

Vanessa Vanin

**Determinação Probabilística da Resposta
Dinâmica de Linhas de Transmissão
Submetidas à Ação de Tormentas Elétricas
Estacionárias e Não Estacionárias**

Florianópolis

2017

Vanessa Vanin

**Determinação Probabilística da Resposta Dinâmica de
Linhas de Transmissão Submetidas à Ação de
Tormentas Elétricas Estacionárias e Não Estacionárias**

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia
Civil da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção
do Grau de Mestre em Engenharia
Civil

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC
Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Orientador: Leandro Fleck Fadel Miguel, Dr.
Coorientador: Rafael Holdorf Lopez, Dr.

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Vanin, Vanessa

Determinação Probabilística da Resposta Dinâmica de
Linhas de Transmissão Submetidas à Ação de Tormentas
Elétricas Estacionárias e Não Estacionárias /
Vanessa Vanin ; orientador, Leandro Fleck Fadel
Miguel, coorientador, Rafael Holdorf Lopez, 2017.
127 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Linhas de Transmissão.
3. Tormentas Elétricas. 4. Tormentas EPS. I. Fadel
Miguel, Leandro Fleck. II. Lopez, Rafael Holdorf.
III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV.
Título.

Vanessa Vanin

**Determinação Probabilística da Resposta Dinâmica de Linhas de
Transmissão Submetidas à Ação de Tormentas Elétricas
Estacionárias e Não Estacionárias**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Florianópolis, 31 de Agosto de 2017:

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Coordenador do Curso

Prof. Leandro Fleck Fadel Miguel, Dr.
Orientador

Prof. Rafael Holdorf Lopez, Dr.
Coorientador
Banca Examinadora:

Prof^a. Ângela Do Valle, Dr^a.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Daniel Domingues Loriggio, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Maximiliano Malite, Dr.
Universidade de São Paulo (Videoconferência)

*Este trabalho é dedicado
à minha família.*

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus pela força e pela fé que permitiram que eu alcançasse meus objetivos.

Aos meus pais, Inácio e Verônica, e minha irmã Miriam, por todo o apoio, pela confiança e pelo amor a mim dedicados, sem vocês ao meu lado nada disso seria possível.

Ao meu orientador, Professor Leandro Fleck Fadel Miguel, pela inestimável contribuição neste trabalho, pela atenção e preocupação com o aprendizado e a formação profissional.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC, por contribuírem com minha formação.

Aos meus professores de graduação da Universidade de Passo Fundo, por terem proporcionado a base de conhecimento necessária para que este passo pudesse ser dado e, por incentivarem a continuação de minha formação acadêmica. Em especial ao Prof. Zacarias Martin Chamberlain Pravia pelos conselhos e pelo incentivo.

Ao Prof. Jorge Daniel Riera, pelas contribuições e sugestões dadas ao trabalho.

À colega e amiga Elisabeth Junges, por ter me ajudado com o FORTRAN.

Aos demais colegas e amigos de pós-graduação, mestrandos e doutorandos, que contribuíram com a troca de experiências, com quem compartilhei dúvidas e aprendizados, compartilho com vocês também esta conquista.

Aos meus amigos que souberam compreender a distância e a ausência, e que me aguentaram entusiasmada falando de tempestade, nuvens, ventos e estruturas.

A todos que de alguma forma contribuíram e torceram, agradeço por fazerem parte desta conquista.

Obrigada!

*“Quando os ventos da mudança sopram,
umas pessoas levantam barreiras,
outras constroem moinhos.”*

— Erico Verissimo

Resumo

Inúmeras falhas de Linhas de Transmissão (LTs) são usualmente associadas à ocorrência de Tormentas Elétricas (TS). Isso é justificado, pois a natureza localizada deste tipo de evento meteorológico pode torná-la particularmente prejudicial a estruturas de grandes dimensões, como no caso de LTs. Todavia, estes ventos de alta intensidade de natureza convectiva foram somente identificados corretamente há apenas algumas décadas, tornando então possível o estudo dos seus efeitos na engenharia estrutural. Neste contexto, este trabalho objetiva abordar, de forma probabilística, a resposta dinâmica não linear geométrica de um trecho de LT submetido a carregamentos oriundos de tormentas elétricas combinadas com ventos sinóticos (simplificadamente considerados sem turbulência), por essa ser a combinação meteorológica mais severa para fins de projeto estrutural. O modelo descrito por Ponte (2005) e Ponte & Riera (2007) e posteriormente adaptado por Miguel & Riera (2013), Gheno (2014) e Gheno *et al.* (2015) foi adotado neste trabalho para a geração dos campos de velocidades do vento, por ser baseado em variáveis meteorológicas, que são suscetíveis à avaliação estatística. Por meio de simulação de Monte Carlo, para um período de 50 anos, os esforços axiais máximos anuais (tração e compressão) foram determinados para alguns elementos da LT (cabos e barras da torre), permitindo a construção de histogramas e, assim, o ajuste de distribuições de probabilidade de Gumbel. Esses valores foram comparados às solicitações impostas por uma tormenta EPS (*extended pressure systems*) com velocidade a 10 m de altura, sobre 3 s, correspondente ao valor de 50 anos calculado para a TS e outra com 80% da sua intensidade. Verificou-se que, para a LT estudada, os esforços axiais causados pela ação de tormentas EPS nos montantes excedem em média 45% os esforços associados aos eventos TS. Para a EPS com 80% da intensidade, os esforços nos montantes excederam em média 12%.

Palavras-chave: tormentas elétricas. linha de transmissão. *downburst*.

Abstract

Numerous Transmission Line failures (TL) are usually associated with the occurrence of Thunderstorms (TS). This is justified because the localized nature of this type of meteorological event can make it particularly damaging to large structures, as in the case of TL. However, these convective high-intensity winds were correctly identified only a few decades ago, making it possible to study their effects on structural engineering. In this context, this work aims to approach, in a probabilistic way, the dynamic nonlinear response of a TL segment subjected to Thunderstorms combined with synoptic winds (simplified considered without turbulence) because this is the most severe meteorological combination for purposes of structural design. The model described by Ponte (2005) and Ponte & Riera (2007) and later adapted by Miguel & Riera (2013), Gheno (2014) and Gheno *et al.* (2015) was adopted in this work to generate wind velocity fields, because it is based on meteorological variables, which are susceptible to statistical evaluation. By Monte Carlo simulation for a period of 50 years, the maximum annual axial stresses (traction and compression) were determined for some elements of the TL (cables and tower bars), allowing the construction of histograms and, thus, the adjustment of probability distributions of Gumbel. These values were compared to the demands imposed by an EPS (extended pressure systems) with velocity at 10 m height, over 3 s, corresponding to the 50-year value calculated for TS and another with 80% of its intensity. It was verified that, for the TL studied, the axial stresses caused by the action of EPS storms in the uprights exceed on average 45% the stresses associated with the TS events. For EPS with 80% of the intensity, the stresses on the amounts exceeded on average 12%.

Key-words: thunderstorms. transmission line. downburst.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Torre colapsada após evento TS	32
Figura 2 – Ciclone extratropical visto por satélite	40
Figura 3 – Registro de uma Tempestade Elétrica	41
Figura 4 – Desenvolvimento de um <i>downburst</i>	42
Figura 5 – Estágios de uma TS estacionária	44
Figura 6 – Estágios de um <i>travelling downburst</i>	45
Figura 7 – Variação dos fluxos de ar entre um <i>downburst</i> estacionário e um <i>travelling downburst</i>	45
Figura 8 – Deslocamento de um <i>downburst</i> sobre uma estrutura estacionária	46
Figura 9 – Gráfico do registro realizado pelo anemômetro de AAFB	47
Figura 10 – Elemento de barra submetido às solicitações, em (a) barra no instante de tempo $t = 0$, em (b) barra no instante de tempo $t + \Delta t$	52
Figura 11 – Algoritmo com os passos do funcionamento do método de solução.	54
Figura 12 – Padrão característico de árvores caídas após fortes ventos. Em (a) tornado, (b) <i>downburst</i>	56
Figura 13 – Modelo <i>wall jet</i>	56
Figura 14 – Representação do modelo <i>double-sheet</i>	57
Figura 15 – Comparação entre a simulação e os registros da velocidade do vento realizada por Chay, Albermani & Wilson (2006)	60
Figura 16 – Isolador usado em diferentes sistemas: (a)- single spanned, (b)-six spanned.	65
Figura 17 – Definição do ângulo de incidência do vento	73
Figura 18 – Esquema de Tormenta Elétrica	75
Figura 19 – Duração característica	77

Figura 20 – Linha de corrente genérica	78
Figura 21 – Eixos coordenados e ângulos	79
Figura 22 – Modelo para definição da área da TS	80
Figura 23 – Representação do modelo de expansão da TS	81
Figura 24 – Perfil da velocidade radial ao longo do tempo para diferentes distâncias do centro da tormenta	82
Figura 25 – Perfil da velocidade axial ao longo do tempo para diferentes distâncias do centro da tormenta	83
Figura 26 – Perfil vertical da velocidade radial para diferentes distâncias do centro da tormenta	84
Figura 27 – Dimensões da área simulada, ao centro, trecho de LT.	86
Figura 28 – Trecho de Linha de Transmissão	90
Figura 29 – Dimensões da Torre Autoportante	91
Figura 30 – Esquema do domínio do caso 1	94
Figura 31 – Esquema do domínio do caso 2	94
Figura 32 – Esquema do domínio do caso 3	95
Figura 33 – Torre de transmissão utilizada na simulação. Em destaque, barras dos montantes analisadas.	95
Figura 34 – Linha de Transmissão utilizada na simulação. Em destaque verde, cabo para-raio analisado, em azul, cabo condutor analisado.	96
Figura 35 – Esforço axial resultante no ponto de fixação do cabo condutor para caso 1 (vento de fundo 25 m/s e combina- ção entre vento de fundo 10 m/s e vento da TS 15 m/s).	97
Figura 36 – Esforço axial no ponto de fixação do cabo para-raio para caso 1 (vento de fundo 25 m/s e combinação vento de fundo 10 m/s e vento da TS 15 m/s).	98
Figura 37 – Esforço axial resultante dos montantes da torre para caso 1 (combinação entre vento de fundo 10 m/s e vento da TS 15 m/s).	99
Figura 38 – Esforço axial resultante dos montantes da torre para caso 1 (vento de fundo 25 m/s).	100

Figura 39 – Histograma com distribuição das velocidades máximas anuais simuladas para a altura de referência $z = 10$ m	101
Figura 40 – Comparação entre resultados simulados e observados por Santos (1989)	101
Figura 41 – Rastros dos eventos TS ocorridos durante o período de 50 anos simulado	102
Figura 42 – Torre de transmissão analisada. Em destaque barras de interesse.	103
Figura 43 – Função densidade de probabilidade da compressão na barra 223 para ventos TS	108
Figura 44 – Função densidade de probabilidade da tração na barra 224 para ventos TS	108
Figura 45 – Função densidade de probabilidade da compressão na barra 225 para ventos TS	109
Figura 46 – Função densidade de probabilidade da tração na barra 226 para ventos TS	109
Figura 47 – Torre: vista frontal, lateral e corte.	127

Lista de tabelas

Tabela 1 – Propriedades dos Isoladores	91
Tabela 2 – Propriedades do Cabo Condutor	92
Tabela 3 – Propriedades do Cabo Para-Raio	92
Tabela 4 – Parâmetros e velocidades a 10 m do solo.	93
Tabela 5 – Coordenadas iniciais da TS e direção do vento de fundo	93
Tabela 6 – Esforços axiais dos cabos condutores em kN.	97
Tabela 7 – Esforços axiais dos cabos para-raios em kN.	98
Tabela 8 – Esforços axiais da barra do montante mais solicitado em kN.	99
Tabela 9 – Tração dos montantes de controle (kN).	104
Tabela 10 – Compressão dos montantes de controle (kN).	104
Tabela 11 – Tração das diagonais de controle (kN).	105
Tabela 12 – Compressão das diagonais de controle (kN).	106
Tabela 13 – Tração das mísulas de controle (kN).	106
Tabela 14 – Compressão das mísulas de controle (kN).	107
Tabela 15 – Tração no ponto de fixação dos cabos (kN).	107
Tabela 16 – Barras e perfis da torre.	126

Lista de abreviaturas e siglas

AAFB	<i>Andrews Air Force Base</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACRS	<i>Aluminum Conductor Steel Reinforced</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
EDS	<i>Every Day Stress</i>
EHS	<i>Extra High Strength</i>
EPS	<i>Extended Pressure System</i>
EPDS	<i>Evolutionary power spectral density function</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
JAWS	<i>Joint Airport Weather Studies</i>
KS	Kolmogorov & Smirnov
LT ou LTs	Linha de Transmissão
NBR	Norma Brasileira
NDESH	<i>Nonparametric deterministic–stochastic hybrid</i>
OSV	Modelo de Oseguera, Bowles e Vicroy
POD	<i>Proper orthogonal decomposition</i>
TL	<i>Transmission Line</i>
TS	<i>Thunderstorm</i> ou Tempestade Elétrica
UTS	<i>Ultimate Tension Stress</i>
USA	<i>United States of America</i>

Lista de símbolos

α	Expoente adimensional da camada limite
β	Coefficiente de ajuste da equação
γ	Direção do vento de fundo
δ	Altura da camada limite
θ	Ângulo que a linha corrente faz com a vertical
ν	Viscosidade dinâmica do fluido
ξ	Razão de amortecimento crítico
ρ	Massa específica do ar
ρ_0	Massa específica do ar no nível do mar
ρ_{AR}	Massa específica do ar
ρ_m	Massa específica do material
τ	Fator de correção da massa específica do ar em relação a temperatura e altitude
φ	Ângulo de projeção da linha corrente no plano xy
χ	Relação entre a área líquida e a área bruta dos painéis da torre
Δp	Diferença de pressão
Δp_0	Diferença de pressão ao nível do mar
Δt	Intervalo de tempo de integração
Δt_{cr}	Intervalo de tempo de integração crítico

Ω	Direção do vento
a	Constante
b	Altura máxima da ação da TS
b_v	Parâmetro meteorológico NBR 6123
c	Coefficiente de amortecimento estrutural
c_m	Coefficiente de amortecimento proporcional
d	Diâmetro do Cabo
\mathbf{f}	Vetor de forças externas
f	Componente de força nodal
f_a	Força axial
f_e	Força externa
f_g	Força gravitacional
h	Altura da base da nuvem em relação ao solo
k	Constante
m	Massa nodal
p	Expoente dependente da rugosidade
q	Deslocamento nodal
\mathbf{q}	Vetor dos deslocamentos
$\dot{\mathbf{q}}$	Vetor da velocidade
$\ddot{\mathbf{q}}$	Vetor da aceleração
q_0	Pressão dinâmica do vento IEC 60826
q_v	Pressão dinâmica do vento NBR 6123

r	Distância da tormenta a um ponto de referência
r_{max}	Raio onde ocorre a velocidade máxima da tormenta
t	Tempo
z	Altura acima do solo
z_r	Altura de referência acima do solo
A	Área
\mathbf{C}	Matriz de amortecimento
C_f	Coefficiente de arrasto
C_{XC}	Coefficiente de arrasto para os cabos
C_{xi}	Coefficiente de arrasto para os isoladores
$C_{xt1,2}$	Coefficiente de arrasto para a torre nas faces 1 e 2
D_N	Diâmetro da bigorna
E	Módulo de elasticidade
F_a	Força de arrasto
F_C	Força de arrasto nos cabos
F_I	Força de arrasto nos isoladores
F_T	Força de arrasto na torre
F_r	Fator de rajada
F_u	Força unitária do vento
G	Fator combinado IEC 60826
G_C	Coefficiente dependente da altura e da rugosidade do terreno para cabos

G_L	Coefficiente de redução de vão
G_t	Coefficiente dependente da altura e da rugosidade para isoladores e torres
H_c	Altura do solo ao centro da bigorna
K	Matriz de rigidez
K_R	Fator de rugosidade IEC 60826
L	Comprimento do vão dos cabos
$L_{(0)}$	Comprimento inicial
$L_{(t)}$	Comprimento final
M	Matriz de massa
P	Período de retorno
R	Comprimento radial da distância a partir do centro da tormenta
R_0	Raio da base da nuvem
R_t	Raio da tormenta no instante de tempo t
R_{max}	Raio máximo da tormenta
Re	Número de Reynolds
S_1	Fator topográfico NBR 6123
S_2	Fator de rugosidade e dimensão da edificação NBR 6123
S_3	Fator estatístico NBR 6123
S_i	Área da isolador projetada horizontalmente
$S_{t1,2}$	Áreas projetadas dos painéis da torre para as faces 1 e 2

T	Duração característica da tormenta
T_n	Período natural
\bar{V}	Velocidade média horizontal do vento
V	Velocidade do vento
V_0	Velocidade inicial de referência
V_a	Velocidade axial
V_f	Velocidade do vento de fundo
V_K	Velocidade característica
V_r	Velocidade radial
V_t	Velocidade tangencial
V_{ef}	Velocidade efetiva
V_{rel}	Velocidade relativa
V_R	Velocidade de referência
V_{RB}	Velocidade de referência em terreno de categoria B

Sumário

1	Introdução	31
1.1	Motivação	31
1.2	Objetivos	34
1.3	Organização do Trabalho	35
2	Conceitos Fundamentais	37
2.1	Fenômenos Meteorológicos que Originam Ventos Fortes	37
2.1.1	Ciclones Extratropicais	39
2.1.2	Tormentas Elétricas	41
2.2	Análise Dinâmica de Estruturas	48
2.2.1	Método de Diferenças Finitas Centrais	48
3	Revisão de Literatura	55
3.1	Modelos de Tormentas Elétricas	55
3.2	Ação de Tormentas Elétricas em Estruturas	61
4	Ação do Vento em Linhas de Transmissão	69
4.1	Modelo Estático de Tormentas EPS	69
4.2	Modelo de <i>Downburst</i> e Linha de Tormenta	74
4.2.1	Velocidade Tangencial	74
4.2.2	Área de Ação da TS e Expansão	80
4.2.3	Linha da Corrente Limite e Camada Limite de Escoamento	82
4.2.4	Vento de Fundo	85
4.2.5	Distribuições Probabilísticas e Parâmetros das Variáveis	85
5	Trecho de LT em Estudo e Dados de Simulação do Vento	89
5.1	Descrição da Linha de Transmissão	90
5.2	Casos de Ventos Oriundos de TS Combinados com Vento de Fundo	93
5.3	Simulação de Séries de Velocidades Anuais	100
6	Conclusão	113

6.1 Sugestões de Trabalhos Futuros 114

Referências 117

APÊNDICE A Descrição da Torre 125

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Linhas de Transmissão (LTs) são estruturas responsáveis por transmitir energia elétrica das usinas até os centros consumidores. Tendo em vista que, geralmente, essas usinas são construídas em locais afastados, as linhas de transmissão se estendem por grandes extensões, o que as sujeita a grandes variações de topologia e as expõe a fenômenos climáticos.

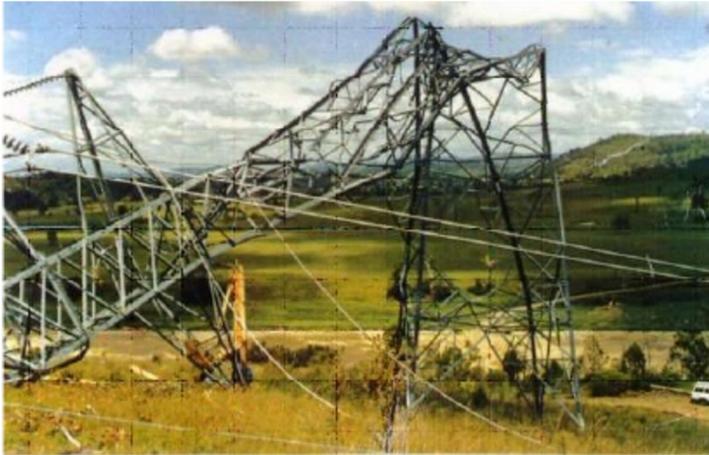
No Brasil, o principal fenômeno climático a ser levado em consideração como agente causador de esforços no projeto de uma linha de transmissão é o vento, uma vez que não há ocorrência de acúmulo de gelo nos elementos que compõem uma LT. Porém, as normas adotadas no dimensionamento dos componentes levam em conta apenas ventos do tipo sinótico, os quais são, tradicionalmente, representados por processos estocásticos, estacionários e ergódigos e podem ser descritos por um crescimento potencial com a altura e modelados satisfatoriamente a partir de uma velocidade de referência paralela ao solo dada a 10 m de altura.

Dempsey & White (1996 apud SHEHATA; DAMATY; SAVORY, 2005) relatam que mais de 80% de todas as falhas de linha relacionadas com o clima, nas Américas, Austrália, África do Sul e

muitas outras organizações, foram causadas por ventos de alta intensidade, que estão associados com a ocorrência de tempestades elétricas. A Figura 1 apresenta uma torre colapsada após uma tempestade elétrica.

Os ventos de alta intensidade de natureza convectiva, apesar de atingirem suas maiores velocidades próximo ao solo e, por isso, serem de fundamental importância na engenharia de estruturas, foram, há apenas algumas décadas, identificados corretamente.

Figura 1 – Torre colapsada após evento TS



Fonte: Hawes & Fikke (2004)

Durante a década de 1970, Fujita, baseado no estranho padrão de danos a árvores nas florestas e em danos estruturais causados por ventos semelhantes, identificou a existência do *downburst*. Esse evento meteorológico foi descrito como uma tempestade local produzida por uma nuvem cumulonimbus a qual é sempre acompanhada de relâmpagos e trovões (FUJITA, 1990).

As primeiras investigações a respeito dos danos causados por esse fenômeno meteorológico se deram na área da aviação. Zhu & Etkin (1985), relataram ser a causa de inúmeros acidentes durante pousos e

decolagens, partindo daí a necessidade de um modelo que representasse adequadamente os perfis de velocidades gerados por um *downburst*.

Desde então, vários autores, como Zhu & Etkin (1985), Oseguera & Bowles (1988) e Vicroy (1991), Holmes & Oliver (2000), Ponte & Riera (2007), entre outros, propuseram modelos que descrevessem o campo de velocidades gerado durante um evento TS de maneira adequada.

A natureza localizada desses *downbursts* impõe um caso de carregamento em torres de transmissão que não existe em eventos de grande escala, como furacões (ELAWADY; DAMATTY, 2016). Assim, um projeto mais racional dos sistemas de linhas de transmissão, nas partes do mundo onde tormentas elétricas são uma ocorrência comum, precisa incluir avaliações de falha, de torre ou condutor, devido aos efeitos desses ventos (SAVORY *et al.*, 2001).

Nos últimos anos, as pesquisas têm se concentrado no aprimoramento dos modelos que descrevem os perfis de velocidade e na reprodução de eventos que causaram ruína de estruturas. Destacam-se os trabalhos de Ponte & Riera (2010) que, partindo de uma abordagem probabilística do modelo de TS proposto em Ponte & Riera (2007), apresentaram um histograma das velocidades anuais máximas durante um período de 50 anos para a região de Porto Alegre e de Miguel & Riera (2013) que adaptaram o método de Ponte & Riera (2007) para gerar, por simulação de Monte Carlo, uma série de 50 anos de máximos anuais de momentos de flexão e cortante na base de torres de seção transversal constante. Posteriormente, Gheno (2014) modificou esse mesmo modelo e estudou a resposta de cabos condutores sujeitos a tormentas elétricas.

Por se tratar de um evento meteorológico de natureza localizada, esse tipo de ação gera esforços desiguais em LTs, em função da posição inicial da tormenta, ao contrário de eventos EPS. Assim, faz-se necessária uma análise probabilística. Da mesma maneira, em função do caráter local, tormentas TS atingem diferentes pontos da LT em instantes de tempo distintos. Por essa razão, uma análise dinâmica também é necessária. Por fim, em função dos grandes deslocamentos sofridos pelos cabos, uma análise não linear geométrica do trecho de LT é adotada.

Desta forma, este trabalho visa determinar a resposta dinâmica não linear geométrica de um trecho de LT submetido à ação de tormentas elétricas estacionárias e não estacionárias por simulação de Monte Carlo, para um período de 50 anos, com ocorrência de 20 eventos TS anuais. Estendendo, assim, trabalhos anteriores que, de maneira geral, determinaram a resposta de estruturas expostas a casos particulares de TS. Vale salientar que TS estacionária é uma tormenta elétrica que não se desloca no espaço e TS não estacionária uma, tormenta elétrica que é trasladada por vento sinótico. Dessas simulações, obter-se-ão os esforços axiais máximos anuais para determinadas barras com esforços representativos, permitindo a construção de histogramas, o ajuste de distribuições de probabilidade de Gumbel e a comparação com resultados obtidos com o modelo de EPS estático. O estudo apresentado é delimitado à região de Porto Alegre.

Cabe destacar que nos eventos simulados tanto de tormentas TS como tormentas EPS não foi considerada a turbulência do vento. Ainda assim, é realizada uma análise dinâmica da resposta da LT em função da característica transiente das tormentas elétricas.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho consiste em abordar, de forma probabilística, a resposta dinâmica não linear geométrica de um trecho de LT submetido a carregamentos oriundos de tormentas elétricas combinadas com ventos sinóticos.

Os objetivos específicos são listados a seguir:

- a) estender para o trecho de LT o modelo de Gheno (2014) originalmente proposto para cabos;
- b) avaliar os resultados obtidos nas simulações de TS, gerar histogramas de algumas barras com esforços representativos e determinar os esforços de 50 anos considerando uma distribuição de Gumbel;

- c) avaliar se a distribuição de Gumbel se ajusta aos dados obtidos;
- d) comparar os valores obtidos com a resposta da LT submetida a eventos EPS, visando identificar qual evento gera maiores esforços.

1.3 Organização do Trabalho

O texto é organizado em seis capítulos: introdução, conceitos fundamentais, revisão de literatura, ação do vento em linhas de transmissão, trecho de LT em estudo e dados de simulação do vento e conclusão. O primeiro capítulo apresenta a motivação do trabalho, os objetivos e a descrição da estrutura do trabalho.

No segundo capítulo, são apresentados conceitos fundamentais sobre os principais fenômenos meteorológicos que originam ventos fortes (os ciclones tropicais, extratropicais, tornados e tormentas elétricas). Na sequência, apresenta-se o método de solução adotado para a análise dinâmica de trecho de LT.

O terceiro capítulo apresenta uma breve descrição de trabalhos relacionados a TS encontrados na literatura, iniciando pela identificação do evento causador de *downbursts* e os modelos que descrevem seus campos de velocidade. Posteriormente, são apontados trabalhos que analisaram a resposta de LT e seus componentes a eles.

Os modelos de tormenta EPS e de tormenta TS utilizados nas simulações deste trabalho são apresentados no capítulo quatro.

No capítulo cinco, encontra-se uma descrição do trecho de LT, bem como são descritas as simulações realizadas. Neste capítulo também são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

No sexto capítulo, encontram-se as conclusões obtidas com o resultado das simulações e as recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Conceitos Fundamentais

Neste capítulo, são apresentados alguns conceitos gerais sobre os principais fenômenos meteorológicos que originam ventos fortes (os ciclones tropicais, extratropicais, tornados e tormentas elétricas). Na sequência, apresenta-se o método de solução adotado para a análise dinâmica de trecho de LT. Maiores detalhes podem ser encontrados em Blessmann (1995) e Simiu & Scanlan (1996) (fenômenos meteorológicos), e em Groehs (1999), Bathe (1982), Soriano (2014) e Kaminski (2007) (para a análise dinâmica).

2.1 Fenômenos Meteorológicos que Originam Ventos Fortes

A causa básica do vento natural é o aquecimento não uniforme da atmosfera, principalmente, a partir da energia solar absorvida pela crosta terrestre e irradiada para a atmosfera sob a forma de calor (BLESSMANN, 1995).

A determinação da velocidade média do vento e as flutuações em torno deste valor são de interesse para a engenharia de estruturas. A origem das flutuações se dá tanto pela agitação (turbulência) do escoamento médio causada pela rugosidade natural e artificial da superfície terrestre como nos processos de convecção causados por gradientes térmicos.

Os procedimentos clássicos prescritos em normas para a determinação das forças devidas ao vento em estruturas partem de uma velocidade horizontal de referência, usualmente a 10 m de altura. Essa velocidade, comumente, é determinada para um dado período de retorno, por exemplo, 50 anos e um intervalo de tempo de 3 s. Entretanto, segundo Solari (2014) e Riera (2016), a informação da componente horizontal do vento a 10 m de altura deve ser conjunta ao evento meteorológico causador, em função dos diferentes campos de velocidades gerados por diferentes tormentas. O estudo dos fenômenos meteorológicos causadores de fortes ventos é, portanto, muito relevante para fins de projeto estrutural.

Os eventos de maior interesse à engenharia civil, de acordo com Blessmann (1995), são os ciclones extratropicais, ciclones tropicais, tormentas elétricas e tornados.

Os ciclones tropicais são tormentas que têm sua energia oriunda do calor latente liberado pela condensação do vapor d'água, originando-se entre as latitudes 5° e 30° , tanto norte quanto sul. Embora se possa indicar 1000 km como uma dimensão típica dos ciclones tropicais, ventos de velocidades destrutivas raramente atingem uma distância acima de 100 km, a partir do seu centro. Quando os ciclones tropicais têm velocidades superiores a 120 km/h são chamados de furacão, tufão, willy-willy ou baguio (em função de sua localização no globo). Esses eventos têm uma ação destrutiva considerável, tanto pela ação direta dos ventos da superfície quanto pelas violentas chuvas que o acompanham.

Os tornados consistem em um vórtice de ar que se desenvolve em uma tempestade elétrica severa. Tipicamente, possuem diâmetro da ordem de 300 m e se movem com velocidades entre 8 m/s e 28 m/s, com uma trajetória aproximada entre 10 m e 30 m. Simiu & Scanlan (1996) apontam que a máxima velocidade tangencial do tornado estima-se ser da ordem de 350 km/h (97 m/s), não havendo restrições de que maiores velocidades sejam atingidas. Segundo Blessmann (1995), além das altas velocidades tangenciais, outros perigos decorrentes dos tornados são causados pela depressão (pressão no núcleo com valores abaixo da pressão

atmosférica) e altas velocidades verticais que ocorrem no seu núcleo, como também pelos objetos e detritos arrastados em sua trajetória que podem ser arremessados como projéteis.

As tormentas elétricas e os ciclones extratropicais, por serem objeto de estudo deste trabalho, são descritos com mais detalhes a seguir.

2.1.1 Ciclones Extratropicais

Os ciclones extratropicais, também conhecidos como *extended pressure system* (EPS), são movimentos circulatórios de ar em torno de centros de baixa pressão. Segundo Blessmann (1995), os dois fenômenos que originam ciclones extratropicais são a ação mecânica de cadeias de montanhas sobre correntes atmosféricas de grandes dimensões ou a interação de massas de ar ao longo das frentes. Os eventos de maiores dimensões e duração são os que estão associados ao mecanismo de transferência de calor do equador para os polos por meio de sistemas de baixa pressão. No hemisfério sul, os ciclones giram no sentido horário.

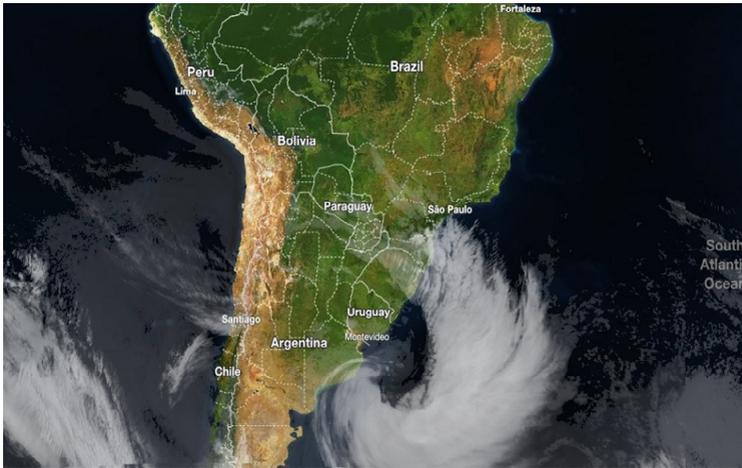
Um evento EPS apresenta atmosfera verticalmente estável e atinge grandes regiões, que variam de algumas centenas a alguns poucos milhares de quilômetros (ao contrário do caráter localizado de eventos como *downbursts*, por exemplo). Como a intensidade média e a direção podem manter razoável constância por várias horas, podem ser observados por imagens de satélite e cartas sinóticas.

Santos (1989) explica que, por causa da extensão territorial abrangida, ocorrência periódica e duração dos ventos, a coleta de dados deste tipo de evento pode ser feita em muitas estações meteorológicas. Em função dessas características, são também chamados de ventos sinóticos, sendo tipicamente representados por processos estocásticos, estacionários e ergódigos. Neste contexto, estacionário refere-se ao processo estocástico, ou seja, seus parâmetros estatísticos não variam com o tempo.

Trata-se, portanto, de um evento amplamente estudado e presente em diversas normas de projeto, como a NBR 6123 (ABNT, 1988). Este

documento prescreve um procedimento de cálculo estático, adotando uma velocidade de referência a 10 m, 50 anos e 3 s, com uma correção potencial do seu perfil vertical. Adicionalmente, o capítulo 9 dessa norma apresenta, também, um método estático equivalente, para levar em conta possíveis amplificações dinâmicas em estruturas esbeltas originadas pela turbulência (flutuações da velocidade em torno de seu valor médio sobre 10 min). Esse procedimento, entretanto, é aplicável somente para determinar a resposta dinâmica de tormentas EPS, por ser limitado a processos estocásticos estacionários.

Figura 2 – Ciclone extratropical visto por satélite



Fonte: De Olho no Tempo Meteorologia (2016)

Ciclones tropicais são semelhantes aos ciclones extratropicais, porém são mais intensos e mais localizados. Em seu estágio maduro, de acordo com Blessmann (1995), para fins de engenharia estrutural, tanto ciclones tropicais quanto extratropicais podem ser considerados como atendendo as especificações das normas de vento no que se refere à variação da velocidade média com a altura e as características da tur-

bulência, ambos fortemente influenciados pela rugosidade da superfície terrestre.

2.1.2 Tormentas Elétricas

Uma Tormenta Elétrica (*Thunderstorm*) ou TS é um fenômeno meteorológico causado por nuvens cumulonimbus que produzem relâmpagos e trovões, fortes chuvas, granizo, fortes correntes descendentes de ventos (*downbursts*) e, em casos extremos, tornados. A Figura 3 apresenta o registro desta tempestade feita da cabine de um avião, no qual é possível observar o corpo cilíndrico com topo em forma de bigorna, que é uma das características desse tipo de evento. A bigorna é causada pelo ar que diverge das partes superiores da corrente ascendente da tempestade.

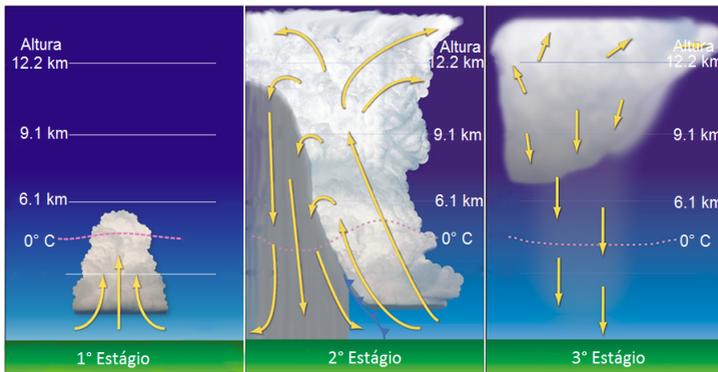
Figura 3 – Registro de uma Tempestade Elétrica



Fonte: Santiago Borja in The Whashington Post (2016)

Essas tormentas são chamadas elétricas, porque a fricção entre os elementos com o ar gera uma diferença de potencial elétrico entre as nuvens e o solo, produzindo descargas elétricas (PONTE, 2005). Blessmann (1995) caracteriza o desenvolvimento de uma TS em três estágios, ilustrados na Figura 4.

Figura 4 – Desenvolvimento de um *downburst*



Fonte: National Oceanic and Atmospheric Administration (2013)

- a) Primeiro estágio: o ar quente e úmido se eleva até alcançar uma altura de aproximadamente 8 km, onde uma nuvem do tipo cúmulos é formada. A temperatura do ar circundante é menor que a do ar ascendente.
- b) Segundo estágio: a nuvem cúmulos, gerada no primeiro estágio, transforma-se em uma cumulonimbus, a alturas de 12 km. Nesse estágio, ocorre formação de gotas de água, cristais de neve e partículas de gelo. Devido a um desequilíbrio entre estes elementos, inicia-se a precipitação. A nuvem, que até então possuía uma temperatura maior que o ar circundante, começa a sofrer um resfriamento. A precipitação aumenta de intensidade por causa do resfriamento e o atrito entre o ar

e os elementos acima mencionados ocasiona o surgimento de correntes descendentes de ar que costumam atingir brusca-mente o solo, gerando rajadas de vento violentas. Este estágio costuma durar de 5 a 30 minutos e é conhecido como estágio maduro.

- c) Terceiro estágio: as correntes descendentes aumentam em área transversal e passam a fazer parte de toda a nuvem. Não havendo mais ar quente e úmido, a precipitação cessa.

Na verdade, estes três estágios constituem-se em uma simplificação das tormentas reais, que podem conter múltiplas células em diferentes estágios de desenvolvimento ou ainda a formação de uma célula-mãe a partir das várias células. (NETO, 2012)

Fujita (1985) subdivide os *downbursts* em *macrobursts* e *microbursts* de acordo com sua escala horizontal de ventos prejudiciais.

- a) *Macroburst*: Um grande *downburst* com ventos que se estendem horizontalmente por dimensões superiores a 4 km de diâmetro. Uma macroexplosão intensa, muitas vezes, causa danos generalizados e pode atingir velocidades de 60 m/s.
- b) *Microburst*: Um *downburst* pequeno com ventos que se estendem horizontalmente por até 4 km de diâmetro ou menos. Dura entre 5 e 15 minutos e seus ventos podem atingir até 75 m/s.

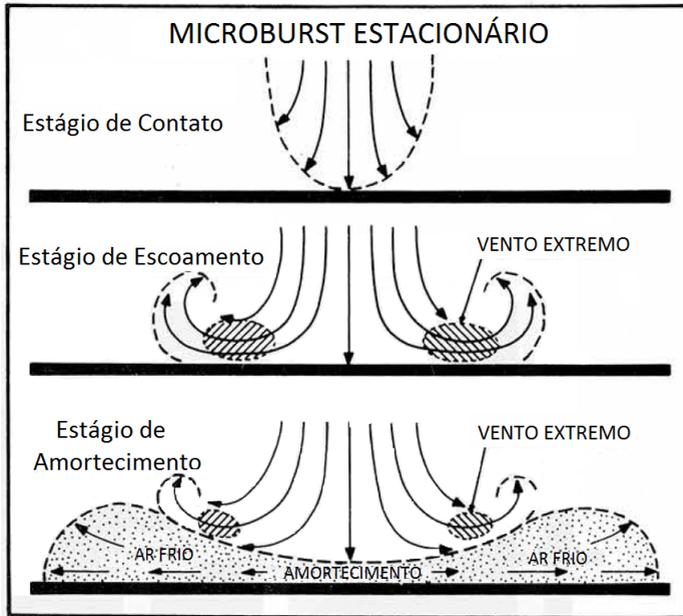
Devido à sua pequena dimensão e vida curta, um *microburst* é muito difícil de detectar. Além disso, a velocidade máxima do vento de uma microexplosão suspeita-se ser maior do que a de uma macroexplosão. (FUJITA, 1990)

Como mencionado na seção 1.1, os *downbursts* podem ser estacionários ou podem se deslocar devido à presença de vento de fundo, ou por estarem associados a uma tormenta do tipo EPS (*travelling downburst* ou *downburst* não-estacionário).

Na Figura 5, uma TS estacionária desce ao chão em sua fase de contato. À medida que o ar frio trazido pelo *downburst* se acumula no chão, uma almofada do ar frio impede que o ar descendente alcance a

superfície. Como resultado, a altura do vento extremo acima do solo aumenta com o tempo. Enquanto isso, a intensidade do vento extremo diminui à proporção que a profundidade de espalhamento aumenta.

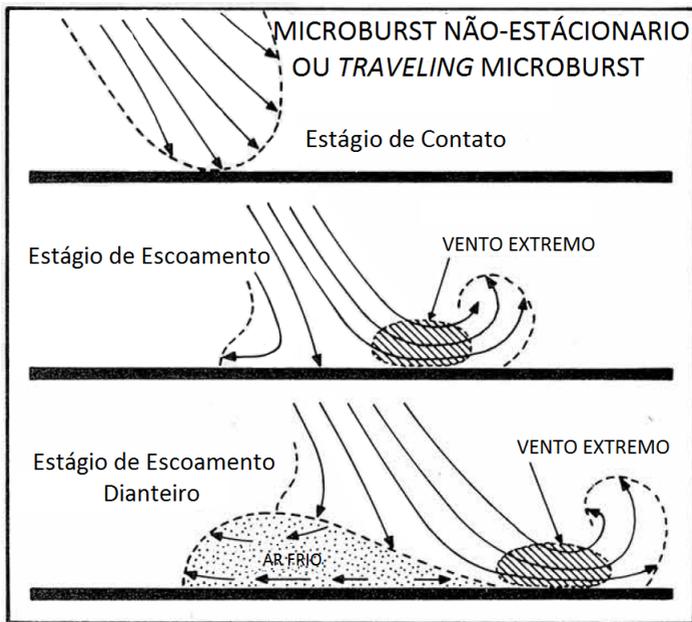
Figura 5 – Estágios de uma TS estacionária



Fonte: Adaptado de Fujita (1985, p.1529)

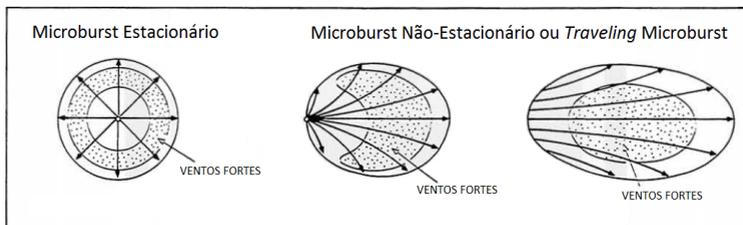
Já no caso de um *downburst* não-estacionário, apresentado na Figura 6, o contrário ocorre. O fluxo de ar se mantém descendo antecipadamente ao ar frio, que é deixado para trás para formar uma cúpula de pressão. É provável que a superfície inclinada do ar frio passe a defletir os ventos do escoamento do *downburst* para a frente. Essa diferença, da direção dos fluxos descendentes após encontrar o solo, pode ser observada na Figura 7.

Figura 6 – Estágios de um *travelling downburst*



Fonte: Adaptado de Fujita (1985, p.1529)

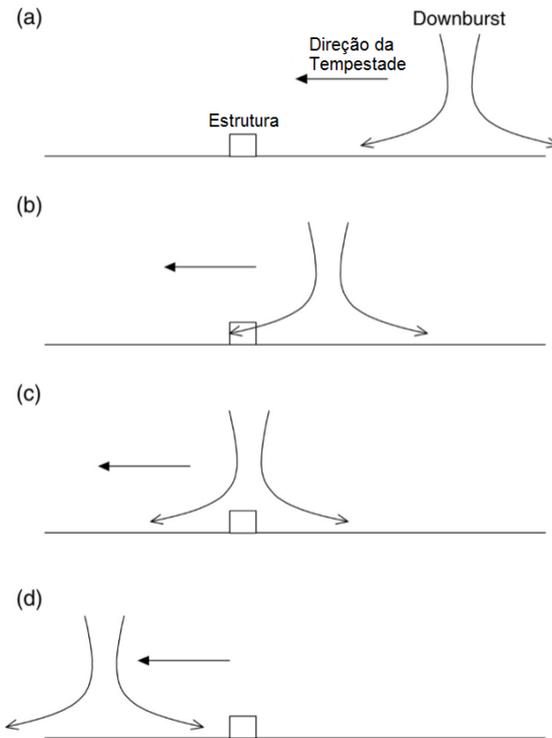
Figura 7 – Variação dos fluxos de ar entre um *downburst* estacionário e um *travelling downburst*



Fonte: Adaptado de Fujita (1990, p.71)

Os ventos TS não são caracterizáveis por um único perfil vertical, mas por uma família de perfis, que dependem da distância do centro da nuvem até o local de interesse. Adicionalmente, posto que a nuvem causadora do evento está usualmente em movimento, o problema é complicado pela necessidade de considerar também outro fator: a relação entre a velocidade de translação da nuvem e a velocidade da corrente descendente (RIERA, 2016).

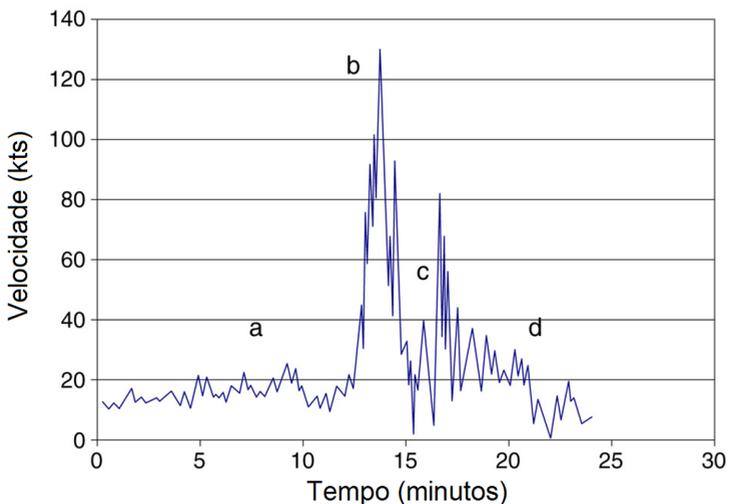
Figura 8 – Deslocamento de um *downburst* sobre uma estrutura estacionária



Fonte: Chay, Albermani & Wilson (2006, p.247)

A Figura 8 representa uma estrutura exposta a um *downburst*, que, pela trajetória do vento de translado, passa diretamente sobre ela. Chay, Albermani & Wilson (2006) explicam que em (a), enquanto a estrutura está fora do fluxo do *downburst*, ela experimenta ventos mais fracos. À proporção que a tempestade avança (b), ocorre um rápido crescimento na velocidade do vento, até se encontrar na parte mais rápida do fluxo divergente. Em (c), com o deslocamento da tempestade, a estrutura se encontra na região de estagnação do *downburst* experimentando um fluxo descendente de vento. Por fim, em (d) ocorre uma mudança de 180° na direção do vento, o que gera um pico secundário na velocidade do vento à medida que a tempestade se afasta, antes de retornar às condições de antes do evento. Na Figura 9, estes regimes de fluxo foram identificados em um registro de anemômetro extraído da base da força aérea de Andrews (AAFB) em 1983.

Figura 9 – Gráfico do registro realizado pelo anemômetro de AAFB



Fonte: Chay, Albermani & Wilson (2006, p.247)

Um caso extremo de *downburst* não-estacionário é a combinação de tormentas elétricas (TS) com ciclones extratropicais (EPS), também chamada de linha de tormenta, *squall lines* ou linha de instabilidade. De acordo com Blessmann (1995), as linhas de tormenta (*squall lines*) são linhas de instabilidade de grande extensão, transversal à direção de movimento de uma frente fria. São originadas quando uma frente fria de movimento rápido se desloca contra uma massa de ar quente, úmido e de instabilidade acentuada. Esta situação gera uma linha de tormentas em diversos estágios de desenvolvimento com ventos excepcionalmente fortes.

2.2 Análise Dinâmica de Estruturas

Usualmente, uma análise dinâmica de estruturas submetidas à ação de tormentas EPS é necessária em função de sua turbulência. Nesse caso, a resposta total pode ser dividida em uma componente média, ou estática, e uma parcela flutuante, gerada pela variação da velocidade no tempo. Assim, como já mencionado, tormentas EPS são representadas por processos estocásticos estacionários. Por outro lado, em função de sua natureza, tormentas TS são processos estocásticos não estacionários e, ainda, por seu caráter localizado, atingem a LT em instantes de tempo distintos. Por essa razão, mesmo sem a consideração da turbulência nesse trabalho, ainda assim, uma análise dinâmica é necessária.

Em função dos grandes deslocamentos sofridos pelos cabos, torna-se necessário que a análise de uma linha de transmissão seja não linear geométrica. Métodos de integração direta, como o método das diferenças finitas centrais (apresentado a seguir), permitem a simulação de comportamentos não lineares.

2.2.1 Método de Diferenças Finitas Centrais

O comportamento dinâmico de uma estrutura com n graus de liberdade pode ser representado pela seguinte equação diferencial

matricial:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (2.1)$$

Onde \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} são as matrizes de massa, amortecimento e rigidez; $\mathbf{f}(t)$ é o vetor de forças externas aplicadas ao sistema e $\mathbf{q}(t)$, $\dot{\mathbf{q}}(t)$ e $\ddot{\mathbf{q}}(t)$ são os vetores dos deslocamentos, da velocidade e da aceleração nos instantes de tempo t .

No caso de treliças espaciais que possuem apenas translações nodais, pode-se considerar que as massas estejam concentradas nos nós. Por consequência, a matriz de massa \mathbf{M} do sistema se torna diagonal. Ainda, tomando a matriz de amortecimento \mathbf{C} proporcional a \mathbf{M} , então o sistema de equações do movimento pode ser desacoplado, não sendo necessária a montagem (ou atualização) da matriz de rigidez global da estrutura.

Quando se utiliza um método de integração explícito (por exemplo, diferenças finitas) tal característica pode se tornar especialmente vantajosa, pois nesses casos, a equação de movimento (Equação 2.1) no instante t (e, portanto, o equilíbrio em t) é utilizada para calcular a resposta no instante $t + \Delta t$. Esta característica torna-se atrativa principalmente na solução de problemas não lineares.

Tomando, então, as expressões clássicas de diferenças finitas centrais para velocidades e acelerações no instante t e substituindo na equação de movimento nesse mesmo instante t , obtém-se:

$$\left(\frac{1}{\Delta t} \mathbf{M} + \frac{1}{2\Delta t} \mathbf{C} \right) \mathbf{q}(t + \Delta t) = \mathbf{f}(t) - \left(\mathbf{K} - \frac{2}{\Delta t^2} \mathbf{M} \right) \mathbf{q}(t) - \left(\frac{1}{\Delta t} \mathbf{M} - \frac{1}{2\Delta t} \mathbf{C} \right) \mathbf{q}(t - \Delta t) \quad (2.2)$$

Em que Δt é o intervalo de tempo de integração (em segundos). Portanto, conforme mostra a equação 2.2, a partir do equilíbrio no instante t , os valores de $\mathbf{q}(t + \Delta t)$ são determinados (os quais são utilizados para calcular os valores de $\dot{\mathbf{q}}(t)$ e $\ddot{\mathbf{q}}(t)$). Na primeira iteração,

é necessário conhecer as condições iniciais ($\mathbf{q}(0)$ e $\dot{\mathbf{q}}(0)$), mas também $\mathbf{q}(0 - \Delta t)$. Isso pode ser feito escrevendo a Equação 2.1 para $t = 0$:

$$\mathbf{q}(0 - \Delta t) = \mathbf{q}(0) - \Delta t \dot{\mathbf{q}}(0) + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{\mathbf{q}}(0) \quad (2.3)$$

O vetor $\ddot{\mathbf{q}}(0)$ pode ser definido a partir da equação do movimento (Equação 2.1) em t igual 0.

Como mencionado, as matrizes \mathbf{M} e \mathbf{C} na Equação 2.2 são diagonais. Considerando as forças axiais (dos elementos e treliça) separadamente no equilíbrio de cada nó, a montagem da matriz de rigidez \mathbf{K} pode ser evitada. A integração, portanto, pode ser efetuada em nível de elemento. Consequentemente, não há necessidade de se utilizar um processo de solução de sistemas de equações algébricas para determinar o vetor $\mathbf{q}(t + \Delta t)$, resultando em uma importante redução do tempo computacional. Assim, a expressão das diferenças finitas centrais no instante t para cada coordenada generalizada (grau de liberdade), passa a ser (permitindo calcular a resposta em $t + \Delta t$):

$$q(t + \Delta t) = \frac{1}{c_1} \left[\frac{f(t)\Delta t^2}{m} + 2q(t) - c_2 q(t - \Delta t) \right] \quad (2.4)$$

Sendo:

$$c_1 = 1 + \frac{c_m \Delta t}{2} \quad e \quad c_2 = 1 - \frac{c_m \Delta t}{2} \quad (2.5)$$

Onde q é o deslocamento nodal na direção x , y ou z (em m); $f(t)$ é a componente da força nodal resultante na direção correspondente (em N) e m é a massa nodal (em kg); c é o coeficiente de amortecimento estrutural e c_m é o coeficiente de amortecimento proporcional ($c_m = c/m$).

A constante de proporcionalidade c_m deve ser ajustada de modo que a razão de amortecimento crítico (ξ) resulte igual à da estrutura analisada.

A componente da força nodal resultante $f(t)$ é composta pelas forças gravitacionais $f_g(t)$ (peso próprio e forças nodais externas $f_e(t)$) e

pela força axial $f_a(t)$, nos elementos da treliça, em razão das deformações axiais.

Aplicando a Equação 2.4 em cada passo da integração e para todos os graus de liberdade, obtêm-se deslocamentos nodais atualizados que levam a deformações axiais nos elementos gerando, portanto, forças axiais opostas (que são incluídas em $f(t)$). A força axial no instante de tempo t , para um elemento de rigidez axial EA e comprimento L , é dada pela equação:

$$f_a(t) = E A \left[\frac{L(t) - L(0)}{L(0)} \right] \quad (2.6)$$

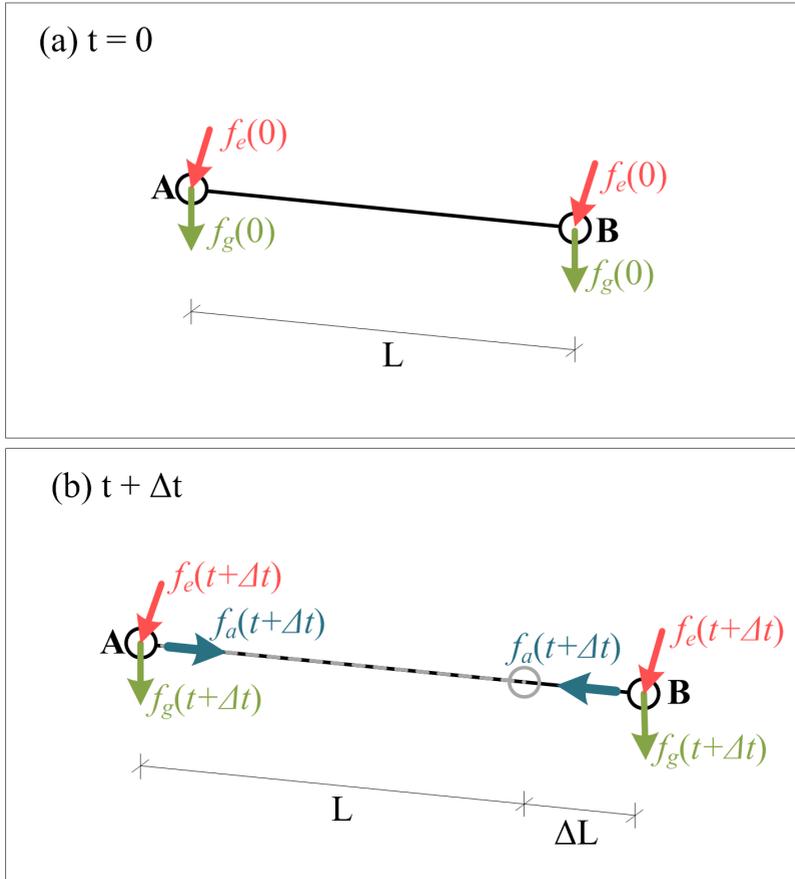
Portanto, de acordo com Kaminski (2007) para se obter as componentes de força nodal resultante $f(t)$, a força axial $f_a(t)$ deve ser multiplicada pelos cossenos diretores do eixo do elemento no estado deformado, e suas componentes somadas com as respectivas forças gravitacionais $f_g(t)$ nas direções x , y e z atuantes no nó em consideração no instante de tempo t .

Na Figura 10 é ilustrada a maneira que ocorre a aplicação de força em um elemento de barra, em (a) barra no instante de tempo $t = 0$, em (b) barra no instante de tempo $t + \Delta t$, coordenadas generalizadas atualizadas após o elemento ter sofrido deformação e deslocamento pela aplicação de forças no instante de tempo anterior.

Kaminski (2007) ressalta que a não-linearidade geométrica é sempre considerada, uma vez que as coordenadas nodais são atualizadas em cada passo de integração. No caso de não-linearidade física, basta considerar a relação não-linear entre a força axial $f_a(t)$ e o deslocamento do elemento, ao invés da relação linear da Equação 2.6.

De acordo com Soriano (2014), na integração numérica direta, o espaçamento de tempo precisa ser ajustado para se ter estabilidade numérica, acurácia de resultado e processamento computacional moderado.

Figura 10 – Elemento de barra submetido às solicitações, em (a) barra no instante de tempo $t = 0$, em (b) barra no instante de tempo $t + \Delta t$.



Um tamanho de passo relativamente pequeno deve ser utilizado para chegar à solução. Na verdade, uma consideração importante no uso do método das diferenças finitas centrais é que o método de integração requer que o passo de tempo Δt seja menor que o valor crítico Δt_{cr} , que pode ser calculado a partir das propriedades de massa e rigidez do

conjunto completo de elementos (BATHE, 1982).

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} = \frac{T_n}{\pi} \quad (2.7)$$

Onde T_n é o menor período do conjunto de elementos finitos com n graus de liberdade.

Na determinação de Δt pela Expressão 2.7, a dificuldade consiste em calcular T_n , que corresponde ao modo de vibração associado ao maior autovalor da estrutura. Entretanto, para o caso de estruturas constituídas por elementos de treliça, o intervalo de tempo Δt pode ser determinado, de forma aproximada, por (GROEHS, 1999):

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} = \frac{L_{min}(0)}{\sqrt{\frac{E}{\rho_m}}} \quad (2.8)$$

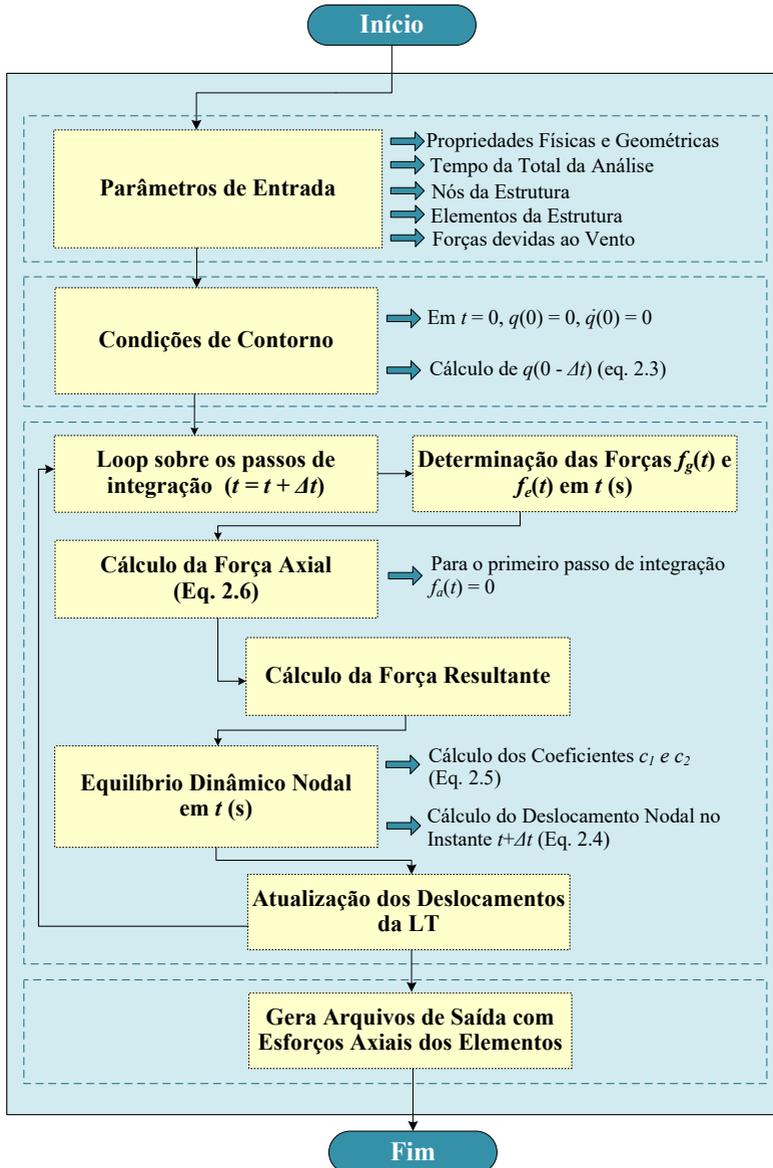
Em que $L_{min}(0)$ é o comprimento inicial da menor barra da treliça (em m); E é o módulo de elasticidade longitudinal (em N/m^2) e ρ_m é a massa específica do material (em kg/m^3).

A Expressão 2.8 fornece um valor de Δt aproximado. A precisão dos resultados, sem calcular o maior autovalor da estrutura, só pode ser garantida após testes, sendo necessário obter, ao menos, duas respostas com valores de Δt diferentes e comparar os resultados.

A Figura 11 apresenta um esquema do funcionamento do método de solução utilizado neste trabalho.

Outros detalhes do método de solução do problema dinâmico podem ser encontrados em Iturrioz (1995), Miguel (2005) e Cappelari (2005).

Figura 11 – Algoritmo com os passos do funcionamento do método de solução.



Capítulo 3

Revisão de Literatura

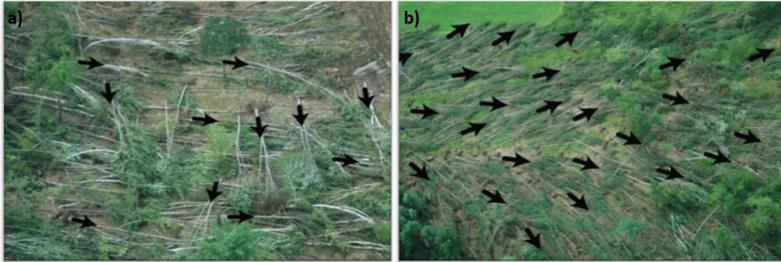
Neste capítulo, será apresentada uma breve descrição de trabalhos relacionados a TS encontrados na literatura, iniciando pela identificação do evento causador de *downbursts* e os modelos que descrevem seus campos de velocidade. Posteriormente, são apontados trabalhos que analisaram a resposta de LT e seus componentes a eles.

3.1 Modelos de Tormentas Elétricas

Na década de 1970, enquanto sobrevoava uma área atingida por severas tempestades, Fujita observou um padrão de danos a árvores diferente do causado por tornados (Figura 12). Ao invés de padrões circulares, centenas de árvores foram derrubadas “para fora” em um padrão semelhante a uma explosão ou uma estrela.

Depois de uma análise exaustiva dos dados de registro de voos e depoimento de testemunhas oculares, Fujita chamou este sistema de ventos de “*downburst*”. Os ventos eram fortes o suficiente para derrubar um avião a jato, mas eram muito pequenos para serem detectados por anemômetros terrestres a tempo de avisar as aeronaves em aproximação (FUJITA, 1990).

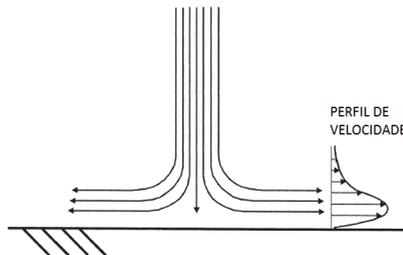
Figura 12 – Padrão característico de árvores caídas após fortes ventos.
Em (a) tornado, (b) *downburst*.



Fonte: Fujita (1990)

Hjelmfelt (1988) apresentou uma caracterização detalhada da estrutura de um *downburst* e de seu ciclo de vida, concluindo que o modelo *wall jet* (modelo muito estudado em laboratório) assemelha-se ao perfil vertical e horizontal de velocidades geradas por um *downburst*. De acordo com Savory *et al.* (2001) estudos mais recentes comprovam que eventos de *downburst* simulados em laboratório usando o modelo *wall-jet* (Figura 13) motram um bom ajuste com dados disponíveis de eventos em escala real.

Figura 13 – Modelo *wall jet*

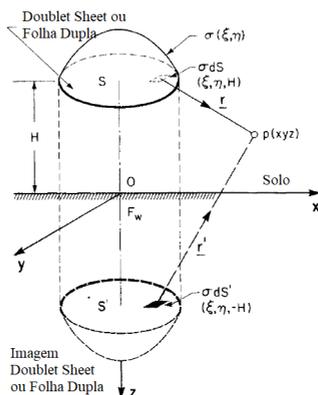


Fonte: Savory *et al.* (2001)

Pela ausência de modelos que representassem a espacialidade do problema, Zhu & Etkin (1985) propuseram um método numérico com o intuito de gerar campos tridimensionais de ventos que produzissem resultados mais próximos ao cenário real, motivados pelo considerável número de acidentes aéreos em pousos e decolagens na presença de *downbursts*.

O *three-dimensional double-sheet model* (Figura 14) considera a TS como sendo estacionária e a descreve como o fluxo descendente de um fluido ideal (incompressível, sem viscosidade e não rotacional), onde a variação de temperatura e os efeitos hidrostáticos são desprezados e o fluxo descendente ocorre a uma altura $z = H_s$ sobre o solo. O modelo gera um campo de velocidades considerando parâmetros de distribuição de velocidade e intensidade da tormenta, o vetor do vento em função da posição em um campo tridimensional e gradientes vertical, horizontal e lateral do vento.

Figura 14 – Representação do modelo *double-sheet*



Fonte: Zhu & Etkin (1985, p.596)

Oseguera & Bowles (1988) desenvolveram um método empírico a partir das equações completas de Euler e que satisfaz as equações de

continuidade de massa que, posteriormente foi modificado por Vicroy (1991) e Vicroy (1992), também conhecido como modelo OSV devido às iniciais dos nomes dos autores.

O modelo OSV, descrito em coordenadas cilíndricas, é estacionário e invariante no tempo. O fluxo é incompressível, sem forças externas ou momentos agindo sobre ele e os efeitos de viscosidade foram parame-trizados. Ele foi definido a partir de quatro variáveis: o raio, a altitude do vento horizontal máximo, um fator de forma da função e um fator de escala. As modificações propostas por Vicroy (1991) e Vicroy (1992) visavam aumentar a precisão do perfil característico de vento horizontal do *microburst*.

Wood & Kwok (1998) desenvolveram uma técnica empírica para prever o perfil de um *downburst* estacionário. A partir da investigação de um experimento em túnel de vento que simulava o modelo de jato de ar sobre uma superfície plana, os autores descreveram o perfil vertical de velocidade radial.

Holmes & Oliver (2000) descreveram uma formulação empírica da direção e da velocidade do vento horizontal de um *downburst* com vento de translado, gerada pela soma vetorial da velocidade do vento de translação e do vento radial oriundo do fluxo descendente incidindo no solo. A frequência de falhas em torres de alta voltagem na Austrália foi uma das motivações do estudo. Uma importante consideração no trabalho realizado por Holmes & Oliver (2000) e que, posteriormente, foi adotada em vários outros modelos foi a da evolução temporal da TS, onde a velocidade da tormenta, em função do tempo, aumenta até atingir o instante de tempo T (duração característica da tormenta) e após decai exponencialmente.

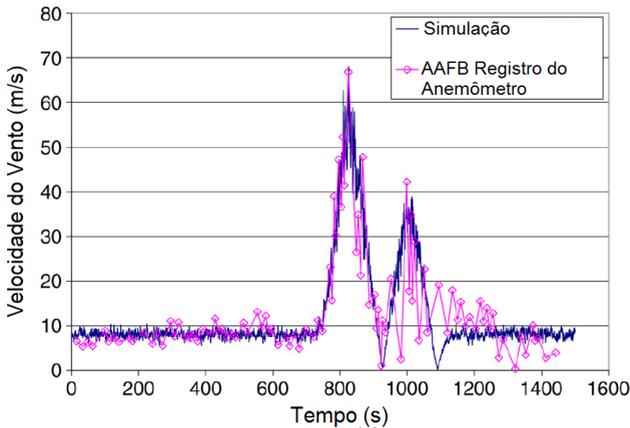
Chen & Letchford (2004) propuseram um modelo determinista-estocástico híbrido, onde os ventos do *downburst* são uma soma da velocidade média determinística e uma flutuação estocástica. Para o vento médio, os autores partiram dos modelos de Wood & Kwok (1998) para o perfil vertical e Holmes & Oliver (2000) para a evolução da velocidade do *downburst* no tempo. A flutuação foi modelada utilizando o

evolutionary power spectral density function (EPDS), como um processo estocástico gaussiano. O modelo foi usado para investigar a resposta dinâmica de uma torre modelada como uma viga em balanço em Chen & Letchford (2004).

Em 2002, nos dias 4 e 15 de julho, dois conjuntos de séries temporais de *downburst* foram gravados com sucesso, simultaneamente, em diferentes alturas, em sete torres de observação no *Reese Technology Center*, em Lubbock no Texas, USA. Chen & Letchford (2005) estudaram a decomposição dos sinais captados pelo método *proper orthogonal decomposition* (POD), onde os sinais foram separados em velocidade média variável no tempo e velocidade flutuante normalizada, ambas comparadas com o modelo numérico. A correlação dos perfis laterais do *downburst* foi estudada por Chen & Letchford (2006) em um esquema de multi-escala. Com base nesses estudos, Chen & Letchford (2007) apresentaram um modelo não paramétrico determinístico estocástico híbrido (NDESH).

Chay, Albermani & Wilson (2006) simularam 30 cenários de *downburst* com diâmetros e velocidades variadas, com a intenção de gerar um modelo sem variação no tempo e sem turbulência, usando o CFD (fluidodinâmica computacional), para o qual a dependência no tempo poderia ser adicionada empiricamente. A partir do método de OSV, os autores sugeriram melhorias em relação ao fator de escala que determina a força do campo do vento produzido e as variáveis que consideram a altura e o raio em que a velocidade máxima ocorre. O modelo, tomando por base as considerações feitas por Holmes & Oliver (2000), incorpora a variação temporal da intensidade da tormenta e ainda é adicionada turbulência às simulações empregando métodos usados em ventos de camada limite. Por último, os autores realizaram uma simulação dos registros do anemômetro da força aérea de Andrews (AAFB) que pode ser vista na Figura 15.

Figura 15 – Comparação entre a simulação e os registros da velocidade do vento realizada por Chay, Albermani & Wilson (2006)



Fonte: Chay, Albermani & Wilson (2006, p.251)

A partir do modelo OSV, Abdelaal, Ma & Mills (2012) e Abd-Elaal, Mills & Ma (2014) propuseram ajustes nos perfis vertical e horizontal da velocidade do vento de um *downburst*, bem como na intensidade da tormenta e na velocidade de translado, apresentadas por Holmes & Oliver (2000). Os autores descrevem um modelo de *downburst* transiente de escala completa nas quatro dimensões (x, y, z, t). Um novo par de funções de modelagem foi apresentado e, em seguida, a equação de continuidade de massa foi usada para derivar os correspondentes perfis.

Ponte (2005) e Ponte & Riera (2007), baseados nas variáveis meteorológicas, propuseram um método a partir do qual é possível simular o campo de velocidades do vento, gerado por tormentas elétricas, para fins de projeto, como em linhas de transmissão. O procedimento foi, mais tarde, modificado por Miguel & Riera (2013), por Gheno (2014) e Gheno *et al.* (2015). Esse modelo foi o adotado neste trabalho e é descrito detalhadamente no capítulo 3. Os demais encontram-se

descritos em Neto (2012), Conceição (2013), Gheno (2014) e Luzardo (2016).

3.2 Ação de Tormentas Elétricas em Estruturas

Com a existência de modelos que representam os perfis de velocidade gerados por *downbursts*, pesquisas sobre o efeito destes ventos de alta velocidade em estruturas como torres de transmissão e cabos começaram a ser feitas.

Savory *et al.* (2001) investigou a resposta estrutural dinâmica de uma torre de transmissão sujeita a carregamentos oriundos de ventos de alta intensidade, como tornados e *microbursts*. O modelo de Holmes & Oliver (2000) foi utilizado na simulação do *microburst* que possuía uma velocidade radial de 80 m/s e era transladado por um vento de fundo de 20 m/s. Foram incluídas a influência restritiva e o peso próprio dos cabos condutores, entretanto não foi considerada a resposta dos cabos em relação à ação do vento. O autor aponta que, embora essa consideração no caso de tornados é provavelmente satisfatória, não se pode afirmar o mesmo em relação aos *microbursts*. A análise estrutural deu-se por um modelo de elementos finitos utilizando a abordagem de integração direta para a consideração da resposta dinâmica. O resultado apontou uma falha induzida pelo tornado, no entanto o *microburst* não produziu falha, devido à sua menor intensidade e maior duração.

Shehata, Damatty & Savory (2005) construíram um modelo em elementos finitos para investigar o comportamento de uma torre de transmissão, isoladores, cabos condutores e para-raios sob os efeitos de um *downburst* modelado, utilizando fluído-dinâmica computacional (CFD). Os autores compararam a resposta da torre submetida a carregamentos típicos de projeto com a resposta a um evento de TS intenso, de onde concluíram que as forças de pico nos membros da torre são sensíveis à localização do *downburst* em relação à torre e que os valores de pico das forças axiais associadas ao *downburst* excederam os devidos ao carregamento usual de vento em uma porcentagem que varia de 9%

a 304%.

Langlois (2007) investigou os efeitos de ventos de alta intensidade (*downbursts* e tornados) e comparou com ventos sinóticos e *direct gust wind*. Este último consiste num método onde rajadas de 3 s são aplicadas diretamente sobre a torre e parte dos condutores, sem nenhuma correção de altura. Para tornados, o autor recomenda que seja aplicado um perfil uniforme de velocidade de vento horizontal em ao menos três orientações (transversal, longitudinal e 45°). Para *downbursts*, o autor considera que, na ausência de modelos validados especificamente para este tipo de evento, a utilização do modelo para vento sinótico, desde que para velocidades de vento de projeto com base em análises estatísticas específicas para *downbursts*, ao invés de derivadas de observações sinóticas do vento, pode ser adotada. Outra possível opção apontada seria utilizar uma velocidade de vento horizontal uniforme aplicada tanto aos condutores quanto ao suporte, sem ajuste com altura, no caso de informações limitadas sobre eventos de *downburst* anteriores. Nesses casos, os perfis de velocidade de vento devem ser aplicados em várias direções para identificar membros críticos.

Neto (2012) comparou resultados da ação de um *downburst* aos da ação de vento originado de eventos EPS em dois tipos de estruturas: um trecho de linha de transmissão e uma chaminé de concreto armado de 180 m de altura. O trecho da linha de transmissão foi analisado estaticamente em termos de momento de tombamento nas torres devido ao vento de *downburst* e comparado ao correspondente momento resistente para estimar o número de torres que seriam levadas ao colapso. A estrutura da chaminé foi analisada para determinar as suas respostas dinâmicas devidas à turbulência dos ventos. Das análises efetuadas, o autor concluiu que, dependendo da aproximação entre as estruturas e os *downbursts*, estes eventos podem produzir respostas muito superiores àquelas geradas pelos usuais ventos de projetos, tanto estática quanto dinamicamente.

Conceição (2013) apresentou uma análise de modelos numéricos de linhas de transmissão sob a ação de ventos sinóticos e de *downbursts*.

Os componentes da linha de transmissão são uma torre de 118,4 m de altura com 3 feixes de 4 cabos condutores cada um e dois cabos para-raios com vãos adjacentes de 1000 m. O autor verificou os estados limites últimos para esforços estáticos de ação de vento EPS e, a partir da análise dinâmica deste modelo sob ação do vento tipo EPS, constatou que o fator de amplificação dinâmica foi significativo. Foi também mostrado que é necessária análise não linear para ação do *downburst*.

Gheno (2014) analisou a resposta de cabos condutores à força induzidas por fluxos descendentes de vento oriundos de tormentas elétricas. No estudo, foram considerados diferentes comprimentos de vãos e diferentes combinações entre *downbursts* e ventos sinóticos. O autor concluiu que, para a mesma velocidade de vento a 10 m de altura do solo, um evento sinótico com direção perpendicular aos cabos induz a carregamento mais severos. Em outros casos analisados, quando o vento é composto pelos dois tipos de evento, devido às características axissimétricas do campo de velocidades da TS, este pode ser o que induz ao maior carregamento.

Solari (2014) fez uma revisão das pesquisas relacionadas a tormentas elétricas (TS) nos últimos quarenta anos e apontou três aspectos relacionados a carregamento devido ao vento em estruturas, em regiões de clima misto. O primeiro aspecto ressaltado foi a classificação e a separação de diferentes eventos de vento intenso, em ciclones extratropicais, tempestades elétricas e frentes de rajada (borda principal do ar frio que corre para baixo e para fora de uma tempestade elétrica). De acordo com o autor, essa separação melhoraria a interpretação dos fenômenos de interesse de engenharia, a análise probabilística da velocidade máxima do vento e, conseqüentemente, a determinação da resposta induzida pelo vento. O segundo aborda o uso da técnica do espectro de resposta, não apenas como uma ferramenta potencialmente eficiente para o cálculo da resposta estrutural às tempestades, mas também como um meio para revisar toda a resposta estimulada pelo vento em um quadro mais geral e abrangente. Por último, o terceiro tópico envolveu a análise estatística das velocidades extremas do vento em climas mistos,

onde o autor apontou algumas deficiências das abordagens atualmente utilizadas para avaliar o carregamento do vento nas estruturas.

Aboshosha, Bitsuamlak & Damatty (2015) realizaram simulações de *downbursts* incidindo sobre quatro diferentes terrenos: zonas abertas, zonas rurais, suburbanas e urbanas, a fim de determinar as características turbulentas em diferentes rugosidades do solo. As escalas de comprimento de turbulência, que regem as correlações de turbulência, foram determinadas nas direções circunferencial, vertical e longitudinal, sendo que, na direção circunferencial, elas foram maiores, indicando que a turbulência está mais correlacionada nesta direção, o que pode não ser favorável para estruturas com grandes dimensões horizontais como LTs.

Aboshosha & Damatty (2015a) realizaram análises dinâmicas para investigar a resposta de dois sistemas condutores, representados na Figura 16, sob ventos de *downburst* e ventos sinóticos, variando a velocidade e os comprimentos do vão, para avaliar a importância de se incluir o efeito dinâmico na previsão da resposta dos condutores. Dos resultados obtidos, os autores concluíram que a análise dinâmica é recomendada para um *single-spanned system* (a) sujeito a *downbursts* e ventos sinóticos com baixa velocidade, uma vez que a contribuição máxima da componente ressoante foi da ordem de 16%. Entretanto, essa análise pode não ser necessária para estimar o pico das reações em um *six-spanned system* (b), já que a contribuição da reação transversal e longitudinal foi da ordem de 5% e 6% respectivamente. Os fatores de rajada, tanto da reação longitudinal quanto da reação transversal, para (a) foram maiores do que para (b). As reações longitudinais desenvolvidas nos dois sistemas podem ser significativas e devem ser incluídas no projeto. Tais contribuições podem justificar o uso da abordagem quasi-estática para analisar os condutores da linha de transmissão submetidos às altas velocidades do vento tipicamente usadas para o projeto da linha.

Figura 16 – Isolador usado em diferentes sistemas: (a)- single spanned, (b)-six spanned.



Fonte: Aboshosha & Damatty (2015a, p.243)

Aboshosha & Damatty (2015b) propuseram um método para cálculo da resposta dos condutores submetidos a ação de *downbursts*, uma vez que a realização dessa análise pelo método de elementos finitos é muito demorada devido à alta não linearidade, às grandes deformações e efeito P-delta. O modelo baseia-se na simulação de isoladores à direita e à esquerda da torre de interesse por uma combinação de apoios rotulados e molas lineares. A solução é focada na configuração de *downburst* que causa a reação longitudinal máxima, sendo que esta depende de 3 parâmetros adimensionais: a relação entre o comprimento do condutor e o comprimento do vão, entre o peso do condutor e a intensidade do vento e entre o comprimento do vão e o comprimento do isolador. A precisão da técnica foi avaliada por meio de uma comparação com resultados obtidos em análises não-lineares pelo método dos elementos finitos, onde as diferenças nas cargas críticas longitudinais foram inferiores a 8%, enquanto nas transversais foram inferiores a 3%.

Elawady & Damatty (2016) estudaram um caso específico de carregamento em linhas de transmissão o qual foi chamado de carga oblíqua de *downburst*. Esse carregamento ocorre quando a linha imaginária que liga o centro da tormenta ao centro da torre não é nem perpendicular

nem paralela à direção do condutor, o que induz uma distribuição irregular e desigual de velocidade ao longo da extensão dos condutores ligados ao lado esquerdo e direito da torre, o que conduz a uma força longitudinal que atua sobre o braço transversal da torre. Partindo de um estudo paramétrico, os autores determinaram a configuração mais crítica de um *downburst* e avaliaram a resposta dos cabos em uma análise não linear, onde foram variados seus parâmetros geométricos e materiais, para, então, com base nesses resultados, analisar a força longitudinal máxima pela linha de transmissão.

Elawady, Damatty & Ansary (2016) conduziram dois estudos de caso para avaliar o impacto econômico na consideração dos casos críticos de *downburst* ao projetar torres de transmissão. O estudo considerou uma torre estaiada e uma torre autoportante dentro do contexto de uma linha de transmissão. As duas linhas foram modeladas usando elementos finitos e o campo de velocidades gerado a partir de CFD. Os membros que excederam a sua capacidade de resistência durante sua exposição ao campo de velocidades do *downburst* foram redimensionados e o aumento do peso das torres foi de 3,5% e 17,5% para as torres autoportante e estaiada, respectivamente.

Yang & Hong (2016) avaliaram a curva de capacidade de uma torre de transmissão exposta a um *downburst*. A torre estava inserida em uma linha de transmissão. Considerou-se a interação torre-linha e a turbulência do vento. A curva de capacidade da torre foi estimada por meio de análise dinâmica incremental e análise estática não-linear e comparada com a curva de capacidade de uma torre onde essas considerações acerca da turbulência do vento e da interação com a linha de transmissão foram negligenciadas. Os resultados da comparação mostram que a curva de capacidade da torre média não é sensível ao número de torres consideradas na linha de transmissão. Isso implica que o efeito torre-linha na curva de capacidade da torre sob ventos *downburst* é desprezível e que as curvas de capacidade de uma única torre são quase idênticas com ou sem molas de extremidades e forneceram informação suficiente.

Luzardo (2016) estudou o comportamento dinâmico de um trecho de linha de transmissão submetido à ação de ventos provenientes de *downbursts*. O autor realizou um estudo paramétrico onde identificou a combinação de variáveis do evento que provocam a maior energia cinética armazenada. Por fim, apresentou uma revisão estrutural dos montantes da torre central da linha modelada. O autor concluiu que a combinação de variáveis que provoca o resultado de forças internas mais crítico varia em relação a cada componente da linha de transmissão.

Riera (2016) infere que a ausência de um modelo que represente os campos de velocidades gerados por eventos TS consiste em uma deficiência das normas de projeto estrutural da América do Sul, sendo portanto, apenas a componente horizontal do vento a 10 m de altura insuficiente para determinar a excitação devida ao vento se o tipo de evento meteorológico responsável não é conjuntamente definido. O autor propôs, então, um modelo simplificado, para estimar o vento de projeto causado por eventos TS.

Downbursts transladados por tormentas EPS, também conhecidas como linhas de tormenta, ou linhas de instabilidade (*squall lines*), são definidos como eventos de interesse. Considerando a remota probabilidade de um evento estacionário e de um TS com um vento de fundo lento ultrapassarem o valor de 30 m/s (PONTE; RIERA, 2007; PONTE; RIERA, 2010), velocidade essa inferior a de projeto apresentada nas normas, são eventos que não necessitam de um tratamento específico (MIGUEL; RIERA, 2013).

O modelo simplificado proposto por Riera (2016) parte de uma velocidade inicial V_0 definida como a componente horizontal da velocidade máxima a 10 m de altura sobre o solo. A tormenta é classificada em uma das cinco categorias de corrente descendente propostas, de onde se obtém os demais parâmetros necessários para a determinação do perfil de velocidades. A velocidade média de translação é estimada em $0,35V_0$.

Capítulo 4

Ação do Vento em Linhas de Transmissão

Neste capítulo, são apresentados os modelos de tormenta EPS e de tormenta TS utilizados nas simulações deste trabalho. Maiores detalhes podem ser encontrados na NBR 6123 (ABNT, 1988), IEC 60826 (2003) e nos trabalhos de Ponte (2005), Ponte & Riera (2007), Gheno (2014) e em suas referências.

4.1 Modelo Estático de Tormentas EPS

Grande parte das normas técnicas de vento prescrevem procedimentos de cálculo baseados em vento sinóticos como, por exemplo, a NBR 6123 (ABNT, 1988) e a IEC 60826 (2003). Essa metodologia não é aplicável a tormentas elétricas, uma vez que só são representativas para processos ergódigos e estacionários.

Na NBR 6123 (ABNT, 1988), parte-se de uma velocidade básica do vento V_0 (m/s) para um período de retorno de 50 anos (com probabilidade de excedência de 63%), medida a uma altura de 10 m a partir do solo, sobre uma rajada de 3 s, em terreno aberto e plano com poucos obstáculos. A velocidade característica do vento V_k (m/s) é encontrada

por meio da correção de V_0 (m/s) (Equação 4.1):

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (4.1)$$

Onde S_1 é o fator topográfico, que leva em consideração as variações do relevo do terreno; S_2 é o fator que considera a rugosidade do terreno e a dimensão da edificação e sua altura sobre o solo, dada pela Equação 4.2; e S_3 é o fator estatístico baseado no grau de segurança requerido e a vida útil da edificação.

$$S_2 = b_v F_r \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (4.2)$$

Sendo p e b_v fatores meteorológicos, F_r o fator de rajada e z (m) a altura em relação ao solo do ponto calculado.

Essa correção permite determinar a pressão dinâmica q_v (N/m²) por meio da Expressão 4.3

$$q_v = 0,613 V_k^2 \quad (4.3)$$

De forma geral, uma componente qualquer de força F_a (N) é obtida pela Equação 4.4.

$$F_a = C_f q A \quad (4.4)$$

Na qual C_f é o coeficiente de força e A (m²) a área.

O procedimento de cálculo para uma tormenta EPS, encontrado no IEC 60826 (2003), inicia pela definição do nível de confiabilidade. Neste caso, é adotado o nível 1, que corresponde a um período de retorno de 50 anos.

Tanto a velocidade do vento quanto sua turbulência dependem da rugosidade do terreno. Quanto maior a rugosidade do terreno, maior a turbulência do vento e menor a velocidade média próxima ao solo. Considerou-se a área em estudo com rugosidade correspondente à categoria de terreno B (terreno aberto com poucos obstáculos, por exemplo, aeroportos ou campos cultivados com poucas árvores) com fator de rugosidade K_R correspondente a 1,00.

Partindo da velocidade do vento V_{RB} (m/s), para um período de retorno de 50 anos, medida a 10 m de altura sobre o solo, em lugar aberto, plano e com poucos obstáculos isolados (correspondente à categoria II da NBR 6123 (ABNT, 1988) e categoria B do IEC 60826 (2003)).

A velocidade de referência V_R (m/s) é calculada corrigindo o valor de V_{RB} com o fator de rugosidade K_R (Equação 4.5).

$$V_R = K_R V_{RB} \quad (4.5)$$

A pressão dinâmica de referência é calculada pela Equação 4.6:

$$q_0 = \frac{1}{2} \tau \rho_{(AR)} V_R^2 \quad (4.6)$$

Onde q_0 é a pressão dinâmica de referência do vento (N/m²); τ é o fator de correção da massa específica do ar em relação à temperatura e altitude; ρ_{AR} é a massa específica do ar a 15°C e pressão atmosférica de 101,3 kPa no nível do mar igual a 1,225 kg/m³.

Genericamente, o valor da ação unitária devida à ação do vento é dado pela Equação 4.7:

$$F_u = q_0 C_X G \quad (4.7)$$

Em que C_X é o coeficiente que depende da forma e das propriedades da superfície do elemento considerado e G é o fator combinado que considera a influência da altura do elemento em relação ao nível do solo, da rugosidade do terreno, das rajadas de vento e da resposta dinâmica do componente.

A particularização da Equação 4.7 é feita para cada um dos componentes da LT.

Para cabos, a solicitação imposta pelo vento é expressa pela Equação 4.8.

$$F_C = q_0 C_{XC} G_C G_L d L \text{sen}^2(\Omega) \quad (4.8)$$

Em que F_C (N) é a solicitação imposta aos cabos, que é transmitida à torre; C_{XC} é coeficiente de arrasto do cabo, normalmente igual a

1; d (m) é o diâmetro do cabo; L (m) é o vão médio da estrutura e Ω é o ângulo entre a direção do vento e o condutor.

Os coeficientes G_C (para a categoria B), que depende da altura z (m) e da rugosidade do terreno e G_L , coeficiente de redução do vão (análogo à classe de edificação definido na NBR 6123 (ABNT, 1988)), são calculados respectivamente pelas Equações 4.9 e 4.10.

$$G_C = 0,3733 \ln(z) + 0,9762 \quad (4.9)$$

$$G_L = 4 \cdot 10^{-10} L^3 - 5 \cdot 10^{-7} L^2 - 10^{-4} L + 1,0403 \quad (4.10)$$

As forças de vento que atuam sobre os isoladores são originárias da força transferida pelos cabos e da pressão de vento que atua diretamente nos isoladores F_I (N). Esta última, fornecida pela Equação 4.11.

$$F_I = q_0 C_{xi} G_t S_i \quad (4.11)$$

Sendo C_{xi} o coeficiente de arrasto do isolador, considerado igual a 1,20; S_i a área do isolador projetada horizontalmente e G_t é o fator combinado (neste caso calculado para a categoria B) variável com a rugosidade do terreno, a altura h (m) do isolador em relação ao solo (pode ser adotada a mesma altura do ponto de fixação dos cabos), calculada pela Equação 4.12.

$$G_t = -0.0002 h^2 + 0.0274 h + 1.6820 \quad (4.12)$$

Para os suportes, as forças devidas à ação do vento são as transmitidas pelos condutores e isoladores, bem como forças impostas pelo vento na própria torre. Para suportes de seção transversal retangular, a força F_T (N) é dada pela Equação 4.13.

$$F_T = q_0 (1 + 0,2 \sin^2 2\Omega) (S_{t1} C_{xt1} \cos^2 \Omega + S_{t2} C_{xt2} \sin^2 \Omega) G_t \quad (4.13)$$

Onde $S_{t1,2}$ são as áreas projetadas do painel da torre nas faces 1 e 2; G_t é dado pela Equação 4.12, sendo h (m) a altura do centro de

4.2 Modelo de *Downburst* e Linha de Tormenta

Ponte (2005) e Ponte & Riera (2007) propuseram um modelo baseado nas variáveis meteorológicas, a partir do qual é possível simular a excitação do vento para fins de projeto, como em linhas de transmissão.

As premissas adotadas são de que, no caso de uma nuvem cumulonimbus estacionária, o campo de vento é axissimétrico e dependente dos seguintes parâmetros: queda de pressão, velocidade e direção do vento de fundo, altura do nível do solo ao centro da bigorna, proporção da base da nuvem e tempo característico da tormenta. Isso permite a geração de um campo de velocidades com variação temporal e espacial, uma vez que todos os parâmetros estão relacionados a variáveis meteorológicas suscetíveis de avaliação estatística.

Gheno (2014) e Gheno *et al.* (2015) inseriram novas considerações relacionadas à espacialidade característica de um evento de TS ao modelo de Ponte e Riera. O modelo passou a delimitar a área de ação da TS (horizontal/radialmente) e a altura vertical das rajadas, esse último chamado de linha corrente limite. Foram introduzidos os conceitos de velocidade efetiva e relativa que estão relacionados à expansão da TS. Por último, foi considerada a formação de uma camada limite de escoamento.

Este modelo foi adotado neste trabalho por permitir uma abordagem tanto determinística, quanto estatística de um evento TS e foi validado pelo autor, a partir da comparação com os resultados apresentados em Gheno (2014).

4.2.1 Velocidade Tangencial

Em uma região sob atmosfera em condições estáveis, mudanças climáticas alteram suas variáveis meteorológicas, o que incorre na formação de uma nuvem cumulonimbus.

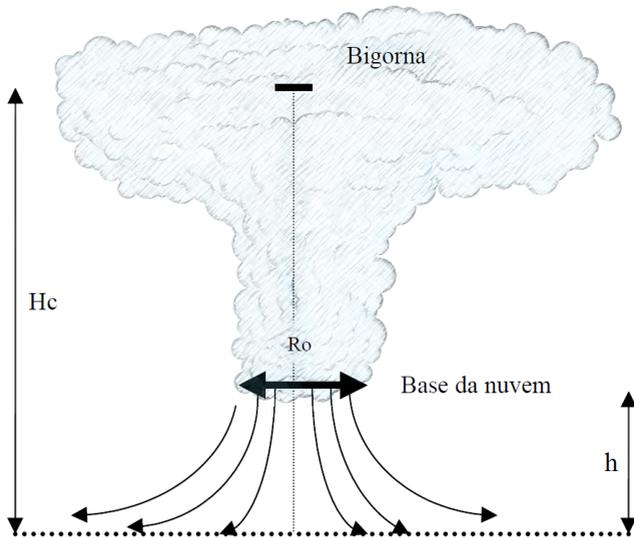
Considera-se que:

- a) a base da nuvem encontra-se a uma altura h em relação ao solo, definida como $h = 0,1 H_c$;

- b) H_c é a altura do solo ao centro da bigorna;
- c) a base da nuvem é circular de raio R_0 ;
- d) existe uma diferença de pressão ao longo da altura H_c , suficiente para desencadear um escoamento descendente de ar.

A Figura 18 representa, de forma esquemática, a tormenta elétrica e suas variáveis.

Figura 18 – Esquema de Tormenta Elétrica



A velocidade tangencial (4.15) em altura z ao longo de uma linha de fluxo pode ser obtida aplicando o teorema de Bernoulli para as alturas H_c e z acima do solo, em que Δp denota a diferença de pressão, enquanto ρ é a massa específica modelada pela equação 4.16.

$$V_t = \sqrt{2 \int_z^{H_c} \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (4.15)$$

$$\rho(z) = \rho_0 \cdot e^{-\beta z} \quad (4.16)$$

Onde ρ é a massa específica do ar; ρ_0 é a massa específica no nível do mar; z é a altitude e β é o coeficiente de ajuste da equação. Neste caso $\beta = 0,000095$.

Admitindo-se que a queda de pressão atmosférica possui valor Δp_0 ao nível do mar e é nula na altitude H_c , define-se que a variação entre os dois pontos $\Delta p(z)$ é linear, resultando na equação 4.17:

$$\Delta p(z) = \Delta p_0 \left(1 - \frac{z}{H_c} \right) \quad (4.17)$$

A equação da velocidade tangencial V_t para a altura z (4.18), que expressa a velocidade do fluxo de ar descendente, é obtida pela combinação das equações 4.15, 4.16 e 4.17.

$$V_t = \sqrt{\frac{2 \Delta p_0}{H_c \rho_0 \beta} (e^{\beta H_c} - e^{\beta z})} \quad (4.18)$$

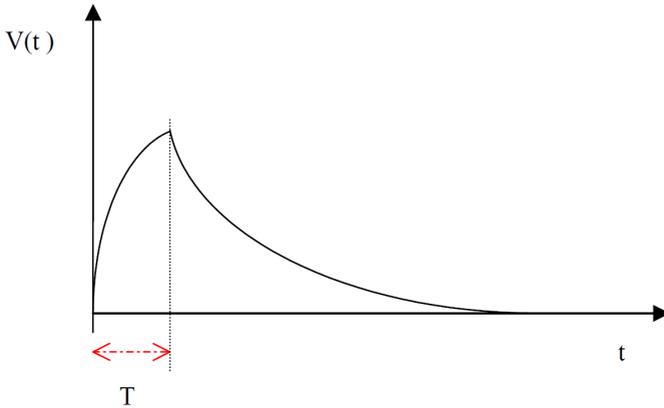
Seguindo o mesmo raciocínio de Holmes & Oliver (2000), Ponte (2005) admitiu que a velocidade em função do tempo se ajusta ao modelo exponencial expresso nas seguintes equações:

$$V(t) = 1,58 V_t [1 - e^{(\frac{-t}{T})}], \quad \text{para } t \leq T \quad (4.19)$$

$$V(t) = V_t [e^{-\frac{(t-T)}{T}}], \quad \text{para } t > T \quad (4.20)$$

Nas quais o parâmetro T representa a duração característica da tormenta e descreve o tempo em que uma partícula percorre a distância $D_N + H_c$, onde D_N é o diâmetro da bigorna. O coeficiente 1,58 corrige o modelo para satisfazer a condição de contorno a qual impõe que em $t = T$, $V(t) = V_t$. A Figura 19 apresenta a evolução da velocidade ao longo do tempo.

Figura 19 – Duração característica



Fonte: Ponte (2005, p.58)

Ponte (2005) admite que as linhas de corrente se desenvolvem de forma axial simétrica em relação ao eixo central da nuvem e são descritas da seguinte forma:

$$z(r) = \frac{k}{r^a} \quad (4.21)$$

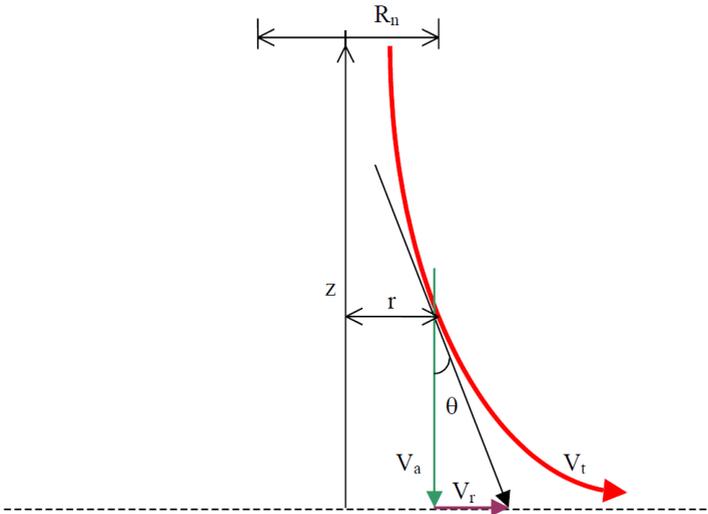
Em que a e k são constantes e r é a distância do eixo central da tormenta a um ponto de referência.

A Figura 20 apresenta uma linha de corrente limite genérica de velocidade tangencial (V_t) e suas componentes de velocidade radial (V_r) e axial (V_a).

Essa linha de corrente ($z(r)$) é matematicamente expressa pela Equação 4.22 e sua derivada em relação a r ($z'(r)$) fornece a tangente do ângulo θ em relação ao eixo r .

$$z(r) = \frac{z_h r_h^{1,2}}{r^{1,2}} \quad (4.22)$$

Figura 20 – Linha de corrente genérica



Fonte: Ponte (2005, p.50)

Sendo θ o ângulo que a linha corrente faz com a vertical:

$$z'(r) = -\frac{1,2 r_h^{1,2} z_h}{r^{2,2}} \quad (4.23)$$

As velocidades radial e axial podem, então, ser descritas por:

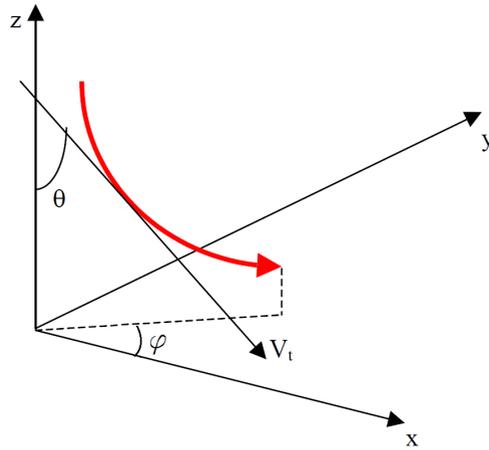
$$V_r = V_t \sin(\theta) \quad (4.24)$$

$$V_a = V_t \cos(\theta) \quad (4.25)$$

$$\sin(\theta) = \sqrt{\frac{1}{1 + (z'(r))^2}} \quad (4.26)$$

$$\cos(\theta) = \sqrt{\frac{(z'(r))^2}{1 + (z'(r))^2}} \quad (4.27)$$

Figura 21 – Eixos coordenados e ângulos



Fonte: Ponte (2005, p.53)

Para facilitar a aplicação do campo de velocidades, até então descrito em coordenadas cilíndricas, em estruturas, este pode ser definido em componentes cartesianas, partindo das seguintes equações:

$$V_x = V_t \operatorname{sen}(\theta) \cos(\varphi) = V_r \cos(\varphi) \quad (4.28)$$

$$V_y = V_t \operatorname{sen}(\theta) \operatorname{sen}(\varphi) = V_r \operatorname{sen}(\varphi) \quad (4.29)$$

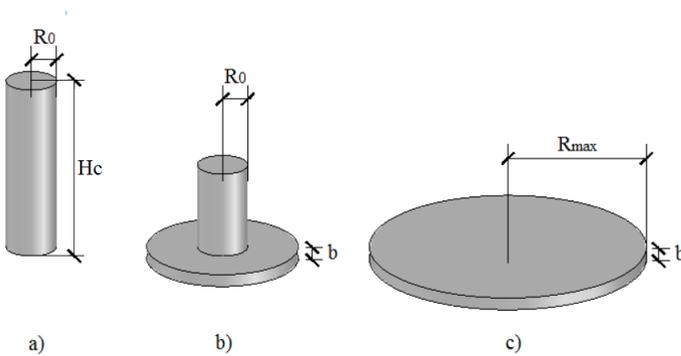
$$V_z = V_t \cos(\theta) = V_a \quad (4.30)$$

Onde V_x , V_y e V_z são a velocidade do vento nas direções x , y e z respectivamente e φ é o ângulo de projeção da linha corrente no plano xy .

4.2.2 Área de Ação da TS e Expansão

A área de ação da TS, partindo da premissa de que o ar é um fluido incompressível, é definida considerando três estágios da tormenta, como mostra a Figura 22. Onde em (a) a geometria da nuvem sofre uma simplificação, é apresentada como um cilindro de altura H_c e raio R_0 , que inicia em (b) a transferência de volume para um cilindro concêntrico de altura b (altura média da ação da TS, definida como 100m) e raio R_t . Essa expansão continua até que o volume do cilindro inicial tenha sido integralmente transferido, o que ocorre em c) quando o cilindro de altura b atinge o raio máximo (R_{max}).

Figura 22 – Modelo para definição da área da TS



Fonte: Gheno (2014, p.56)

A Equação 4.31 mostra a relação de igualdade dos volumes dos cilindros, de onde é possível, por meio de manipulação algébrica, isolar o R_{max} (Equação 4.32).

$$\pi R_0^2 H_c = \pi R_{max} b \quad (4.31)$$

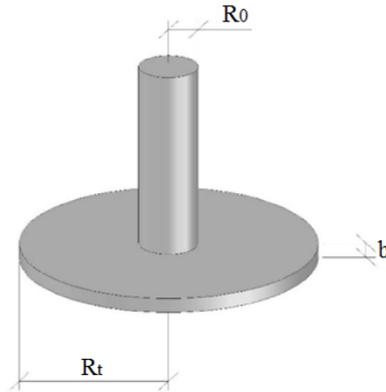
$$R_{max} = R_0 \sqrt{\frac{H_c}{b}} \quad (4.32)$$

Esse processo de expansão é descrito pela Equação 4.33 que inclui a variável temporal t , que pode ser isolada conforme a Equação 4.34 em que R_t é o raio no instante t .

$$\pi V t R_0^2 = \pi b (R_t^2 - R_0^2) \quad (4.33)$$

$$t = \frac{b}{V} \frac{R_t^2 - R_0^2}{R_0^2} \quad (4.34)$$

Figura 23 – Representação do modelo de expansão da TS



Fonte: Gheno (2014, p.57)

Segundo Gheno (2014), a ação de uma TS incidindo em obstáculos não pontuais, como estruturas de grande dimensão horizontal (cabos suspensos, por exemplo), necessita da consideração de que, em diferentes pontos no espaço, os efeitos do vento chegam em instantes distintos.

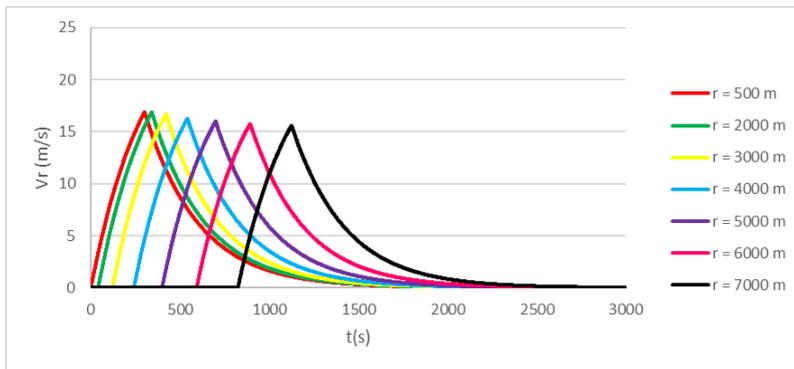
Para tanto, partindo da Equação 4.34, determina-se a velocidade com a qual a tormenta se expande, chamada velocidade efetiva (V_{ef}).

A razão entre a velocidade efetiva e a velocidade de escoamento (V) é denominada velocidade relativa de expansão (V_{rel}).

$$V_{ef} = \frac{R_t}{t} = \frac{R_t R_0^2}{b (R_t^2 - R_0^2)} V \quad (4.35)$$

$$V_{rel} = \frac{R_t R_0^2}{b (R_t^2 - R_0^2)} \quad (4.36)$$

Figura 24 – Perfil da velocidade radial ao longo do tempo para diferentes distâncias do centro da tormenta



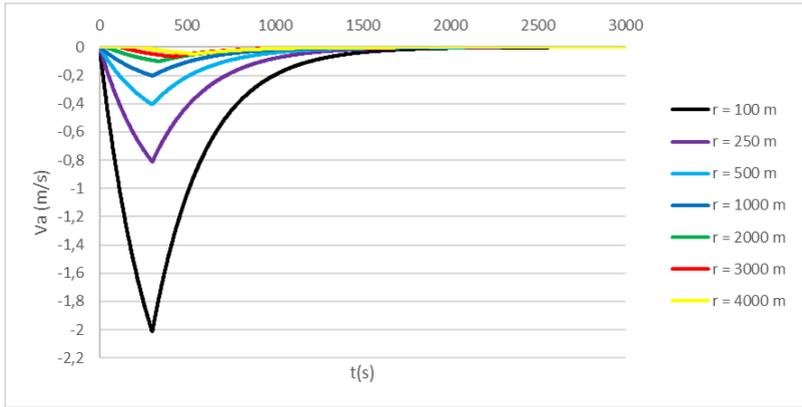
Fonte: Gheno (2014)

As Figuras 24 e 25 apresentam os perfis de velocidade radial e axial para diferentes distâncias do centro da tormenta. Na Figura 24, é possível observar que, em diferentes pontos, a velocidade chega em instantes diferentes.

4.2.3 Linha da Corrente Limite e Camada Limite de Escoamento

De acordo com Gheno (2014), tem-se como premissa que existe uma limitação vertical para as rajadas de vento, representada por uma linha de corrente considerada como superior. Define-se que esta linha de corrente é a que passa pelo ponto (R_0, h) , no qual h representa a altura

Figura 25 – Perfil da velocidade axial ao longo do tempo para diferentes distâncias do centro da tormenta



Fonte: Gheno (2014)

da base da nuvem, admitida como $(0, 1H_c)$. Por meio da particularização da Equação 4.22, a altura máxima que o campo de vento gerado pela TS atinge (z_{max}), em função do afastamento da origem da tormenta (r), é dada pela Equação 4.37, desde que $r > R_0$.

$$z_{max} = \frac{R_0^{1,2} (0, 1H_c)}{r^{1,2}} \quad (4.37)$$

A camada limite é a região adjacente a uma superfície sólida na qual tensões viscosas estão presentes. Essas tensões estão presentes, porque existe cisalhamento das camadas do fluido, isto é, gradientes de velocidade na camada-limite (FOX; MCDONALD, 2006).

A definição mais direta é espessura de perturbação, δ que representa a distância da superfície na qual a velocidade se situa dentro de 1% da velocidade da corrente livre (FOX; MCDONALD, 2006).

O desenvolvimento da camada limite de escoamento descendente foi considerado a partir das equações fornecidas por Fox & McDonald (2006), que expressam a espessura da camada limite turbulenta,

apresentada nas Equações 4.38 e 4.39

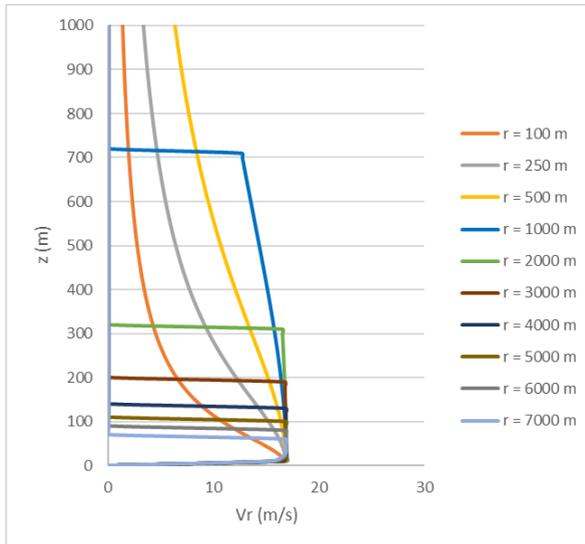
$$\delta = \frac{0,382(r - R_0)}{Re^{\frac{1}{5}}} \quad (4.38)$$

$$Re = \frac{V(r - R_0)}{\nu} \quad (4.39)$$

Onde ν é a viscosidade dinâmica do fluido e $(r - R_0)$ representa a distância percorrida pelo fluido do raio de escoamento na base da nuvem a um ponto de interesse localizado em r ; Re o n° de Reynolds e δ a espessura da camada limite.

A Figura 26 contém os perfis verticais de velocidade radial para diferentes distâncias da tormenta.

Figura 26 – Perfil vertical da velocidade radial para diferentes distâncias do centro da tormenta



Fonte: Gheno (2014)

4.2.4 Vento de Fundo

O modelo até então descrito representa um evento estacionário. O deslocamento da nuvem é causado por um vento de fundo com perfil vertical $V_f(z)$, dado pela Equação 4.40, que é incorporado ao modelo pela soma das velocidades horizontais da tormenta TS com as do vento de fundo.

$$V_f(z) = V_0 \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (4.40)$$

Em que $V_f(z)$ é a velocidade média sobre 3 s a uma altura z do solo e V_0 é a velocidade média sobre 3 s a uma altura de referência de 10 m. O expoente p depende da rugosidade do terreno, neste trabalho adotado com 0,085.

$$V_{fx}(z) = V_f(z) \cos(\gamma) \quad (4.41)$$

$$V_{fy}(z) = V_f(z) \sen(\gamma) \quad (4.42)$$

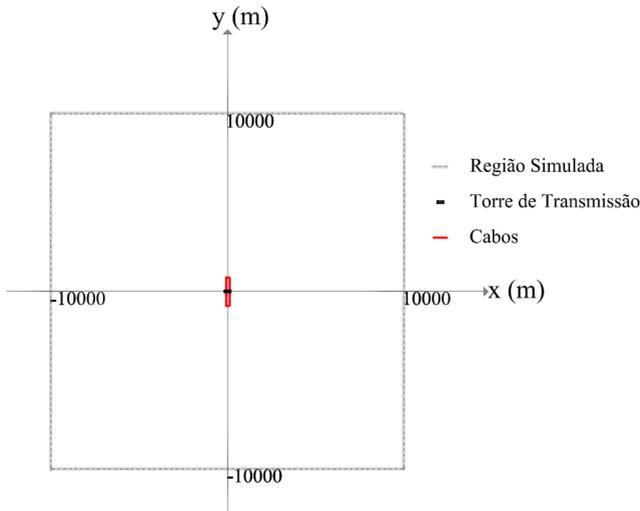
Sendo $V_{fx}(z)$ e $V_{fy}(z)$ as componentes em x e y da velocidade do vento de fundo e γ o ângulo entre a direção do vento de fundo e o eixo x .

4.2.5 Distribuições Probabilísticas e Parâmetros das Variáveis

As distribuições de probabilidade das variáveis do modelo e seus parâmetros, adotados neste trabalho, são descritas a seguir.

Dimensões da área: A área a ser estudada foi uma área quadrada de lado igual a 20000 m apresentada na Figura 27. Esta dimensão foi escolhida com base numa capacidade auditiva de uma pessoa situada no centro da área, pois os registros disponíveis sobre o número de tormentas, usualmente, são coletados pela audição do som do trovão após uma descarga elétrica (PONTE, 2005).

Figura 27 – Dimensões da área simulada, ao centro, trecho de LT.



Frequência de TS: A NBR 5419 (ABNT, 2001) apresenta o mapa isocerâunico do Brasil, de onde é possível estabelecer o número de eventos TS para cada região. Neste trabalho, adota-se como região de interesse uma área situada na cidade de Porto Alegre, onde ocorrem 20 eventos TS por ano.

Frequência dos ventos de fundo: Ponte (2005) admite a atuação permanente de vento de fundo, sendo esse eventualmente substituído por uma tormenta EPS. Adota-se a hipótese de que a cada 50 tormentas elétricas uma é transladada por uma tormenta EPS.

Diferença de Pressão: Em Porto Alegre, registros de queda de pressão de até 7 milibars por hora (700 Pa) podem ser encontrados. Caracena et al. (1977 apud Ponte & Riera 2010) sugere que a queda de pressão em microbursts varia de 2.4 mb à 5 mb (240 Pa à 500 Pa), mas não faz comentários em relação ao modelo probabilístico (PONTE; RIERA, 2010). As simulações neste trabalho utilizam a distribuição de Gumbel (distribuição de valores extremos tipo I) com fator de forma de

50 Pa e fator de posição 100 Pa, conforme Ponte (2005).

Duração Característica: O intervalo de tempo que compreende o início da tormenta até o instante em que esta atinge sua máxima velocidade é definido como duração característica. Ponte (2005) utilizou os dados de seis registros de TS realizados nas estações meteorológicas de Passo Fundo e São Luiz Gonzaga e ressaltou que, ainda que os parâmetros obtidos sejam oriundos de uma região diferente da de estudo, eles fornecem uma ideia da magnitude dos parâmetros a serem utilizados. Assim, a distribuição de Gumbel (distribuição de extremos tipo I), com fator de forma 150 s e fator de posição 300 s, é adotada neste trabalho.

Velocidade do vento de fundo: O atlas eólico do Rio Grande do Sul (2002, 2014) sugere que a distribuição estatística dos ventos se ajusta a distribuição de Weibull. Ponte & Riera (2010), para o módulo da velocidade do vento de fundo na altura de referência de 10 m, assumem como fator de forma 2,5 m/s e fator de posição 3,0 m/s.

Velocidade da tormenta EPS: Adota-se uma distribuição de Gumbel (distribuição de extremos tipo I), nos casos em que uma tormenta EPS é responsável pela translação do *downburst*, com fator de forma 3 m/s e fator de posição 21,5 m/s, conforme o recomendado por Santos (1989).

Direção do vento de translado: Admite-se que a direção do vento possui distribuição uniforme, que varia entre 0° e 360° , de acordo com o adotado por Ponte & Riera (2010).

Altura da Bigorna: Segundo Gheno (2014), o fim da tropopausa, região de inversão térmica, ou isoterma, que ocorre entre a troposfera e a estratosfera, costuma ser o limitante da altura da bigorna de uma nuvem cumulonimbus. Para a região de Porto Alegre (latitude aproximada $30^\circ S$), Gheno (2014) admitiu que a representação estatística da altura da bigorna pode ser representada por uma distribuição normal, de média 11000 m e desvio padrão 500 m.

Raio de escoamento descendente na base da nuvem: A análise de dados obtidos no projeto JAWS (*Joint Airport Weather Studies*), realizada em Hjelmfelt (1988), serviu de base para a determinação do

raio de escoamento descendente na base da nuvem. De acordo com Gheno (2014), o raio da base da nuvem (R_0) pode variar entre 300 m e 2000 m em uma distribuição de probabilidade triangular de moda igual a 700 m.

Capítulo 5

Trecho de LT em Estudo e Dados de Simulação do Vento

As simulações realizadas neste trabalho se dividem em duas etapas. Na primeira, foram simulados e analisados alguns casos definidos de combinação entre vento de fundo e TS, propostos em Gheno (2014). Na segunda etapa, são simulados 50 anos de eventos TS, considerando as distribuições de probabilidade descritas na Subseção 4.2.5.

A modelagem numérica dos eventos TS ocorreu por meio de uma rotina escrita por Ponte (2005) e Gheno (2014) em MATLAB e adaptada, neste trabalho, para contemplar o trecho de LT, apresentado na Seção 4.2 que tem como saída os campos de força devidos ao vento. Esses campos de força são aplicados à LT para que seja realizada a análise dinâmica. Essa análise é feita pela rotina escrita em linguagem FORTRAN que utiliza o método das diferenças finitas centrais, descrito na Seção 2.2. Esta rotina foi desenvolvida para estruturas treliçadas considerando não-linearidades geométricas, e tem como entrada os dados da estrutura analisada e seus carregamentos, e como saída os esforços nos elementos da estrutura.

5.1 Descrição da Linha de Transmissão

O trecho de linha de transmissão analisado (Figura 28) é composto por uma torre de suspensão autoportante, isoladores, cabos condutores e cabos para-raios adjacentes.

Um trecho de linha de transmissão similar a este foi estudado em trabalhos anteriores por Kaminski (2007) e Miguel *et al.* (2012). Nesta dissertação foram feitas algumas adaptações nos montantes da torre visando a adequação a velocidade do vento imposta.

A torre de suspensão autoportante (Figura 29) tem formato tronco-piramidal denominada “SY”, com 33,4 m de altura e 5 m de abertura da base. Oito diferentes perfis de cantoneira (ASTM A572 grau 50) compõem a torre, que foi modelada como treliça espacial e possui 174 nós e 415 barras. O apêndice A traz a silhueta e cortes da torre, onde são identificados os perfis que a compõe.

Figura 28 – Trecho de Linha de Transmissão

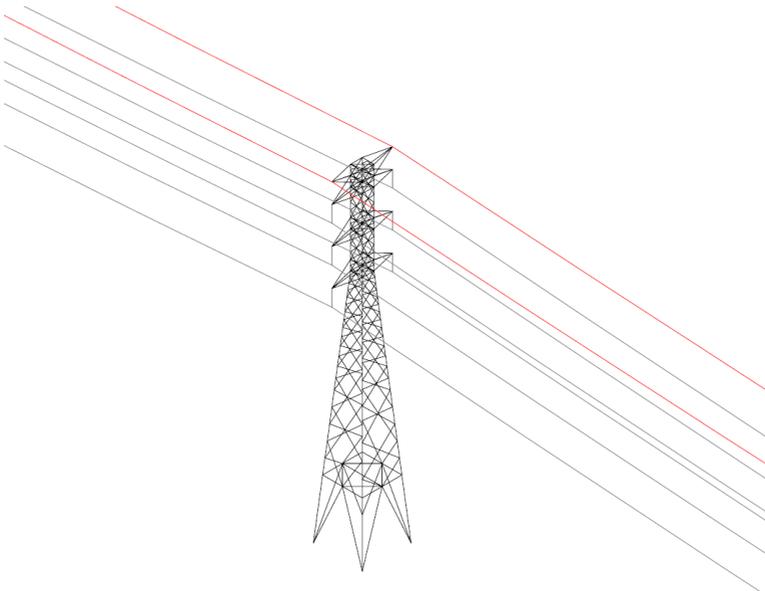
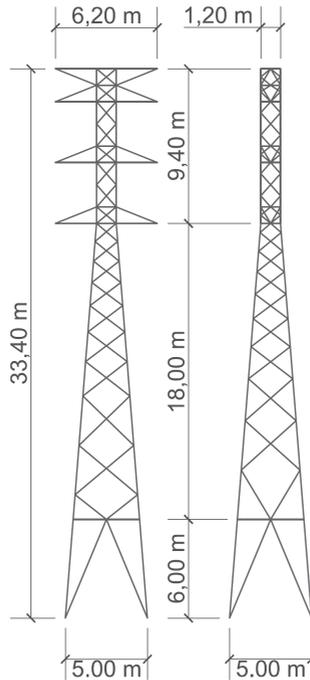


Figura 29 – Dimensões da Torre Autoportante



As cadeias de isoladores têm 1,65 m de comprimento e cada uma delas foi modelada com um único elemento e têm suas propriedades descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades dos Isoladores

Área da Seção Transversal	1150	mm ²
Peso por Metro	505,36	N/m
Módulo de Elasticidade	200	GPa
Coefficiente de Amortecimento	0,5	s ⁻¹

Cabos suspensos em linhas de transmissão apresentam formato de catenária. Na condição EDS (*Every Day Stress*), os cabos condutores

são projetados para uma tração em torno de 20% de sua capacidade (UTS - *Ultimate Tension Stress*). Nos cabos para-raio, esta tração é de aproximadamente 14% (KAMINSKI, 2007).

O cabo condutor utilizado nessa modelagem foi o cabo *Grosbeak* ACRS (*Aluminum Conductor Steel Reinforced*) 26/7 (26 fios de alumínio e alma com 7 fios de aço) com suas propriedades apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades do Cabo Condutor

Diâmetro Externo	25,146	mm
Área da Seção Transversal	374,7	mm ²
Tração de Ruptura	112095	N
Peso Unitário	12,7726	N/m
Módulo de Elasticidade	74,515	GPa
Coefficiente de Amortecimento	0,5	s ⁻¹

Os cabos para-raios são de aço do tipo Extra High Strength (EHS) com 7 fios de 3/8 de polegadas com suas propriedades apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades do Cabo Para-Raio

Diâmetro Externo	9,144	mm
Área da Seção Transversal	51,08	mm ²
Tração de Ruptura	68502,6	N
Peso Unitário	3,98413	N/m
Módulo de Elasticidade	172,369	GPa
Coefficiente de Amortecimento	0,5	s ⁻¹

As leis constitutivas dos cabos, bem como a formulação utilizada para determinar a catenária e o comprimento teórico, a flecha máxima e sua posição encontram-se descritas em Kaminski (2007).

5.2 Casos de Ventos Oriundos de TS Combinados com Vento de Fundo

Conforme Gheno (2014), os parâmetros que definem a duração da tormenta (T) e o raio da base da nuvem (R_0) com maior probabilidade de ocorrência são ($T = 300$ s) e ($R_0 = 700$ m). Estes valores foram adotados para todas as simulações a seguir.

A Tabela 4 apresenta as combinações de vento de fundo (V_0) e velocidade tangencial da linha de corrente da TS (V_t) para a altura de referência ($z = 10$ m), bem como os parâmetros (H_c) e (Δp_0) que foram fixados para definir a velocidade tangencial.

Tabela 4 – Parâmetros e velocidades a 10 m do solo.

H_c	Δp_0 (Pa)	V_t (m/s)	V_0 (m/s)
-	-	0	25
8500	40	10	15
9600	80	15	10
11200	120	20	5
12800	160	25	0

Fonte: Gheno (2014)

Tabela 5 – Coordenadas iniciais da TS e direção do vento de fundo

	x_0 (m)	y_0 (m)	γ ($^\circ$)
Caso 1	0	-2000	90
Caso 2	-2000	-1000	0
Caso 3	-500	-2000	60

Fonte: Gheno (2014)

Três casos de trajeto, para as combinações descritas, são apresen-

tados na Tabela 5 e nas Figuras 30, 31 e 32. A área adotada foi a de um quadrado de 20000 m de lado, conforme exposto na subseção 4.2.5.

Figura 30 – Esquema do domínio do caso 1

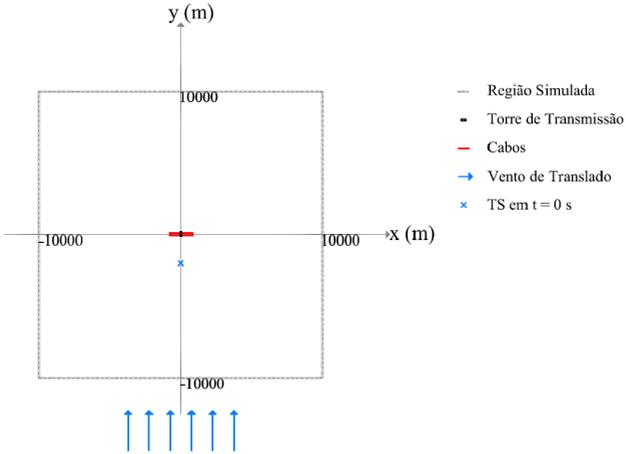


Figura 31 – Esquema do domínio do caso 2

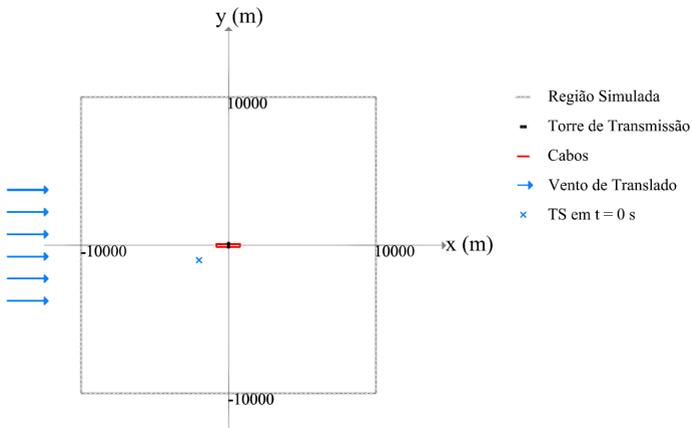
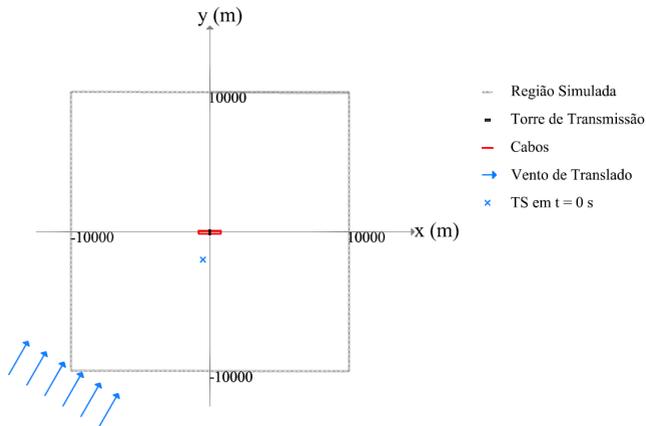


Figura 32 – Esquema do domínio do caso 3



Os casos descritos tem a finalidade de possibilitar a avaliação das diferenças entre tormentas TS estacionárias, TS combinadas com vento de fundo e tormenta EPS nos esforços máximos resultantes nos montantes das torres e nos pontos de fixação de um cabo condutor e um cabo para-raio da LT.

Figura 33 – Torre de transmissão utilizada na simulação. Em destaque, barras dos montantes analisadas.

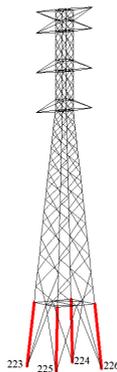
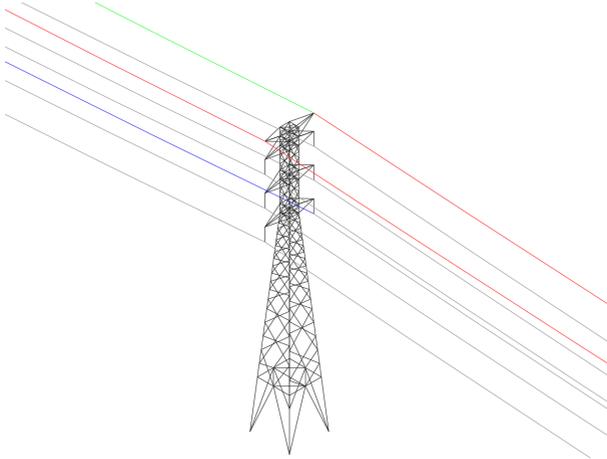


Figura 34 – Linha de Transmissão utilizada na simulação. Em destaque verde, cabo para-raio analisado, em azul, cabo condutor analisado.



Os esforços axiais máximos obtidos nas simulações descritas anteriormente são apresentados nas Tabelas 6 (tração dos cabos condutores), 7 (tração dos cabos para-raio) e 8 (esforços axiais dos montantes da torre de transmissão).

As Figuras 35 e 36 ilustram a evolução dos esforços axiais com o tempo para o cabo condutor e para o cabo para-raio respectivamente. É possível observar que, para o caso combinado entre vento de fundo e *downburst*, o esforço apresenta uma variação temporal que é característica de eventos TS, enquanto o caso apenas com vento sinótico mantém a mesma resposta ao longo do tempo de análise.

Essa mesma característica pode ser observada nas Figuras 37 e 38, as quais apresentam os esforços axiais das barras da torre.

Figura 35 – Esforço axial resultante no ponto de fixação do cabo condutor para caso 1 (vento de fundo 25 m/s e combinação entre vento de fundo 10 m/s e vento da TS 15 m/s).

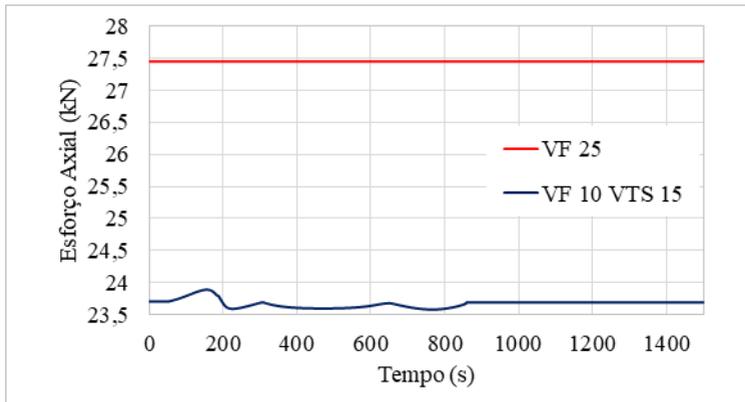


Tabela 6 – Esforços axiais dos cabos condutores em kN.

V_o (m/s)	V_t (m/s)	Caso 1	Caso 2	Caso 3
25	0	27,45	23,59	25,87
15	10	24,22	23,59	23,96
10	15	23,89	23,76	23,80
5	20	24,60	24,44	24,51
0	25	26,05	23,68	25,80

Figura 36 – Esforço axial no ponto de fixação do cabo para-raio para caso 1 (vento de fundo 25 m/s e combinação vento de fundo 10 m/s e vento da TS 15 m/s).

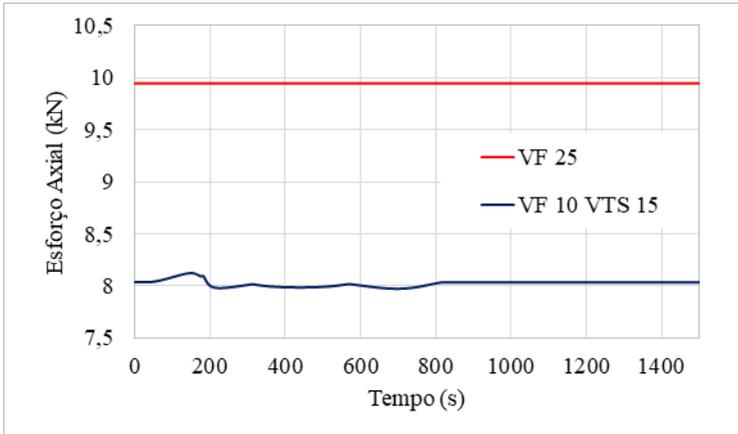


Tabela 7 – Esforços axiais dos cabos para-raios em kN.

V_o (m/s)	V_t (m/s)	Caso 1	Caso 2	Caso 3
25	0	9,95	8,09	9,19
15	10	8,31	8,02	8,17
10	15	8,12	8,05	8,06
5	20	8,39	8,32	8,27
0	25	9,05	7,97	9,02

Tabela 8 – Esforços axiais da barra do montante mais solicitado em kN.

V_o (m/s)	V_t (m/s)	Caso 1	Caso 2	Caso 3
25	0	-90,78	-35,80	-76,74
15	10	-43,65	-25,40	-38,39
10	15	-34,81	-31,17	-31,29
5	20	-51,83	-47,92	-48,59
0	25	-70,23	-36,94	-67,72

Figura 37 – Esforço axial resultante dos montantes da torre para caso 1 (combinação entre vento de fundo 10 m/s e vento da TS 15 m/s).

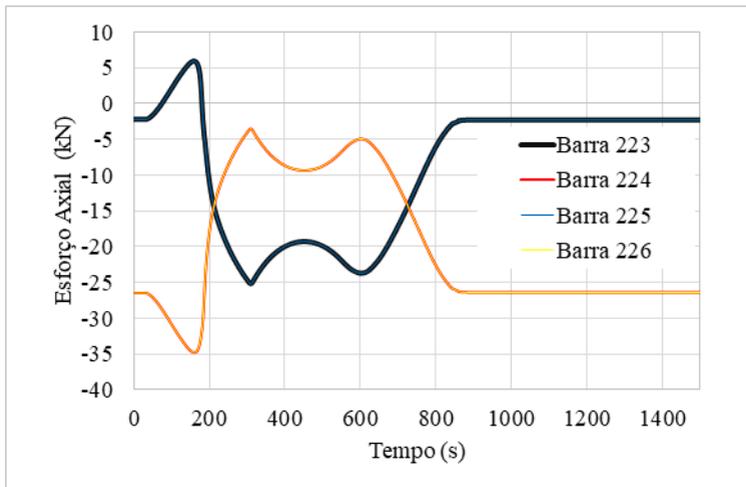
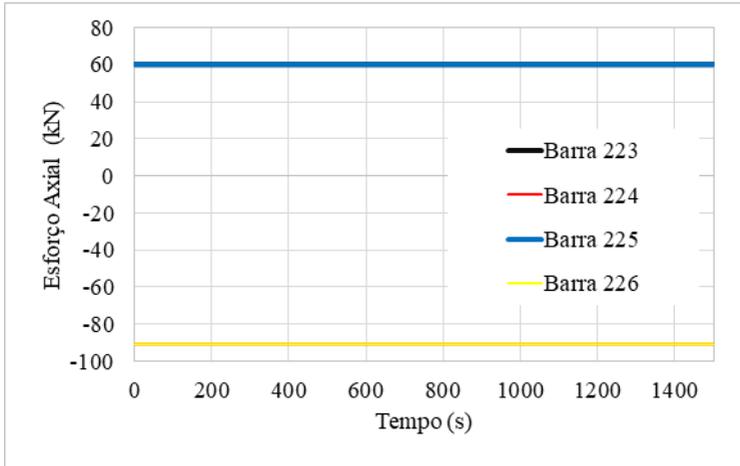


Figura 38 – Esforço axial resultante dos montantes da torre para caso 1 (vento de fundo 25 m/s).



A resposta dos cabos condutores e dos cabos para-raios apresentaram o maior valor no caso em que o vento sinótico é perpendicular a eles (caso 1, velocidade de 25 m/s) que, conseqüentemente, também gerou o maior esforço axial nos montantes da torre.

5.3 Simulação de Séries de Velocidades Anuais

O modelo de Ponte (2005) e Ponte & Riera (2007), adaptado por Miguel & Riera (2013) e, posteriormente, por Gheno (2014) e Gheno *et al.* (2015) e descrito na Seção 4.2 permite que suas variáveis sejam avaliadas estatisticamente. Desta forma, é possível obter informações estatísticas a respeito das velocidades extremas de uma região e, no caso em estudo, dos esforços extremos em uma estrutura sujeita aos campos de velocidade gerados pelo modelo.

A validação do modelo probabilístico foi feita em Ponte (2005), Ponte & Riera (2010) e Gheno (2014), em comparação com os registros apresentados em Santos (1989) para estações meteorológicas em

Uruguaiana, Bagé e Porto Alegre.

Figura 39 – Histograma com distribuição das velocidades máximas anuais simuladas para a altura de referência $z = 10$ m

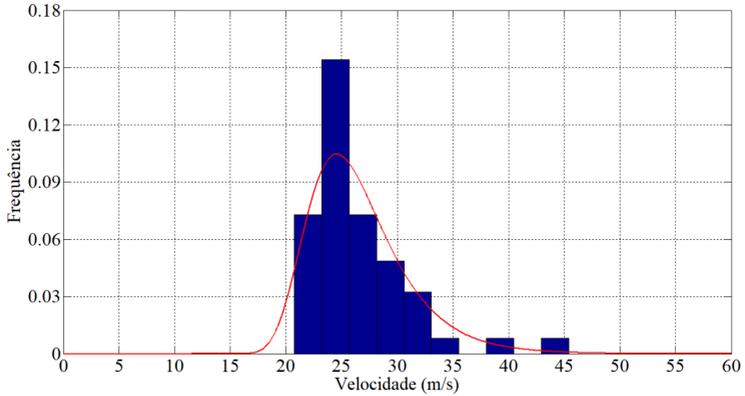
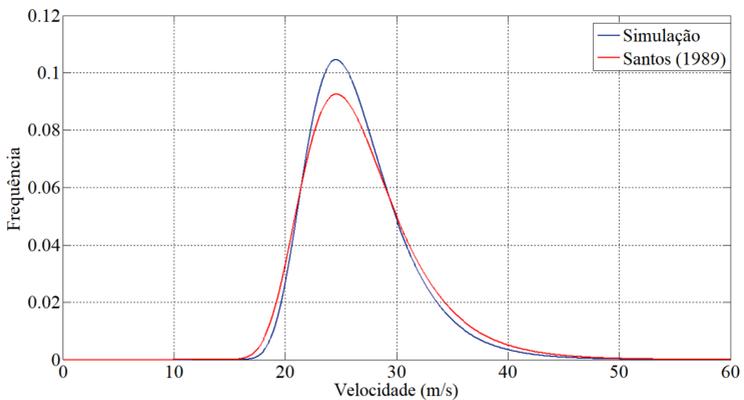


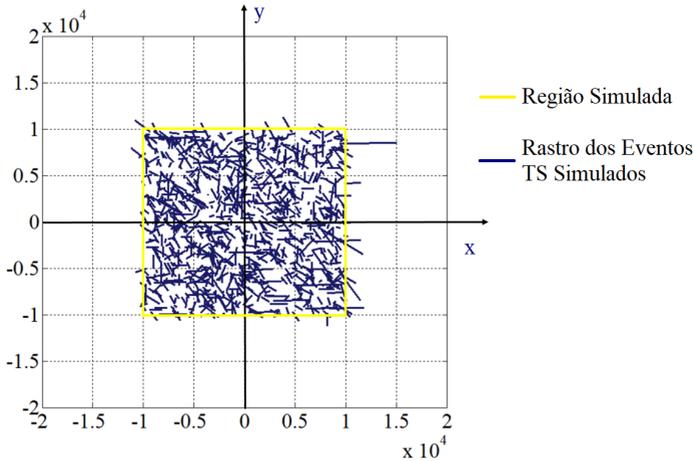
Figura 40 – Comparação entre resultados simulados e observados por Santos (1989)



A Figura 39 apresenta o histograma das velocidades máximas

anuais para os 50 anos simulados e a pdf (função de densidade de probabilidade) Gumbel ajustada. Na Figura 40, é feita a comparação entre as distribuições das velocidades simuladas neste trabalho com as observadas por Santos (1989) e verifica-se um boa correlação.

Figura 41 – Rastros dos eventos TS ocorridos durante o período de 50 anos simulado



A Figura 41 exhibe os trajetos dos 20 eventos TS anuais simulados durante o período de 50 anos. Nela, é possível verificar a ocorrência das tormentas em toda a área analisada, sendo a LT localizada no centro desta área.

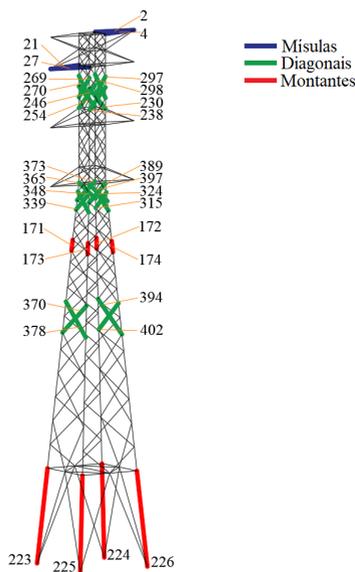
As forças devidas à ação do vento geradas na simulação foram aplicadas ao trecho de LT estudado e a resposta dinâmica foi determinada. Com a finalidade de comparação, também foram determinados os esforços do trecho de LT a tormentas EPS. Os resultados são apresentados a seguir.

Para um período de retorno de 50 anos, a velocidade a 10 m de altura para as tormentas elétricas simuladas foi de 38,27 m/s. Partindo desse valor, foi determinada a resposta da LT a uma tormenta EPS

com a mesma velocidade a 10 m de altura e uma tormenta EPS com 80% desta velocidade. Estimou-se o valor menor para a tormenta EPS, pois, de acordo com Riera & Nanni (1989), que analisaram séries de máximas anuais de velocidade do vento no Brasil e as classificaram de acordo com o evento (TS ou EPS), para períodos de retorno superiores a 10 anos, eventos TS atingem velocidades maiores que tormentas EPS. Em função da ausência de dados experimentais precisos, adotou-se uma relação de 80%.

A Figura 42 mostra, em destaque, as barras selecionadas para a comparação dos esforços. Em vermelho, os montantes; em verde, as diagonais; e, em azul, as mísulas. Os esforços axiais das barras monitoradas para o período de retorno de 50 anos foram determinados e são apresentados nas Tabelas 9, 10, 11, 12, 13 e 14. A Tabela 15 contém o valor de tração no ponto de fixação dos cabos na torre.

Figura 42 – Torre de transmissão analisada. Em destaque barras de interesse.



A média, o desvio padrão e o resultado do teste de aderência de Kolmogorov & Smirnov (KS), para os esforços axiais das barras selecionadas, também é apresentado nas tabelas. De acordo com os valores encontrados, a distribuição de Gumbel não pode ser rejeitada, já que, em comparação com o valor tabelado para um nível de significância 0,2, o valor de KS deve ser $\leq 0,15$. O significado deste valor é a maior distância entre a frequência acumulada observada e a teórica.

Tabela 9 – Tração dos montantes de controle (kN).

Barras	TS 50 anos (kN)	EPS (kN)	0,8*EPS (kN)	Média TS (kN)	Desvio Padrão TS (kN)	KS
171	70,14	132,08	80,08	26,62	16,79	0,13
172	71,14	-	-	26,80	17,10	0,07
173	67,32	132,08	80,08	26,80	15,63	0,11
174	69,86	-	-	25,96	16,94	0,08
223	86,13	158,23	96,86	33,16	20,43	0,14
224	85,65	-	-	33,58	20,09	0,08
225	80,60	158,23	96,86	33,42	18,20	0,12
226	85,47	-	-	32,22	20,54	0,09

Tabela 10 – Compressão dos montantes de controle (kN).

Barras	TS 50 anos (kN)	EPS (kN)	0,8*EPS (kN)	Média TS (kN)	Desvio Padrão TS (kN)	KS
171	-94,71	-	-	-50,36	17,11	0,08
172	-91,76	-155,79	-104,41	-51,33	15,60	0,11
173	-95,61	-	-	-51,33	17,08	0,07
174	-94,61	-155,79	-104,41	-51,16	16,76	0,14
223	-117,68	-	-	-61,62	21,63	0,09
224	-111,93	-201,71	-130,22	-62,95	18,90	0,12
225	-117,38	-	-	-63,12	20,93	0,08
226	-117,38	-201,71	-130,22	-62,69	21,10	0,14

Tabela 11 – Tração das diagonais de controle (kN).

Barras	TS 50 anos (kN)	EPS (kN)	0,8*EPS (kN)	Média TS (kN)	Desvio Padrão TS (kN)	KS
269	0,77	0,17	0,13	0,39	0,15	0,08
297	0,78	-	-	0,38	0,15	0,13
270	0,87	0,17	0,13	0,38	0,19	0,10
298	0,86	-	-	0,39	0,18	0,11
230	6,12	-	-	3,26	1,10	0,09
238	6,01	10,16	6,79	3,26	1,06	0,13
246	6,09	-	-	3,25	1,10	0,09
254	6,00	10,16	6,79	3,27	1,06	0,13
373	0,91	1,42	0,95	0,50	0,16	0,08
389	1,02	-	-	0,45	0,22	0,10
365	1,05	1,42	0,95	0,49	0,21	0,10
397	1,04	-	-	0,49	0,21	0,06
324	4,30	-	-	1,81	0,96	0,06
315	4,18	7,53	4,74	1,83	0,91	0,13
348	4,27	-	-	1,81	0,95	0,07
339	4,20	7,53	4,74	1,83	0,92	0,14
378	3,95	-	-	2,02	0,75	0,08
394	3,63	7,69	4,41	2,07	0,60	0,11
370	3,86	-	-	2,07	0,69	0,10
402	3,91	7,69	4,41	2,05	0,71	0,11

Tabela 12 – Compressão das diagonais de controle (kN).

Barras	TS 50 anos (kN)	EPS (kN)	0,8*EPS (kN)	Média TS (kN)	Desvio Padrão TS (kN)	KS
269	-0,87	-	-	-0,40	0,18	0,13
297	-0,90	-0,63	-0,28	-0,39	0,19	0,09
270	-0,79	-	-	-0,39	0,16	0,12
298	-0,78	-0,63	-0,28	-0,40	0,14	0,08
230	-4,45	-8,61	-5,23	-1,71	1,06	0,13
238	-4,55	-	-	-1,71	1,10	0,09
246	-4,46	-8,61	-5,23	-1,72	1,06	0,13
254	-4,55	-	-	-1,71	1,10	0,09
373	-1,58	-	-	-0,84	0,29	0,13
389	-1,56	-3,41	-1,76	-0,85	0,27	0,07
365	-1,58	-	-	-0,80	0,30	0,14
397	-1,36	-3,41	-1,76	-0,85	0,20	0,06
324	-4,87	-8,34	-5,42	-2,49	0,92	0,13
315	-4,96	-	-	-2,48	0,96	0,07
348	-4,86	-8,34	-5,42	-2,50	0,91	0,13
339	-4,96	-	-	-2,47	0,96	0,07
378	-2,84	-5,07	-3,14	-1,12	0,67	0,12
394	-2,74	-	-	-1,13	0,62	0,10
370	-2,55	-5,07	-3,14	-1,13	0,55	0,10
402	-2,82	-	-	-1,08	0,67	0,08

Tabela 13 – Tração das mísulas de controle (kN).

Barras	TS 50 anos (kN)	EPS (kN)	0,8*EPS (kN)	Média TS (kN)	Desvio Padrão TS (kN)	KS
21	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-
2	3,52	3,86	3,29	2,81	0,28	0,07
4	3,59	3,86	3,29	2,82	0,29	0,14

Tabela 14 – Compressão das mísulas de controle (kN).

Barras	TS 50 anos (kN)	EPS (kN)	0,8*EPS (kN)	Média TS (kN)	Desvio Padrão TS (kN)	KS
21	-10,29	-12,07	-10,56	-9,01	0,49	0,13
27	-10,27	-12,07	-10,56	-9,00	0,49	0,13
2	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-

Tabela 15 – Tração no ponto de fixação dos cabos (kN).

Barras	TS 50 anos (kN)	EPS (kN)	0,8*EPS (kN)	Média TS (kN)	Desvio Padrão TS (kN)	KS
422	11,14	14,98	11,74	9,28	0,71	0,08
442	11,14	14,98	11,74	9,28	0,71	0,08
481	11,24	14,98	11,74	9,28	0,76	0,06
501	11,24	14,98	11,74	9,28	0,76	0,06
502	30,34	38,89	31,32	26,26	1,58	0,06
522	30,34	38,89	31,33	26,26	1,58	0,06
561	30,39	38,89	31,32	26,25	1,60	0,05
581	30,39	38,89	31,33	26,25	1,60	0,05
582	30,66	39,69	31,79	26,39	1,65	0,06
602	30,66	39,69	31,79	26,39	1,65	0,06
641	30,72	39,69	31,79	26,39	1,67	0,07
661	30,72	39,69	31,79	26,39	1,67	0,07
662	30,91	40,37	32,20	26,49	1,70	0,06
682	30,91	40,38	32,20	26,49	1,70	0,06
721	30,97	40,37	32,20	26,49	1,73	0,07
741	30,97	40,38	32,20	26,49	1,73	0,07

Figura 43 – Função densidade de probabilidade da compressão na barra 223 para ventos TS

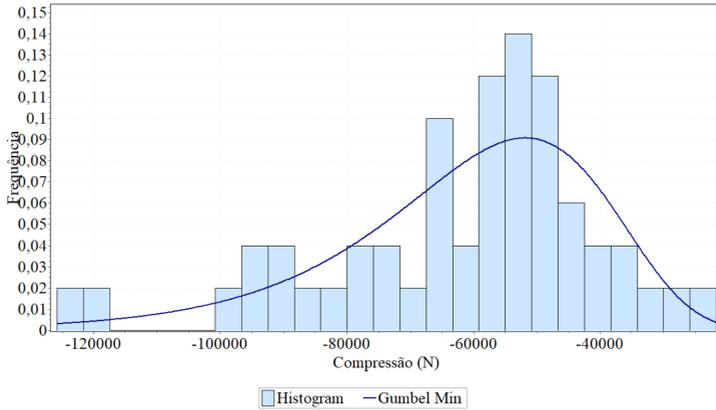


Figura 44 – Função densidade de probabilidade da tração na barra 224 para ventos TS

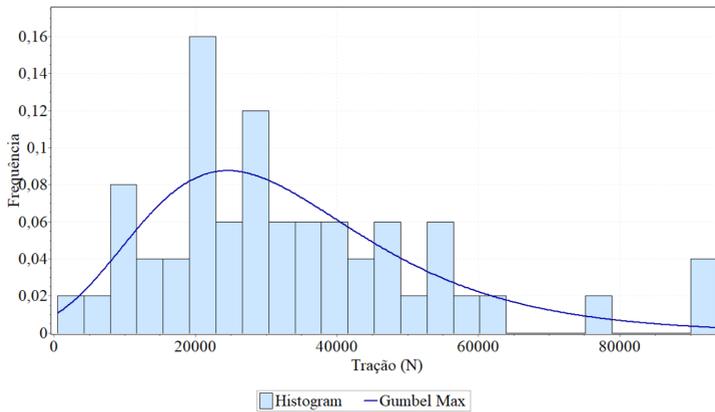


Figura 45 – Função densidade de probabilidade da compressão na barra 225 para ventos TS

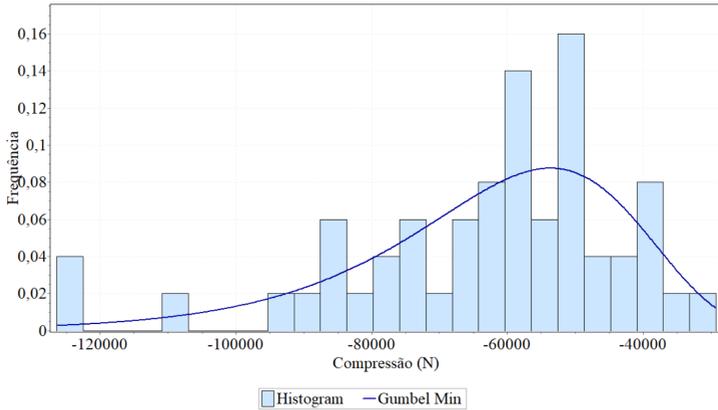
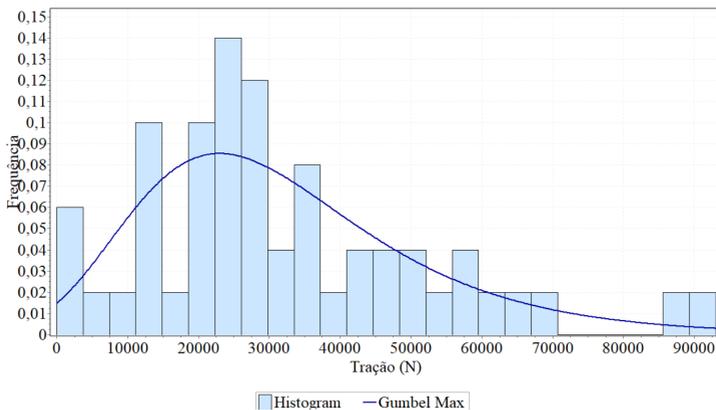


Figura 46 – Função densidade de probabilidade da tração na barra 226 para ventos TS



Verificou-se que, para a LT estudada, os esforços axiais causados pela ação de tormentas EPS nos montantes excedem em média 45% os

esforços associados aos eventos TS. Para a EPS com 80% da intensidade os esforços nos montantes excederam em média 12%.

Apesar de preliminares os resultados obtidos neste estudo já permitem algumas considerações. Uma discussão importante seria sobre o intervalo de tempo da velocidade de referência para o cálculo da força do vento. Em função do caráter não estacionário das tormentas TS, entende-se que um mapa com velocidade básica sobre 3 s seria mais geral. Nesse caso a ação do vento seria bem representada apenas por um modelo EPS. Por outro lado, esse seria um caso exagerado, pois estaria se considerando a velocidade máxima de um evento TS associada a um modelo de cálculo de tormenta EPS.

Portanto, dado que informações de dois mapas separados em função do evento causador tenham sido obtidas, poderia ser possível a realização de um projeto mais econômico. Vale salientar que nesse trabalho em função da carência de informações mais precisas (experimentais) adotou-se simplificadamente que a velocidade básica de um mapa EPS teria 80% de intensidade em relação a velocidade básica especificada para um evento TS. Estudos adicionais neste sentido ainda são necessários.

Considerando que a relação entre as velocidades básicas especificadas para eventos TS e EPS seja superior ou igual 80%, ainda assim o modelo de vento EPS seria suficiente para determinar a envoltória dos esforços. Portanto, velocidades individualizadas pelo tipo de tormenta levariam a esforços reduzidos em relação a utilização do mapa misto. Caso essa relação seja inferior a 80% poderia ocorrer um cenário em que os esforços gerados por tormentas TS seriam superiores aqueles oriundos de tormenta EPS. Nesse caso um modelo simplificado de TS agindo na LT seria necessário e igualmente um projeto mais racional poderia ser alcançado.

Vale destacar que em função da ausência da turbulência nas simulações, os resultados aqui obtidos podem ser considerados como um limite inferior àqueles que realmente seriam observados na torre. Além disso, neste trabalho apenas considerou-se uma linha de circuito duplo,

caso fosse circuito simples possivelmente a diferença entre TS e EPS não seria tão grande.

Capítulo 6

Conclusão

LTs são estruturas de grande dimensão horizontal e, em caso de carregamentos gerados por tormentas EPS, o vento irá atingir a estrutura de maneira uniforme. Entretanto, carregamentos oriundos de tormentas elétricas, por se tratar de um evento localizado e de curta duração, encontram diferentes pontos da estrutura em diferentes instantes de tempo.

As simulações realizadas neste trabalho foram divididas em duas etapas. Na primeira, foram simulados alguns casos definidos de combinação entre vento de fundo e TS, propostos em Gheno (2014).

Para esses casos específicos de combinação de tormentas TS e EPS, a resposta dos cabos condutores e dos cabos para-raios apresentaram o maior valor no caso em que o vento sinótico é perpendicular a eles (caso 1, velocidade de 25 m/s) que, conseqüentemente também gerou o maior esforço axial nos montantes da torre.

Na segunda etapa, foi apresentada uma abordagem probabilística da resposta dinâmica de um trecho de LT submetido à ação de tormentas elétricas estacionárias e não estacionárias. Realizou-se a simulação de um período de 50 anos, com ocorrência de 20 eventos TS anuais, por meio de simulação de Monte Carlo.

Com os resultados obtidos nas simulações de TS, foram gerados histogramas de algumas barras com esforços representativos e determi-

nados os esforços de 50 anos, considerando uma distribuição de Gumbel. Esses valores foram comparados com a resposta da LT submetida a eventos EPS. Observou-se que os esforços axiais causados pela ação de tormentas EPS nos montantes excedem em média 45% os esforços associados aos eventos TS. Para a EPS com 80% da intensidade os esforços nos montantes excederam em média 12%.

Partindo desses resultados, entende-se que uma discussão central seria na definição da velocidade básica do vento (entre 3 s e 10 min). Entende-se que um mapa com velocidade básica sobre 3 s seria mais geral, ou seja, sem a classificação do evento causador da velocidade máxima.

No caso de mapas de velocidade separados, o modelo de EPS pode não ser mais suficiente, sendo necessário que um modelo de TS seja especificado para o outro mapa. A especificação do modelo de vento e a separação dos mapas de velocidade básica classificados de acordo com o evento causador podem levar a um projeto mais racional.

Vale destacar que em função da ausência da turbulência nas simulações, os resultados aqui obtidos podem ser considerados como um limite inferior àqueles que realmente seriam observados na torre. Além disso, neste trabalho apenas considerou-se uma linha de circuito duplo, caso fosse circuito simples possivelmente a diferença entre TS e EPS não seria tão grande.

6.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

Sugere-se que trabalhos futuros sejam:

- a) definição de mapas de velocidade básica do vento em função do evento meteorológico causador;
- b) proposição de um modelo simplificado de cálculo para tormentas TS;
- c) estudar a resposta dinâmica turbulenta em tormentas EPS e, especialmente, TS;

- d) realizar uma análise probabilística da resposta de uma LT a tormentas TS com turbulência;
- e) testar diferentes modelos de turbulência em TS;
- f) submeter outras estruturas à análise probabilística utilizada neste trabalho.

Referências

- ABD-ELAAL, E.-S.; MILLS, J. E.; MA, X. Empirical models for predicting unsteady-state downburst wind speeds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 129, p. 49–63, 2014. Citado na página 60.
- ABDELAAL, E.; MA, X.; MILLS, J. E. A newly developed analytical model of transient downburst wind loads. *Proceedings of the 22th Australian Conference on the Mechanics of Structures and Material*, Sydney, Australia, 2012. Citado na página 60.
- ABOSHOSHA, H.; BITSUAMLAK, G.; DAMATTY, A. E. Turbulence characterization of downbursts using les. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 136, p. 44–61, 2015. Citado na página 64.
- ABOSHOSHA, H.; DAMATTY, A. E. Dynamic response of transmission line conductors under downburst and synoptic winds. *Wind and Structures*, v. 21, n. 2, p. 241–272, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 64 e 65.
- ABOSHOSHA, H.; DAMATTY, A. E. Engineering method for estimating the reactions of transmission line conductors under downburst winds. *Engineering Structures*, v. 99, p. 272–284, 2015. Citado na página 65.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6123*: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988. 66 p. Citado 5 vezes nas páginas 39, 69, 71, 72 e 73.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5419*: Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2001. 66 p. Citado na página 86.
- BATHE, K. J. *Finite element procedures*. United States of America: Prentice-Hall, Inc., 1982. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 53.
- BLESSMANN, J. *O vento na engenharia estrutural*. Porto Alegre: Ed. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. Citado 6 vezes nas páginas 37, 38, 39, 40, 42 e 48.

CAMARGO SCHUBERT ENGENHARIA EÓLICA. *Atlas Eólico: Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 2002. 70 p. Citado na página 87.

CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS AND ELECTROSUL CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. *Atlas Eólico: Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 2014. 116 p. Citado na página 87.

CAPPELLARI, T. T. de O. *Determinação da Resposta Dinâmica de Feixes de Condutores em Linhas Aéreas de Transmissão*. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS - BR, 2005. Citado na página 53.

CHAY, M. T.; ALBERMANI, F.; WILSON, R. Numerical and analytical simulation of downburst wind loads. *Engineering Structures*, n. 28, p. 240–254, 2006. Citado 5 vezes nas páginas 15, 46, 47, 59 e 60.

CHEN, L.; LETCHFORD, C. W. A deterministic–stochastic hybrid model of downbursts and its impact on a cantilevered structure. *Engineering Structures*, n. 26, p. 619–629, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 59.

CHEN, L.; LETCHFORD, C. W. Proper orthogonal decomposition of two vertical profiles of full-scale nonstationary downburst wind speeds[lzcl]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, n. 93, p. 187–216, 2005. Citado na página 59.

CHEN, L.; LETCHFORD, C. W. Multi-scale correlation analyses of two lateral profiles of full-scale downburst wind speeds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, n. 94, p. 675–696, 2006. Citado na página 59.

CHEN, L.; LETCHFORD, C. W. Numerical simulation of extreme winds from thunderstorm downbursts. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, n. 95, p. 977–990, 2007. Citado na página 59.

CONCEIÇÃO, R. S. da. *Torres de Linha de Transmissão (LTEE) Sob Ação de Ventos Originados de Ciclones Extratropicais e de Downbursts*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ - BR, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 61 e 62.

DE OLHO NO TEMPO METEOROLOGIA. *Alerta de ciclone extratropical*. 2016. Disponível em: <<http://deolhonotempo.com.br/index.php/>>

monitoramento/6066-alerta-de-ciclone-extratropical-explosivo-2>. Acesso em: 07 jul. 2017. Citado na página 40.

DEMPSEY, D.; WHITE, H. B. Winds wreak havoc on lines. *Transmission and Distribution World*, v. 48, n. 6, p. 32–42, 1996. Citado na página 31.

ELAWADY, A.; DAMATTY, A. E. Longitudinal force on transmission towers due to non-symmetric downburst conductor loads. *Engineering Structures*, v. 127, p. 206–226, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 65.

ELAWADY, A.; DAMATTY, A. E.; ANSARY, A. E. Critical load cases simulating downbursts: Economical implications for design of transmission lines. *CIGRE-IEC*, Montréal, QC, Canada, p. 1–8, 2016. Citado na página 66.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 6. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC S.A., 2006. Citado na página 83.

FUJITA, T. T. *THE DOWNBURST: Microburst and Macrobust*. 3. ed. United States of America: Satellite and Mesometeorology Research Project (SMRP), 1985. Citado 3 vezes nas páginas 43, 44 e 45.

FUJITA, T. T. Downbursts: Meteorological features and wind field characteristics. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Amsterdam, v. 36, p. 75–86, 1990. Citado 5 vezes nas páginas 32, 43, 45, 55 e 56.

GHENO, R. M. *Campo de velocidades gerado pela combinação de ventos convectivos e sinóticos em cabos suspensos*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS - BR, 2014. Citado 20 vezes nas páginas 11, 13, 33, 34, 60, 61, 63, 69, 74, 80, 81, 82, 83, 84, 87, 88, 89, 93, 100 e 113.

GHENO, R. M.; MENEZES, R. C. R.; RIERA, J. D.; MIGUEL, L. F. F. Loads induced on cables by convective winds in temperate latitudes. *ICWE*, Porto Alegre, Brasil, p. 1–11, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 11, 13, 60, 74 e 100.

GROEHS, A. G. *Mecânica Vibratória*. 1. ed. São Leopoldo - RS, Brasil: Editora Unisinos, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 53.

HAWES, H.; FIKKE, S. M. Report on current practices regarding frequencies and magnitude of high intensity winds. *CIGRE-IEC*, p. 1–8, 2004. Citado na página 32.

HJELMFELT, M. R. Structure and life cycle of microburst outflows observed in colorado. *Journal of Applied Meteorology*, v. 27, p. 900–927, 1988. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 87.

HOLMES, J. D.; OLIVER, S. E. An empirical model of a downburst. *Engineering Structures*, n. 22, p. 1167–1172, 2000. Citado 6 vezes nas páginas 33, 58, 59, 60, 61 e 76.

INTERNATIONAL STANDARD. *IEC 60826*: Desing criteria of overhead transmission lines. Switzerland, 2003. Citado 4 vezes nas páginas 69, 70, 71 e 73.

ITURRIOZ, I. *Aplicação do Método dos Elementos Discretos ao Estudo de Estruturas Laminares de Concreto Armado*. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS - BR, 1995. Citado na página 53.

KAMINSKI, J. *Incertezas de modelo na análise de torres metálicas treliçadas de linhas de transmissão*. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS - BR, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 37, 51, 90 e 92.

LANGLOIS, S. *Modelagem e Simulação do Campo de Velocidades do Vento em Tormentas Elétricas*. Tese (Doutorado) — Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montréal, Canadá, 2007. Citado na página 62.

LUZARDO, A. C. *Simulação do Comportamento Dinâmico de Torres de Linhas de Transmissão sob Ação de Ventos Originados de Downburst*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS - BR, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 61 e 67.

MIGUEL, L. F. F. *Critério Constitutivo para o Deslizamento com Atrito ao Longo da Falha Sísmica*. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS - BR, 2005. Citado na página 53.

- MIGUEL, L. F. F.; MIGUEL, L. F. F.; RIERA, J. D.; JR., J. K.; MENEZES, R. C. R. de. Assessment of code recommendations through simulation of eps wind loads along a segment of a transmission line. *Engineering Structures*, v. 43, p. 1–11, 2012. Citado na página 90.
- MIGUEL, L. F. F.; RIERA, J. D. Loads induced on tall structures by thunderstorm winds in temperate latitudes. *Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures*, New York, USA, p. 1–6, 2013. Citado 6 vezes nas páginas 11, 13, 33, 60, 67 e 100.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. *Life Cycle of a Thunderstorm*. 2013. National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponível em: <<http://www.srh.noaa.gov/jetstream/tstorms/life.html>>. Acesso em: 20 jan. 2017. Citado na página 42.
- NETO, W. T. D. *Estruturas de Torres Sob Ação de Ventos Originados de Downbursts*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ - BR, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 43, 61 e 62.
- OSEGUERA, R. M.; BOWLES, R. L. A simple, analytical 3-dimensional downburst model based on boundary layer stagnation flow. *Nasa Technical Memorandum 100632*, p. 1–19, 1988. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 57.
- PONTE, J. *Modelagem e Simulação do Campo de Velocidades do Vento em Tormentas Elétricas*. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS - BR, 2005. Citado 15 vezes nas páginas 11, 13, 42, 60, 69, 74, 76, 77, 78, 79, 85, 86, 87, 89 e 100.
- PONTE, J.; RIERA, J. D. Wind velocity field during thunderstorms. *Wind and Structures*, v. 10, n. 3, p. 1–15, 2007. Citado 8 vezes nas páginas 11, 13, 33, 60, 67, 69, 74 e 100.
- PONTE, J.; RIERA, J. D. Simulation of extreme wind series caused by thunderstorms in temperate latitudes. *Structural Safety*, v. 32, p. 231–237, 2010. Citado 5 vezes nas páginas 33, 67, 86, 87 e 100.
- RIERA, J. D. Sobre a definição do vento para projeto estrutural na abnt nbr 6123 (1989) e outras normas sul americanas. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, Passo Fundo, v. 13, n. 3, p. 1–27, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 38, 46 e 67.

RIERA, J. D.; NANNI, L. F. Polit study of extreme wind velocities in a mixed climate considering wind orientation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 32, p. 11–20, 1989. Citado na página 103.

SANTIAGO BORJA IN THE WHASHINGTON POST. *Pilot captures incredible nighttime thunderstorm photo over the Pacific Ocean*. 2016. Santiago Borja in The Whashington Post. Disponível em: <<https://goo.gl/kgKLzF>>. Acesso em: 05 fev. 2017. Citado na página 41.

SANTOS, M. L. W. dos. *Regionalização das velocidades extremas e temperaturas do vento no centro-sul do Brasil*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS - BR, 1989. Citado 6 vezes nas páginas 17, 39, 87, 100, 101 e 102.

SAVORY, E.; PARKE, G. A. R.; ZEINODDINI, M.; TOY, N.; DISNEY, P. Modelling of tornado and microburst-induced wind loading and failure of a lattice transmission tower. *Engineering Structures*, v. 23, p. 365–375, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 33, 56 e 61.

SHEHATA, A. Y.; DAMATY, A. A. E.; SAVORY, E. Finite element modeling of transmission line under downburst wind loading. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 42, p. 71–89, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 61.

SIMIU, E.; SCANLAN, R. H. *Wind Effects on Structures: Fundamentals and applications to design*. 3. ed. Rio de Janeiro - RJ, Brasil: John Wiley & Sons, Inc., 1996. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

SOLARI, G. Emerging issues and new frameworks for wind loading on structures in mixed climates. *Wind and Structures*, v. 19, n. 3, p. 295–320, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 63.

SORIANO, H. L. *Introdução à Dinâmica das Estruturas*. 1. ed. Rio de Janeiro - RJ, Brasil: Elsevier, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 51.

VICROY, D. D. A simple analytical, axisymmetric microburst model for downdraft estimation. *Nasa Technical Memorandum 104053*, p. 1–13, 1991. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 58.

VICROY, D. D. Assessment of microburst models for downdraft estimation. *Journal of Aircraft*, v. 29, n. 6, p. 1043–1048, 1992. Citado na página 58.

WOOD, G. S.; KWOK, K. C. S. An empirically derived estimate for the mean velocity profile of a thunderstorm downburst. *7th AWES Workshop*, Auckland, 1998. Citado na página 58.

YANG, S. C.; HONG, H. P. Nonlinear inelastic responses of transmission tower-line system under downburst wind. *Engineering Structures*, v. 123, p. 490–500, 2016. Citado na página 66.

ZHU, S.; ETKIN, B. Model of the wind field in a downburst. *Journal of Aircraft*, v. 22, n. 7, p. 595–601, 1985. Citado 3 vezes nas páginas 32, 33 e 57.

APÊNDICE A

Descrição da Torre

A torre de suspensão autoportante tem formato tronco-piramidal denominada “SY”, com 33,4 m de altura e 5 m de abertura da base. Oito diferentes perfis de cantoneira (ASTM A572 grau 50) compõem a torre, que foi modelada como treliça espacial e possui 174 nós e 415 barras. A Figura 47 traz a silhueta e cortes da torre, onde são identificadas as barras. Os perfis correspondentes as barras são encontrados na Tabela 16.

Tabela 16 – Barras e perfis da torre.

Barras	Perfis	Barras	Perfis	Barras	Perfis
M1	L 100X8	E3	L 40X3	D26	L 40X3
M2	L 100X8	E4	L 40X3	D27	L 40X3
M3	L 100X8	E5	L 40X3	D28	L 40X3
M4	L 100X8	E6	L 40X3	D29	L 40X3
M5	L 75X10	D11	L 45X3	F21	L 45X3
M6	L 75X10	D12	L 45X3	F22	L 45X3
M7	L 75X10	D13	L 45X3	F23	L 45X3
M8	L 75X10	D14	L 45X3	F24	L 45X3
M9	L 75X10	D15	L 40X3	F25	L 40X3
M10	L 75X10	D16	L 40X3	F26	L 40X3
M11	L 75X10	D17	L 40X3	F27	L 40X3
M12	L 75X10	D18	L 40X3	F28	L 40X3
M13	L 75X10	D19	L 40X3	B1	L 50X5
M14	L 65X6	F11	L 45X3	B2	L 40X5
M15	L 65X6	F12	L 45X3	B3	L 45X3
M16	L 65X6	F13	L 45X3	B4	L 50X5
M17	L 65X6	F14	L 45X3	B5	L 40X5
M18	L 65X6	F15	L 40X3	B6	L 40X3
M19	L 65X6	F16	L 40X3	B7	L 65X6
C1	L 40X3	F17	L 40X3	MB1	L 65X6
C2	L 40X3	F18	L 40X3	MB2	L 65X6
C3	L 40X3	F19	L 40X3	MB3	L 50X5
C4	L 40X3	D21	L 45X3	BB1	L 50X5
C5	L 40X3	D22	L 45X3	BB2	L 50X5
C6	L 40X3	D23	L 45X3	BB3	L 40X3
E1	L 40X3	D24	L 45X3	BB4	L 40X3
E2	L 40X3	D25	L 40X3	-	-

