto da interpolação espacial de uma superfície estatística é uma camada *raster*, a qual contém estimativas de valores de velocidade feitas para todas as células do *raster*. Este, por sua vez, é o nome do recurso computacional do QGIS usado para a realização do procedimento. De forma geral, dados *rasters* são compostos por células, ou matriz de pixels, de forma que cada um abriga um valor representante da área coberta pela respectiva célula. A Figura 3.3 ilustra a disposição das células de uma camada *raster*. É válido ressaltar, ademais, que a definição das dimensões das células deve ser feita tomando-se como base o tamanho da área a ser interpolada. Assim sendo, adotaram-se células de 1000 x 1000 pixels, visto que a base é toda a extensão do estado de Minas Gerais.

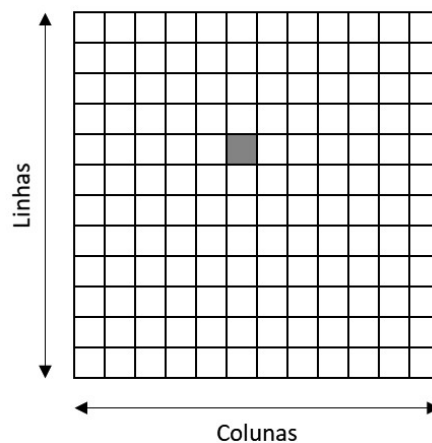


Figura 3.3 – Composição de uma camada *raster* (Imagem obtida via documentação do QGIS).

Para a realização da interpolação espacial, é necessário definir o método a ser utilizado no processo. Dentre os principais, destacam-se o método de Ponderação pelo Inverso da Distância (do inglês, IDW: *Inverse Distance Weighting*) e Redes de Triangulação Irregular (do inglês, TIN: *Triangulated Irregular Networks*).

Segundo Jakob e Young (2016), o método de interpolação espacial IDW parte do pressuposto que valores mais próximos entre si são mais parecidos do que distantes, ou seja, cada ponto possui uma influência no novo ponto, de forma que o peso diminui na medida em que a distância aumenta. A Figura 3.4 ilustra a lógica deste método.

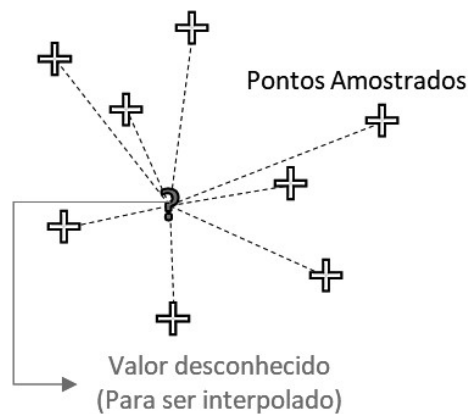


Figura 3.4 – Fundamentos do método de interpolação IDW (Imagem obtida via documentação do QGIS).

O método de interpolação TIN, por sua vez, utiliza o algoritmo Triangulação Delaunay e busca traçar triângulos com pontos vizinhos próximos a partir da interseção de círculos circunscritos em torno dos pontos amostrais, conforme a Figura 3.5.

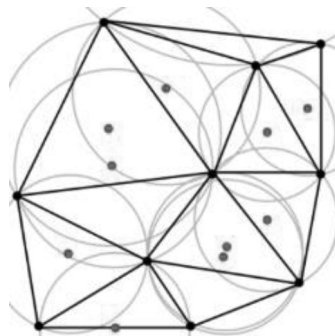


Figura 3.5 – Fundamentos do método de interpolação TIN (Imagem obtida via documentação do QGIS).

De acordo com a documentação do QGIS, o método TIN gera uma superfície não suavizada, o que prejudica a qualidade do produto. Portanto, optou-se pela utilização do método de Ponderação do Inverso da Distância para interpolar os valores de velocidade básica do vento.

### 3.2 Resultados e discussões

Este estudo iniciou com o levantamento das velocidades de vento no estado considerando um total de 225 estações meteorológicas, das quais 17 foram removidas devido à distância em relação à fronteira do estado de Minas Gerais e 110 devido à determinação de um valor extremo inconsistente, restando 98 estações. A Tabela A.1 apresenta as estações meteorológicas consideradas e as removidas na determinação do mapa de velocidades.

Para determinar se os dados coletados de uma determinada estação serão ou não considerados na definição do mapa de velocidades de vento do estado, as seguintes análises foram feitas:

- Análise do relevo da região onde está localizada a estação sob estudo;
- Análise da imagem de satélite para constatar a categoria de rugosidade do terreno;
- Análise comparativa dos valores extremos de velocidade do vento nas estações vizinhas.

Existem diversas incertezas nos dados coletados das estações meteorológicas, tais como: interferência nas medições devido à presença de obstáculos, alteração da rugosidade do terreno devido a modificações na ocupação do solo, falta de manutenção e calibração periódica dos equipamentos, imagens de satélite desatualizadas, entre outros. Dessa maneira, é necessário avaliar os valores extremos determinados para cada conjunto de dados das 98 estações de forma segura, visando não subestimar a ação do vento. Assim, os valores obtidos nesse trabalho foram comparados com as normas e trabalhos presentes na literatura.

No mapa de isopleias proposto pela ABNT NBR 6123:1988 e atualmente em revisão, as velocidades variam entre 30 e 50 m/s, considerando todo o território nacional, e entre 30 e 40 m/s, considerando apenas o estado de Minas Gerais, com espaçamento de 5 m/s entre as curvas e período de integração igual a 3 segundos. Nota-se que no estado de Minas Gerais as velocidades aumentam da região Norte para a região Sul, com valores máximos na fronteira com o estado de São Paulo. Para utilizar o mapa de isopleias, de maneira geral, as velocidades devem ser determinadas através da interpolação entre as curvas de velocidade constante, indicando assim valores aproximados a serem adotados em projetos.

Beck e Corrêa (2013) apresentam uma proposta de mapa de isopleias para todo o território brasileiro. No mapa, cujo período de integração é igual a 3 segundos, as velocidades no país variam entre 26 e 42 m/s e, dentro do estado de Minas Gerais, entre 32 e 40 m/s,

aproximadamente, com isopletas variando em intervalos de 2 m/s. Os autores ajustaram distribuições de Gumbel às séries temporais de máxima velocidade de vento e as usaram para prever a velocidade básica com período de recorrência de 50 anos. No mapa, confeccionado utilizando-se 104 estações meteorológicas, fica explícito que as velocidades no estado de Minas Gerais aumentam da região Norte para a região Sul, com valores máximos na fronteira com o estado de São Paulo.

Como visto, os intervalos de velocidades apresentados pela ABNT NBR 6123:1988 e por Beck e Corrêa (2013) apresentam valores mínimos de velocidade de vento iguais a 30 e 26 m/s, respectivamente. Além disso, valores inferiores a esses não são recorrentes em projetos de estruturas. Assim, em concordância com esses trabalhos e principalmente devido ao fato de o carregamento proveniente do vento ser preponderante no dimensionamento de estruturas de linhas de transmissão, neste trabalho não foram considerados valores extremos inferiores a 28 m/s.

Diante do critério adotado, a Tabela A.2 apresenta as estações excluídas e a Tabela A.3 as estações selecionadas para compor o banco de velocidades do vento, as quais serão utilizadas na confecção do mapa de velocidades básicas do estado de Minas Gerais. Ressalta-se que os valores apresentados são definidos tendo como referência um período de integração igual a 3 segundos minutos, altura de referência igual a 10 metros, categoria de rugosidade B e período de retorno igual a 50 anos.

A Figura 3.6 apresenta a posição geográfica das estações selecionadas.



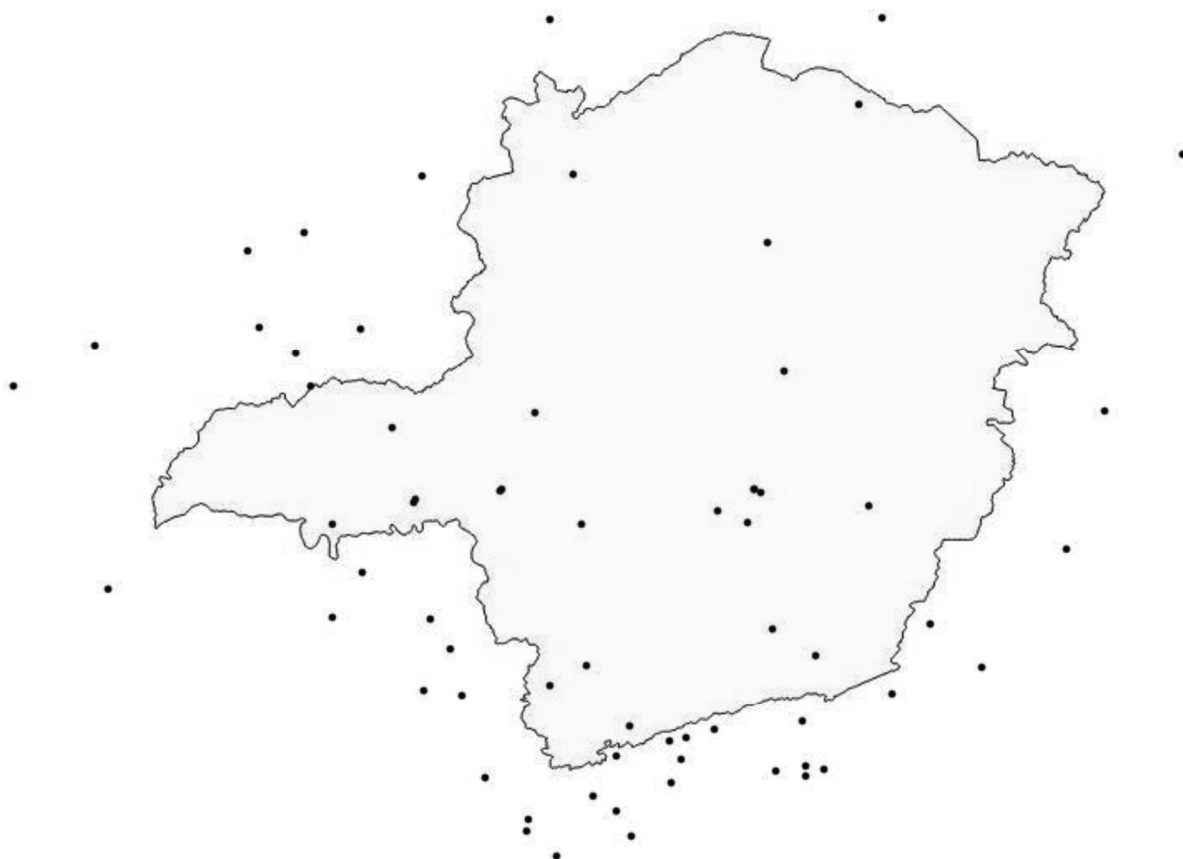


Figura 3.6 – Posição geográfica de cada estação meteorológica considerada.

De posse dos dados da Tabela A.3, foram gerados mapas de isopleias, em m/s, considerando período de integração igual a 3 segundos, discretizadas a cada 2 e 5 m/s, conforme as figuras a seguir.

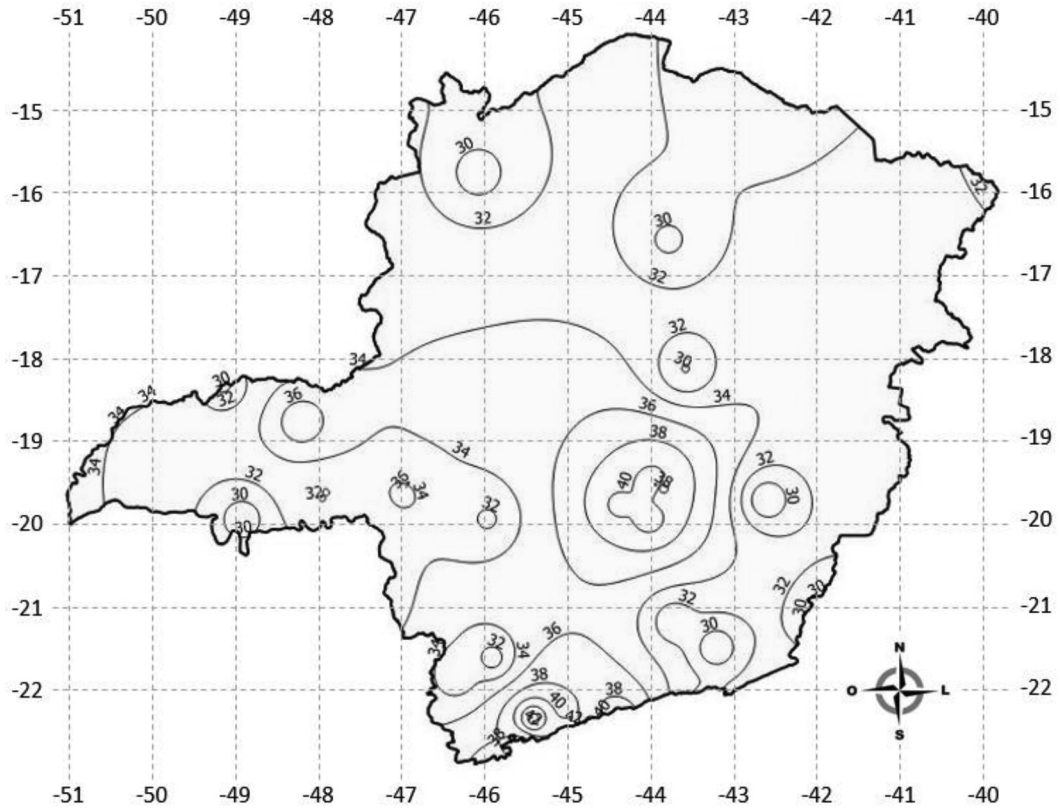


Figura 3.7 – Mapa de isopleias considerando um espaçamento de 2 m/s.

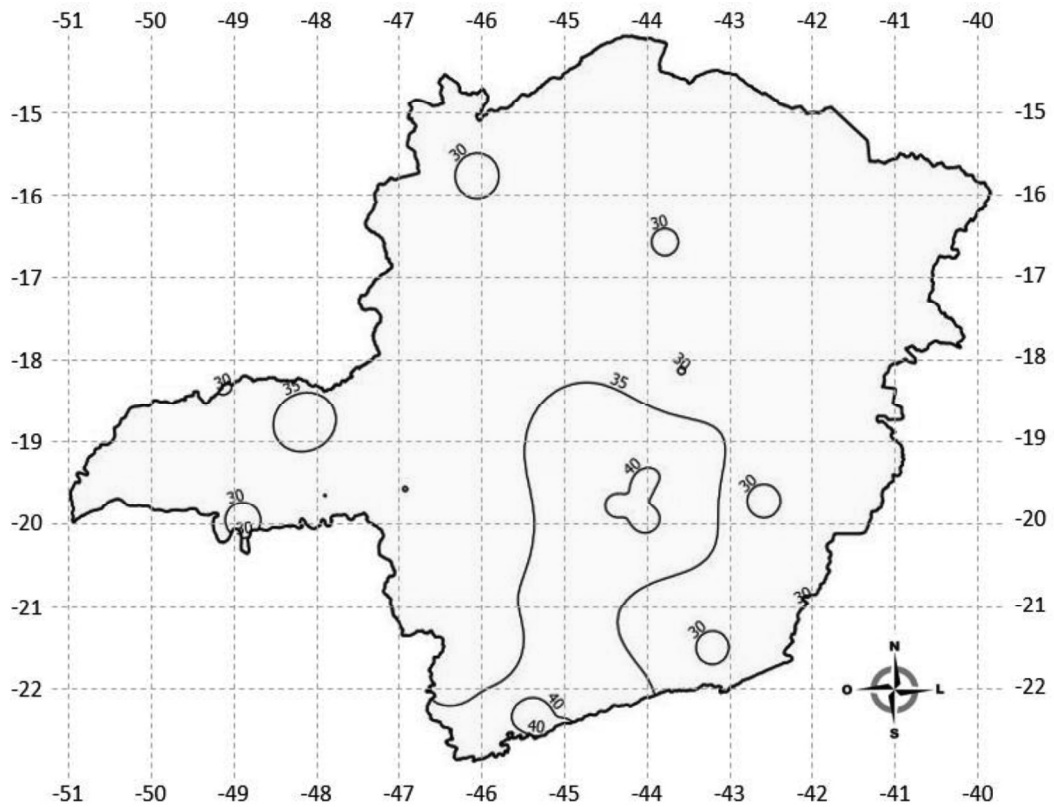


Figura 3.8 – Mapa de isopleias considerando um espaçamento de 5 m/s.

Algumas considerações importantes devem ser realizadas acerca desses mapas. Nota-se que, devido à posição geográfica das estações meteorológicas (Figura 3.6) e de seus respectivos valores extremos, a interpolação dos dados resultou em isopletas irregulares e em pontos isolados do mapa. O que se espera de um mapa de isopletas são curvas suaves que abranjam todo o território e que possibilite a interpolação entre as curvas. Observa-se também que o menor espaçamento entre as curvas melhora sua apresentação e possibilita uma utilização mais eficiente dos mapas propostos.

Uma avaliação mais precisa da velocidade básica em qualquer ponto do estado pode ser obtida através do mapa de calor apresentado na Figura 3.9, cujas faixas de velocidade são apresentadas para diferentes períodos de integração. A discretização dos municípios sobre esse mapa possibilita a identificação da velocidade máxima presente em cada município do estado.

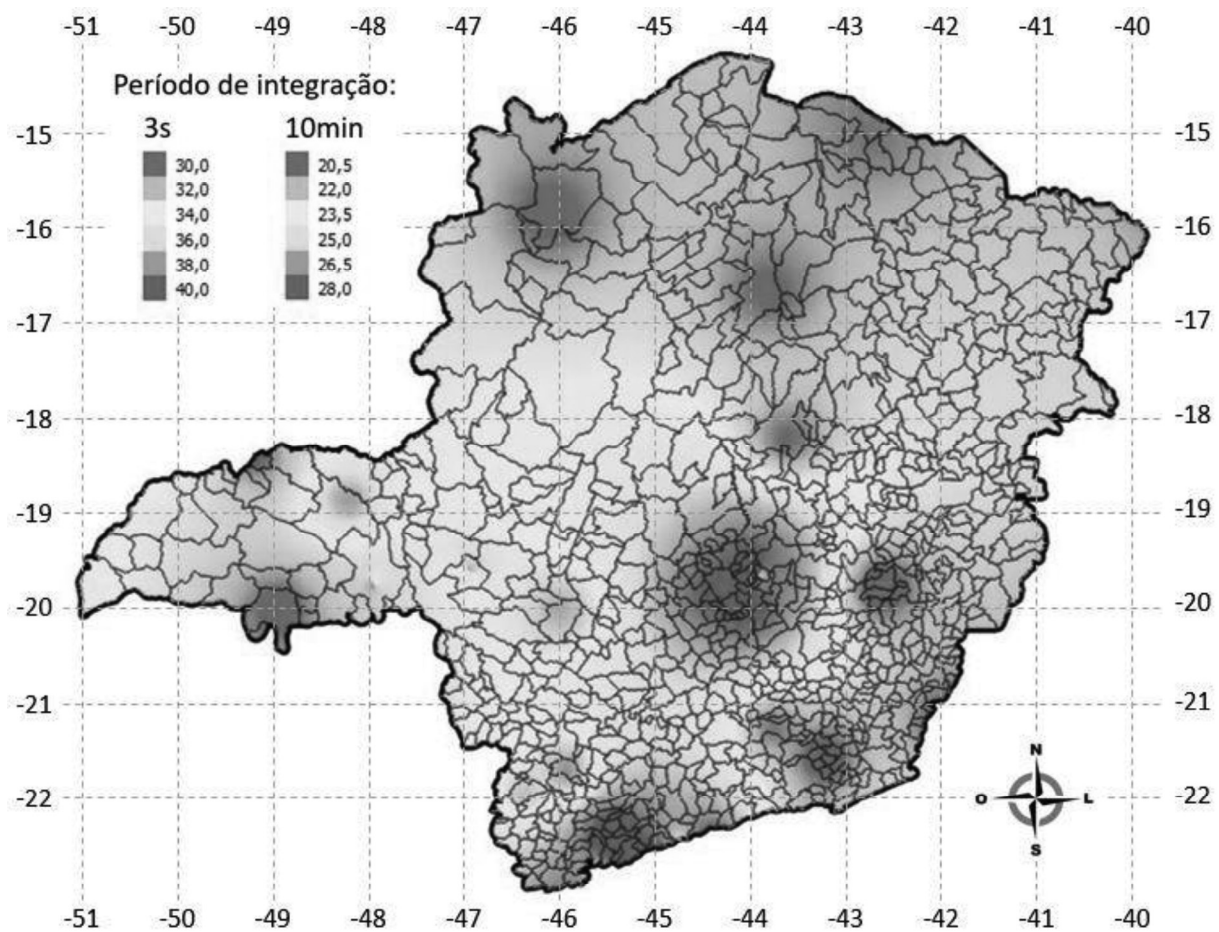


Figura 3.9 – Mapa de calor de velocidade básica do estado de Minas Gerais.

O mapa de calor proposto neste trabalho, considerando períodos de integração de 3 segundos e de 10 minutos, tem intervalo de velocidades que variam de 30,0 a 40,0 m/s e de 20,5 a 28,0 m/s, respectivamente. Ele sugere uma precisão muito melhor quando se avaliam as diferentes regiões do estado, com o aparecimento de picos não observados no mapa da norma ABNT NBR 6123:1988, como o da região central do estado, próximo à capital, Belo Horizonte. Isso ocorre porque a confecção do mapa aqui proposto foi baseada em um banco de dados muito mais amplo do que o disponível em 1977 (banco de dados que fundamentou o mapa de isopletas desta norma), sobretudo com maior número de estações.

# 4

## ANÁLISE NÃO LINEAR GEOMÉTRICA DE UMA ESTRUTURA DO TIPO SUSPENSÃO

### 4.1 Metodologia

Para avaliar o comportamento não linear geométrico das estruturas empregadas em linhas aéreas de transmissão da CEMIG, adotou-se uma estrutura do tipo suspensão amplamente utilizada em suas LTs. A estrutura é composta por perfis cantoneira de aço carbono ASTM-A36 e ligações parafusadas. Assumiu-se que ela pertence a um sistema composto por três condutores elétricos em disposição triangular do tipo Linnet 336,4 MCM e um cabo guarda HS 5/16 in. As cadeias de isoladores são compostas por discos com corpo isolante de vidro temperado (254 x 146 mm), com 1,42 m de comprimento. Admitiu-se também que estrutura se localiza em uma região montanhosa e com vegetação natural preservada, sendo sua altitude média e a temperatura média consideradas como 700 metros e 15 °C, respectivamente.

O Quadro 4.1 apresenta as propriedades dos cabos presentes na LT em análise. As propriedades dos cabos condutores foram retiradas do catálogo de produtos do fabricante (Nexans, 2013).

Quadro 4.1 – Propriedades dos cabos presentes na linha de transmissão (Carvalho, 2010).

Propriedades	Cabo condutor – Linnet 336,4 MCM	Cabo guarda – HS 5/16 in
Diâmetro [mm]	18,30	7,95
Material	Alumínio com alma de aço	Aço
Módulo de Elasticidade [GPa]	55,6	200,0
Carga de Ruptura [kgf]	6393	3630
Peso Linear [kgf/km]	688,3	305,0
EDS ( <i>Every Day Stress</i> )	18,5 %	16,0 %

A força de tração EDS (*Every Day Stress*) é definida como a tração final de trabalho dos cabos após o seu lançamento, dada em relação ao valor da carga de ruptura (%). Nesta tração

é considerado o efeito da atuação do peso próprio somado à tração imposta ao cabo para a obtenção da catenária de projeto.

A Figura 4.1 apresenta a geometria e as principais dimensões da estrutura-tipo.

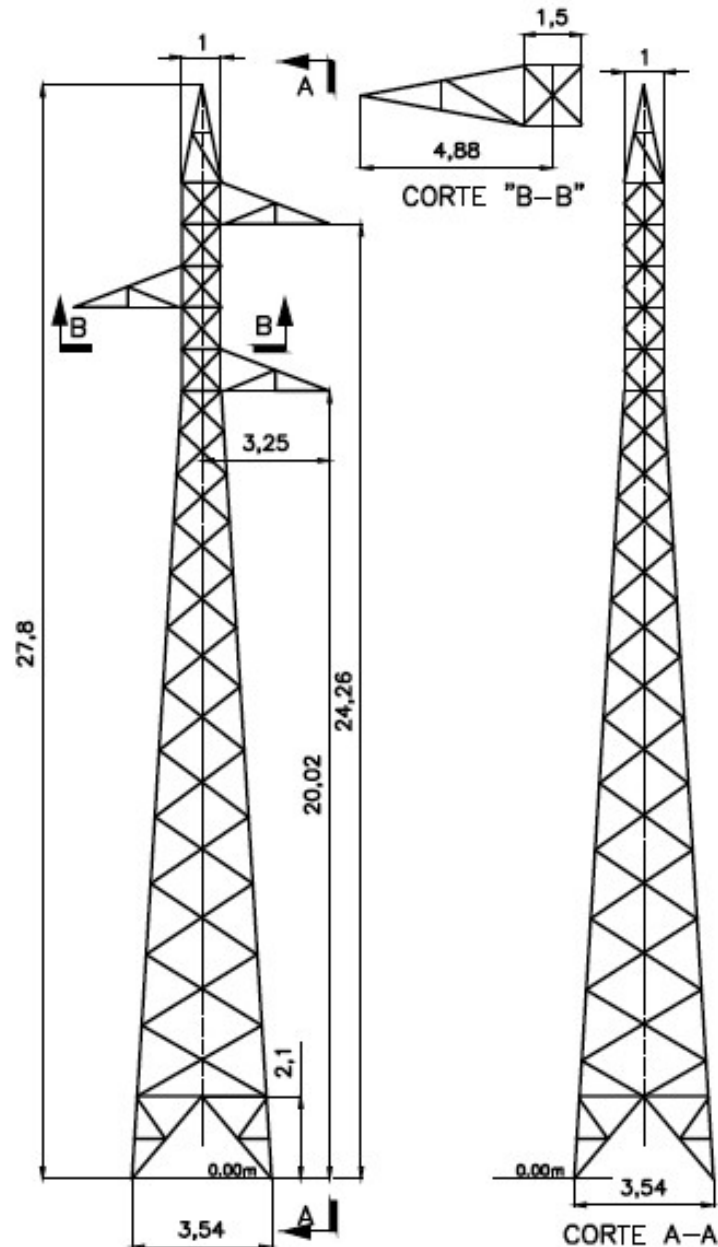


Figura 4.1 – Geometria e dimensões gerais da torre em análise [m] (Adaptado de Carvalho (2010)).

O estudo paramétrico será dividido em três diferentes conjuntos de análises, conforme a finalidade de avaliar a influência de diferentes parâmetros. Destaca-se que todas as análises serão realizadas considerando dois modelos, um simplificado e um modelo completo, os quais serão detalhados posteriormente.

#### 4.1.1 Avaliação da influência do comprimento dos vãos

Para avaliar a influência do comprimento dos vãos no comportamento não linear da estrutura, serão considerados vãos nivelados e velocidade básica do vento igual a 35 m/s, uma vez que, conforme o estudo climatológico apresentado nos resultados do Capítulo 3, esta é a velocidade que representa a maior parte do território.

A Tabela 4.1 apresenta detalhadamente todas as combinações de vãos adjacentes deste conjunto de análises e a Figura 4.2 exemplifica a combinação 7.

Tabela 4.1 – Análises considerando vãos nivelados e velocidade básica do vento igual a 35 m/s.

Combinação	Vãos adjacentes [m]	Combinação	Vãos adjacentes [m]	Combinação	Vãos adjacentes [m]
1	300 e 300	8	400 e 500	15	500 e 800
2	300 e 400	9	400 e 600	16	600 e 600
3	300 e 500	10	400 e 700	17	600 e 700
4	300 e 600	11	400 e 800	18	600 e 800
5	300 e 700	12	500 e 500	19	700 e 700
6	300 e 800	13	500 e 600	20	700 e 800
7	400 e 400	14	500 e 700	21	800 e 800

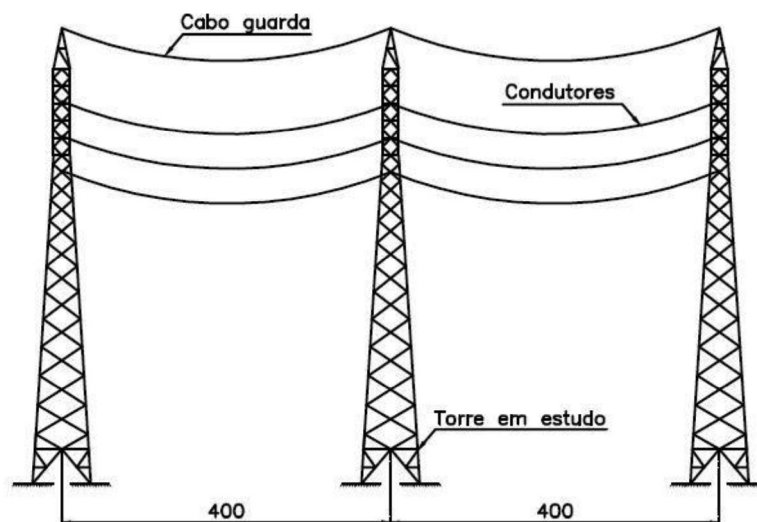


Figura 4.2 – Esquema do trecho da LT com vãos adjacentes nivelados e de comprimento igual a 400 metros (sem escala).

As combinações da Tabela 4.1 resultarão em um total de 42 análises, sendo 21 considerando o modelo completo e 21 considerando o modelo simplificado.

#### 4.1.2 Avaliação da influência da velocidade média do vento

Para avaliar a influência da velocidade média do vento serão considerados vãos nivelados e três velocidades presentes no estado, a saber: 30, 35 e 40 m/s. Neste caso, serão avaliadas 10 combinações de vãos, conforme apresentado na Tabela 4.2. A combinação 11 é exemplificada na Figura 4.3.

Tabela 4.2 – Análises considerando vãos nivelados e velocidade básica do vento igual a 30, 35 e 40 m/s.

Combinação	Vãos adjacentes [m]	Combinação	Vãos adjacentes [m]
1	300 e 300	13	500 e 600
4	300 e 600	15	500 e 800
6	300 e 800	18	600 e 800
9	400 e 600	19	700 e 700
11	400 e 800	21	800 e 800

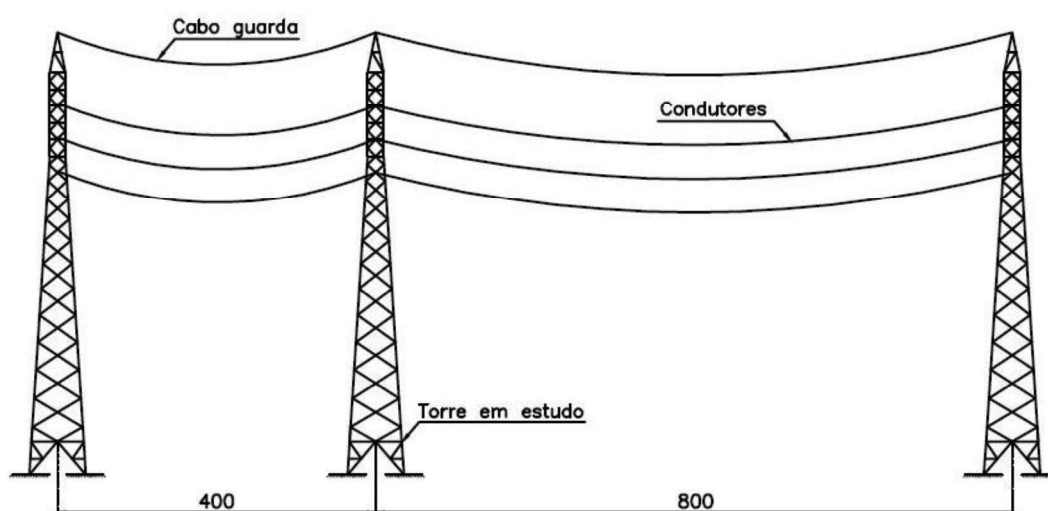


Figura 4.3 – Esquema do trecho da LT com vãos adjacentes nivelados e de comprimentos iguais a 400 e a 800 metros, respectivamente (sem escala), avaliados para as velocidades de 30, 35 e 40 m/s.

As combinações da Tabela 4.2 resultarão em um total de 60 análises, sendo 30 para cada modelo numérico.

#### 4.1.3 Avaliação da influência do desnível das torres adjacentes

As linhas de transmissão de propriedade da CEMIG apresentam vãos usuais que variam de 300 a 800 metros, em terrenos cujos desníveis variam de 0% (terreno plano) a 15% (terreno com aclive ou declive acentuado), sendo esses percentuais medidos em relação ao comprimento do vão. Desta maneira, serão analisadas algumas combinações de vãos dentro desta faixa para terreno sem desnível (0%) e para os desníveis iguais a 5 e 10% (positivos e



negativos), considerando apenas a velocidade básica igual a 35 m/s. As combinações de vãos deste conjunto são as de número 7, 11 e 21 (Tabela 4.1) e, considerando as variações de desnível, determina-se o conjunto de análises a serem realizadas, presentes na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Análises considerando vãos desnivelados e velocidade básica do vento igual a 35 m/s.

Desnível à esquerda	Vãos adjacentes [m]	Desnível à direita
Positivo	400 e 400	Positivo
Positivo	400 e 400	Negativo
Negativo	400 e 400	Negativo
Positivo	400 e 800	Negativo
Positivo	400 e 800	Positivo
Negativo	400 e 800	Negativo
Negativo	400 e 800	Positivo
Positivo	800 e 800	Positivo
Positivo	800 e 800	Negativo
Negativo	800 e 800	Negativo

A Figura 4.4 e a Figura 4.5 exemplificam análises que consideram vãos de comprimentos iguais e desnivelados acima e abaixo da torre em estudo, respectivamente.

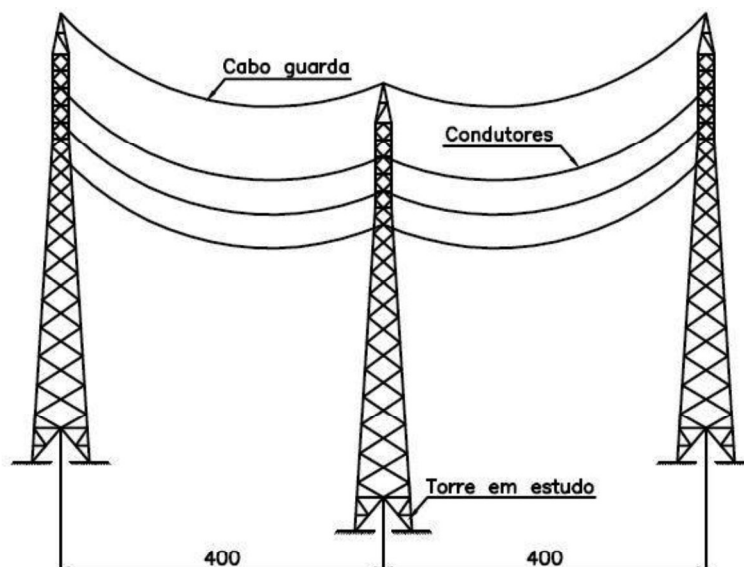


Figura 4.4 – Esquema do trecho da LT com vãos adjacentes desnivelados (acima da torre em estudo) e de comprimento igual a 400 metros, (sem escala).

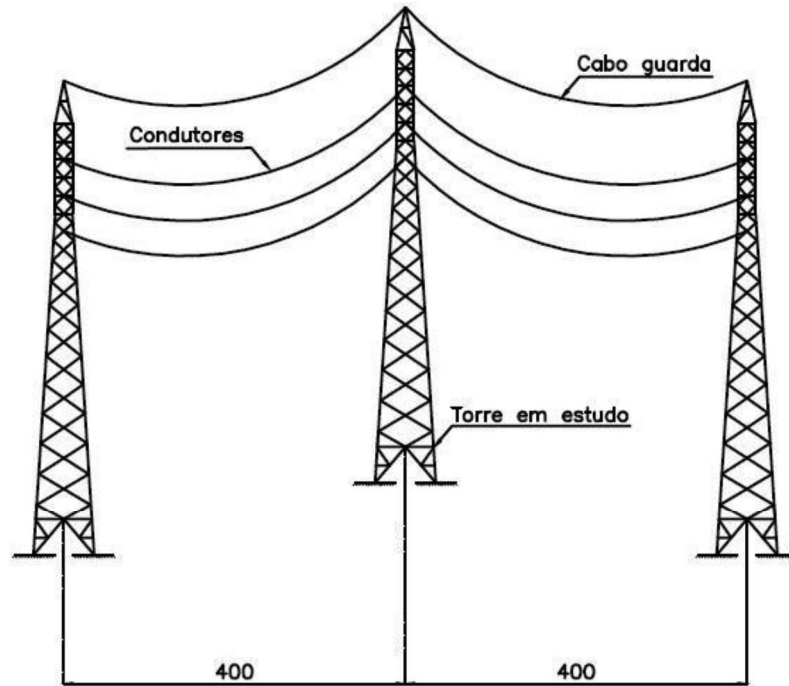


Figura 4.5 – Esquema do trecho da LT com vãos adjacentes desnivelados (abaixo da torre em estudo) e de comprimento igual a 400 metros, (sem escala).

A Figura 4.6 e a Figura 4.7 exemplificam análises que consideram vãos de comprimentos desiguais e desnivelados em diferentes situações.

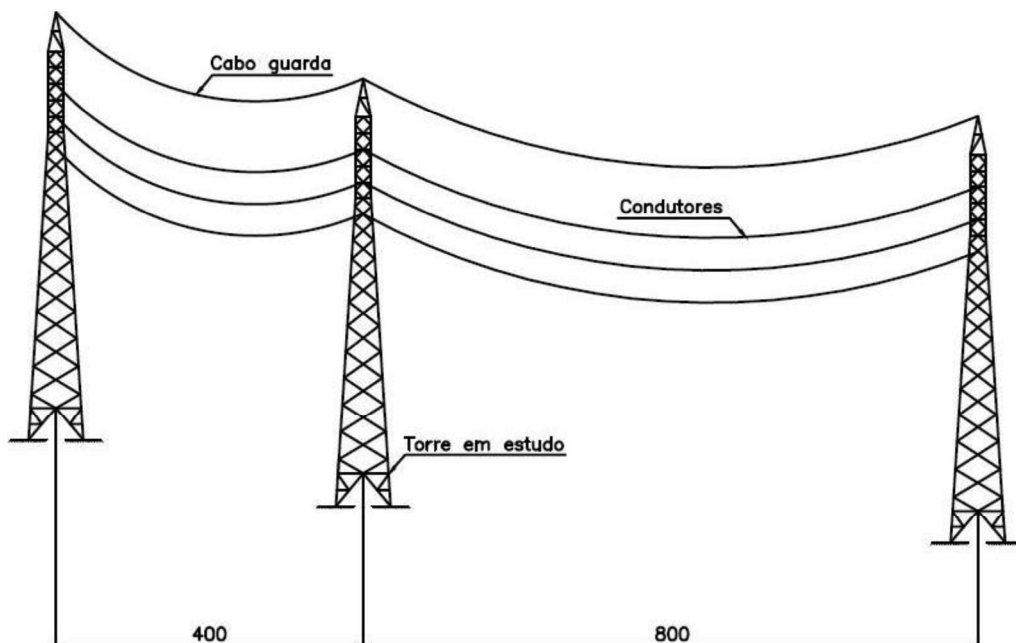


Figura 4.6 – Esquema do trecho da LT com vãos adjacentes desnivelados (menor vão acima e maior vão abaixo da torre em estudo) e de comprimento igual a 400 e a 800 metros, respectivamente (sem escala).

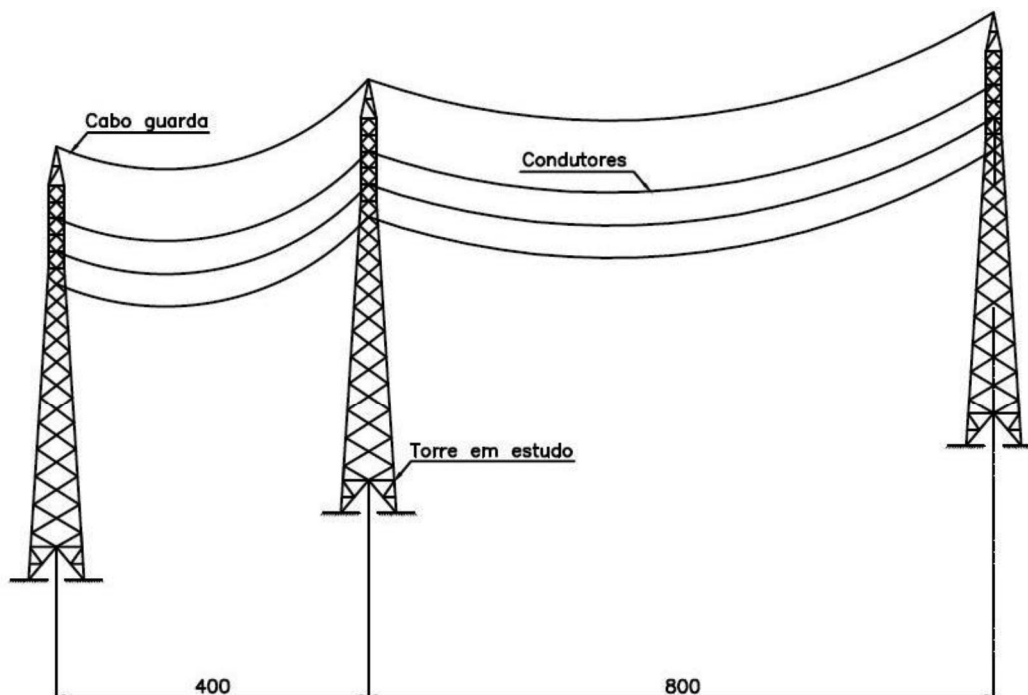


Figura 4.7 – Esquema do trecho da LT com vãos adjacentes desnivelados (menor vão abaixo e maior vão acima da torre em estudo) e de comprimento igual a 400 e a 800 metros, respectivamente (sem escala).

Todas as combinações da Tabela 4.2, acrescidas das combinações 7, 11 e 21 da Tabela 4.1 (terreno plano), resultarão em um total de 23 análises.

#### 4.1.4 Modelagem da estrutura treliçada em elementos finitos

A modelagem da estrutura em elementos finitos foi realizada utilizando o pacote computacional ANSYS v.18.2. Foram construídos dois modelos distintos: o primeiro denominado modelo simplificado, contemplando somente a torre de transmissão, conforme as especificações da norma americana ASCE 10-15; o segundo, denominado modelo completo, contempla a torre, as cadeias de isoladores e os cabos do sistema de transmissão.

Destaca-se que Carvalho (2010) e Oliveira (2019) apresentaram modelos similares para avaliar a ação do vento em sistemas de LTs, os quais foram validados por meio da comparação com resultados obtidos em túnel de vento por Loredou-Souza (1996). Neste trabalho, os modelos destes autores foram adaptados para que a estrutura tivesse todas as bases niveladas, sendo apresentada em detalhes nos itens a seguir a metodologia utilizada para o seu desenvolvimento.

#### 4.1.5 Modelo simplificado: somente a estrutura da torre de transmissão

##### 4.1.5.1 Aspectos gerais da modelagem

Os modelos numéricos foram desenvolvidos no programa de elementos finitos ANSYS através da linguagem própria de programação APDL (*Ansys Parametric Design Language*). Por meio desta programação é possível criar geometrias, aplicar forças e condições de contorno, solucionar o modelo e realizar o pós-processamento dos resultados. Este recurso diminui significativamente o tempo gasto na modelagem, cálculos interativos do problema e análise dos resultados. Neste trabalho, o posicionamento vertical dos nós que compõem os cabos e os carregamentos foram aplicados em conformidade com o apresentado por Carvalho (2010) e Oliveira (2019).

Para a definição dos nós do modelo da torre, um arquivo com as coordenadas espaciais foi criado e importado no programa. As unidades usadas na modelagem foram metros [m] para comprimento e newtons [N] para força. A Figura 4.8 apresenta uma vista isométrica do modelo computacional da torre e o sistema de coordenadas utilizado.

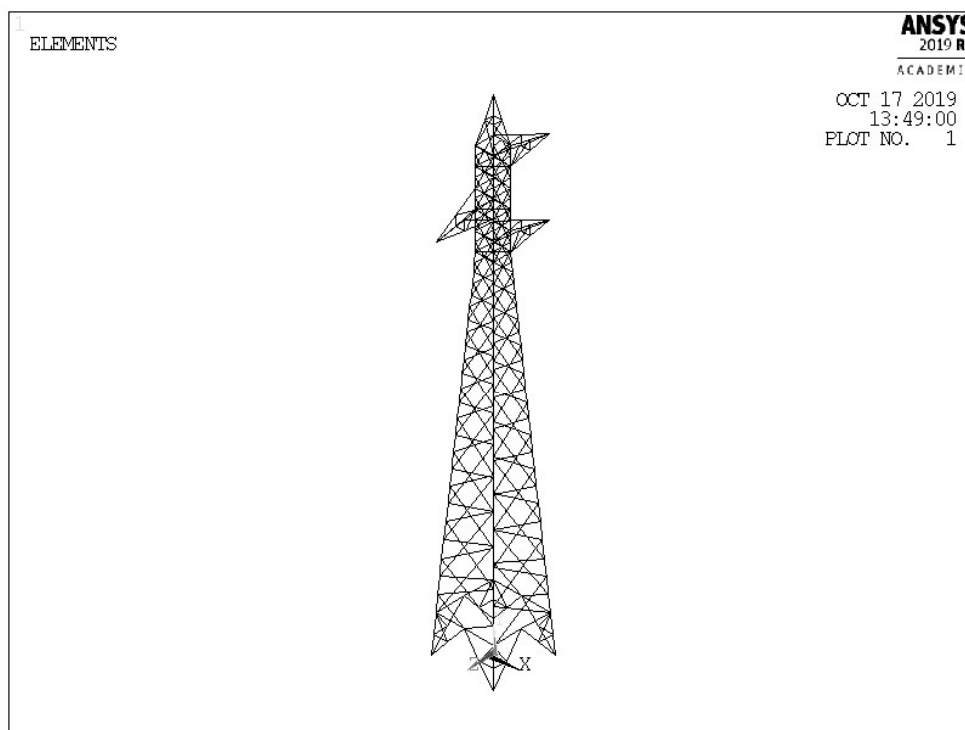


Figura 4.8 – Modelo tridimensional da torre de transmissão.

Para os perfis de aço ASTM A-36, adotaram-se módulo de elasticidade igual a 200 GPa, coeficiente de Poisson igual a 0,3 e densidade de 7850 kg/m<sup>3</sup>.

Utilizou-se o elemento de pórtico espacial *BEAM188* (Figura 4.9a) para representar as colunas e os montantes das mísulas. Este elemento possui dois nós com seis graus de liberdade por nó (translações e rotações nos três eixos). Para as estruturas de contraventamento da torre foram utilizados elementos de treliça não linear *LINK180* (Figura 4.9b). Este elemento possui dois nós com três graus de liberdade por nó (translações nos três eixos). A priori toda a estrutura poderia ser modelada com elementos de treliça, conforme recomendado pela ASCE 10-15. Entretanto, estruturas com contraventamentos defasados, como a estrutura em análise, apresentam instabilidade por não serem travadas nos planos perpendiculares. Assim, a consideração das colunas como elementos de viga garante a estabilidade da estrutura.

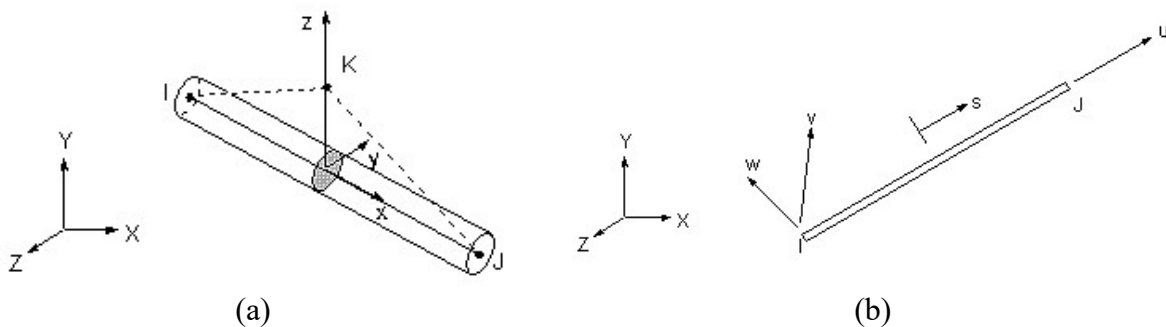


Figura 4.9 – (a) Elemento BEAM 188; (b) Elemento LINK180 (ANSYS Inc, 2017).

Mesmo na modelagem simplificada do sistema estrutural serão considerados os efeitos das não linearidades geométricas e dos grandes gradientes de deslocamentos (*large rotation*). Tal consideração objetiva a avaliação da susceptibilidade da estrutura da treliça ao acréscimo de esforços internos decorrentes da não linearidade geométrica.

#### 4.1.5.2 Aplicação das condições de contorno

As condições de contorno foram aplicadas aos nós que simulam as bases da torre. Para simular bases indeslocáveis dos perfis metálicos na fundação de concreto, os nós das bases tiveram as três translações restritas. A Figura 4.10 apresenta as condições de contorno aplicadas aos pés da torre. É importante destacar que a imposição destas condições implica a desconsideração da interação solo-estrutura. Em outras palavras, as fundações foram consideradas rígidas o suficiente para não interferirem no comportamento estrutural da torre.

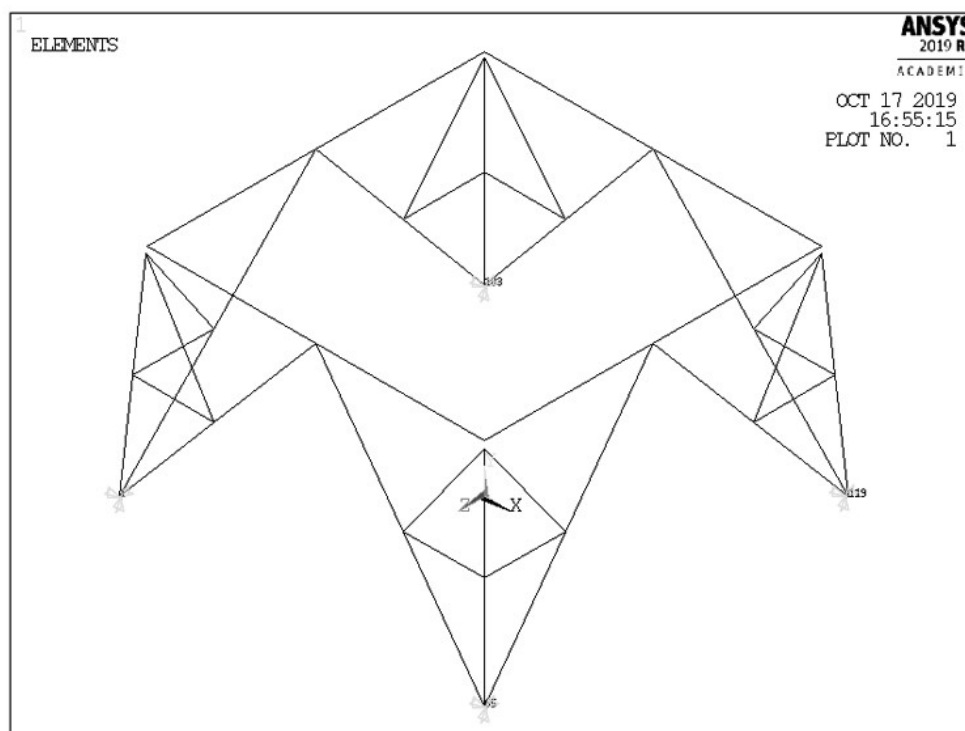


Figura 4.10 – Condições de contorno aplicadas às bases da torre.

#### 4.1.5.3 Determinação e aplicação das forças

Foram considerados dois casos de carregamento, sendo que no primeiro caso são contempladas somente as forças gravitacionais e, no segundo, as forças de vento são aplicadas no modelo já deformado devido à ação do peso próprio. O peso próprio da estrutura metálica da torre foi aplicado por meio da densidade dos elementos estruturais. A estrutura da torre apresenta o peso de projeto igual a 20672 N (2108 kgf). Cada isolador teve seu peso próprio estimado em 310,88 N (32 kgf).

Para o cálculo da reação devido ao peso próprio dos cabos foi utilizada a formulação apresentada por Labegalini *et al.* (1992), que considera o desnível, conforme Equações (2.22) e (2.23). O comprimento desenvolvido da catenária devido ao peso próprio dos cabos foi obtido analiticamente, somente para o cálculo do peso total dos mesmos. A formulação matemática utilizada foi exposta na Equação (2.24).

As forças devidas ao peso próprio dos elementos para cada combinação de vãos adjacentes analisada, considerando as torres adjacentes niveladas e desniveladas, são apresentadas na Tabela 4.4 e na Tabela 4.5 respectivamente. Estas forças devem ser aplicadas aos pontos de

suspensão dos cabos, ou seja, nos pontos extremos das mísulas da torre, no sentido vertical e negativo (eixo Y) em relação ao sistema de referência adotado.

Tabela 4.4 – Forças verticais na torre devidas ao peso próprio dos seus elementos considerando as torres adjacentes niveladas [N].

Combinação	Elemento		
	Cabo condutor	Cabo condutor + Isolador	Cabo guarda
300 e 300	2032,97	2343,85	898,56
300 e 400	2373,14	2684,02	1048,80
300 e 500	2714,47	3025,35	1199,45
300 e 600	3057,24	3368,12	1350,63
300 e 700	3401,75	3712,63	1502,42
300 e 800	3748,28	4059,16	1654,94
400 e 400	2713,31	3024,19	1199,04
400 e 500	3054,64	3365,52	1349,70
400 e 600	3397,41	3708,29	1500,87
400 e 700	3741,92	4052,80	1652,66
400 e 800	4088,46	4399,34	1805,18
500 e 500	3395,97	3706,85	1500,35
500 e 600	3738,74	4049,62	1651,52
500 e 700	4083,25	4394,13	1803,32
500 e 800	4429,78	4740,66	1955,84
600 e 600	4081,51	4392,39	1802,70
600 e 700	4426,02	4736,90	1954,49
600 e 800	4772,55	5083,43	2107,01
700 e 700	4770,52	5081,40	2106,28
700 e 800	5117,06	5427,94	2258,80
800 e 800	5463,60	5774,48	2411,32

Tabela 4.5 – Forças verticais na torre devidas ao peso próprio dos seus elementos considerando as torres adjacentes desniveladas [N].

Combinação	Desnível à esquerda	Desnível à direita	Condutor	Condutor + Isolador	Cabo Guarda
400 e 400	5%	5%	1546,9	1857,8	627,1
400 e 400	-5%	5%	2707,2	3018,1	1196,8
400 e 400	-5%	-5%	3867,4	4178,3	1766,6
400 e 800	5%	-5%	4060,8	4371,6	1795,2
400 e 800	5%	5%	2900,5	3211,4	1225,5
400 e 800	-5%	-5%	5221,0	5531,9	2365,0
400 e 800	-5%	5%	4060,8	4371,6	1795,2
800 e 800	5%	5%	4254,1	4565,0	1823,9
800 e 800	-5%	5%	5414,3	5725,2	2393,6
800 e 800	-5%	-5%	6574,6	6885,5	2963,4
400 e 400	10%	10%	386,7	697,6	57,3
400 e 400	-10%	10%	2707,2	3018,1	1196,8
400 e 400	-10%	-10%	5027,6	5338,5	2336,4
400 e 800	10%	-10%	4060,8	4371,6	1795,2
400 e 800	10%	10%	1740,3	2051,2	655,7
400 e 800	-10%	-10%	6381,2	6692,1	2934,8
400 e 800	-10%	10%	4060,8	4371,6	1795,2
800 e 800	10%	10%	3093,9	3404,8	1254,1
800 e 800	-10%	10%	5414,3	5725,2	2393,6
800 e 800	-10%	-10%	7734,8	8045,7	3533,2

A Tabela 4.6 apresenta as forças devidas ao vento para cada combinação de vãos adjacentes e para as diferentes velocidades adotadas no estudo. Estas forças devem também ser aplicadas aos pontos extremos das mísulas da torre, no sentido transversal e positivo (eixo Z) em relação ao sistema de referência adotado. Destaca-se que estes valores não tiveram diferenças significativas para casos em que as torres adjacentes são desniveladas, uma vez que o comprimento desenvolvido dos cabos não apresentou alterações significativas.



Tabela 4.6 – Forças transversais aplicadas na torre devidas à ação do vento nos cabos [N].

Comb.	30 m/s		35 m/s		40 m/s	
	Cabo condutor	Cabo guarda	Cabo condutor	Cabo guarda	Cabo condutor	Cabo guarda
300 e 300	2685,58	1164,58	3655,43	1585,15	4774,41	2070,39
300 e 400	3133,18	1358,68	4264,66	1849,34	5570,14	2415,45
300 e 500	3580,78	1552,78	4873,90	2113,53	6365,87	2760,52
300 e 600	4028,37	1746,88	5483,14	2377,72	7161,61	3105,58
300 e 700	4475,97	1940,97	6092,38	2641,92	7957,34	3450,64
300 e 800	4923,57	2135,07	6701,62	2906,11	8753,08	3795,71
400 e 400	3580,78	1552,78	4873,90	2113,53	6365,87	2760,52
400 e 500	4028,37	1746,88	5483,14	2377,72	7161,61	3105,58
400 e 600	4475,97	1940,97	6092,38	2641,92	7957,34	3450,64
400 e 700	4923,57	2135,07	6701,62	2906,11	8753,08	3795,71
400 e 800	5371,17	2329,17	7310,85	3170,30	9548,81	4140,77
500 e 500	4475,97	1940,97	6092,38	2641,92	7957,34	3450,64
500 e 600	4923,57	2135,07	6701,62	2906,11	8753,08	3795,71
500 e 700	5371,17	2329,17	7310,85	3170,30	9548,81	4140,77
500 e 800	5818,76	2523,26	7920,09	3434,49	10344,55	4485,84
600 e 600	5371,17	2329,17	7310,85	3170,30	9548,81	4140,77
600 e 700	5818,76	2523,26	7920,09	3434,49	10344,55	4485,84
600 e 800	6266,36	2717,36	8529,33	3698,68	11140,28	4830,90
700 e 700	6266,36	2717,36	8529,33	3698,68	11140,28	4830,90
700 e 800	6713,96	2911,46	9138,57	3962,87	11936,01	5175,97
800 e 800	7161,55	3105,56	9747,80	4227,07	12731,75	5521,03

Destaca-se que a utilização do modelo simplificado apresenta menor custo computacional, uma vez que haverá menos incógnitas a serem calculadas pelo método dos elementos finitos. Em outras palavras, o tempo de processamento e a memória de armazenamento necessária para armazenar os resultados da análise serão menores, o que é vantajoso para o usuário.

#### 4.1.6 Modelo completo: torre, cadeia de isoladores e cabos

##### 4.1.6.1 Aspectos gerais da modelagem

No modelo completo utiliza-se todo o modelo desenvolvido para a torre (simplificado), com adição dos elementos que representam os cabos e as cadeias de isoladores. A Figura 4.11 apresenta uma vista isométrica do modelo completo e o sistema de coordenadas utilizado.

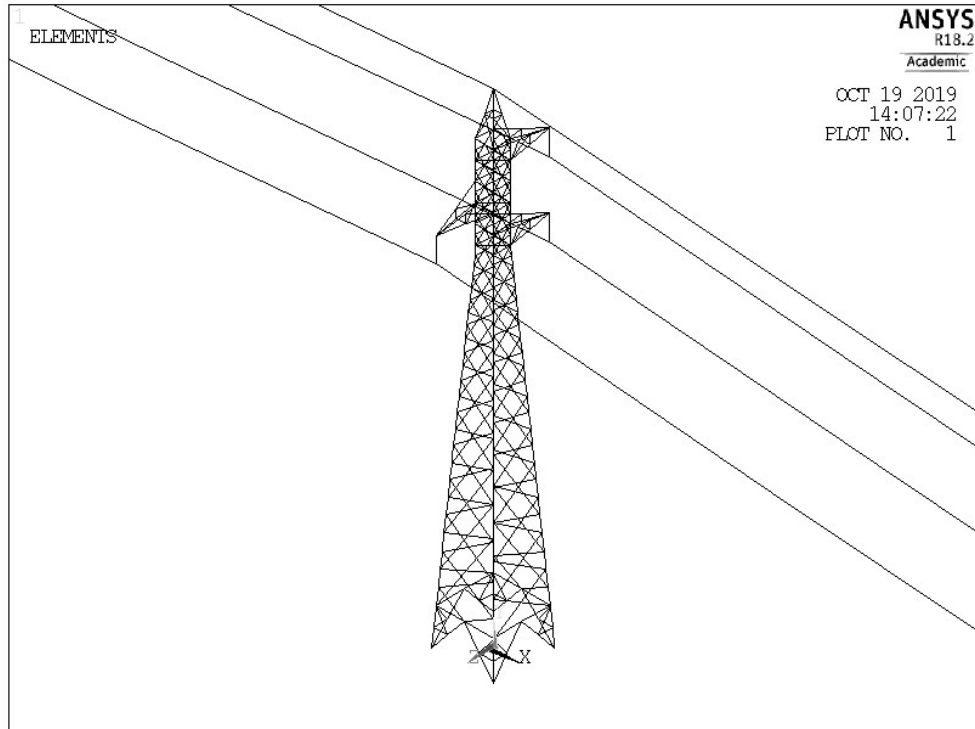


Figura 4.11 – Modelo tridimensional completo.

Na discretização do modelo completo, utilizou-se o elemento finito *LINK180*, tanto para os cabos como para a cadeia de isoladores. Para os cabos foram utilizadas malhas com  $n$  elementos, sendo  $n$  o comprimento do vão dividido por 20, isto é, cada elemento da malha tem tamanho igual a 20 metros. As cadeias de isoladores foram consideradas como elementos bi-rotulados com elevada rigidez axial.

As cadeias de isoladores são verticais após o lançamento dos cabos condutores. Contudo, como existem vãos de cabos diferentes e conseqüentemente pesos diferentes, com a atuação do peso próprio dos cabos no modelo o elemento que representa a cadeia de isoladores não fica na posição vertical. Esse elemento deverá ser modelado inclinado, no sentido do menor vão dos cabos, para que, após a realização de cálculos iterativos considerando a atuação incremental do peso próprio e do esticamento dos condutores, apresente-se na posição vertical. A Figura 4.12 apresenta a modelagem da cadeia de isoladores inclinada no sentido do vão com o menor comprimento.

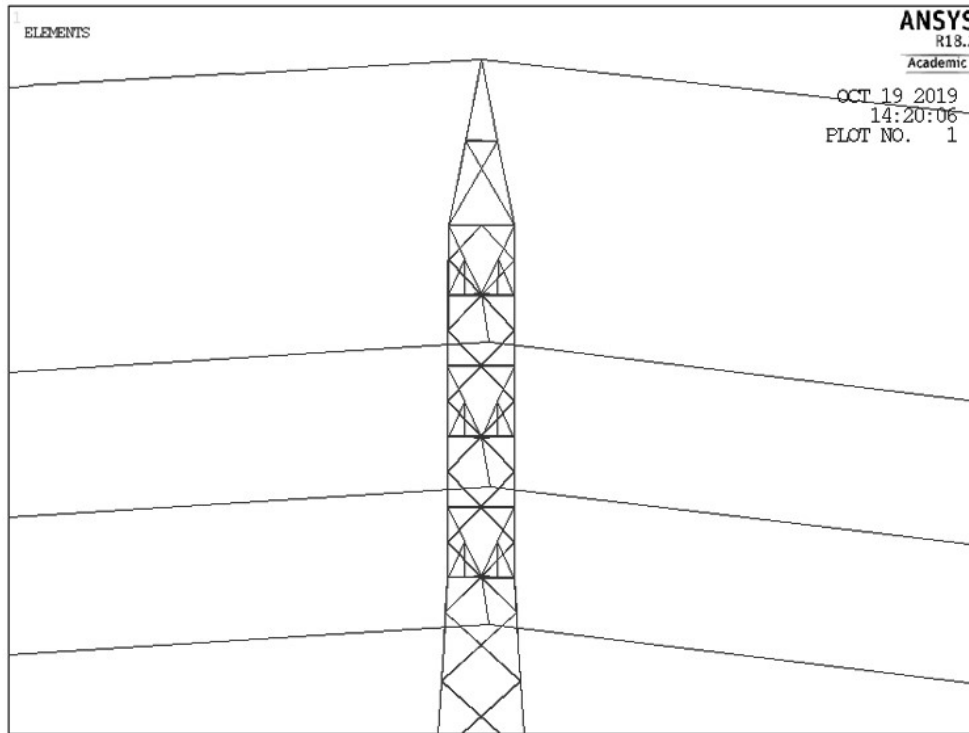


Figura 4.12 – Modelagem da cadeia de isoladores inclinada para o vão de menor comprimento.

Para chegar à tração final de trabalho dos cabos (EDS – *Every Day Stress*), deve-se utilizar uma sobreposição de efeitos, forçando deslocamentos (cabos modelados a partir de catenárias obtidas teoricamente) e deformações iniciais. A formulação de grandes gradientes de deslocamentos (*large rotation*) deve ser considerada para o cálculo correto das trações e consequentemente da catenária final. Os cálculos devem ser iterativos, com acréscimos graduais de força para que o sistema chegue à convergência em cada iteração. A deformação inicial é o fator preponderante para a estabilidade da solução.

Assim, adotou-se  $1 \times 10^{-1}$  de deformação inicial para todos os vãos e, por meio da equação da mudança de estado (Equação (2.34)), encontrou-se qual o valor da tração inicial ( $T_0$ ) a ser aplicada aos cabos do modelo para que se alcance a tração EDS e para que os isoladores fiquem na posição vertical após a atuação incremental do peso próprio. A Tabela 4.7 apresenta os valores de tração inicial utilizados para cada comprimento de vão. Destaca-se que estes valores não tiveram diferenças significativas para casos em que as torres adjacentes são desniveladas.

Tabela 4.7 – Tração inicial ( $T_0$ ) [N] aplicada aos modelos para cada comprimento de vão.

Comprimento do vão [m]	Cabo Condutor	Cabo Guarda
300	18900	11000
400	14400	7300
500	13170	6700
600	12630	6400
700	12330	6200
800	12150	6000

A modelagem do cabo guarda foi feita com uma metodologia diferente da utilizada para os cabos condutores, uma vez que a ligação deste cabo com a torre é realizada através de um elemento fixo (grampo), e não de um elemento deslocável (cadeia de isoladores). No entanto, o grampo só é prensado após o lançamento do cabo guarda, fazendo a força longitudinal resultante tender para zero. Contudo, para estabelecer a mesma tração em ambos os vãos do cabo guarda, é necessário realizar cálculos iterativos, considerando o aumento do comprimento da catenária do lado do maior vão e, conseqüentemente, a redução da catenária do menor vão.

O posicionamento de todos os nós que compõem os cabos foi aplicado através de uma macro que contém a equação da catenária (Equação (2.25)).

#### 4.1.6.2 Aplicação das condições de contorno

Para que o sistema estrutural esteja em equilíbrio, além das condições de contorno especificadas para as bases da torre, foram aplicadas as reações provocadas pela atuação do peso próprio e das forças devidas ao vento nos cabos presentes nos vãos adjacentes ao trecho em estudo. Para isso, tomou-se o comprimento médio de 400 metros e considerou-se a situação do cabo biapoiado e nivelado, de maneira que as reações fossem iguais à metade do valor total para cada extremidade. Na Figura 4.13 é apresentada a aplicação das forças na extremidade dos cabos (para os cabos condutores, apenas as reações de um deles são representadas).

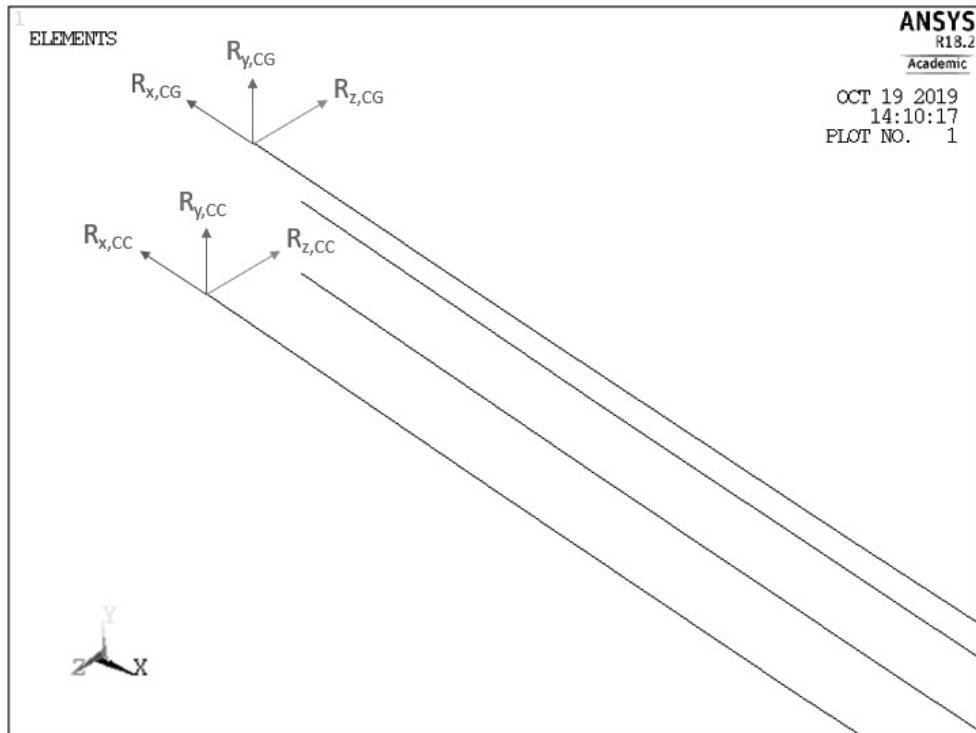


Figura 4.13 – Reações aplicadas na extremidade dos cabos do trecho estudado.

Ao invés de restringir as translações dos cabos fixados nas torres adjacentes à estrutura-tipo, optou-se por esta configuração de condições de contorno porque é sabido que os pontos de fixação dos cabos à estrutura não são completamente rígidos e, portanto, apresentam pequenos deslocamentos, que ocorrem por toda a linha de transmissão.

#### 4.1.6.3 Aplicação dos carregamentos

Conforme realizado no modelo anterior, foram considerados dois casos de carregamento. O primeiro caso contempla somente as forças devidas ao peso próprio e, o segundo caso, as forças de vento são aplicadas no modelo já deformado devido à ação do peso próprio.

O peso da estrutura metálica da torre e dos componentes mecânicos (cabos e cadeias de isoladores) é o mesmo do apresentado no Item 4.1.5.3, porém o peso próprio dos cabos é aplicado como força nodal equivalente nos nós que compõem os cabos, ao longo do seu comprimento. As reações verticais devidas ao desnível dos apoios dos cabos são calculadas automaticamente pelo modelo numérico, uma vez que os cabos se encontram modelados.

As forças de vento atuantes nas cadeias dos isoladores foram aplicadas nos dois nós extremos do elemento utilizado. As forças devidas ao vento atuando sobre os cabos também foram

aplicadas como forças nodais equivalentes nos nós que compõem os cabos, ao longo do comprimento e no sentido transversal e positivo (eixo Z) em relação ao sistema de referência adotado, conforme se verifica no exemplo da Figura 4.14 (exemplificam-se as forças aplicadas apenas em um dos cabos).

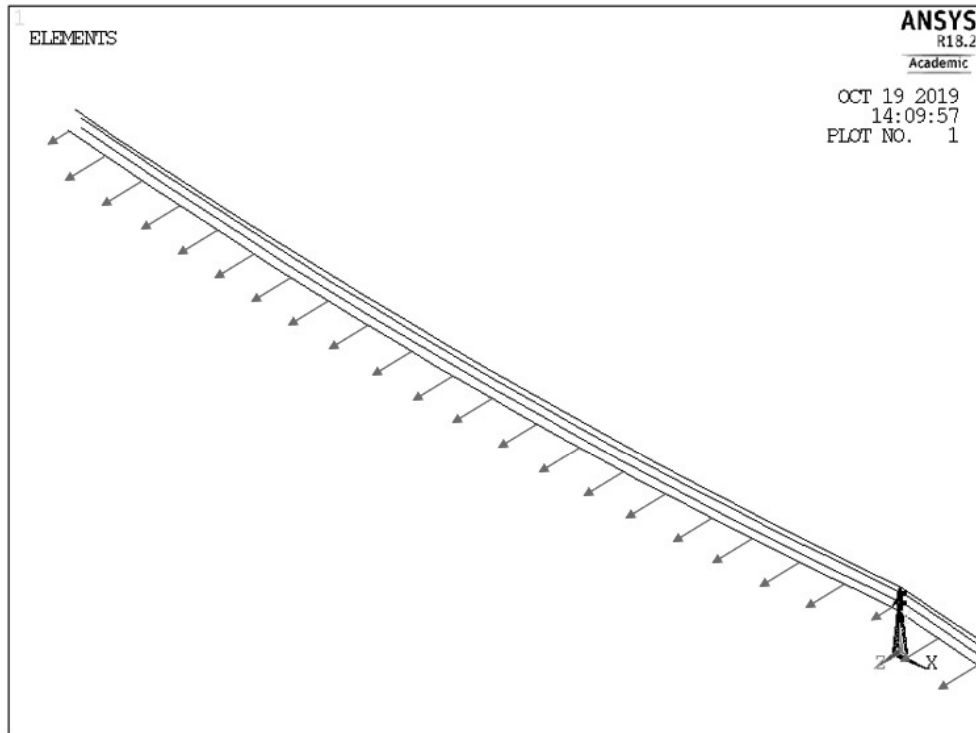


Figura 4.14 – Modelo numérico dos cabos com a força do vento atuando na direção positiva do eixo Z.

A Tabela 4.8 apresenta a pressão dinâmica do vento para as três velocidades consideradas neste estudo, calculada pela Equação (2.17), e as respectivas forças nodais equivalentes aplicadas aos nós dos  $n$  elementos que compõem os cabos.

Tabela 4.8 – Forças devidas ao vento aplicadas aos nós dos  $n$  elementos que compõem os cabos.

Velocidade básica [m/s]	$q_0$ [N/m <sup>2</sup> ]	Força aplicada aos nós [N]	
		Nós internos	Nós externos
30	488,91	179,04	89,52
35	665,47	243,70	121,85
40	869,18	318,29	159,15

#### 4.1.7 Obtenção das reações nas bases da estrutura

Como as estruturas de suporte de linhas de transmissão estão sempre sujeitas a forças transversais ao longo da altura, surgem momentos na fundação que podem ser posteriormente

transformados em binários nas diferentes bases da estrutura. Estes momentos podem ser obtidos analiticamente por diferentes métodos.

No caso do modelo simplificado, em que as forças devidas ao peso próprio dos cabos e ao vento sobre os cabos são aplicadas diretamente nas mísulas da torre, surgirá apenas um momento transversal ao sentido da linha. Para o modelo completo, quando os vãos adjacentes à torre central tiverem comprimentos diferentes, uma força longitudinal surgirá devido ao desequilíbrio longitudinal decorrente da ação do vento nos cabos. Esta força é responsável pelo surgimento de um momento longitudinal na base da torre.

De posse das forças aplicadas nas mísulas da torre e das alturas dos pontos de fixação dos cabos condutores e do cabo guarda (Figura 4.1), é possível calcular o momento transversal ( $M_t$ ) (em torno do eixo X) e o momento longitudinal ( $M_l$ ) (em torno do eixo Z) por meio das Equações (4.1) e (4.2), respectivamente:

$$M_t = F_{v,CG}h_{CG} + F_{v,CC}(h_{CC1} + h_{CC2} + h_{CC3}) \quad (4.1)$$

$$M_l = F_{l,CG}h_{CG} + F_{l,CC}(h_{CC1} + h_{CC2} + h_{CC3}) \quad (4.2)$$

Sendo:

$F_{v,CG}$  Força nodal equivalente transversal devida ao vento nos cabos aplicada ao ponto de fixação do cabo guarda;

$F_{v,CC}$  Força nodal equivalente transversal devida ao vento nos cabos aplicada ao ponto de fixação do cabo condutor;

$F_{l,CG}$  Força nodal equivalente longitudinal devida ao desequilíbrio dos cabos aplicada ao ponto de fixação do cabo guarda;

$F_{l,CC}$  Força nodal equivalente longitudinal devida ao desequilíbrio dos cabos aplicada ao ponto de fixação do cabo condutor;

$h_{CG}$  Altura do ponto de fixação do cabo guarda;

$h_{CC1}$  Altura do ponto de fixação do cabo condutor 1;

$h_{CC2}$  Altura do ponto de fixação do cabo condutor 2;

$h_{CC3}$  Altura do ponto de fixação do cabo condutor 3.

Contudo, as reações das bases ( $R_x$ ,  $R_y$  e  $R_z$ ) calculadas automaticamente pelo programa ANSYS consideram as ações do peso próprio da torre, da cadeia de isoladores e dos cabos e

das forças de vento, uma vez que todo o sistema estrutural encontra-se modelado. Como todas as forças aplicadas ao sistema estrutural devem aparecer nas reações de apoio, torna-se mais conveniente calcular os momentos transversais e longitudinais por meio destas reações, as quais implicam no surgimento de binários nas quatro bases da torre.

A Figura 4.15 apresenta a numeração adotada para as bases da torre na identificação das reações de apoio.

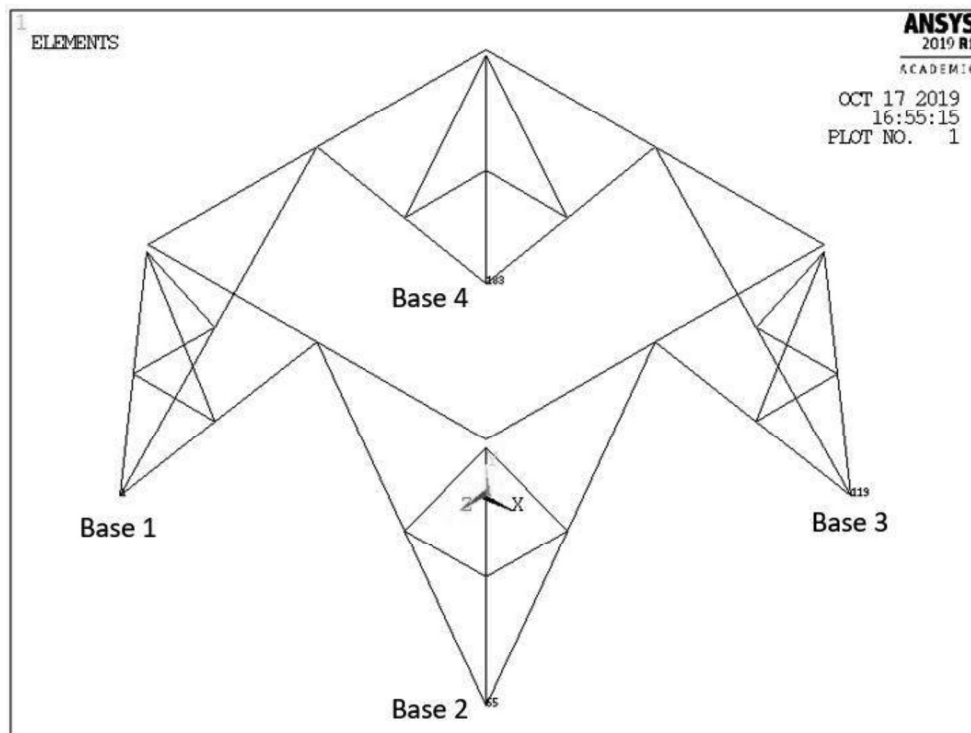


Figura 4.15 – Numeração das bases da torre.

Pela Figura 4.15, nota-se que as Bases 1, 2, 3 e 4 correspondem aos nós 1, 65, 119 e 183 do modelo, respectivamente. Assim, a Figura 4.16 exemplifica uma configuração característica das reações de apoio de algumas combinações de vãos.



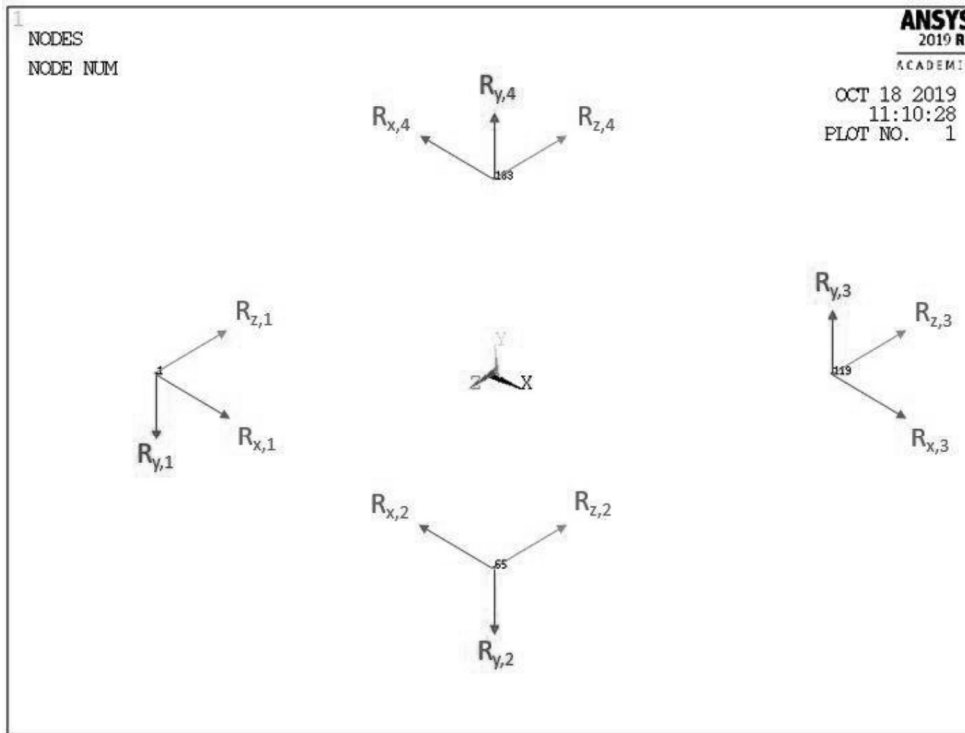


Figura 4.16 – Reações de apoio transversais e longitudinais que aparecem nos nós da base do modelo.

Pela configuração das reações de apoio da Figura 4.16, chegam-se às seguintes equações para o cálculo do momento transversal ( $M_t$ ) e momento longitudinal ( $M_l$ ):

$$M_t = [(R_{y,1} - R_{y,1}^*) + (R_{y,4}^* - R_{y,4}) + (R_{y,2} - R_{y,2}^*) + (R_{y,3}^* - R_{y,3})] \frac{d_{base}}{2} \quad (4.3)$$

$$M_l = [(R_{y,4}^* - R_{y,4}) - (R_{y,1} - R_{y,1}^*) + (R_{y,2} - R_{y,2}^*) - (R_{y,3}^* - R_{y,3})] \frac{d_{base}}{2} \quad (4.4)$$

Em que  $d_{base}$  é a distância entre duas bases, igual a 3,54 m (Figura 4.1),  $R_{y,i}$  são as reações de apoio verticais das quatro bases ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) quando a força do vento é aplicada aos cabos e  $R_{y,i}^*$  são as reações de apoio verticais das quatro bases ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) quando apenas o peso próprio da estrutura, da cadeia de isoladores e dos cabos é aplicado.

## 4.2 Resultados e discussões

### 4.2.1 Avaliação da deslocabilidade da estrutura de suporte

Utilizando o modelo numérico simplificado descrito anteriormente (Figura 4.8), avaliou-se o efeito das não linearidades geométricas na estrutura da torre isolada. As forças foram calculadas supondo a linha de transmissão nivelada e ambos os vãos adjacentes iguais a 900 metros, valores de vãos considerados elevados para a realidade da malha de distribuição da

CEMIG. Com estas condições geométricas, isolam-se as influências devidas aos desníveis entre torres e vãos desiguais. A Figura 4.17 e Figura 4.18 apresentam os esforços normais na torre contemplando as análises sem e com a consideração das não linearidades geométricas, respectivamente.

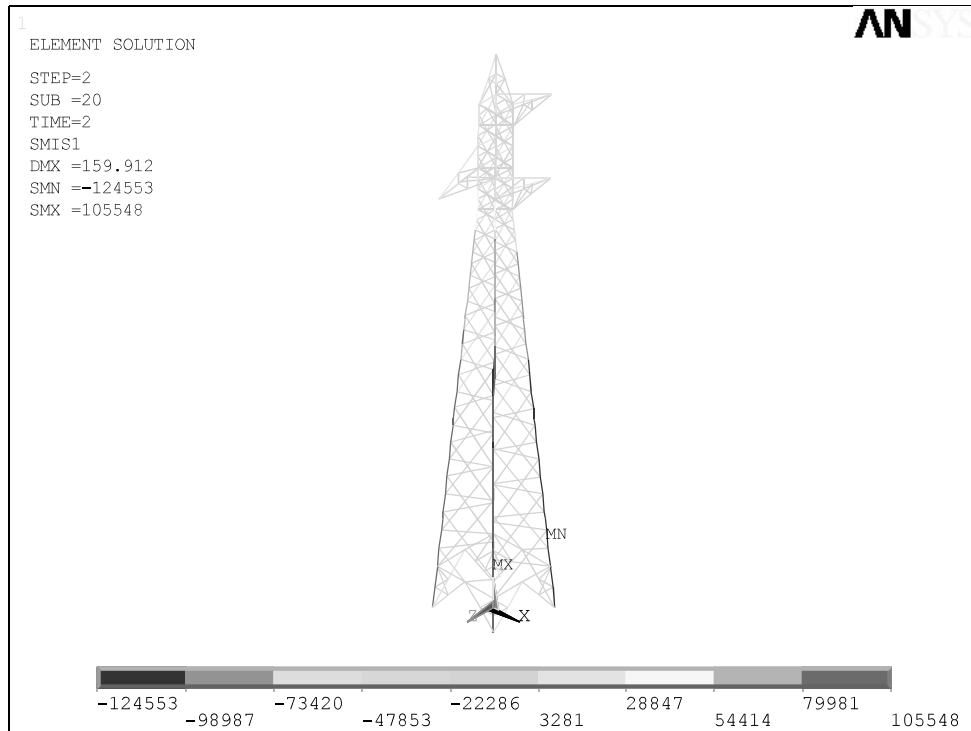


Figura 4.17 – Forças normais no modelo simplificado com peso próprio e vento sem a consideração das não linearidades geométricas [N].

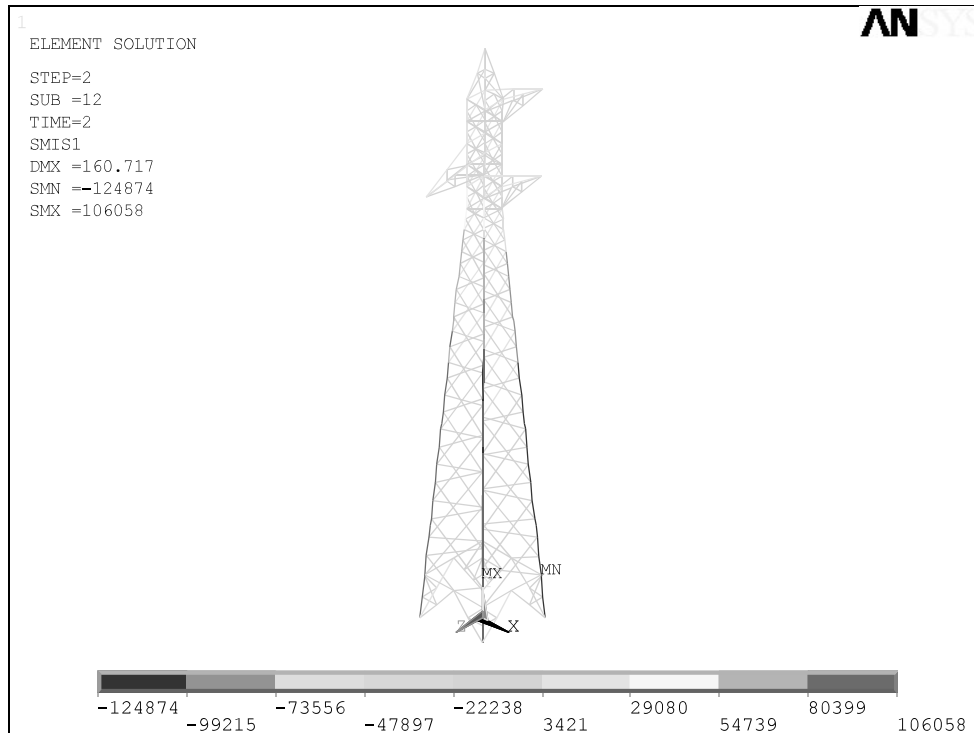


Figura 4.18 – Forças normais no modelo simplificado com peso próprio e vento com a consideração das não linearidades geométricas [N].

Os deslocamentos laterais (Z) ocasionados pela atuação das forças de vento encontram-se expostos na Figura 4.19.

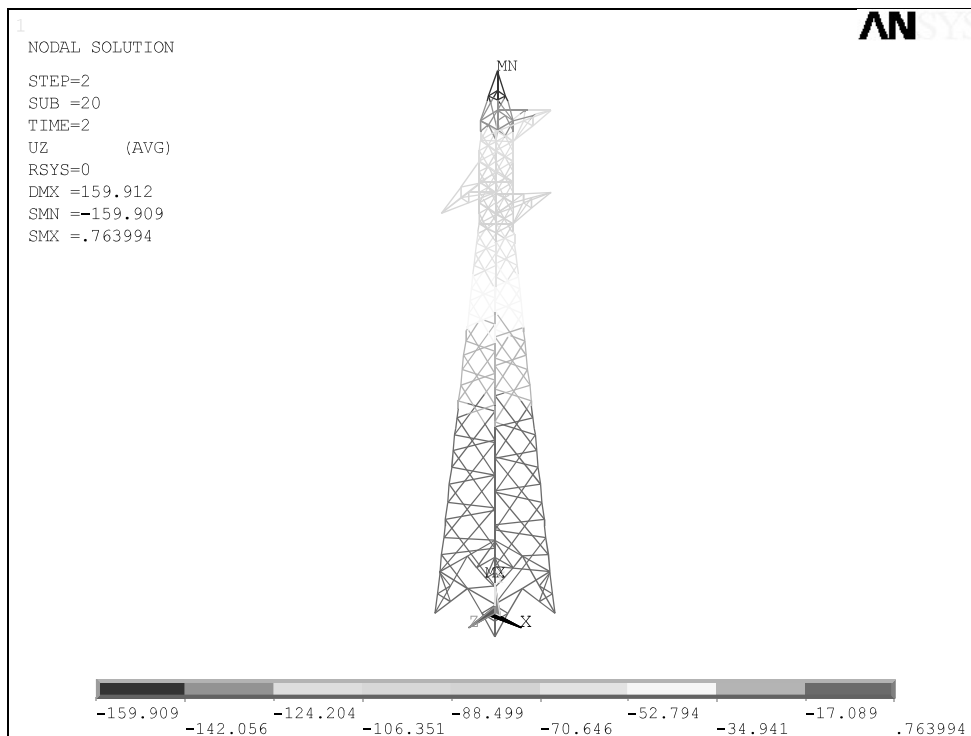


Figura 4.19 – Deslocamentos laterais (z) com a atuação do peso próprio e vento com a consideração das não linearidades geométricas [mm].

Pode-se observar que as análises com e sem a consideração das não linearidades geométricas apresentaram resultados muito semelhantes. Tal fato ocorre devido à característica de baixa deslocabilidade da torre, evidenciada no campo de deslocamentos da Figura 4.19. Em outras palavras, a estrutura de suporte é muito rígida e não é susceptível ao acréscimo de solicitações devido às não linearidades geométricas decorrentes da posição deformada da própria estrutura.

#### **4.2.2 Avaliação da influência do comprimento dos vãos**

O carregamento devido ao peso próprio das cadeias de isoladores e devido à ação do vento foi aplicado aos modelos conforme a metodologia apresentada no capítulo anterior: no modelo simplificado, as forças apresentadas na Tabela 4.4 e na Tabela 4.5 foram aplicadas nos pontos de suspensão dos cabos e; no modelo completo, o peso próprio dos cabos é aplicado automaticamente pelo programa, enquanto as forças do vento apresentadas na Tabela 4.8 foram aplicadas como forças nodais equivalentes nos nós que compõe o cabo, conforme Figura 4.14.

Foram consideradas 21 combinações de vãos adjacentes nivelados (Tabela 4.1), contudo um caso típico foi tomado para exemplificação dos resultados: vãos adjacentes iguais a 400 e 800 metros. A Figura 4.20 apresenta as forças normais nos elementos da torre, considerando as forças de vento conforme a norma IEC 60826:2017 (para velocidade do vento igual a 35 m/s), com um ângulo de incidência igual a  $0^\circ$  (direção Z, transversal aos cabos) e o efeito do peso próprio.

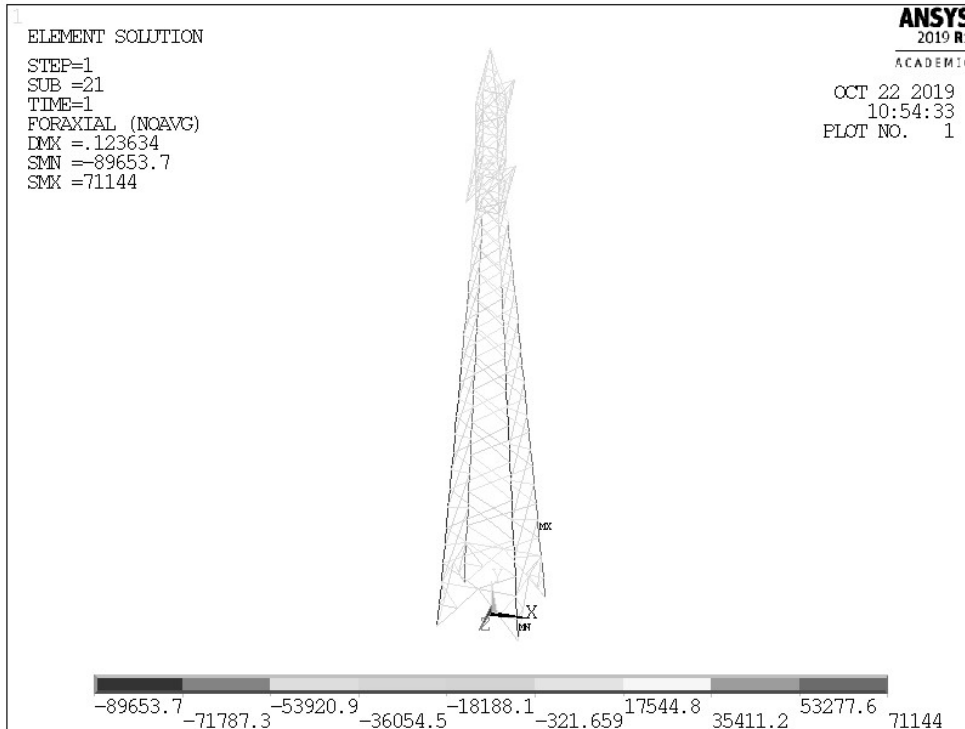


Figura 4.20 – Forças normais na torre do modelo simplificado (vãos adjacentes iguais a 400 e 800 metros) devidas às forças de peso próprio e vento (35 m/s) conforme a IEC 60826 [N].

A aplicação do vento como forças nodais equivalentes no modelo completo levou a outras solicitações na torre, conforme pode ser observado na Figura 4.21.

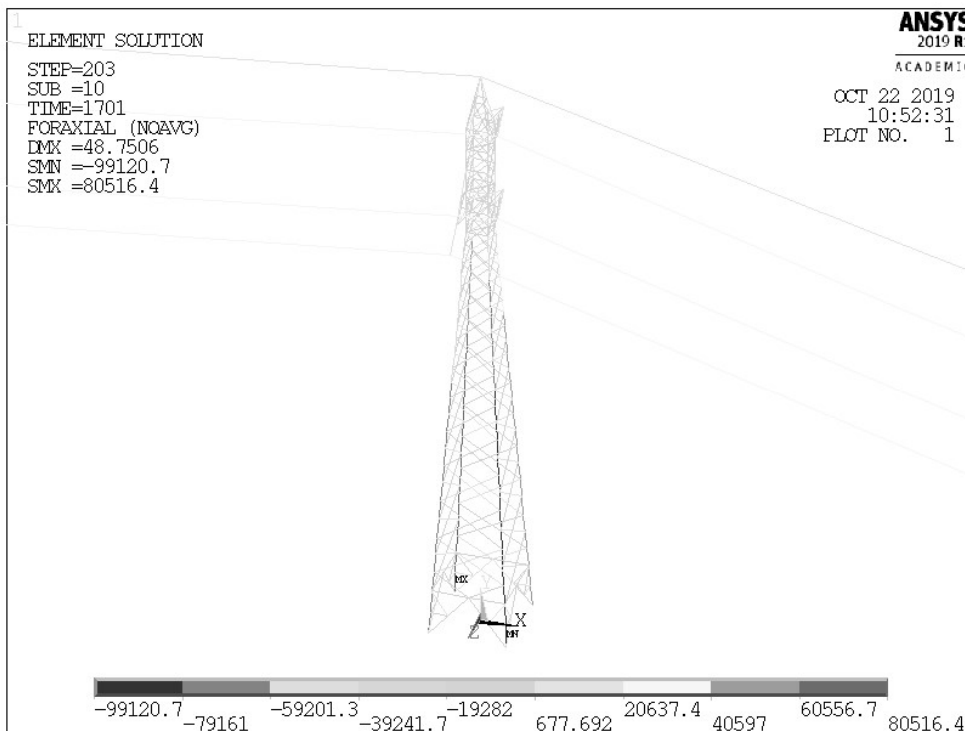


Figura 4.21 – Forças normais na torre do modelo completo (vãos adjacentes iguais a 400 e 800 metros) devidas às forças de peso próprio e de vento (35 m/s) conforme a IEC 60826 [N].

Como era esperado, observa-se na Figura 4.20 que no modelo simplificado as forças normais de tração dos montantes que chegam nas bases da torre têm valores praticamente iguais e que o mesmo acontece com as forças de compressão. Como as forças são aplicadas nos pontos de fixação dos cabos na torre, esta metodologia não é capaz de considerar possíveis efeitos decorrentes da diferença de comprimento dos vãos adjacentes, evidenciado a seguir.

Na Figura 4.21, em contrapartida, forças normais de tração e compressão distintas surgem nos mesmos montantes. Neste modelo completo, então, notam-se alguns dos efeitos da consideração de vãos com comprimentos diferentes: a maior força de compressão surge no lado da torre com o maior comprimento de vão (800 m) e a maior força de tração surge no lado oposto (vão de 400 m).

As forças de tração e compressão máximas e a diferença entre seus respectivos valores considerando os modelos simplificado e completo e todas as combinações de vãos adjacentes é apresentada na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Forças normais máximas nas bases dos modelos completo e simplificado.

Combinação	Compressão axial máxima [kN]			Tração axial máxima [kN]		
	Completo	Simplificado	Diferença	Completo	Simplificado	Diferença
300 e 300	-45,03	-47,10	-4,6%	30,46	32,84	-7,8%
300 e 400	-55,30	-54,17	2,1%	40,09	39,23	2,2%
300 e 500	-66,44	-61,24	7,8%	50,57	45,61	9,8%
300 e 600	-76,60	-68,33	10,8%	60,10	51,99	13,5%
300 e 700	-86,05	-75,42	12,3%	68,87	58,36	15,2%
300 e 800	-95,06	-82,53	13,2%	77,26	64,74	16,2%
400 e 400	-59,60	-61,24	-2,7%	43,70	45,61	-4,4%
400 e 500	-70,10	-68,33	2,5%	53,52	51,99	2,9%
400 e 600	-79,97	-75,42	5,7%	62,74	58,37	7,0%
400 e 700	-90,65	-82,53	9,0%	72,75	64,74	11,0%
400 e 800	-99,12	-89,65	9,6%	80,52	71,11	11,7%
500 e 500	-73,97	-75,42	-2,0%	56,63	58,37	-3,1%
500 e 600	-84,51	-82,53	2,3%	66,54	64,75	2,7%
500 e 700	-94,09	-89,65	4,7%	75,43	71,12	5,7%
500 e 800	-104,00	-96,69	7,0%	84,57	77,91	7,9%
600 e 600	-88,36	-89,65	-1,5%	69,60	71,12	-2,2%
600 e 700	-98,28	-96,78	1,5%	78,78	77,49	1,6%
600 e 800	-106,58	-103,93	2,5%	86,28	83,86	2,8%
700 e 700	-102,63	-103,93	-1,3%	82,29	83,86	-1,9%
700 e 800	-111,89	-111,09	0,7%	90,82	90,22	0,7%
800 e 800	-117,22	-118,26	-0,9%	95,37	96,59	-1,3%

A comparação dos esforços axiais nas barras indicou valores mais elevados para o modelo completo quando os vãos adjacentes são diferentes. Neste caso, a diferença máxima observada para as forças de compressão foi de 13% e de 16% para as forças de tração. Nota-se que as diferenças se tornam maiores à medida que se aumenta a diferença relativa entre os vãos. Quando os vãos adjacentes são iguais, os modelos simplificados apresentaram forças maiores, sendo as máximas diferenças iguais a 4,6% e a 7,8% para compressão e tração, respectivamente.

A Tabela 4.10 apresenta as reações verticais máximas obtidas nas bases da torre para as os dois modelos considerados.

Tabela 4.10 – Reações verticais máximas nas bases dos modelos completo e simplificado.

Combinação	Compressão máxima [kN]			Tração máxima [kN]		
	Completo	Simplificado	Diferença	Completo	Simplificado	Diferença
300 e 300	44,52	46,52	-4,5%	-29,88	-32,21	-7,8%
300 e 400	54,45	53,43	1,9%	-39,33	-38,54	2,0%
300 e 500	65,21	60,34	7,5%	-49,63	-44,86	9,6%
300 e 600	75,03	67,25	10,4%	-59,02	-51,19	13,3%
300 e 700	84,16	74,17	11,9%	-67,69	-57,52	15,0%
300 e 800	92,88	81,08	12,7%	-76,01	-63,84	16,0%
400 e 400	58,76	60,34	-2,7%	-42,98	-44,86	-4,4%
400 e 500	68,89	67,25	2,4%	-52,66	-51,19	2,8%
400 e 600	78,42	74,16	5,4%	-61,74	-57,52	6,8%
400 e 700	88,72	81,08	8,6%	-71,63	-63,85	10,9%
400 e 800	96,92	88,01	9,2%	-79,35	-70,18	11,5%
500 e 500	72,77	74,16	-1,9%	-55,81	-57,52	-3,1%
500 e 600	82,93	81,08	2,2%	-65,60	-63,86	2,7%
500 e 700	92,18	88,01	4,5%	-74,40	-70,19	5,7%
500 e 800	101,72	94,83	6,8%	-83,47	-76,93	7,8%
600 e 600	86,76	88,01	-1,4%	-68,69	-70,19	-2,2%
600 e 700	96,33	94,93	1,4%	-77,80	-76,53	1,6%
600 e 800	104,34	101,87	2,4%	-85,26	-82,87	2,8%
700 e 700	100,62	101,87	-1,2%	-81,32	-82,87	-1,9%
700 e 800	109,53	108,80	0,7%	-89,82	-89,21	0,7%
800 e 800	114,75	115,74	-0,9%	-94,36	-95,55	-1,3%

As diferenças observadas nos valores das reações verticais tiveram a mesma ordem de grandeza e seguiram o mesmo padrão das forças axiais nos elementos, descritos anteriormente. Além disso, destaca-se que em todos os casos em que os vãos adjacentes são diferentes, o modelo completo apresentou respostas superiores às respostas do modelo simplificado. De maneira geral, quando a diferença relativa entre os vãos supera os 50%, a diferença nos esforços solicitantes supera os 10%.

Dessa maneira, é preciso entender de que forma a não linearidade geométrica está afetando o sistema estrutural de modo global, ou seja, convém investigar os motivos pelos quais as reações de apoio verticais (e também as forças axiais) obtidas através dos modelos simplificado e completo apresentaram tamanha discrepância (mais de 10% para alguns casos).

Um modo de averiguar estas diferenças é através do cálculo do momento transversal que surge na base da torre, para os dois modelos. Os seus valores são apresentados na Tabela 4.11.



Tabela 4.11 – Momento transversal nas bases dos modelos completo e simplificado.

Combinação	Momento transversal [kN.m]		
	Completo	Simplificado	Diferença
300 e 300	271,88	287,25	-5,7%
300 e 400	320,82	335,19	-4,5%
300 e 500	368,91	380,94	-3,3%
300 e 600	420,77	431,14	-2,5%
300 e 700	467,49	479,15	-2,5%
300 e 800	515,80	527,18	-2,2%
400 e 400	370,90	383,16	-3,3%
400 e 500	419,79	431,14	-2,7%
400 e 600	466,90	479,15	-2,6%
400 e 700	516,97	527,18	-2,0%
400 e 800	565,51	575,23	-1,7%
500 e 500	468,15	479,15	-2,3%
500 e 600	517,34	527,18	-1,9%
500 e 700	565,66	575,23	-1,7%
500 e 800	612,74	623,46	-1,8%
600 e 600	565,53	575,23	-1,7%
600 e 700	614,66	623,30	-1,4%
600 e 800	661,31	671,39	-1,5%
700 e 700	661,50	671,39	-1,5%
700 e 800	711,32	719,51	-1,2%
800 e 800	759,90	767,65	-1,0%

Na Tabela 4.11 nota-se que a diferença entre os resultados dos diferentes modelos não foi significativa, com valores na ordem de 2%. Entretanto, diferentemente do que ocorreu com as forças axiais e com as reações de apoio, o momento transversal do modelo completo foi sempre inferior ao do modelo simplificado para todas as combinações de vãos. Isso ocorre uma vez que as forças transversais são aplicadas sempre a uma altura maior no modelo simplificado (ponto de suspensão do cabo) em relação ao modelo completo, que considera a altura do ponto de aplicação da força no cabo em relação à base da estrutura.

Observa-se no modelo completo o surgimento de forças longitudinais nos pontos de fixação dos cabos devido ao desequilíbrio entre os vãos de diferentes comprimentos com a atuação das forças de vento, comprovada com o deslocamento longitudinal (direção X) das cadeias de isoladores e com o somatório das reações de apoio longitudinais diferentes de zero. Tais forças longitudinais resultam em um momento longitudinal na fundação da torre (calculado pela Equação (4.4)), conforme se verifica na Figura 4.22 e na Tabela 4.12.

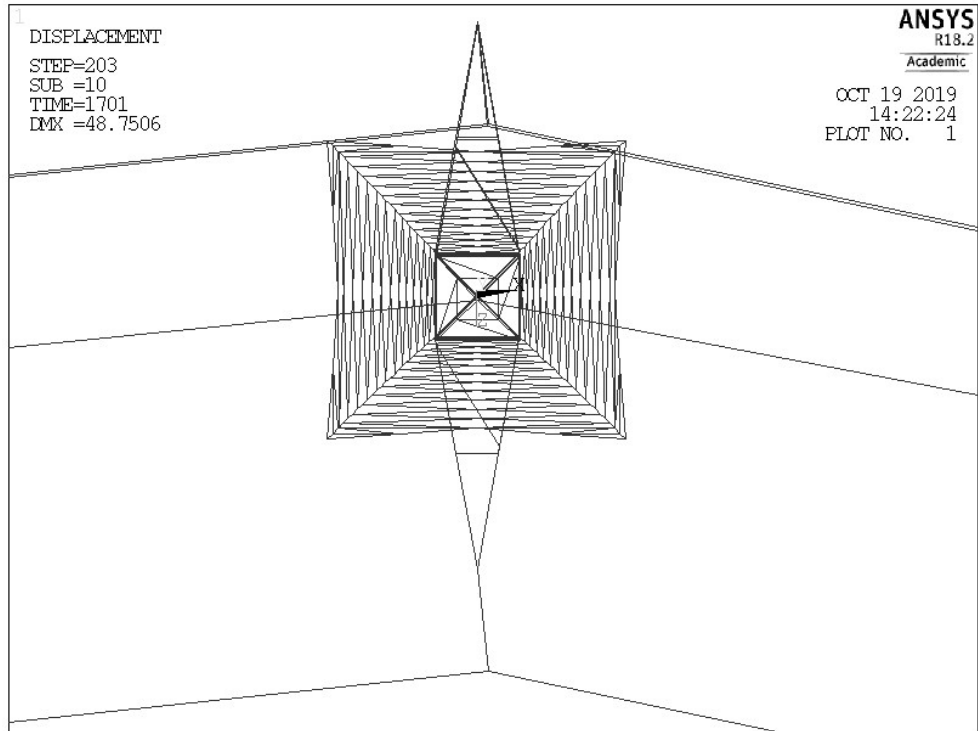


Figura 4.22 – Configuração deslocada da estrutura, das cadeias de isoladores e dos cabos (vista em planta).

Tabela 4.12 – Momento longitudinal nas bases do modelo completo.

Combinação	Deslocamento médio da extremidade da cadeia de isoladores [cm]	Somatório das reações de apoio ( $R_x$ ) [kN]	Momento longitudinal [kN.m]
300 e 300	0,00	0,00	0,00
300 e 400	3,88	-0,82	-20,82
300 e 500	8,93	-1,85	-46,16
300 e 600	12,31	-2,66	-65,66
300 e 700	15,53	-3,41	-83,06
300 e 800	18,18	-4,01	-96,24
400 e 400	0,00	0,00	0,00
400 e 500	3,74	-0,90	-22,35
400 e 600	7,43	-1,72	-42,25
400 e 700	12,29	-2,70	-64,82
400 e 800	13,72	-3,11	-73,73
500 e 500	0,00	0,00	0,00
500 e 600	4,47	-0,95	-22,59
500 e 700	7,54	-1,48	-39,26
500 e 800	11,68	-2,51	-58,32
600 e 600	0,00	0,00	0,00
600 e 700	3,56	-0,78	-18,13
600 e 800	5,51	-1,20	-27,38
700 e 700	0,00	0,00	0,00
700 e 800	2,83	-0,59	-13,04
800 e 800	0,00	0,00	0,00

Pela Tabela 4.12 observa-se que quanto maior a diferença relativa entre os vãos, maior o deslocamento médio das cadeias de isoladores e, conseqüentemente, maior o momento longitudinal. Além disso, o surgimento do momento longitudinal na base da estrutura faz com as reações sejam maiores que no modelo simplificado, uma vez que este último não é capaz de detectar as forças longitudinais no sistema.

Dos resultados acima apresentados conclui-se que quando os vãos adjacentes têm comprimentos iguais, a análise das estruturas de forma isolada (modelo simplificado) apresenta resultados mais conservadores e pode ser aplicada no projeto de estruturas de LTs. Entretanto, observa-se esta análise não é capaz de detectar os efeitos das não linearidades geométricas, presentes em sistemas compostos por vãos adjacentes distintos, indicados pelo surgimento do momento longitudinal na base. Nestes casos recomenda-se realizar a análise não linear geométrica da estrutura (modelo completo).

### 4.2.3 Avaliação da influência da velocidade média do vento

A avaliação da influência da velocidade média do vento no comportamento da estrutura foi realizada através de 10 combinações de vãos adjacentes nivelados (Tabela 4.2) e três velocidades do vento distintas, a saber: 30, 35 e 40 m/s. Novamente, o caso típico de vãos adjacentes iguais a 400 e 800 metros foi tomado para exemplificação dos resultados.

A Figura 4.23 e a Figura 4.24 apresentam as forças normais nos elementos da torre considerando velocidades do vento iguais a 30 e a 40 m/s, respectivamente.

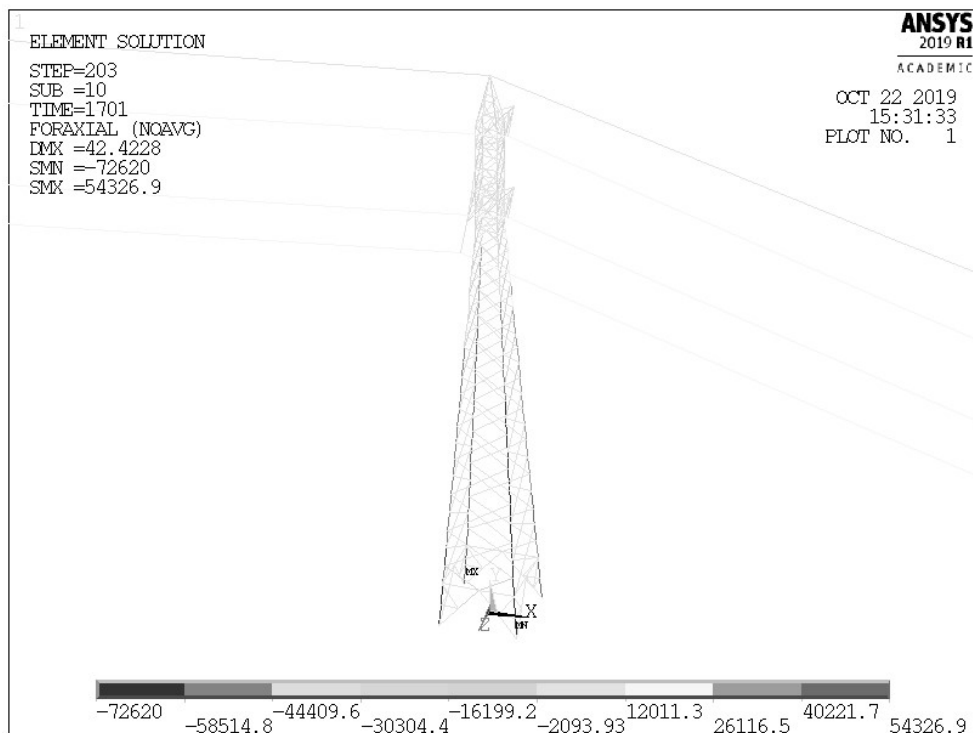


Figura 4.23 – Forças normais na torre do modelo completo (vãos adjacentes iguais a 400 e 800 metros) devidas às forças de peso próprio e de vento a 30 m/s.

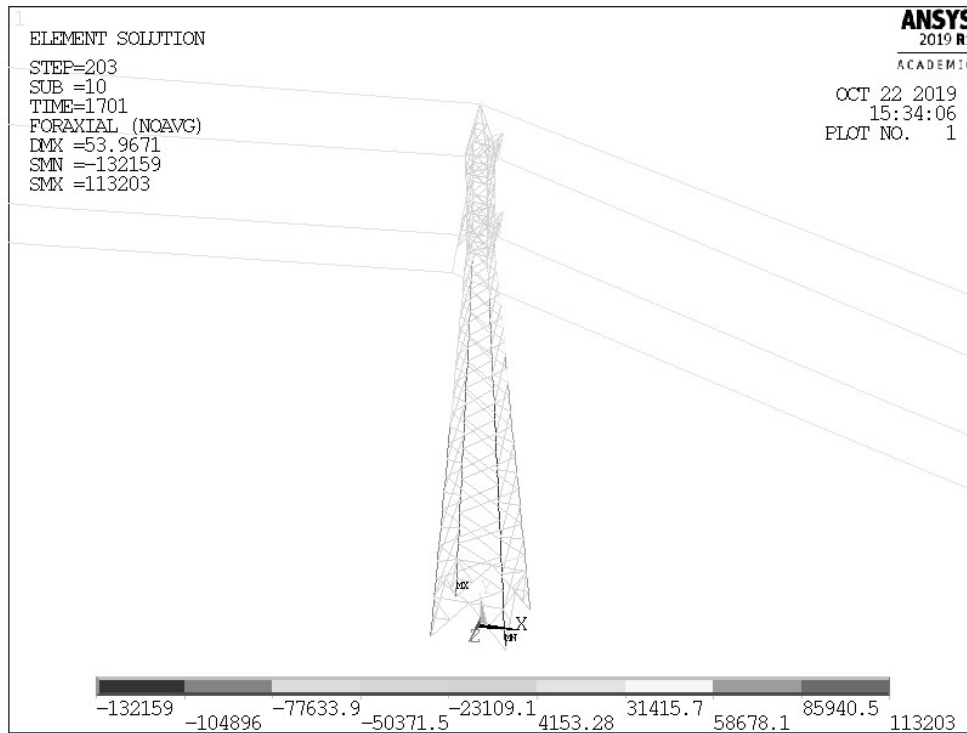


Figura 4.24 – Forças normais na torre do modelo completo (vãos adjacentes iguais a 400 e 800 metros) devidas às forças de peso próprio e de vento a 40 m/s.

As forças axiais máximas de compressão e de tração considerando as diferentes velocidades e as combinações da Tabela 4.2 são apresentadas na Tabela 4.13 e na Tabela 4.14, respectivamente.

Tabela 4.13 – Forças normais máximas de compressão nos montantes do modelo completo para diferentes velocidades do vento [kN].

Combinação	30 m/s			35 m/s			40 m/s		
	Comp.	Simp.	Dif.	Comp.	Simp.	Dif.	Comp.	Simp.	Dif.
300 e 300	-34,62	-36,08	-4,2%	-45,03	-47,10	-4,6%	-54,25	-56,89	-4,9%
300 e 600	-56,35	-51,74	8,2%	-76,60	-68,33	10,8%	-100,77	-87,52	13,1%
300 e 800	-68,53	-62,21	9,2%	-95,06	-82,53	13,2%	-123,99	-106,08	14,4%
400 e 600	-59,57	-56,97	4,4%	-79,97	-75,42	5,7%	-104,47	-96,79	7,4%
400 e 800	-72,62	-67,45	7,1%	-99,12	-89,65	9,6%	-132,16	-115,38	12,7%
500 e 600	-63,19	-62,21	1,6%	-84,51	-82,53	2,3%	-109,53	-106,07	3,2%
500 e 800	-75,63	-72,61	4,0%	-104,00	-96,69	7,0%	-135,93	-124,71	8,3%
600 e 800	-79,45	-77,96	1,9%	-106,58	-103,93	2,5%	-140,74	-134,06	4,7%
700 e 700	-76,93	-77,96	-1,3%	-102,63	-103,93	-1,3%	-132,36	-134,06	-1,3%
800 e 800	-87,76	-88,50	-0,8%	-117,22	-118,26	-0,9%	-151,63	-152,83	-0,8%

Tabela 4.14 – Forças normais máximas de tração nos montantes do modelo completo conforme velocidade do vento [kN].

Combinação	30 m/s			35 m/s			40 m/s		
	Comp.	Simp.	Dif.	Comp.	Simp.	Dif.	Comp.	Simp.	Dif.
300 e 300	20,18	21,92	-8,6%	30,46	32,84	-7,8%	34,50	36,73	-6,5%
300 e 600	40,04	35,64	11,0%	60,10	51,99	13,5%	84,08	70,82	15,8%
300 e 800	50,89	44,76	12,0%	77,26	64,74	16,2%	105,93	87,72	17,2%
400 e 600	42,63	40,21	5,7%	62,74	58,37	7,0%	86,86	79,28	8,7%
400 e 800	54,33	49,34	9,2%	80,52	71,11	11,7%	113,20	96,18	15,0%
500 e 600	45,55	44,78	1,7%	66,54	64,75	2,7%	91,05	87,74	3,6%
500 e 800	56,65	54,34	4,1%	84,57	77,91	7,9%	116,02	104,63	9,8%
600 e 800	59,74	58,47	2,1%	86,28	83,86	2,8%	119,82	113,07	5,6%
700 e 700	57,19	58,47	-2,2%	82,29	83,86	-1,9%	111,17	113,07	-1,7%
800 e 800	66,64	67,60	-1,4%	95,37	96,59	-1,3%	128,62	129,94	-1,0%

Assim como aconteceu nas análises do item anterior, as maiores diferenças entre as respostas do modelo completo e do simplificado apareceram para as combinações com maiores diferenças de vãos adjacentes, como no caso da combinação de vãos iguais a 300 e 800 metros. Observa-se novamente que, de forma geral, quando o vão maior excede o inferior em 50% (ou mais) as diferenças estão em torno de 10%, situação que se agrava com o aumento da velocidade média do vento.

Mais uma vez as diferenças observadas nos valores das reações verticais tiveram a mesma ordem de grandeza e seguiram o mesmo padrão das forças axiais nos elementos, como se verifica na Tabela 4.15 e na Tabela 4.16.

Tabela 4.15 – Reações verticais máximas de compressão nas bases dos modelos completo e simplificado conforme velocidade do vento [kN].

Combinação	30 m/s			35 m/s			40 m/s		
	Comp.	Simp.	Dif.	Comp.	Simp.	Dif.	Comp.	Simp.	Dif.
300 e 300	34,34	35,76	-4,1%	44,52	46,52	-4,5%	54,01	56,61	-4,8%
300 e 600	55,43	51,09	7,8%	75,03	67,25	10,4%	98,31	85,90	12,6%
300 e 800	67,30	61,33	8,9%	92,88	81,08	12,7%	120,64	103,90	13,9%
400 e 600	58,65	56,21	4,2%	78,42	74,16	5,4%	102,07	94,90	7,0%
400 e 800	71,33	66,45	6,8%	96,92	88,01	9,2%	128,61	112,91	12,2%
500 e 600	62,25	61,33	1,5%	82,93	81,08	2,2%	107,10	103,90	3,0%
500 e 800	74,33	71,46	3,9%	101,72	94,83	6,8%	132,40	121,92	7,9%
600 e 800	78,10	76,69	1,8%	104,34	101,87	2,4%	137,15	130,94	4,5%
700 e 700	75,70	76,69	-1,3%	100,62	101,87	-1,2%	129,33	130,94	-1,2%
800 e 800	86,24	86,94	-0,8%	114,75	115,74	-0,9%	147,86	149,00	-0,8%

Tabela 4.16 – Reações verticais máximas de tração nas bases dos modelos completo e simplificado conforme velocidade do vento [kN].

Combinação	30 m/s			35 m/s			40 m/s		
	Comp.	Simp.	Dif.	Comp.	Simp.	Dif.	Comp.	Simp.	Dif.
300 e 300	-19,74	-21,45	-8,6%	-29,88	-32,21	-7,8%	-34,25	-36,59	-6,8%
300 e 600	-39,25	-35,02	10,8%	-59,02	-51,19	13,3%	-82,71	-69,85	15,6%
300 e 800	-49,99	-44,07	11,8%	-76,01	-63,84	16,0%	-104,40	-86,67	17,0%
400 e 600	-41,88	-39,55	5,5%	-61,74	-57,52	6,8%	-85,63	-78,26	8,6%
400 e 800	-53,45	-48,61	9,1%	-79,35	-70,18	11,5%	-111,77	-95,09	14,9%
500 e 600	-44,83	-44,09	1,7%	-65,60	-63,86	2,7%	-89,92	-86,68	3,6%
500 e 800	-55,81	-53,56	4,0%	-83,47	-76,93	7,8%	-114,73	-103,51	9,8%
600 e 800	-58,94	-57,68	2,1%	-85,26	-82,87	2,8%	-118,62	-111,94	5,6%
700 e 700	-56,43	-57,68	-2,2%	-81,32	-82,87	-1,9%	-110,06	-111,95	-1,7%
800 e 800	-65,82	-66,75	-1,4%	-94,36	-95,55	-1,3%	-127,51	-128,81	-1,0%

Das tabelas acima, observa-se que o modelo completo apresentou resultados maiores em todos os casos de vãos adjacentes diferentes, independente da velocidade considerada. Novamente entende-se que as maiores diferenças estão associadas às combinações com grande diferença entre os vãos e ocorreram devido às forças longitudinais, resultado do desequilíbrio entre os vãos de cabos.

Os valores do momento transversal que surge nas bases da torre são apresentados na Tabela 4.17, decorrentes da atuação do vento sobre os condutores, como exemplificado na Figura 4.25.

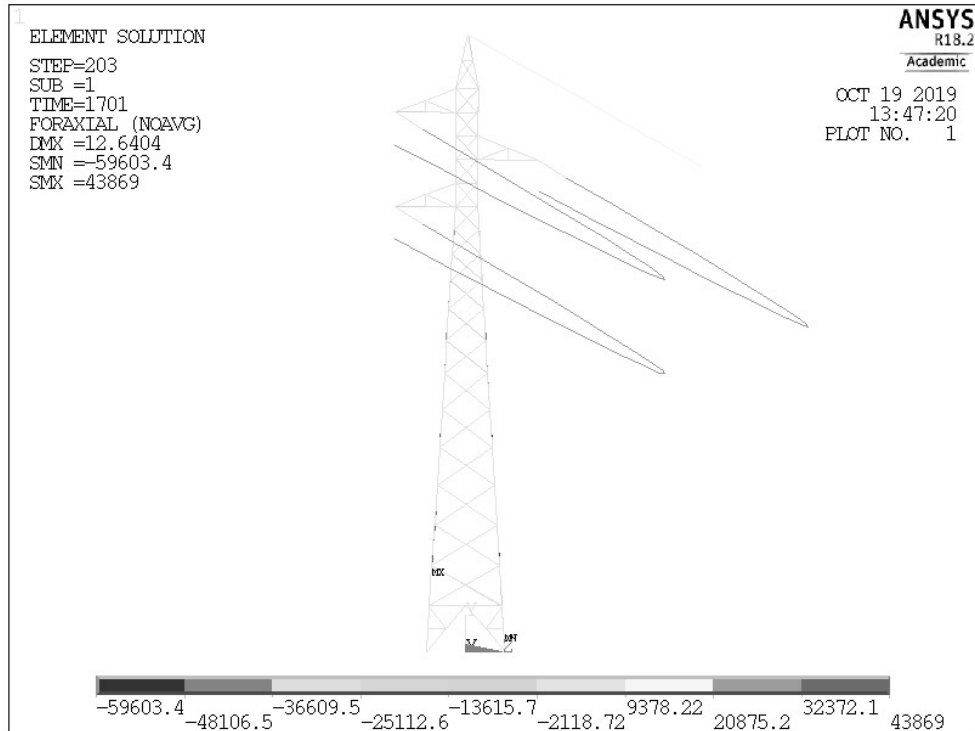


Figura 4.25 – Forças axiais nos elementos da torre e nos cabos na configuração deformada [N] para o caso de vãos adjacentes iguais a 400 metros e velocidade do vento igual a 35 m/s.

Tabela 4.17 – Momento transversal nas bases dos modelos completo e simplificado conforme velocidade do vento [kN.m].

Combinação	30 m/s			35 m/s			40 m/s		
	Comp.	Simp.	Dif.	Comp.	Simp.	Dif.	Comp.	Simp.	Dif.
300-300	199,97	211,02	-5,5%	271,88	287,25	-5,7%	319,29	338,45	-6,0%
300-600	307,76	316,72	-2,9%	420,77	431,14	-2,5%	549,50	563,19	-2,5%
300-800	379,76	387,26	-2,0%	515,80	527,18	-2,2%	668,40	688,67	-3,0%
400-600	343,53	351,98	-2,5%	466,90	479,15	-2,6%	610,34	625,91	-2,6%
400-800	415,10	422,55	-1,8%	565,51	575,23	-1,7%	739,35	751,45	-1,6%
500-600	379,46	387,26	-2,1%	517,34	527,18	-1,9%	675,48	688,66	-2,0%
500-800	448,50	458,04	-2,1%	612,74	623,46	-1,8%	802,76	813,38	-1,3%
600-800	486,15	493,17	-1,4%	661,31	671,39	-1,5%	865,69	877,11	-1,3%
700-700	485,23	493,17	-1,6%	661,50	671,39	-1,5%	864,75	877,11	-1,4%
800-800	558,06	563,86	-1,0%	759,90	767,65	-1,0%	994,30	1.002,91	-0,9%

Antes de avaliar os valores de momento longitudinal, convém avaliar o deslocamento longitudinal médio da extremidade das cadeias de isoladores. Os resultados são apresentados na Tabela 4.18.



Tabela 4.18 – Deslocamento longitudinal médio dos isoladores [cm].

Combinação	30 m/s	35 m/s	40 m/s
300 e 300	0,00	0,00	0,00
300 e 600	8,51	12,31	16,78
300 e 800	10,47	18,18	21,83
400 e 600	5,08	7,43	10,54
400 e 800	9,28	13,72	20,21
500 e 600	3,19	4,47	6,08
500 e 800	6,68	11,68	14,09
600 e 800	4,34	5,51	9,40
700 e 700	0,00	0,00	0,00
800 e 800	0,00	0,00	0,00

Os valores da Tabela 4.18 mostram que o deslocamento dos isoladores será tão maior quanto maior for a velocidade do vento e quanto maior for a diferença entre os vãos adjacentes. Conforme se verifica na Tabela 4.15, este padrão influenciará diretamente no momento longitudinal devido ao desequilíbrio entre os vãos de diferentes comprimentos.

Tabela 4.19 – Momento longitudinal nas bases do modelo completo conforme velocidade do vento [kN.m].

Combinação	30 m/s	35 m/s	40 m/s	30 e 35 m/s	35 e 40 m/s	30 e 40 m/s
300 e 300	0,00	0,00	0,00	0%	0%	0%
300 e 600	39,28	65,66	103,21	40%	36%	62%
300 e 800	49,60	96,24	142,41	48%	32%	65%
400 e 600	25,33	42,25	67,08	40%	37%	62%
400 e 800	41,87	73,73	126,88	43%	42%	67%
500 e 600	13,70	22,59	36,09	39%	37%	62%
500 e 800	27,70	58,32	87,57	53%	33%	68%
600 e 800	16,49	27,38	57,24	40%	52%	71%
700 e 700	0,00	0,00	0,00	0%	0%	0%
800 e 800	0,00	0,00	0,00	0%	0%	0%

Dos resultados acima apresentados entende-se que o tipo de análise a ser realizada independe da velocidade do vento, mas sim da relação entre o comprimento dos vãos adjacentes. O aumento da velocidade média acarreta no aumento do desequilíbrio longitudinal, o que implica na amplificação dos esforços solicitantes e reações na base, decorrentes do acréscimo do valor do momento longitudinal.

#### 4.2.4 Avaliação da influência do desnível das torres adjacentes

Para avaliar a influência do desnível das torres adjacentes no comportamento não linear da estrutura e dos cabos foram avaliadas três combinações de vãos: 400 - 400, 400 - 800 e 800 - 800 metros. Para cada uma das combinações estipulou-se um desnível igual para ambos os lados, variando entre positivo e negativo e entre 5 e 10%, de acordo com a Tabela 4.3. Análises com desníveis iguais as 15% foram realizadas, todavia o modelo não apresentou convergência, portanto os resultados não serão apresentados. Para todas as análises, a velocidade do vento foi igual a 35 m/s.

Tabela 4.20 –Forças axiais máximas nas bases dos modelos completo e simplificado para diferentes combinações de desnível.

Combinação	Desnível à esquerda	Desnível à direita	Compressão axial máxima [kN]			Tração axial máxima [kN]		
			Comp.	Simp.	Dif.	Comp.	Simp.	Dif.
400 e 400	0%	0%	-59,60	-61,24	-2,7%	43,70	45,61	-4,4%
	5%	5%	-58,53	-60,77	-3,8%	46,23	47,21	-2,1%
	10%	10%	-57,84	-60,30	-4,2%	49,00	48,79	0,4%
	5%	-5%	-60,12	-61,24	-1,9%	44,22	45,62	-3,2%
	10%	-10%	-60,64	-61,24	-1,0%	44,71	45,62	-2,0%
	-5%	-5%	-60,81	-61,71	-1,5%	41,20	44,03	-6,9%
	-10%	-10%	-61,75	-57,41	7,0%	38,42	37,74	1,8%
400 e 800	0%	0%	-99,12	-89,65	9,6%	80,52	71,11	11,7%
	5%	-5%	-99,29	-89,64	9,7%	80,61	71,15	11,7%
	10%	-10%	-99,92	-89,64	10,3%	81,15	71,15	12,3%
	5%	5%	-97,82	-89,15	8,9%	83,07	72,72	12,5%
	10%	10%	-99,68	-88,67	11,0%	88,78	74,28	16,3%
	-5%	-5%	-100,95	-90,13	10,7%	78,46	69,58	11,3%
	-10%	-10%	-101,56	-90,62	10,8%	75,22	68,01	9,6%
800 e 800	-5%	5%	-99,68	-89,64	10,1%	81,18	71,15	12,4%
	-10%	10%	-99,68	-89,64	10,1%	81,24	71,15	12,4%
	0%	0%	-117,22	-118,26	-0,9%	95,37	96,59	-1,3%
	5%	5%	-116,14	-117,73	-1,4%	98,16	98,20	0,0%
	10%	10%	-115,43	-117,23	-1,6%	101,43	99,74	1,7%
	5%	-5%	-116,62	-118,24	-1,4%	94,69	96,65	-2,1%
	10%	-10%	-119,63	-118,24	1,2%	97,78	96,65	1,2%
	-5%	-5%	-117,96	-118,74	-0,7%	92,02	95,11	-3,3%
	-10%	-10%	-119,13	-119,25	-0,1%	89,31	93,56	-4,8%

Da Tabela 4.20, para vãos iguais, observam-se forças axiais próximas para o modelo simplificado e para o modelo completo. Já para o modelo com diferença entre vãos, observa-

se que a variação do desnível altera a diferença entre os modelos em uma ordem média de 11%. Grande diferença entre os resultados é observada para a condição sem desnível (0% - 0%), decorrente do desequilíbrio longitudinal, identificado anteriormente. Infere-se destes resultados que o desnível pode contribuir para o aumento da diferença entre os resultados, mas não é o principal motivo para a ocorrência das diferenças entre os modelos.

Sendo objetivo deste conjunto de análises verificar a influência dos desníveis nas respostas da estrutura, convém então comparar os resultados obtidos para todas as combinações de desnível com os valores de referência, ou seja, os valores dos modelos nivelados (0%). A Tabela 4.21 apresenta estas diferenças.

Tabela 4.21 – Comparação das forças axiais dos modelos com desnível com os valores de referência (0%).

Combinação	Desnível à esquerda	Desnível à direita	Compressão axial máxima [kN]		Tração axial máxima [kN]	
			Completo	Simplificado	Completo	Simplificado
400 e 400	5%	5%	-1,8%	-0,8%	5,5%	3,4%
	10%	10%	-3,0%	-1,6%	10,8%	6,5%
	5%	-5%	0,9%	0,0%	1,2%	0,0%
	10%	-10%	1,7%	0,0%	2,3%	0,0%
	-5%	-5%	2,0%	0,8%	-6,1%	-3,6%
	-10%	-10%	3,5%	-6,7%	-13,7%	-20,9%
	5%	-5%	0,2%	0,0%	0,1%	0,1%
400 e 800	10%	-10%	0,8%	0,0%	0,8%	0,1%
	5%	5%	-1,3%	-0,6%	3,1%	2,2%
	10%	10%	0,6%	-1,1%	9,3%	4,3%
	-5%	-5%	1,8%	0,5%	-2,6%	-2,2%
	-10%	-10%	2,4%	1,1%	-7,0%	-4,6%
	-5%	5%	0,6%	0,0%	0,8%	0,1%
	-10%	10%	0,6%	0,0%	0,9%	0,1%
800 e 800	5%	5%	-0,9%	-0,4%	2,8%	1,6%
	10%	10%	-1,5%	-0,9%	6,0%	3,2%
	5%	-5%	-0,5%	0,0%	-0,7%	0,1%
	10%	-10%	2,0%	0,0%	2,5%	0,1%
	-5%	-5%	0,6%	0,4%	-3,6%	-1,6%
	-10%	-10%	1,6%	0,8%	-6,8%	-3,2%

Das diferenças apresentadas acima destacam-se que aquelas com desníveis positivos em ambos os lados (situação exemplificada na Figura 4.4) apresentaram maiores valores de tração quando comparados com o caso das torres niveladas. Além disso, nota-se que os casos com

desnível negativo de ambos os lados tiveram diferenças significativas (da ordem de 9%, em média) quando o desnível foi de 10%, ao passo que para desníveis de 5% esta diferença foi aproximadamente a metade, considerando modelos completos. Para modelos simplificados, estas diferenças são menores em média, mas são captadas pelo modelo desde que as reações aplicadas nas mísulas sejam calculadas e aplicadas considerando o desnível entre torres adjacentes.

O mesmo comportamento pode ser observado nas reações de apoio verticais da estrutura, sobretudo de tração, que representam uma situação indesejável no gabarito da linha de transmissão: arrancamento de fundações. A Tabela 4.22 apresenta as reações de apoio na base dos modelos e a Tabela 4.23 apresenta as diferenças em relação ao modelo de referência (sem desnível).

Tabela 4.22 – Reações verticais máximas nas bases dos modelos completo e simplificado para diferentes combinações de desnível.

Combinação	Desnível à esquerda	Desnível à direita	Compressão máxima [kN]			Tração máxima [kN]		
			Comp.	Simp.	Dif.	Comp.	Simp.	Dif.
400 e 400	0%	0%	58,76	60,34	-2,7%	-42,98	-44,86	-4,4%
	5%	5%	57,61	59,82	-3,8%	-45,40	-46,39	-2,2%
	10%	10%	56,86	59,31	-4,3%	-48,05	-47,91	0,3%
	5%	-5%	59,24	60,33	-1,8%	-43,48	-44,87	-3,2%
	10%	-10%	59,74	60,33	-1,0%	-43,97	-44,87	-2,0%
	-5%	-5%	60,03	60,84	-1,4%	-40,61	-43,35	-6,8%
	-10%	-10%	61,04	56,69	7,1%	-37,96	-37,17	2,1%
400 e 800	0%	0%	96,92	88,01	9,2%	-79,35	-70,18	11,5%
	5%	-5%	97,08	88,00	9,4%	-79,43	-70,22	11,6%
	10%	-10%	97,69	88,00	9,9%	-79,98	-70,22	12,2%
	5%	5%	95,57	87,48	8,5%	-81,79	-71,72	12,3%
	10%	10%	97,22	86,95	10,6%	-87,35	-73,22	16,2%
	-5%	-5%	98,77	88,52	10,4%	-77,39	-68,71	11,2%
	-10%	-10%	99,47	89,04	10,5%	-74,27	-67,21	9,5%
800 e 800	-5%	5%	97,45	88,00	9,7%	-79,99	-70,22	12,2%
	-10%	10%	97,43	88,00	9,7%	-80,04	-70,22	12,3%
	0%	0%	114,75	115,74	-0,9%	-94,36	-95,55	-1,3%
	5%	5%	113,62	115,19	-1,4%	-97,04	-97,11	-0,1%
	10%	10%	112,85	114,65	-1,6%	-100,20	-98,59	1,6%
	5%	-5%	114,14	115,72	-1,4%	-93,71	-95,62	-2,0%
	10%	-10%	116,98	115,72	1,1%	-96,75	-95,62	1,2%
	-5%	-5%	115,56	116,26	-0,6%	-91,12	-94,13	-3,3%
	-10%	-10%	116,78	116,79	0,0%	-88,51	-92,63	-4,7%

Tabela 4.23 – Comparação das reações de apoio verticais dos modelos com desnível com os valores de referência (0%).

Combinação	Desnível à esquerda	Desnível à direita	Compressão máxima [kN]		Tração máxima [kN]	
			Completo	Simplificado	Completo	Simplificado
400 e 400	5%	5%	-2,0%	-0,9%	5,3%	3,3%
	10%	10%	-3,3%	-1,7%	10,6%	6,4%
	5%	-5%	0,8%	0,0%	1,2%	0,0%
	10%	-10%	1,7%	0,0%	2,2%	0,0%
	-5%	-5%	2,1%	0,8%	-5,8%	-3,5%
	-10%	-10%	3,7%	-6,4%	-13,2%	-20,7%
	5%	-5%	0,2%	0,0%	0,1%	0,0%
400 e 800	10%	-10%	0,8%	0,0%	0,8%	0,0%
	5%	5%	-1,4%	-0,6%	3,0%	2,1%
	10%	10%	0,3%	-1,2%	9,2%	4,2%
	-5%	-5%	1,9%	0,6%	-2,5%	-2,1%
	-10%	-10%	2,6%	1,2%	-6,8%	-4,4%
	-5%	5%	0,5%	0,0%	0,8%	0,0%
	-10%	10%	0,5%	0,0%	0,9%	0,0%
800 e 800	5%	5%	-1,0%	-0,5%	2,8%	1,6%
	10%	10%	-1,7%	-1,0%	5,8%	3,1%
	5%	-5%	-0,5%	0,0%	-0,7%	0,1%
	10%	-10%	1,9%	0,0%	2,5%	0,1%
	-5%	-5%	0,7%	0,4%	-3,6%	-1,5%
	-10%	-10%	1,7%	0,9%	-6,6%	-3,2%

Observando as diferenças encontradas, conclui-se que o desnível entre torres sempre altera as forças e reações da estrutura e deve ser considerado. Entretanto, o modelo simplificado consegue captar bem esse efeito, não sendo necessário o desenvolvimento de um modelo completo para a avaliação de estruturas em desnível. Ressalta-se que, ainda que o modelo simplificado seja utilizado, as forças a serem aplicadas na estrutura devem ser calculadas considerando o desnível, conforme as Equações (2.22) e (2.23).

Os momentos transversais são apresentados na Tabela 4.24 e os momentos longitudinais na Tabela 4.25, para cada caso em estudo.

Tabela 4.24 – Momentos nas bases dos modelos completo e simplificado para diferentes combinações de desnível.

Combinação	Desnível à esquerda	Desnível à direita	Momento transversal [kN.m]		
			Completo	Simplificado	Diferença
400 e 400	0%	0%	370,90	383,16	-3,3%
	5%	5%	375,41	382,93	-2,0%
	10%	10%	374,54	390,30	-4,2%
	5%	-5%	370,22	383,16	-3,5%
	10%	-10%	370,85	383,18	-3,3%
	-5%	-5%	367,00	383,38	-4,5%
	-10%	-10%	368,78	343,03	7,0%
400 e 800	0%	0%	565,51	575,23	-1,7%
	5%	-5%	563,85	575,21	-2,0%
	10%	-10%	564,45	575,31	-1,9%
	5%	5%	569,79	574,88	-0,9%
	10%	10%	570,46	582,23	-2,1%
	-5%	-5%	560,18	575,55	-2,7%
	-10%	-10%	560,88	568,35	-1,3%
800 e 800	-5%	5%	566,01	575,21	-1,6%
	-10%	10%	565,85	575,31	-1,7%
	0%	0%	759,90	767,65	-1,0%
	5%	5%	765,38	749,21	2,1%
	10%	10%	766,02	774,51	-1,1%
	5%	-5%	755,41	767,64	-1,6%
	10%	-10%	759,46	767,79	-1,1%
	-5%	-5%	751,35	768,08	-2,2%
	-10%	-10%	746,45	761,03	-2,0%

Tabela 4.25 – Deslocamento médio dos isoladores e momento longitudinal nas bases do modelo completo.

Combinação	Desnível à esquerda	Desnível à direita	Deslocamento médio dos isoladores [cm]	Momento longitudinal [kN.m]
400 e 400	0%	0%	0,00	0,00
	5%	5%	0,00	0,00
	10%	10%	0,00	0,00
	5%	-5%	-1,95	-4,25
	10%	-10%	-3,63	-7,10
	-5%	-5%	0,00	0,00
	-10%	-10%	0,00	0,00
400 e 800	0%	0%	13,72	73,73
	5%	-5%	14,66	76,28
	10%	-10%	15,94	79,65
	5%	5%	14,98	73,34
	10%	10%	20,58	90,50
	-5%	-5%	13,25	78,69
	-10%	-10%	11,24	76,96
800 e 800	-5%	5%	14,24	77,37
	-10%	10%	13,66	77,56
	0%	0%	0,00	0,00
	5%	5%	0,00	0,00
	10%	10%	0,00	0,00
	5%	-5%	-0,42	0,14
	10%	-10%	2,44	16,77
	-5%	-5%	0,00	0,00
	-10%	-10%	0,00	0,00

Avaliando os valores de momento calculados, ratifica-se conclusão obtida anteriormente. O aumento das reações e forças internas nos modelos completos com desnível ocorreu principalmente devido ao desequilíbrio longitudinal entre vãos (vãos de 400 e 800 metros), e não devido à presença do desnível. Portanto, para os efeitos da não linearidade geométrica, o fato de a estrutura estar em desnível com as adjacentes não indica a necessidade da utilização de um modelo completo.

# 5

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Generalidades

Este trabalho decorre da necessidade de instalação de novas linhas de transmissão aéreas (LTs) e se justifica por uma série de fatores, a saber: a crescente demanda por energia elétrica e as consequências negativas da interrupção do seu fornecimento, as alterações climáticas e as intervenções humanas na ocupação do solo, a ocorrência de acidentes graves nessas estruturas, a desatualização das normas brasileiras aplicáveis ao projeto de LTs, entre outras.

Neste sentido, apresentou-se um estudo da climatologia do vento em Minas Gerais e se propôs um mapa de velocidades para o estado com base nas prescrições da norma europeia IEC 60826:2017. Além disso, foram desenvolvidos modelos numéricos para avaliação do comportamento não linear geométrico de estruturas frequentemente empregadas em linhas de transmissão aéreas (LTs) quando essas estruturas são submetidas à ação do vento.

### 5.2 Mapa de velocidades básicas do vento para o estado de Minas Gerais

Uma avaliação minuciosa das velocidades de vento obtidas foi realizada para remover os valores incoerentes. O ajuste consistiu em avaliar o relevo da região onde está localizada a estação em estudo e as condições de rugosidade do terreno e comparar com as velocidades do vento das estações vizinhas. O número inicial de 225 estações meteorológicas foi então reduzido para 98, e posteriormente para 65, após serem descartadas velocidades inferiores a 28 m/s. O mapa de isopletas foi então proposto considerando o período de integração igual 3 segundos, altura de referência igual a 10 metros, categoria de rugosidade B, referente a terrenos abertos e com poucos obstáculos, e período de recorrência igual a 50 anos.

A partir dos dados, um mapa de calor com as velocidades também foi proposto, considerando períodos de integração iguais a 3 segundos e 10 minutos, com velocidades entre 30,0 - 40,0



m/s e 20,5 - 28,0 m/s, respectivamente. Com um banco de dados muito mais amplo do que o utilizado à época da elaboração da norma ABNT NBR 6123:1988, foi possível identificar regiões com velocidades mais elevadas do que as até então recomendadas por esta norma.

### **5.3 Comportamento não linear geométrico de estruturas de LTs**

Estudou-se neste trabalho o comportamento não linear geométrico das estruturas frequentemente empregadas em linhas de transmissão aéreas da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Foram desenvolvidos modelos tridimensionais em elementos finitos de uma estrutura de suspensão tipo frequentemente utilizada em LTs. Estes modelos contemplaram as não linearidades geométricas presentes no sistema estrutural (torre, isoladores e cabos) e permitiram avaliar a influência destas não linearidades geométricas na estrutura suporte após seu processamento.

Os resultados do modelo completo proposto foram comparados com os resultados obtidos através da análise de uma torre isolada, com forças externas aplicadas no ponto de suspensão dos cabos, modelo este frequentemente utilizado no projeto de LTs.

Para a quantificação da influência das não linearidades geométricas no sistema, foram avaliados diferentes comprimentos de vãos de cabos, velocidades médias do vento e desníveis entre torres adjacentes. Os resultados permitiram chegar às seguintes conclusões:

- Para os casos de vãos adjacentes de comprimentos iguais, pode-se realizar a análise das estruturas de forma isolada (modelo simplificado), pois os efeitos decorrentes da não linearidade geométrica não são expressivos;
- Para os casos de vãos adjacentes de comprimentos diferentes, o efeito das não linearidades geométricas se tornam expressivos;
- O tipo de análise a ser realizada nas estruturas independe da velocidade do vento, mas sim do comprimento dos vãos adjacentes;
- O aumento da velocidade média do vento implica no aumento do desequilíbrio longitudinal, o que acarreta na amplificação dos esforços solicitantes e reações na base devido ao acréscimo do valor do momento longitudinal;
- Para os efeitos da não linearidade geométrica, o fato da estrutura estar em desnível com as adjacentes não indica a necessidade da utilização de um modelo completo;

- As forças a serem aplicadas na estrutura devem ser calculadas considerando o desnível entre vãos, mesmo que o modelo simplificado seja utilizado.

#### **5.4 Recomendações práticas para o dimensionamento de estruturas de LTs frente à análise dos resultados obtidos**

O entendimento do comportamento das estruturas frequentemente empregadas em linhas aéreas de transmissão, explicitado nas conclusões apresentadas no item anterior, permitiu estabelecer recomendações práticas (ou critérios) de dimensionamento para que o projetista saiba qual tipo de análise deverá realizar no dimensionamento das estruturas. Estas recomendações, válidas para velocidades do vento entre 30 e 40 m/s e desníveis das torres adjacentes entre 0 e 10%, são descritas a seguir:

- Se a relação entre o maior e o menor vão for inferior a 1,5, a análise da estrutura pode ser realizada sem a consideração das não linearidades geométricas (análise simplificada com o modelo da torre isolada);
- Se a relação entre o maior e o menor vão for superior a 1,5, recomenda-se realizar a análise das estruturas a partir de um modelo completo (torres, cabos e isoladores), sempre considerando as não linearidades geométricas presente no sistema estruturas (análise a partir do modelo completo).

O emprego destas recomendações por parte do projetista conduzirá ao dimensionamento de estruturas com maior nível de confiabilidade, uma vez que a determinação dos esforços solicitantes nas estruturas e fundações será realizada de forma mais precisa.

#### **5.5 Principais conclusões**

Diante dos resultados apresentados, comprova-se a necessidade de revisão dos procedimentos normativos aplicáveis ao projeto de LTs, tanto em relação à obtenção da velocidade básica do vento por meio de mapas atualizados quanto à modelagem estrutural através de modelos completos, que possibilitem a determinação de uma série de variáveis necessárias à fase de projeto da estrutura.

Portanto, é pertinente afirmar que a metodologia apresentada neste trabalho pode ser empregada para desenvolver projetos de estruturas de LTs em Minas Gerais, atentando-se para o fato de que as recomendações aqui propostas são válidas apenas para torres

autoportantes. Os resultados deste estudo podem, desse modo, ser utilizados para embasar futuras revisões das normas de projeto de LTs.

## 5.6 Sugestões para trabalhos futuros

Apontam-se as seguintes sugestões de prosseguimento deste trabalho:

- a) Expandir o estudo da climatologia do vento do estado de Minas Gerais para todo território brasileiro, partindo da obtenção dos dados de velocidade máxima do vento das principais redes meteorológicas e da aplicação da metodologia para determinação dos valores extremos apresentada neste trabalho. Além deste, recomenda-se utilizar o trabalho apresentado por Vallis *et al.* (2017) como ponto de partida;
- b) Avaliar o comportamento não linear geométrico de outras alternativas topológicas de estruturas de LTs. Tal avaliação pode ser realizada a partir da modelagem numérica de uma estrutura de LT real que tenha seu projeto disponibilizado, a ser utilizado na validação do modelo;
- c) Realizar análises dinâmicas das estruturas e cabos submetidos às forças de vento;
- d) Avaliar a influência da rigidez da torre na resposta dinâmica;
- e) Incluir a interação solo-estrutura nas análises. Além deste, outros trabalhos podem ser utilizados como referência, como Carvalho (2010), Carvalho (2015) e Oliveira (2019).

# 6

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – ASCE. ASCE 10-15: Design of Latticed Steel Transmission Structures. *ASCE*, 2015.

ANSYS INC. *Release 18.2 – Documentation for ANSYS*. Canonsburg, Estados Unidos, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5422: Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica. *ABNT*, Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6123: Forças devidas ao Vento em Edificações. *ABNT*, Rio de Janeiro, 1988.

BAUTISTA, E. A. L.; ZOCCHI, S. S.; ANGELOCCI, L. R.. A distribuição generalizada de valores extremos aplicada ao ajuste dos dados de velocidade máxima do vento em Piracicaba, São Paulo, Brasil. *Revista de Matemática e Estatística*, v. 22, p. 95-111, 2004.

BAUTISTA, E. A. L. A distribuição generalizada de valores extremos no estudo da velocidade máxima do vento em Piracicaba, SP. 2002. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BECK, A. T.; CORRÊA, M. R. S. New design chart for basic wind speeds in Brazil. *Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 10, n. 4, p. 707-723, 2013.

BLESSMANN, J. *Acidentes causados pelo vento*, 4a edição. 2001.

BLESSMANN, J. *Aerodinâmica das construções*. fac-similar. *Porto Alegre: Editora da UFRGS*, 2011.

BLESSMANN, J. *Aerodinâmica das construções*. Ed. da Universidade, UFRGS, 1983.

BLESSMANN, J. *O vento na engenharia estrutural*. Editora da Universidade/UFRGS, 1995.

BORGES, A. F. ET AL. Métodos de cartografia e geoprocessamento aplicados na gestão de inconsistências de limites intermunicipais-estudo de caso entre Nova Lima e Belo Horizonte, MG. *Revista Geografias*, p. 80-99, 2016.

BROWNLEE, K. A. *Statistical theory and methodology in science and engineering*. New York: Wiley, 1965.

CAPPELLARI, T. T. O. Determinação da resposta dinâmica de feixes de condutores em linhas aéreas de transmissão. 2005.

CARLOS, T. B.; KAMINSKI JR, J. Rotina numérica para análise dinâmica de torres estaiadas de linhas de transmissão submetidas à ruptura de cabo. In: *XXXVI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (XXXVI CILAMCE)*. Rio de Janeiro, Brasil. 2015.

CARVALHO, H. Efeitos do vento em linhas de transmissão. *Belo Horizonte*, 2015.

CARVALHO, H. Metodologias para análise estática do efeito do vento em linhas de transmissão. 2010.

CARVALHO, H. ET AL. Aerodynamic damping in cables of overhead transmission lines subjected to wind loads. *Wind Engineering*, v. 42, n. 4, p. 268-275, 2018.

CARVALHO, H.; QUEIROZ, G; FAKURY, R. H. Comportamento de sistemas estruturais de linhas de transmissão submetidos ao vento. *Revista da estrutura de Aço*, v. 5, n. 1, p. 21-38, 2016.

CLARK, M. ET AL. Measured dynamic performance of electricity transmission towers following controlled broken-wire events. *Proceedings of CIGRE*, 2006.

COLES, S. ET AL. *An introduction to statistical modeling of extreme values*. London: Springer, 2001.

DAVENPORT, A. G. Gust response factors for transmission line loading. In: *Wind Engineering*. Pergamon, 1980. p. 899-909.

EIFFEL, G. *La résistance de l'air et l'aviation: expériences effectuées au laboratoire du Champ-de-Mars*. Dunod, 1911.

EL-GHAZALY, H. A.; AL-KHAIAT, H. A. Analysis and design of guyed transmission towers—Case study in Kuwait. *Computers & structures*, v. 55, n. 3, p. 413-431, 1995.

FERRARI, G. T. *Imputação de dados pluviométricos e sua aplicação na modelagem de eventos extremos de seca agrícola*. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FISHER, R. A.; TIPPETT, L. H. C. Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. In: *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. Cambridge University Press, 1928. p. 180-190.

FLACHSBART, O. Wind pressure on solid-walled and framed structures—Mémoires. *Association Internationale des Ponts et Charpentes*, v. 1, p. 153-72, 1932.

FRÉCHET, M. Sur les ensembles compacts de fonctions mesurables. *Fundamenta Mathematicae*, v. 9, n. 1, p. 25-32, 1927.

GOULD, R. W. F.; RAYMER, W. G. *Measurements over a wide range of Reynolds numbers of the wind forces on models of lattice frameworks with tubular members*. National Physical Laboratory, Division of Maritime Science, Department of Trade and Industry, 1972.

HAMADA, A. ET AL. The response of a guyed transmission line system to boundary layer wind. *Engineering Structures*, v. 139, p. 135-152, 2017.

HOSKING, J. R. M. Testing whether the shape parameter is zero in the generalized extreme-value distribution. *Biometrika*, v. 71, n. 2, p. 367-374, 1984.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC 60826:2003. Design criteria of overhead transmission lines. 3rd ed, International standard, Geneva, Switzerland, 2003.

JAKOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas. *Anais*, p. 1-22, 2016.

JÓNSDÓTTIR, G. M.; MILANO, F. Data-based continuous wind speed models with arbitrary probability distribution and autocorrelation. *Renewable Energy*, 2019.

KAMINSKI JR, J. Incertezas de modelo na análise de torres metálicas treliçadas de linhas de transmissão. *Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS. Porto Alegre*, p. 362, 2007.

KEMPNER JR, L.; LAURSEN, H. I. Measured Dynamic Response of a Latticed Transmission Line Tower and Conductors to Wind Loading. In: *Pre-prints of the Fourth US National Conference on Wind Engineering. Seattle, Washington*. 1981. p. 348-355.

KLEIN, T. Estudo em túnel de vento das características aerodinâmicas de torres metálicas treliçadas. 2004.

KRISHNASAMY, S. G. Wind and ice loads on overhead transmission lines. *Ontario Hydro Research Review*, v. 3, p. 11-18, 1981.

LABEGALINI, P.R. ET AL. *Projetos Mecânicos das Linhas de Transmissão*. 2ª edição. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1992.

LEE, P.; MCCLURE, G. Elastoplastic large deformation analysis of a lattice steel tower structure and comparison with full-scale tests. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 63, n. 5, p. 709-717, 2007.

LOREDO-SOUZA, A. M. *The Behaviour of Transmission Lines Under High Winds*. 1996. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado)-Faculty of Engineering Science Department of Civil Engineering, The University of Western Ontario, Ontário.

LUZARDO, A. C. Simulação do comportamento dinâmico de torres de linhas de transmissão sob ação de ventos originados de Downburst. 2016.

MAL, A. K.; SINGH, S. *Deformation of elastic solids*. Prentice Hall, 1991.

MASSEY JR, F. J. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American statistical Association*, v. 46, n. 253, p. 68-78, 1951.

MOMOMURA, Y. ET AL. Full-scale measurements of wind-induced vibration of a transmission line system in a mountainous area. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 72, p. 241-252, 1997.

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS. *Descrição, fundamentos e aplicações*, 2008.

MONK, P. E. Structural Failure of Transmission Towers Under High Wind Loads. *A project submitted in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Master of Engineering in the University of Canterbury—New Zealand—1980*, 1980.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Applied statistics and probability for engineers*. John Wiley & Sons, 2010.

NEXANS. “Catálogo de Produtos: Alumínio, condutores nus”, 2003.

OLIVEIRA, B. A. S., SILVA, J. G. S. Modelagem do Comportamento Estrutural Dinâmico de Torres de Aço de Telecomunicações Submetidas à Ação Dinâmica Não Determinística de Cargas de Vento. In: *XXXVII Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (XXXVI CILAMCE)*. Brasília, Brasil. 2016.

OLIVEIRA, C. C. Avaliação do Comportamento de Sistemas Estruturais de Linhas de Transmissão Submetidos à Ação do Vento. 2019.

OLIVEIRA, M. I. R. D. Análise estrutural de torres de transmissão de energia submetidas aos efeitos dinâmicos induzidos pelo vento. *Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro*, 2006.

OLIVEIRA, M. I. R. ET AL. Structural analysis of guyed steel telecommunication towers for radio antennas. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 29, n. 2, p. 185-195, 2007.

PADARATZ, I. J. Velocidade básica do vento no Brasil. 1977.

REIS, E. D. ET AL. Metodologia Para A Determinação Da Velocidade Básica Do Vento Aplicada Ao Projeto De Linhas Aéreas De Transmissão. In: *XL Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (XL CILAMCE)*. Natal, Brasil. 2019.

RIPPEL, L. I. Estudo em túnel de vento do arrasto aerodinâmico sobre torres treliçadas de linhas de transmissão. 2005.

RODRIGUES, R. S. Mecânica do colapso aeroelástico de torres TEE. *Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 2004.

RUBIRA, F. G.; DE MELO, G. V.; FONSECA, GUSTAVO. A importância dos sistemas geodésicos de referência no cadastramento rural. *Geografia Ensino & Pesquisa*, v. 20, n. 2, p. 147-162, 2016.

SANTOS, A. S. ET AL. Estudo de vibrações eólicas em linhas de transmissão de energia elétrica de alta tensão. 2008.

SILVA, J.B.G.F.; CARVALHO, M. M. Algumas considerações sobre a problemática dos efeitos dinâmicos nas estruturas de linhas de transmissão. In: *Proceedings of the International Seminar on Modeling and Identification of Structures Subjected to Dynamic Excitation*, Bento Gonçalves, RS, Brasil, (2009).

SILVA, R. R. *A distribuição Generalizada de Pareto e mistura de distribuições de Gumbel no estudo da vazão e da velocidade máxima do vento em Piracicaba, SP*. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

STENGEL, D. ET AL. Aerodynamic damping of nonlinear movement of conductor cables in wind tunnel tests, numerical simulations and full scale measurements. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 169, p. 47-53, 2017.

SWED, F. S.; EISENHART, C.L. Tables for testing randomness of grouping in a sequence of alternatives. *The Annals of Mathematical Statistics*, v. 14, n. 1, p. 66-87, 1943.

VALLIS, M. B. ET AL A review of Brazilian wind data. In: *Proceedings of the 13th Americas Conference on Wind Engineering (13ACWE) Gainesville, Florida USA, May 21-24*. 2017.

VILLANUEVA, D; PAZOS, J. L.; FEIJOO, A. Probabilistic load flow including wind power generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 26, n. 3, p. 1659-1667, 2011.

VIOLA, M. L. L. ET AL. Teoria de valores extremos e copulas: distribuição valor extremo generalizada e copulas arquimedianas generalizadas trivariadas. 2006.

WAHBA, Y. M. F.; MADUGULA, M. K. S; MONFORTON, G. R. Effect of icing on the free vibration of guyed antenna towers. *Atmospheric research*, v. 46, n. 1-2, p. 27-35, 1998.

XIE, Q.; CAI, Y.; XUE, S. Wind-induced vibration of UHV transmission tower line system: Wind tunnel test on aero-elastic model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 171, p. 219-229, 2017.

ZAR, JERROLD H. *Biostatistical analysis*. Pearson Education India, 1999.



## ANEXO A

Na Tabela A.1 são apresentadas as estações meteorológicas dos estados que fazem fronteira com Minas Gerais e que foram desconsideradas neste estudo por estarem posicionadas além do raio de 200 km da fronteira com o estado. Apresentam-se também nesta tabela as estações desconsideradas devido à inconsistência do valor extremo da velocidade do vento. Na Tabela A.2, apresentam-se aquelas que foram excluídas por apresentarem valor extremo inferior a 28 m/s e, por fim, a Tabela A.3 apresenta as que foram consideradas na determinação do mapa de velocidades.

Tabela A.1 – Estações desconsideradas no cálculo das isopletas.

Sistema	UF/Cidade	Código	Latitude [°]	Longitude [°]
INMET	BA PAULO AFONSO	82986	-9,41	-38,24
INMET	BA SALVADOR (ONDINA)	83229	-13,01	-38,51
INMET	BA CIPO	83192	-11,08	-38,52
INMET	BA SERRINHA	83190	-11,63	-38,97
INMET	BA CRUZ DAS ALMAS	83222	-12,67	-39,08
INMET	BA MONTE SANTO	83090	-10,44	-39,33
INMET	BA ITABERABA	83244	-12,52	-40,28
INMET	BA JACOBINA	83186	-11,17	-40,53
INMET	BA MORRO DO CHAPEU	83184	-11,22	-41,22
INMET	BA LENCOIS	83242	-12,56	-41,39
INMET	BA IRECE	83182	-11,3	-41,87
INMET	BA REMANSO	82979	-9,63	-42,1
INMET	BA STA R DE CASSIA (IBIPETUBA)	83076	-11,02	-44,52
INMET	BA BARREIRAS	83236	-12,16	-45,01
INMET	GO GOIAS	83374	-15,94	-50,14
INMET	SP PRESIDENTE PRUDENTE	83716	-22,13	-51,39
INMET	GO ARAGARCAS	83368	-15,9	-52,23
INMET	BA ALAGOINHAS	83249	-12,15	-38,43
INMET	BA FEIRA DE SANTANA	83221	-12,20	-38,97
ICEA	BA-PORTO SEGURO	83460	-16,44	-39,08
INPE	BA ILHEUS	32499	-14,75	-39,23

Sistema	UF/Cidade	Código	Latitude [°]	Longitude [°]
INMET	BA GUARATINGA	83446	-16,73	-39,55
INPE	BA EUNAPOLIS	32496	-16,29	-39,58
INPE	BA TEIXEIRA DE FREITAS	32498	-17,57	-39,73
INPE	ES SOORETAMA	31957	-19,37	-40,07
INPE	BA JEQUIE	32492	-13,87	-40,07
INMET	BA SENHOR DO BONFIM	83088	-10,47	-40,18
INPE	MG NANUQUE	32519	-17,82	-40,32
INPE	BA VITORIA DA CONQUISTA	32493	-14,89	-40,80
INMET	MG AIMORES	83595	-19,49	-41,07
INPE	BA ANAGE	32494	-14,62	-41,14
INPE	ES VENDA NOVA IMIGRANTE	31959	-20,38	-41,19
INPE	ES JERONIMO MONTEIRO	31958	-20,75	-41,29
INPE	BA MARCIONILIO SOUZA	32490	-13,14	-41,53
INPE	BA BRUMADO	32495	-14,20	-41,77
INPE	BA PIATA	32489	-13,12	-41,79
INPE	RJ SANTA MARIA MADALENA	31956	-21,95	-42,01
INMET	MG ARACUAI	83442	-16,83	-42,05
INPE	MG ARACUAI	32502	-16,84	-42,07
INPE	MG CARATINGA	32508	-19,74	-42,14
INMET	MG SALINAS	83441	-16,15	-42,29
INPE	MG IPATINGA	32507	-19,47	-42,52
INPE	BA CAETITE	32547	-13,96	-42,60
INPE	MG LEOPOLDINA	32510	-21,47	-42,72
INPE	RJ TERESOPOLIS	31954	-22,41	-42,79
INMET	MG ESPINOSA	83338	-14,91	-42,81
INPE	MG VICOSA	32509	-20,74	-42,84
INMET	MG ITAMARANDIBA	83488	-17,86	-42,85
INPE	MG CNPMS ASLIM	31111	-15,86	-43,04
INPE	MG CNPMS FAZ ANGICOS	31115	-15,50	-43,06
INMET	BA BARRA	83179	-11,08	-43,17
INMET	RJ RIO DE JANEIRO	83743	-22,90	-43,19
ICEA	RJ-RIO DE JANEIRO	83746	-22,81	-43,25
INMET	MG JANAUBA	83395	-15,78	-43,30
INMET	MG JUIZ DE FORA	83692	-21,77	-43,35
INPE	MG CNPMS FAZ GADO BRAVO	31116	-15,04	-43,37
ICEA	MG-JUIZ DE FORA	83112	-21,79	-43,39
ICEA	BA-BOM JESUS DA LAPA	83289	-13,26	-43,41
INMET	MG C DO MATO DENTRO	83589	-19,02	-43,43
INPE	MG CNPMS FAZ ITAPOA	31117	-15,57	-43,59
INPE	MG CNPMS EPAMIG JAIBA	31112	-15,33	-43,62
INPE	MG CNPMS FAZ RIACHINHO	31118	-15,82	-43,68
INPE	RJ MENDES	31955	-22,52	-43,72
INMET	BA CARINHANHA	83408	-14,28	-43,77

Sistema	UF/Cidade	Código	Latitude [°]	Longitude [°]
INPE	MG MONTES CLAROS	32503	-16,75	-43,89
ICEA	MG-BELO HORIZONTE	83583	-19,66	-43,90
INPE	MG CNPMS FAZ SAO GERALDO	31119	-15,03	-43,90
INPE	MG BELO HORIZONTE	32513	-19,88	-43,91
INPE	MG CNPMS EMPAMIG MOCAMBINHO	31113	-15,15	-43,92
INMET	MG BELO HORIZONTE	83587	-19,93	-43,95
ICEA	ES-VITÓRIA	83649	-19,85	-43,95
ICEA	DF-BRASÍLIA	83378	-19,91	-43,99
INMET	MG SETE LAGOAS	83586	-19,46	-44,25
INPE	MG ANDRELANDIA	31744	-21,74	-44,32
INMET	MG CURVELO	83536	-18,75	-44,45
INPE	SP SAO JOSE DO BARREIRO	32530	-22,64	-44,58
INPE	MG PIRAPORA	32504	-17,25	-44,84
INPE	SP PESM PICINGUABA	30887	-23,36	-44,85
INMET	MG PIRAPORA	83483	-17,35	-44,92
INPE	SP CUNHA	30885	-23,07	-44,97
INPE	MG LAVRAS	32511	-21,22	-44,97
INPE	MG ANDREQUICE	32506	-18,28	-44,99
INPE	SP CACHOEIRA PAULISTA MET	31000	-22,68	-45,00
INPE	SP PIQUETE	31006	-22,52	-45,14
INPE	BA RODA VELHA	31962	-12,89	-45,15
INPE	SP GUARATINGUETA	32524	-22,80	-45,19
INPE	MG TRES CORACOES	31745	-21,71	-45,23
INPE	MG SANTA FE DE MINAS	31930	-16,50	-45,42
INMET	SP TAUBATE	83784	-23,03	-45,55
INPE	SP CAMPOS DO JORDAO	32527	-22,72	-45,57
INPE	SP TAUBATE	32531	-23,03	-45,57
INPE	SP PARAIBUNA	30888	-23,41	-45,60
INPE	SANTA RITA DO SAPUCAI	31746	-22,25	-45,69
INPE	SP MONTEIRO LOBATO	32523	-22,95	-45,84
INPE	MG MACHADO	32526	-21,70	-45,89
INMET	SP GUARULHOS	83075	-23,43	-46,46
ICEA	SP-SÃO PAULO	83778	-23,44	-46,47
INPE	MG INB UTM PC01	30975	-21,95	-46,49
ICEA	MG-POÇOS DE CALDAS	83644	-21,84	-46,57
INMET	SP MIR. DE SANTANA	83781	-23,50	-46,62
INPE	SP PESM CURUCUTU	30890	-23,92	-46,64
INPE	SP ITANHAEM	30889	-24,17	-46,79
INPE	MG PARACATU	32505	-17,25	-46,89
INMET	MG UNAI	83428	-16,37	-46,89
INPE	GO FLORES DE GOIAS	32353	-14,51	-47,00
INMET	MG SAO S. DO PARAISO	83631	-20,91	-47,11
INPE	SP ITU	31977	-23,29	-47,29

Sistema	UF/Cidade	Código	Latitude [°]	Longitude [°]
INMET	GO FORMOSA	83379	-15,55	-47,34
INPE	GO CRISTALINA	32481	-16,77	-47,43
INPE	SP SAO CARLOS	31973	-22,17	-47,89
INMET	DF BRASÍLIA	83377	-15,79	-47,93
INPE	SP MIGUELOPOLIS	31975	-20,19	-48,01
INMET	GO IPAMERI	83522	-17,72	-48,17
INPE	SP JABOTICABAL	31974	-21,24	-48,30
INPE	GO VIANOPOLIS	32342	-16,80	-48,49
INPE	SP JAU	31978	-22,19	-48,62
INPE	GO ABADIANIA	31705	-16,15	-48,66
INPE	GO ANAPOLIS	32360	-16,37	-48,94
INMET	SP AVARE	83773	-23,10	-48,94
INMET	GO ITUMBIARA	83523	-18,41	-49,21
INMET	MG ITUIUTABA	83521	-18,96	-49,51
INPE	SP VOTUPORANGA	31976	-20,41	-49,97
INPE	MG HONOROPOLIS	31929	-19,50	-50,00
INPE	GO JANDAIA	32354	-17,24	-50,13
INPE	GO SANTA HELENA	32343	-17,85	-50,56
INMET	MS PARANAIBA	83565	-19,75	-51,18
INPE	GO JATAI	32484	-17,92	-51,72

Tabela A.2 – Estações excluídas por apresentarem valor extremo inferior a 28 m/s.

Sistema	UF/Cidade	Código	Latitude [°]	Longitude [°]	Vel. [m/s]
ICEA	BA-ILHÉUS	83349	-14,82	-39,03	26,91
INMET	BA CARAVELAS	83498	-17,74	-39,26	25,57
INMET	BA VITORIA DA CONQUISTA	83344	-14,88	-40,80	23,42
INMET	MG PEDRA AZUL	83393	-16,01	-41,28	19,95
INMET	BA ITUACU	83292	-13,81	-41,30	25,05
INMET	RJ CAMPOS	83698	-21,74	-41,33	24,11
ICEA	RJ-MACAÉ	83749	-22,35	-41,76	24,79
INMET	MG CAPARAO	83639	-20,52	-41,90	25,85
INMET	MG CARATINGA	83592	-19,74	-42,14	25,57
INMET	MG VICOSA	83642	-20,75	-42,85	27,81
ICEA	MG-BARBACENA	83118	-21,79	-43,39	26,51
INMET	BA BOM JESUS DA LAPA	83288	-13,25	-43,41	24,77
INPE	MG JAIBA	32501	-15,62	-43,60	26,57
ICEA	MG-BELO HORIZONTE	83571	-16,71	-43,82	26,00
INMET	MG MONTES CLAROS	83437	-16,69	-43,84	26,41
INMET	MG JANUARIA	83386	-15,45	-44,00	25,38
INMET	MG MOCAMBINHO	83389	-15,08	-44,01	25,77
INMET	BA CORRENTINA	83286	-13,33	-44,62	22,56
INMET	MG DIVINOPOLIS	83635	-20,17	-44,87	22,30

Sistema	UF/Cidade	Código	Latitude [°]	Longitude [°]	Vel. [m/s]
INMET	MG LAVRAS	83687	-21,75	-45,00	27,23
INMET	MG SAO LOURENCO	83736	-22,10	-45,02	24,52
ICEA	SP-GUARATINGUETÁ	83708	-22,79	-45,20	27,31
INMET	MG JOAO PINHEIRO	83481	-17,70	-46,16	26,28
INMET	MG FORMOSO	83334	-14,95	-46,24	25,41
INMET	MG PATOS DE MINAS	83531	-18,51	-46,43	25,77
INMET	MG PARACATU	83479	-17,24	-46,88	24,22
INMET	SP FRANCA	83630	-20,58	-47,37	27,71
INMET	SP SOROCABA	83851	-23,48	-47,43	27,14
INMET	GO CATALAO	83526	-18,18	-47,95	21,82
INMET	GO PIRENOPOLIS	83376	-15,85	-48,97	27,59
INMET	GO GOIANIA	83423	-16,67	-49,25	25,02
INMET	SP VOTUPORANGA	83623	-20,42	-49,98	22,82
INMET	GO RIO VERDE	83470	-17,80	-50,92	26,99

Tabela A.3 – Estações meteorológicas consideradas na determinação do mapa de velocidades.

Sistema	UF/Cidade	Código	Latitude [°]	Longitude [°]	Vel. [m/s]
INMET	BA CANAVIEIRAS	83398	-15,67	-38,95	28,52
INMET	ES SAO MATEUS	83550	-18,70	-39,85	33,48
INMET	ES VITORIA	83648	-20,32	-40,32	29,13
ICEA	RJ-CAMPO DOS GOITACAZES	83103	-21,70	-41,31	29,01
INMET	RJ ITAPERUNA	83695	-21,20	-41,90	28,39
INMET	RJ CORDEIRO	83718	-22,02	-42,36	33,70
INMET	BA CAETITE	83339	-14,07	-42,48	29,74
INPE	MG PERD P EST DO RIO DOCE	30800	-19,80	-42,64	28,50
INMET	MG MONTE AZUL	83388	-15,08	-42,75	30,34
ICEA	RJ-RIO DE JANEIRO	83755	-22,91	-43,16	36,07
INMET	MG CORONEL PACHECO	83037	-21,56	-43,25	28,04
ICEA	RJ-RIO DE JANEIRO	83054	-22,99	-43,37	28,38
ICEA	RJ-CAMPO DOS AFONSOS	83748	-22,88	-43,38	36,35
INMET	RJ AVELAR	83049	-22,35	-43,41	28,67
INMET	MG DIAMANTINA	83538	-18,24	-43,62	29,94
ICEA	RJ-ITAGUAI	83115	-22,93	-43,72	38,04
INMET	MG BARBACENA	83689	-21,25	-43,76	30,39
ICEA	MG-MONTES CLAROS	83436	-16,71	-43,82	29,69
ICEA	MG-LAGOA SANTA	83588	-19,66	-43,90	36,15
ICEA	GO-GOIÂNIA	83424	-19,62	-43,97	43,37
ICEA	MG-CONFINS	83566	-19,62	-43,97	40,82
INMET	MG IBIRITE	83632	-20,01	-44,05	41,37
INMET	MG FLORESTAL	83581	-19,86	-44,41	40,58
INMET	RJ RESENDE	83738	-22,45	-44,44	42,58

Sistema	UF/Cidade	Código	Latitude [°]	Longitude [°]	Vel. [m/s]
INPE	SP QUELUZ	32532	-22,54	-44,77	30,40
INPE	SP SILVEIRAS	32533	-22,80	-44,84	43,44
INPE	SP CUNHA	32520	-23,07	-44,95	29,10
INPE	SP CRUZEIRO	32525	-22,58	-44,97	44,62
INPE	SP CARAGUATATUBA	32521	-23,69	-45,43	31,51
INPE	MG ITAJUBA MET	32512	-22,41	-45,44	44,79
INPE	SP PARAIBUNA	32522	-23,41	-45,59	48,62
INMET	SP CAMPOS DO JORDAO	83714	-22,75	-45,60	36,38
ICEA	SP-SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	83829	-23,23	-45,87	43,74
INMET	MG MACHADO	83683	-21,68	-45,94	31,09
INMET	MG BAMBUI	83582	-20,03	-46,00	31,65
INMET	MG ARINOS	83384	-15,92	-46,11	29,22
ICEA	SP-SANTOS	83818	-23,93	-46,30	38,28
INMET	GO POSSE	83332	-14,10	-46,37	29,83
INMET	MG CALDAS	83681	-21,91	-46,38	32,52
INMET	MG CAPINOPOLIS	83514	-18,71	-46,55	34,26
ICEA	SP-SÃO PAULO	83779	-23,51	-46,63	28,51
ICEA	SP-SÃO PAULO	83780	-23,63	-46,66	40,40
INMET	MG ARAXA	83579	-19,61	-46,95	31,51
INPE	MG ARAXA	32334	-19,64	-46,97	36,05
ICEA	SP-CAMPINAS	83721	-23,01	-47,13	35,70
ICEA	SP-PIRASSUNUNGA	83671	-22,03	-47,42	42,48
INMET	SP SAO SIMAO	83669	-21,48	-47,55	30,34
ICEA	SP-RIBEIRÃO PRETO	83652	-21,14	-47,78	30,71
INMET	SP SAO CARLOS	83726	-21,97	-47,87	34,32
INMET	DF RONCADOR	83373	-15,93	-47,88	33,04
INMET	MG UBERABA	83577	-19,74	-47,95	35,72
ICEA	MG-UBERABA	83576	-19,76	-47,97	30,35
ICEA	MG-UBERLÂNDIA	83525	-18,88	-48,23	37,83
INPE	SP BARRETOS	32464	-20,58	-48,59	30,07
INPE	GO CALDAS NOVAS	32357	-17,72	-48,61	29,23
INMET	SP CATANDUVA	83676	-21,12	-48,93	29,98
INMET	MG FRUTAL	83574	-20,03	-48,93	28,60
INPE	GO ITUMBIARA	32349	-18,41	-49,19	29,23
INPE	GO GOIANIA	32485	-16,59	-49,27	38,87
INPE	GO GOIATUBA	32483	-18,02	-49,37	38,16
INPE	GO VICENTINOPOLIS	32341	-17,71	-49,79	36,77
INPE	GO PALMEIRAS DE GOIAS	32347	-16,81	-49,93	31,87
ICEA	SP-URUBUPUNGA	83617	-20,78	-51,57	37,01
INMET	GO JATAI	83464	-17,92	-51,72	31,24
INPE	GO CHAPADA DO CEU	32359	-18,40	-52,67	42,61