



ESTRUTURAS DE TORRES SOB AÇÃO DE VENTOS ORIGINADOS DE DOWNBURSTS

Wilson Torres Damasceno Neto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador(es): Michèle Schubert Pfeil

Ronaldo Carvalho Battista

Rio de Janeiro

Março de 2012

ESTRUTURAS DE TORRES SOB AÇÃO DE VENTOS ORIGINADOS DE
DOWNBURSTS

Wilson Torres Damasceno Neto

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof^a. Michèle Schubert Pfeil, D. Sc.

Prof^o. Ronaldo Carvalho Battista, Ph. D.

Prof^a. Patrícia Habib Hallak, D. Sc

Prof^o. Luís Cláudio Gomes Pimentel, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2012

Damasceno Neto, Wilson Torres

Estruturas de Torres Sob Ação de Ventos Originados de Downbursts / Wilson Torres Damasceno Neto. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XV, 85 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Michèle Schubert Pfeil

Ronaldo Carvalho Battista

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 81-85.

1. Downburst. 2. Tormentas Elétricas. 3. Análise dinâmica. I. Pfeil, Michèle Schubert. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

A minha avó Alice, por prezar sempre pelos estudos dos seus netos.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me guiar pelos caminhos tortuosos dessa vida e pela saúde e perseverança que me foi dada para vencer meus desafios.

À Juliana Chaves Berçot de Mello, pelo companheirismo de todos os momentos, pela compreensão, por sempre me apoiar, me incentivar e acreditar em mim.

Ao meu grande irmão Rodolfo de Lima Paula, companheiro a toda hora, seja no trabalho ou nos estudos, agradeço os conselhos, a paciência e a ajuda dada nos mais difíceis.

Aos meus avós Hermínio Berço de Mello e Neide Berço de Mello, por me acolherem e por cuidarem sempre tão bem de mim.

Aos meus eternos grandes amigos Daniel Lara, Marlon Honório, Téo do Coutto, Daniel Rozadas, Ricardo Brito, Abrahão Fernandes, Janaina Lara, Letícia Nacif, Fabrício Guida, que mesmo distantes nesse momento, jamais eu poderia esquecê-los. Obrigado pela amizade, por me apoiarem e, principalmente, obrigado pela compreensão dada à minha ausência nesta etapa tão importante da minha vida.

Aos amigos da faculdade, Ana Paula Bencardino, Cristiane Azevedo, Monique Martins, Caroline Pitzer, que fizeram parte desta jornada, agradeço a preocupação constante que vocês tiveram com o andamento deste trabalho.

Aos amigos do LabEst, Thiago Grabois, Carlos Rossigali, Eduardo Peldoza, Dimas Rambo, Natasha Amador, Luciane Ribas, Carlos Seruti, pela ajuda e apoio em todos os aspectos.

À equipe da Cessão Onerosa, Paulo Pastore, Carlos Valadão, Fernando Ramires, Ramon Araujo, Cintia Pacheco, Cláudia Tourasse, Ana Carolina, Fábio Valagão, Jessé Lessa, Jose Dalboni, Mariana Santos, Rafael Nascimento, Djalma Santos e Francisca Werneck pelo amparo e por todo o incentivo que me foi dado para a realização deste trabalho.

Aos meus professores orientadores, Michèle Pfeil e Ronaldo Battista, pelo suporte e pelo conhecimento adquirido com eles neste período.

À minha eterna professora, Eliane Maria Lopes Carvalho, por sempre estar presente e pela constante preocupação como o andamento e a conclusão desta dissertação.

À CNPq pelo apoio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTRUTURAS DE TORRES SOB AÇÃO DE VENTOS ORIGINADOS DE DOWNBURSTS

Wilson Torres Damasceno Neto

Março/2012

Orientadores: Michèle Schubert Pfeil

Ronaldo Carvalho Battista

Programa: Engenharia Civil

Devido à extensão das linhas aéreas de transmissão (LT), estas estruturas são particularmente vulneráveis a ação de ventos oriundos de *downbursts*, apontados na literatura como a causa para a queda de torres LT em todo o mundo.

Com base em alguns modelos empíricos disponíveis na literatura, implementou-se neste trabalho um programa computacional para geração das componentes horizontais da velocidade de vento e posterior análise estrutural estática e dinâmica de estruturas de torres de dois exemplos. Nestes exemplos, comparam-se os resultados da ação de um downburst aos da ação de vento originado de ciclone extratropical, conforme adotado em geral pelas normas de projeto. O primeiro exemplo trata de um trecho de linha de transmissão 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. Como segundo exemplo, foi tomada uma estrutura de chaminé de concreto armado de 180m de altura para determinar as suas respostas dinâmicas devidas à turbulência dos ventos. Das análises efetuadas verificou-se que, dependendo da aproximação à estrutura, os *downbursts* podem produzir respostas muito superiores àquelas geradas pelos usuais ventos de projetos, tanto estática quanto dinamicamente.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

TOWER STRUCTURES UNDER THE ACTION OF WINDS CAUSED BY
DOWNBURSTS

Wilson Torres Damasceno Neto

March/2012

Advisors: Michèle Schubert Pfeil
Ronaldo Carvalho Battista

Department: Civil Engineering

Due to its large dimension, transmission lines (TL) are structures particularly prone to high intensity winds such as downbursts, to which are attributed the collapses of TL towers all over the world.

In this work some of the empirical models available in the literature were selected to develop a computational tool to perform a simulation of the wind velocity horizontal component field during a downburst followed by static or dynamic analyses of tower structures. Two examples are presented, both showing comparisons of tower responses due at downbursts and to traditional wind model based on extratropical cyclones as adopted by most design codes. The first example deals with static analyses of tower belonging to a TL stretch aiming to determine the number of tower collapses during a downburst. The second example focuses on the dynamic behavior of a 180m high reinforced concrete chimney under turbulent winds. The results show that, depending on the approaching distance to the structure, downbursts may induce much more severe responses, both static and dynamic, than extratropical cyclones.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	1
1.2	OBJETIVOS	4
1.3	APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	5
2	FENÔMENOS METEOROLÓGICOS QUE ORIGINAM VENTOS FORTES	6
2.1	CICLONES TROPICAIS	6
2.2	CICLONES EXTRATROPICAIS	8
2.3	TORNADOS.....	11
2.4	TORMENTAS ELÉTRICAS (TS)	12
2.4.1	<i>Registro de FUJITA (1985)</i>	<i>15</i>
2.4.2	<i>Registro da Texas Tech University (TTU) e análise dos sinais CHEN e LETCHFORD, 2005, 2006, 2007).....</i>	<i>16</i>
2.4.3	<i>Registro de PALUCH et al (2003).....</i>	<i>20</i>
3	MODELAGEM PARA CAMPO DE VELOCIDADE DE VENTO DURANTE UM DOWNBURST.....	22
3.1	INTRODUÇÃO	22
3.2	MODELO DE ZHU E ETKIN (1983 APUD (PONTE JÚNIOR, 2005))	24
3.3	MODELO DE RIERA E ROCHA (1998 APUD (PONTE JÚNIOR, 2005))	27
3.4	MODELO DE OSEGUERA E BOWLES (1988).....	28
3.5	MODELO DE VICROY (1992 APUD (QU E JI, 2009))	30
3.6	MODELO DE WOOD E KWOK (1998).....	31
3.7	MODELO DE HOLMES E OLIVER (2000)	31
3.8	MODELO DE CHEN E LETCHFORD (2007)	34
3.9	MODELO DE PONTE JÚNIOR (2005)	37
3.10	COMPARAÇÃO DOS PERFIS VERTICAIS.....	40
4	SIMULAÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADE E DAS FORÇAS DE VENTO.....	43
4.1	IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA SUBDOWN.....	43
4.2	PROGRAMA PARA ANÁLISE ESTRUTURAL.....	44
4.3	VALIDAÇÃO DO PROGRAMA SUBDOWN	45
5	EXEMPLOS NUMÉRICOS E RESULTADOS DE ESTRUTURAS SOB AÇÃO DE VENTO DO TIPO DOWNBURST	49
5.1	INTRODUÇÃO	49
5.2	ESTUDO DOS PARÂMETROS DO MODELO DA VELOCIDADE RADIAL (V_R).....	49
5.2.1	<i>Variação de T</i>	<i>50</i>
5.2.2	<i>Variação de $r_{máx}$.....</i>	<i>51</i>

5.2.3	<i>Variação de D</i>	51
5.3	TRECHO DE LINHA DE TRANSMISSÃO COM SETE TORRES	52
5.3.1	<i>Descrição da estrutura e das análises efetuadas</i>	52
5.3.2	<i>Momento de tombamento último</i>	55
5.3.3	<i>Vento de fundo a 90° com o eixo da linha de transmissão</i>	57
5.3.4	<i>Vento de fundo a 45° com o eixo da linha de transmissão</i>	62
5.4	CHAMINÉ COM 180 METROS DE ALTURA	69
5.4.1	<i>Descrição da estrutura</i>	69
5.4.2	<i>Dados para simulação de velocidade de vento</i>	72
5.4.3	<i>Forças devidas a ação do vento</i>	74
5.4.4	<i>Análise do deslocamento da estrutura devido a parcela média da velocidade do downburst</i> 76	
5.4.5	<i>Análise do deslocamento da estrutura devido ao vento downburst</i>	77
6	CONCLUSÃO	79
6.1	COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES	79
6.2	SUGESTÕES PARA PESQUISA FUTURA	80
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

Lista de figuras

Figura 1.1 – Representação esquemática de um <i>downburst</i> (WIKIPEDIA, 2012).	2
Figura 1.2 – Mapa da distribuição de raios por km ² por ano (NASA, 2012a)	2
Figura 2.1 – Mapa da temperatura da superfície do mar. (Adaptado de NASA, 2012b). 7	
Figura 2.2 – Furacão Catarina (NASA, 2012c)	8
Figura 2.3 – Registro de um Anemômetro de uma tormenta EPS. (Adaptado de (HOLMES, 2001)).	9
Figura 2.4 – Foto de um tornado (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2012).	12
Figura 2.5 – Nuvem cumulonimbus (WUNDER GROUND, 2012).	13
Figura 2.6 – Estágios de uma tormenta elétrica (BLESSMANN, 1995).	13
Figura 2.7 – Escoamento descendente. (Adaptado de (FUJITA, 1985)).	14
Figura 2.8 – Registro da velocidade e da direção do vento da Base da Força Aérea de Andrews. (Adaptado de (FUJITA, 1985)).	16
Figura 2.9 – Sete torres e seus locais de observação. (Adaptado de (CHEN e LETCHFORD, 2006)).	17
Figura 2.10 – Histórias de tempo de velocidade do vento da torre 4 do RFD e do derecho, respectivamente, gravados simultaneamente a uma altura de 2, 4, 6, 10 e 15 metros com uma taxa de amostragem de 1,0 Hz. (Adaptado de (CHEN e LETCHFORD, 2005)).	17
Figura 2.11 – Comparação da FDE a 10 metros de altura com o espectro de Harris (Adaptado de (CHEN e LETCHFORD, 2006)).	18
Figura 2.12 – História de tempo completa de velocidade de vento do RFD em 4 de junho de 2002 (a) e o derecho em 15 de junho de 2002 (b), gravados simultaneamente das torres 2 a 6, a 10 metros com uma taxa de amostragem de 1,0 Hz.	19
Figura 2.13 – História de tempo do RFD. (a) Velocidades como foram gravadas; (b) História de tempo filtrada com 40 s de filtro de média móvel; (c) “turbulência” residual obtida pela subtração. (Adaptado de (HOLMES, 2007)).	20
Figura 2.14 – Registro da velocidade do vento de um <i>downburst</i> PALUCH <i>et al.</i> , (2003).	21
Figura 3.1 – Componente vertical e radial da velocidade do vento.	22
Figura 3.2 – Perfis de velocidade V_r de um <i>microburst</i> típico. (Adaptado de (HJELMFELT, 1988)).	24

Figura 3.3 – Representação do modelo do jato descendente de ZHU E ETKIN. (Adaptado de (PONTE JÚNIOR, 2005)).	26
Figura 3.4 – Características básicas de um modelo para uma frente de tempestade. (Adaptado de (PONTE JÚNIOR, 2005)).	27
Figura 3.5 – Histograma de máxima velocidade de vento anual por simulação de tormenta TS. (Adaptado de (PONTE JÚNIOR, 2005)).	28
Figura 3.6 – Exemplo genérico da soma vetorial do vento ambiental com o vento radial do <i>downburst</i> . (Adaptado de (CHEN e LETCHFORD, 2004)).	32
Figura 3.7 – Modelo de perfil radial de velocidade do vento. (Adaptado de (HOLMES e OLIVER, 2000)).	32
Figura 3.8 – Comparação da simulação. (a) Registro da velocidade e direção do vento da BFAA. (Adaptado de (FUJITA, 1985)); (b) Simulação de Holmes. (Adaptado de (HOLMES e OLIVER, 2000)).	34
Figura 3.9 – Esquema da tormenta elétrica (PONTE JÚNIOR, 2005).	37
Figura 3.10 – Representação das componentes da velocidade tangencial e da linha de corrente (PONTE JÚNIOR, 2005).	38
Figura 3.11 – Comparação entre três modelos para perfis verticais de velocidade média do vento. (Adaptado de (CHEN e LETCHFORD, 2004)).	41
Figura 3.12 – Comparação dos perfis verticais de velocidade média do vento para diferentes distâncias radiais r . (a) $r = 100\text{m}$; (b) $r = 200\text{m}$; . (c) $r = 1211\text{m}$. (PONTE JÚNIOR, 2005).	41
Figura 4.1 – Modelo esquemático do <i>downburst</i> e seu caminho em direção a torre de transmissão. (Adaptado de (SAVORY, 2001)).	45
Figura 4.2 – Validação com o modelo de SAVORY (2001). (a) Resultado de SAVORY (2001); (b) Resultado do programa SubDown.	46
Figura 4.3 – Comparação entre perfil vertical de WOOD e KWOK (1998) e de SAVORY (2001).	47
Figura 4.4 – Validação com a reprodução do registro da BFAA por HOLMES e OLIVER (2000). (a) Reprodução do registro da BFAA (HOLMES e OLIVER, 2000); (b) Reprodução dos resultados realizada no programa SubDown.	48
Figura 5.1 – Aspecto da variação de V_r ao longo do tempo.	50
Figura 5.2 – Caminho de um <i>downburst</i> típico em direção a um ponto de análise.	50
Figura 5.3 – Variação do parâmetro T. (a) $T = 200\text{s}$; (b) $T = 600\text{s}$.	51
Figura 5.4 – Variação do parâmetro $r_{m\acute{a}x}$. (a) $r_{m\acute{a}x} = 1000\text{m}$; (b) $r_{m\acute{a}x} = 2000\text{m}$.	51

Figura 5.5 – Variação do parâmetro D. (a) D = 1500m; (b) D = 3000m	52
Figura 5.6 – Esquema estrutural adotado para análise. (Adaptado de (RODRIGUES, 1999)).	53
Figura 5.7 – Silhueta da torre (dimensões em metros). (Adaptado de (RODRIGUES, 1999)).	53
Figura 5.8 – Modelo esquemático da região da análise.....	54
Figura 5.9 – Projeção do tronco de pirâmide no plano vertical (cotas em metros), Battista (2010, 2011).	55
Figura 5.10 – Modelo esquemático do <i>downburst</i> se movimentando a 90° em relação ao eixo Y (cotas em metro).	57
Figura 5.11 – Componente x da velocidade horizontal do vento no topo das torres (altura z = 32,8 metros).	58
Figura 5.12 – Perfil de velocidade ao longo da altura para vento EPS e vento <i>downburst</i> nas torres de 1 a 7 no instante de velocidade máxima (aproximadamente t = 160s na Figura 5.11).	59
Figura 5.13 – Modelo esquemático do <i>downburst</i> se movimentando a 45° do eixo Y (cotas em metro).	62
Figura 5.14 – Componente x da velocidade horizontal do vento.	63
Figura 5.15 – Perfil de velocidade ao longo da altura para vento EPS e vento <i>downburst</i> nas torres de 1 a 7 no instante de velocidade máxima (aproximadamente t = 120s na Figura 5.14).	64
Figura 5.16 – Relato das quedas de 9 torres em São Pedro do Iguaçu (LIMA, 2005)...	69
Figura 5.17 – Modelo esquemático do exemplo de Chaminé	70
Figura 5.18 – Velocidade média do <i>downburst</i> reproduzido para o registro da BFAA no item 4.3.	73
Figura 5.19 – Flutuação do vento ao longo do tempo de uma EPS gerada pelo programa TurbHarris a um ponto situado a 180 m do solo.	74
Figura 5.20 – Flutuação do vento ao longo do tempo de um <i>downburst</i> gerada pelo programa SubDown a um ponto situado a 180 m do solo.....	74
Figura 5.21 – Deslocamento ao longo do tempo do <i>downburst</i> reproduzido para o registro da BFAA no item 4.3.	76
Figura 5.22 – Deslocamento da chaminé ao longo do tempo para flutuação de vento gerada através do TurbHarris.	77
Figura 5.23 – Deslocamento da chaminé ao longo do tempo para um <i>downburst</i>	78

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Modelos encontrados na literatura.....	24
Tabela 3.2 – Parâmetros utilizados por CHEN e LETCHFORD (2004).....	40
Tabela 4.1 – Modelos utilizados no programa SubDown	43
Tabela 5.1 – Momento na base das torres de 1 a 7 para ação de vento de projeto segundo a NBR 6123 com $V_0 = 41$ m/s, $S_1 = 1,0$, $S_3 = 1,10$	56
Tabela 5.2.a – Momento na base das torres 1 e 7 para ação do <i>downburst</i> no instante em que a velocidade V_x é máxima.....	59
Tabela 5.3 – Resumo dos momentos nas bases das torres de 1 a 7 para um vento de fundo a 90° da linha de transmissão.	61
Tabela 5.4.a – Momento na base da torre 1 para ação do <i>downburst</i> no instante em que a velocidade V_x é máxima.	64
Tabela 5.5 – Resumo dos momentos nas bases das torres de 1 a 7 para um vento de fundo a 45° do eixo y.....	68
Tabela 5.6 – Características dos elementos da chaminé.....	71
Tabela 5.7 – Massas concentradas e forma modal.	71
Tabela 5.8 – Valores das intensidades de turbulência	73
Tabela 5.9 – Dados para cálculo das forças de vento.....	75
Tabela 5.10 – Forças nodais no instante de tempo do pico máximo de deslocamento.	76
Tabela 5.11 – Coeficiente de amplificação dinâmica.....	78

Lista de símbolos

$C1$	Constante do modelo de Vicroy
$C2$	Constante do modelo de Vicroy
D_s	Diâmetro da tempestade do modelo de Zhu e Etkin
erf	Função erro
g	Aceleração da gravidade
H_c	Altura do solo ao centro da nuvem
H_s	Altura da superfície da área de origem tempestade
I_v	Intensidade de turbulência variável no tempo
I_v^*	Intensidade de turbulência de vento da “tradicional” camada limite
I_{v10}	Intensidade de turbulência a 10 metros de altura do solo.
P	Pressão
R	Escala de comprimento radial
r	Distância do centro da nuvem ao ponto de interesse
r_p	Raio onde a velocidade máxima é atingida
$r_{V_{max}}$	Raio correspondente ao ponto de máxima velocidade de vento radial
S	Superfície da área da tempestade do modelo de Zhu e Etkin
t	Tempo
S_v	Funções de densidade espectral cruzada
T	Duração característica da tormenta
U	Sinal de velocidade dos ventos originados de ciclones extratropicais
\bar{U}	Valor médio de U
u	Velocidade flutuante em torno de \bar{U}
v	Velocidade de vento flutuante normalizada
V	Velocidade radial
\bar{V}	Velocidade média variada ao longo do tempo
\tilde{V}	Velocidade flutuante induzida pela turbulência.

V_a	Componente axial da velocidade tangencial
V_o	Vento de fundo
$V_{r,m\acute{a}x}$	M\acute{a}xima velocidade radial de um <i>dowburst</i>
V_r	Componente radial da velocidade tangencial
V_t	Velocidade tangencial de um <i>dowburst</i>
V_w	Campo de velocidade de um <i>dowburst</i>
V_x	Componente x do campo de velocidade do campo de velocidade
V_y	Componentes y do campo de velocidade do campo de velocidade
V_z	Componentes z do campo de velocidade do campo de velocidade
x	Dist\ancia radial a partir do centro da tormenta
X_1	Frequ\encia adimensionalizada
$x_{m\acute{a}x}$	Dist\ancia na qual ocorre $V_{r,m\acute{a}x}$
z	Altura acima do solo (m)
z^*	Altura caracter\istica fora da camada limite
z_m	Altura em que a velocidade m\acute{a}xima \e atingida
$\bar{z}_{V_{max}}$	Altura correspondente a m\acute{a}xima velocidade radial
α	Constante do modelo de Vicroy
δ	Altura onde V_r \e a metade de $V_{r,m\acute{a}x}$
ε	Altura caracter\istica dentro da camada limite
η	Coordenada η de um diferencial da \e area
λ	Fator de escala
ξ	Coordenada ξ de um diferencial da \e area
ρ	Massa espec\ifica do ar
σ	Fun\c\ao de distribui\c\ao da intensidade da tempestade
$\tilde{\sigma}$	Desvio padr\ao vari\avel
$\bar{\phi}$	Perfil vertical de velocidade
ψ_u	Fun\c\ao de co-espectro normalizado

1 Introdução

1.1 Motivação do trabalho

O estudo dos ventos oriundos de tormentas elétricas teve início nos EUA através do Dr. Tetsuya Theodore Fujita, professor da Universidade de Chicago, que identificou o fenômeno denominado “*downburst*” (CHAY, 2001).

Em 3-4 de abril 1974, durante suas pesquisas aéreas sobre danos associados a tornados, Fujita não só identificou os padrões normais de redemoinho de árvores caídas, como também observou padrões estranhos de árvores desenraizadas que indicavam fortes ventos divergentes (CHAY, 2001).

Em 24 de junho de 1975, um Boeing 727, caiu ao tentar pousar em Nova York, no Aeroporto Internacional John F. Kennedy (JFK), matando 112 e ferindo 12 pessoas. Após analisar os dados de voo gravados da aeronave, os relatórios dos pilotos e o anemômetro do aeroporto, a hipótese de Fujita foi de que o avião teria voado através de um sistema de ventos divergentes semelhante ao que ele observou durante sua análise em 3-4 de abril 1974 (CHAY, 2001). FUJITA (1985), então, intitulou este fenômeno de *downburst* e o definiu como “uma forte coluna densa de ar frio descendente (*downdraft*) que induz a uma forte explosão de ventos divergentes (*outburst*) no chão ou perto dele”. A Figura 1.1 ilustra o fenômeno de maneira esquemática.

Esse fenômeno só pode ocorrer na presença de nuvens do tipo cumulonimbus, que dão origem a tormentas elétricas caracterizadas por intensas descargas acompanhadas de fortes pancadas de chuva e ventos de atuação localizada, granizo, e por muitas vezes, tornados. Algumas evidências da presença desse fenômeno no território brasileiro são fornecidas pela NASA - *National Aeronautics and Space Administration*, dos Estados Unidos, que apresenta um mapa (Figura 1.2), indicando as contagens anuais médias de descargas elétricas por quilômetro quadrado, com base em dados coletados por satélites entre 1995 e 2002. Locais onde ocorreram menos de um relâmpago (em média) a cada ano estão representados por cores cinza ou roxa. As cores em vermelho e preto representam os lugares com maior número de relâmpagos. Como se pode ver nesse mapa, existe uma contagem elevada de descargas elétricas em grande parte do território brasileiro, em especial, no leste dos Estados do Paraná e São Paulo.

Em geral, as normas técnicas sobre ação de vento em estruturas não contemplam esse tipo de evento, admitindo que todos os ventos sejam oriundos de sistemas de ciclones extratropicais. Neste modelo, o vento é caracterizado por um escoamento horizontal em equilíbrio, no qual a velocidade média a uma determinada altura sobre o solo é constante e depende do perfil de rugosidade do terreno.



Figura 1.1 – Representação esquemática de um *downburst* (WIKIPEDIA, 2012).

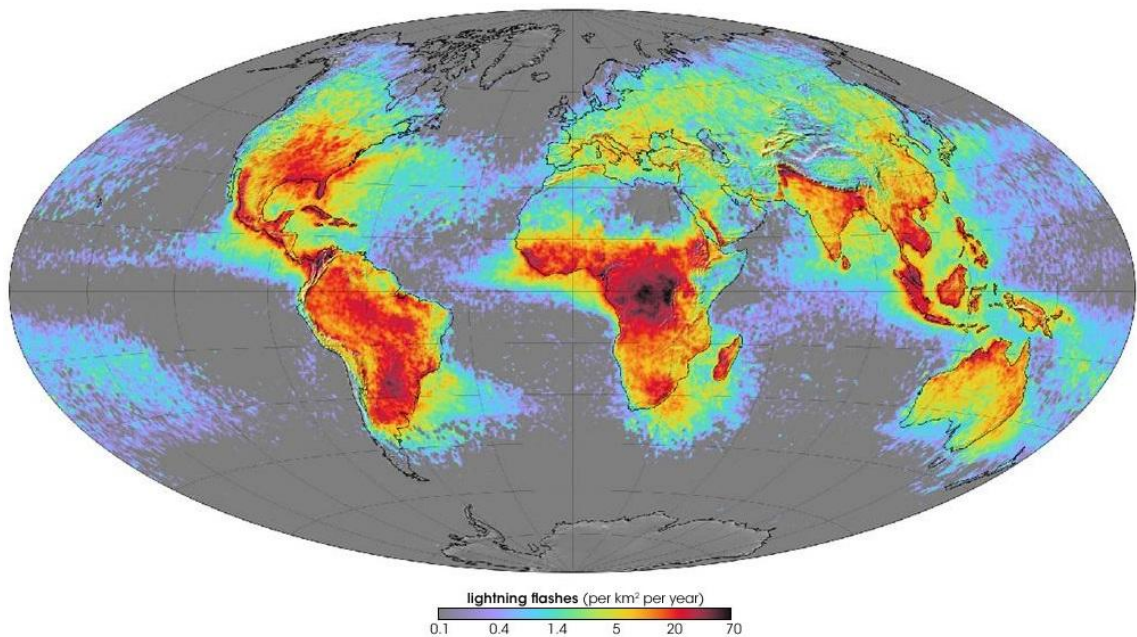


Figura 1.2 – Mapa da distribuição de raios por km² por ano (NASA, 2012a)

Em particular, as estruturas de linhas aéreas, por sua extensão, exposição e variações topográficas, se mostram vulneráveis à ação de ventos originados de tormentas elétricas, tais como *downbursts* e tornados. Grupos de estudos do CIGRÉ – *International Council on Large Electric Systems* – realizaram em 2004 e em 2008 (CIGRÉ, 2004, CIGRÉ, 2008) pesquisas sobre diretrizes das normas de projeto de estruturas de linhas aéreas em mais de duas dezenas de países (incluindo o Brasil) referentes a ação destes ventos. Em 2004, as normas dos países pesquisados não apresentaram diretrizes sobre o assunto. Já em 2008, foram registradas recomendações específicas para estes ventos nas normas de países como Austrália, Estados Unidos, Argentina, África do Sul e Canadá.

LIMA *et. al.*, (2004a, 2004b) apresentaram em 2004 estudos de casos de quedas de torres de linhas de transmissão no Brasil, relacionadas à ocorrência de tempestades severas através de descrição observacional dos eventos abordando as condições de tempo observado em escala sinótica e em mesoescala por meio de imagens de satélite, detecção de descargas elétricas e imagens de radar meteorológico. Estas observações indicaram a presença de nuvens cumulonimbus na dianteira de sistemas frontais (frentes frias) avançando pelos estados de Paraná e São Paulo, a ocorrência de chuvas intensas e a presença de granizo nos locais de queda das torres. Estas evidências sugerem que as quedas das torres se devem à ocorrência de *downburst*.

Em sequência às observações de Fujita, iniciaram-se projetos de coleta de dados meteorológicos sobre *downbursts*, dentre estes o projeto JAWS - *Joint Airport Windshear Studies* em 1982. Os dados coletados foram analisados por HJELMFELT (1988) que apresentou uma detalhada descrição dos “*microbursts*”. Ele concluiu que o modelo de um jato de ar sobre uma superfície plana (*wall jet model*) caracterizava bem os perfis da componente horizontal da velocidade de vento ao longo da altura e da distância radial em relação ao centro do jato. Este modelo é base teórica para simulações de *downburst* em experimentos de túnel de vento (WOOD e KWOW, 1998, CHOI, 2004, SENGUPTA e SARKAR, 2008) e simulações com modelos numéricos e com fluido-dinâmica-computacional (SHEHATA *et al.*, 2005, LI *et al.*, 2009, MASON *et al.*, 2009). Estas simulações e principalmente os numerosos registros de velocidade de vento em *downbursts* são utilizadas para ajustes de modelos empíricos.

Do ponto de vista estrutural há interesse na descrição da componente horizontal da velocidade de vento. Diferentes modelos empíricos têm sido propostos na literatura para caracterizar esta componente de velocidade em termos de sua variação em relação à

altura, distância radial, tempo, além de propriedades estatísticas da turbulência. HOLMES e OLIVER (2000), por exemplo, propuseram um modelo empírico no qual a componente horizontal da velocidade de vento é a soma vetorial da velocidade de deslocamento da tormenta e da velocidade radial resultante do jato de ar sobre uma superfície.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo principal fazer a análise de estruturas de torres de linhas aéreas ou não, sob ação de *downburst* e comparação dos resultados para ação de vento conforme abordado pelas normas brasileiras de projeto. Os objetivos específicos são listados a seguir:

- Realizar um estudo dos modelos disponíveis na literatura para caracterizar a componente horizontal da velocidade de vento em *downburst*;
- Selecionar um conjunto de modelos e implementar um programa computacional, capaz de gerar o campo de velocidades de vento de um *downburst*. Este programa foi denominado SubDown;
- Validação do programa SubDown através de comparação a medições de velocidade de vento oriundas de *downburst* disponíveis na literatura e a análises de outros autores;
- Acoplar o programa SubDown a um programa de análise estática e dinâmica de estruturas e efetuar análises de dois exemplos;
- Comparar resultados das análises para ação de *downburst* e vento segundo o modelo adotado nas normas de projeto.

Tendo realizado o estudo bibliográfico e a escolha do conjunto de modelos, pretende-se desenvolver o programa numérico SubDown, baseado em linguagem Fortran, capaz de gerar um campo de velocidades de vento de um *downburst* em movimento ao longo do tempo.

Para uma compreensão melhor das características deste fenômeno, será efetuada duas análises comparativas para ação de ventos relativos aos da norma de projeto e ao *downburst*. A primeira análise tem como objetivo avaliar a dimensão que esse tipo de evento pode alcançar. Um trecho real de linhas de transmissão foi reproduzido em um modelo numérico utilizando o programa SubDown. Neste modelo, um *downburst* é deslocado através do trecho de linhas e, por meio das velocidades adquiridas, será feito

um modelo simplificado de cálculo para avaliar os esforços nas torres de transmissão. Para a segunda análise, pretende-se fazer um estudo mais aprofundado sobre a influência de ventos oriundos de *downburst* em estruturas civis. Acoplando então o programa SubDown como sub-rotina de um programa de análise estática e dinâmica, desenvolveu-se um modelo numérico de uma chaminé 180 metros de altura, com a finalidade de obter a resposta da estrutura ao longo do tempo.

Ao fim desse trabalho, pretende-se chegar a uma conclusão sobre os efeitos dos ventos causados por *downburst* e saber se este deve ser considerado na norma técnica brasileira de ventos. Também será abordada uma proposta para futuros prosseguimentos desse trabalho.

1.3 Apresentação do trabalho

O capítulo 2 contém a descrição de alguns tipos de fenômenos meteorológicos que originam ventos fortes, classificados por suas dimensões entre macroescala, mesoescala e microescala.

O capítulo 3 apresenta uma revisão da literatura, enumerando os modelos estudados e definindo qual adotado para a elaboração do programa utilizado neste trabalho e o motivo dessa escolha.

O capítulo 4 descreve a validação do programa desenvolvido neste trabalho, por meio de estudos de autores encontrados na literatura e também através de uma reprodução de um registro de velocidade do vento de um *downburst* obtido por um anemômetro.

O capítulo 5 apresenta um estudo paramétrico dos parâmetros do modelo da velocidade do vento reproduzida pelo programa desenvolvido neste trabalho. Apresenta também uma simulação do campo da velocidade radial de vento de um *downburst* em uma região com torres de linhas de transmissão. Desta forma, pretende-se avaliar a dimensão da área de influência que esse tipo de vento pode atingir. Além disso, fornece a descrição do modelo estudado neste trabalho, detalhando as características da estrutura e do vento e fazendo uma análise mais completa da resposta da estrutura no tempo. Por fim será apresentada uma discussão dos resultados obtidos.

Finalmente, o capítulo 6 contém as conclusões deste estudo com indicações e recomendações sobre a direção de futuras pesquisas nesta área.

2 Fenômenos meteorológicos que originam ventos fortes

A principal causa dos ventos naturais é a diferença de pressão atmosférica decorrente das variações de temperatura do ar aquecido pela energia solar. Os sistemas meteorológicos, que dão origem a ventos de superfície de alta velocidade, são tratados como tormentas, independente de seu mecanismo de formação. Os tipos mais comuns de tormentas são ciclones tropicais, ciclones extratropicais, tormentas elétricas e tornados (BLESSMANN, 1995).

Os ciclones têm diâmetros típicos da ordem de 1000 km e duração de até vários dias. Já as dimensões espaciais típicas das tormentas elétricas não costumam ultrapassar 24 km, enquanto que os tornados têm diâmetro médio de 300 metros e podem percorrer extensões de até 30 km.

Apresenta-se neste capítulo uma breve descrição de cada uma destas tormentas com ênfase nos ventos *downburst* originados de tormentas elétricas.

2.1 Ciclones tropicais

A formação dos ciclones tropicais ocorre sobre os oceanos em região tropical onde a temperatura da água seja superior a 26° Celsius, entre as latitudes 5° e 30° do globo terrestre, onde a força de Coriolis começa a ser significativa, podendo dar início ao movimento circulatório de ar. Neste movimento, o ar quente e úmido é levado para o centro da circulação, forçando a ascensão do mesmo, até expandir-se e esfriar-se. Com isto grande quantidade de vapor d'água, contido na massa de ar, é condensado. Este processo continua enquanto houver uma fonte de ar quente e úmido. Essa continua condensação libera grande quantidade de energia provocando ventos de grande intensidade (BLESSMANN, 1995).

Os ciclones tropicais são chamados de tormenta tropical quando a velocidade do vento junto ao solo atinge cerca de 70 km/h. Para velocidades superiores a 120 km/h, o ciclone passa a ser chamado de tufão ou furacão, dependendo do oceano em que é formado.

No hemisfério norte, os ciclones ocorrem com bastante frequência. Já no hemisfério sul, a frequência maior se dá nos oceanos Índico e Pacífico, sendo pouco frequente no oceano Atlântico, já que a temperatura da água do mar no hemisfério sul é inferior a 26° Celsius. Este fato limita a evaporação e a alimentação do ciclone no estágio de

formação e facilita a dissipação desse fenômeno. A Figura 2.1 ilustra um mapa da temperatura média do mar em graus Celsius, colhido em maio de 2001 pela NASA. As cores vermelha e amarela indicam temperaturas mais quentes, a verde é um valor intermediário, enquanto que as cores azul e roxo são valores progressivamente mais frias.

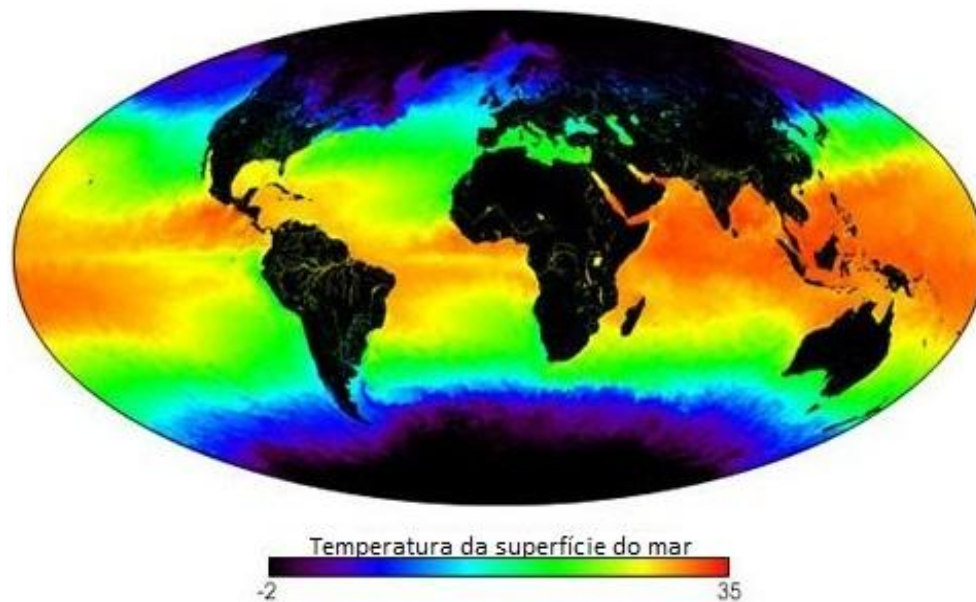


Figura 2.1 – Mapa da temperatura da superfície do mar. (Adaptado de NASA, 2012b).

Em virtude do aquecimento global, decorrente do efeito estufa, um raro ciclone tropical se formou no Atlântico Sul e moveu-se, entre os dias 23 e 28 de março de 2004, em direção a costa brasileira, causando grande destruição e mortes no sul do Brasil, em especial em Santa Catarina. O fenômeno foi nominado de Catarina e é mostrado na Figura 2.2, em uma foto tirada pela NASA.

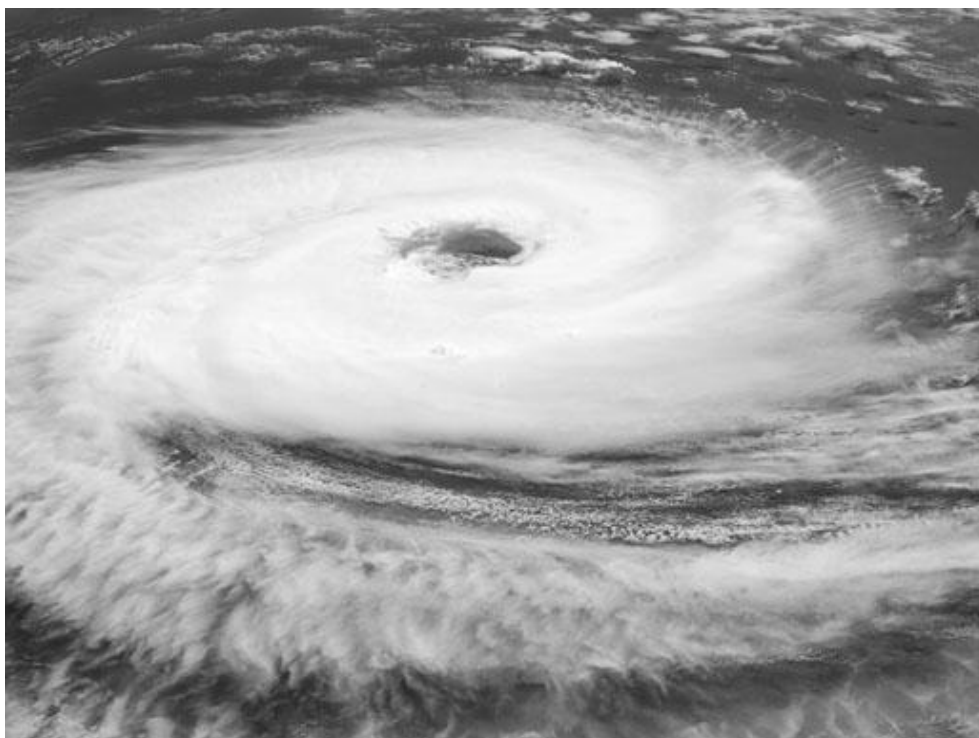


Figura 2.2 – Furacão Catarina (NASA, 2012c)

2.2 Ciclones extratropicais

Ocorrem devido ao efeito mecânico de cadeias de montanhas sobre correntes atmosféricas de grandes dimensões ou pela interação de massas de ar ao longo das frentes frias. Ciclones extratropicais compõem os fenômenos mais frequentes a ocasionarem ventos fortes em latitudes temperadas. Recebem o nome de sistemas de pressão plenamente desenvolvidos ou tormentas EPS (*extended pressure systems*) quando se encontram seu estágio “maduro”.

As tormentas EPS produzem ventos em equilíbrio dinâmico com a rugosidade da superfície terrestre, daí a denominação ventos de camada limite. Estes ventos podem manter velocidade e direção relativamente constantes por várias horas como mostrado na Figura 2.3, ou até alguns dias, e são os ventos mais estudados e melhor conhecidos.

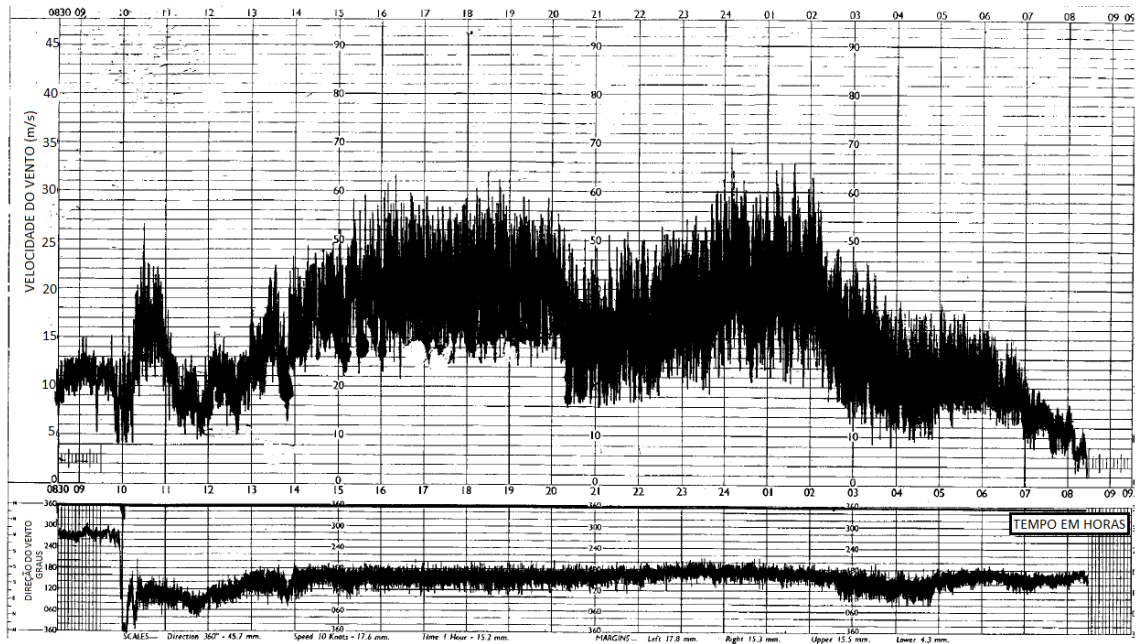


Figura 2.3 – Registro de um Anemômetro de uma tormenta EPS. (Adaptado de (HOLMES, 2001)).

Os sinais de velocidade dos ventos $U(t)$ originados de ciclones extratropicais podem ser decompostos em um valor médio \bar{U} (constante) e um sinal de velocidade flutuante $u(t)$ em torno de \bar{U} , de modo que:

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \quad (2.1)$$

Além disso, existem componentes flutuantes em duas direções ortogonais à direção principal do vento.

A velocidade média varia ao longo da altura acima do solo em função do perfil de rugosidade do terreno. A lei potencial e a lei logarítmica são as funções de perfil vertical mais utilizadas na literatura. De origem empírica, a lei potencial, dada pela equação (2.2), relaciona as velocidades médias em duas alturas z e z_{ref} :

$$U(z) = \bar{U}(10) \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (2.2)$$

As flutuações de velocidade em torno do valor médio se originam dos vórtices e turbilhões causados essencialmente pela interação mecânica entre o escoamento e a superfície da terra.

As velocidades flutuantes são tradicionalmente tratadas como processos aleatórios estacionários e ergódicos, sendo caracterizadas por funções de densidade espectral S e

pelos seus desvios padrão σ . Define-se intensidade de turbulência, por exemplo da velocidade flutuante u , por:

$$I_u = \sigma_u / \bar{U} \quad (2.3)$$

onde:

- σ_u é o desvio padrão de u .

Um exemplo de função de densidade espectral S_u bastante utilizada é o espectro de Harris, apresentado em formato adimensional como se segue:

$$f \frac{S_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{0,6X_1}{(2 + X_1^2)^{5/6}} \quad (2.4)$$

onde:

- X_1 é a frequência adimensionalizada.

$$X_1 = \frac{fL}{\bar{U}(10)} \quad (2.5)$$

Sendo L independente da altura e tomando igual a 1800 metros em função de ajustes a dados experimentais.

A função de correlação cruzada descreve a interdependência entre sinais de velocidade flutuante em dois pontos. Quanto maior a proximidade entre esses pontos, maior a correlação dos sinais. A parte real da função de densidade espectral cruzada é dada por:

$$S_{u_i, u_j} = \sqrt{S_{u_i}(f)} \sqrt{S_{u_j}(f)} \psi_u(\Delta r, f) \quad (2.6)$$

sendo:

- $\psi_u(\Delta r, f)$ a função de co-espectro normalizado:

$$\psi_u(\Delta r, f) = \exp \left[- \frac{f \sqrt{C_y^2 (y_j - y_i)^2 + C_z^2 (z_j - z_i)^2}}{\bar{U}_m} \right] \quad (2.7)$$

onde:

- $(y_j - y_i)$ e $(z_j - z_i)$ são respectivamente as coordenadas dos pontos i e j ;
- C_y e C_z são coeficientes de decaimento, obtidos experimentalmente. Na falta de ensaios experimentais, são adotados valores conservadores para C_y e C_z respectivamente iguais a 16 e 10 (DAVENPORT, 1961).

Em geral as normas de projeto que abordam a ação do vento em estruturas consideram este tipo de vento “bem comportado” para definir os valores de velocidade de vento a serem tomados para cálculo das forças aerodinâmicas, além dos procedimentos para análise dinâmica das estruturas sob ação de vento turbulento.

O tratamento da velocidade flutuante u como processo aleatório e ergódico e a linearização das forças aerodinâmicas em relação a u permitem que as análises dinâmicas das estruturas sejam realizadas no domínio da frequência com base na teoria de vibrações aleatórias e no método do fator de rajadas proposto por DAVENPORT (1961).

2.3 Tornados

Os tornados são movimentos ciclônicos em forma de funil vertical. São gerados em grandes nuvens convectivas de tormentas elétricas e concentram grande energia em uma pequena região. O diâmetro típico de um tornado é da ordem de 300 metros, mas pode variar entre 100 até 3000 metros e a velocidade horizontal do vento pode ser superior a 110 m/s (396 km/h). A extensão vertical geralmente depende da altura da nuvem e pode ser da ordem de 300 a 3000 metros (BLESSMANN, 1995).

O desenvolvimento de um tornado inicia a partir de duas condições meteorológicas que são as fortes células convectivas, geralmente tormentas elétricas frontais e os ventos fortes no topo da célula. A inércia de um vento forte agindo no topo de uma célula atrai o ar para cima, reduzindo a pressão estática no núcleo da célula, uma força centrífuga lança o ar para longe do centro de rotação gerando de cima para baixo uma nuvem em forma de funil dando início a um movimento circulatório.

O núcleo também funciona como uma chaminé onde ocorrem correntes ascendentes de ar com velocidades entre 150 a 300 km/h. Os tornados podem se formar isoladamente ou em grupos. Uma única nuvem pode originar dezenas de tornados.



Figura 2.4 – Foto de um tornado (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2012).

2.4 Tormentas elétricas (TS)

As tormentas elétricas são caracterizadas por uma atmosfera verticalmente instável. O gradiente térmico vertical provoca um violento movimento de ar para o mesmo sentido com formação de nuvens chamadas de cumulonimbus.

Uma nuvem cumulonimbus atinge em média 15 km de altitude, estando a base da nuvem em torno de 1 a 3 km acima da superfície e apresentando tipicamente um diâmetro de 10 a 20 km. Distingue-se dos outros tipos de nuvens por seu tamanho e grande extensão vertical, pela presença de gotículas de água superesfriadas, pela formação de gelo em elevadas altitudes (acima de 5-6 km) e por apresentarem fortes correntes verticais de ar (MACGORMAN e RUST, 1998, RAKOV e UMAN, 2003).

São formadas por gotas d'água, cristais de gelo, flocos de neve e granizo. A força que movimenta o ar na direção ascendente pode ser oriunda de vários motivos, dentre eles, um aquecimento da superfície terrestre, um movimento de ar subindo encostas de montanhas, uma diferença de temperatura entre a terra e o mar ou uma frente fria.

A Figura 2.5 mostra a foto de uma nuvem cumulonimbus em cima do continente africano tirada pela NASA.



Figura 2.5 – Nuvem cumulonimbus (WUNDER GROUND, 2012).

As tormentas elétricas se desenvolvem em três estágios, ilustrados na Figura 2.6:

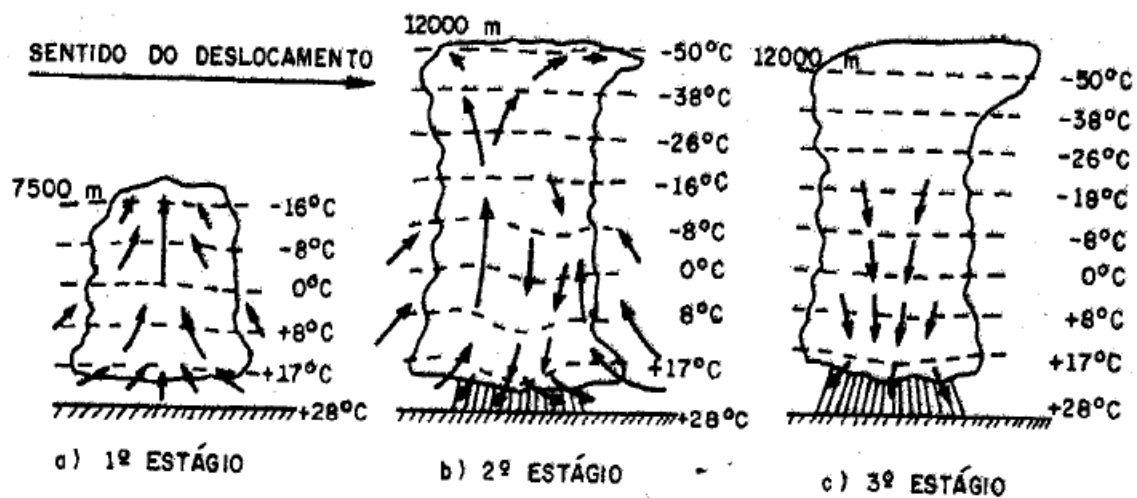


Figura 2.6 – Estágios de uma tempestade elétrica (BLESSMANN, 1995).

- **Primeiro estágio:** eleva-se o ar quente e úmido a uma altura de aproximadamente 8 km, com formação de nuvens cúmulos. Neste estágio, a temperatura do ar circundante é menor que a do ar ascendente.
- **Segundo estágio:** é onde ocorre a transformação da nuvem cúmulo em uma cumulonimbus, a uma altura de 12 km ou mais. A temperatura da nuvem é

maior do que a do ar circundante, formando elementos de cristais de neve e partículas de gelo que precipitam. A intensidade de precipitação aumenta devido ao resfriamento do ar que ocorre em função da queda desses elementos, havendo formação de correntes descendentes pelo atrito dos elementos com o ar. Essas correntes descendentes atingem o solo bruscamente e são acompanhadas de chuva torrencial. Este estágio dura entre 5 a 30 minutos.

- **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 acaba.

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.

As tormentas elétricas desenvolvidas são responsáveis pelo escoamento descendente de ar. O escoamento descendente consiste num rápido jato de ar que desce verticalmente. Quando este escoamento atinge o solo, o jato converte-se em um escoamento radial, encabeçado por um vórtice ao redor do *downburst*, formando um anel (*ring vortex*) como mostra a Figura 2.7.

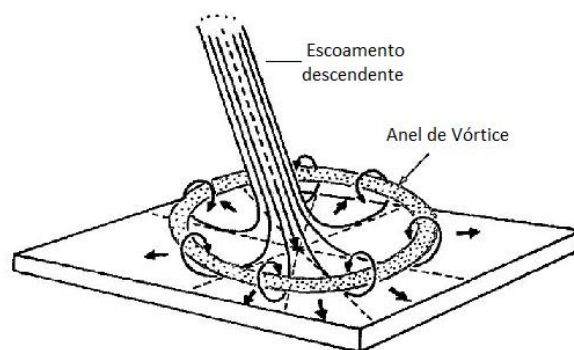


Figura 2.7 – Escoamento descendente. (Adaptado de (FUJITA, 1985)).

As nuvens cumulonimbus podem ser transportadas pela circulação dos ventos da região em que ela se encontra. Esse tipo de vento é chamado por muitos autores de “vento de fundo” ou “vento ambiental”. Ele é caracterizado por ter a velocidade e a direção constantes por toda região da tormenta elétrica.

Fujita subdividiu os escoamentos descendentes de um *downburst* em macroescoamentos (*macrobursts*) e microescoamentos (*microbursts*). Os macroescoamentos estendem-se por áreas superiores a 4 km de diâmetro (mesoescala) e seus ventos duram de 5 a 30

minutos podendo chegar a uma velocidade máxima de 216 km/h. Os microescoamentos estendem-se por áreas inferiores a 4 km de diâmetro e seus ventos duram de 5 a 15 minutos podendo atingir uma velocidade máxima de 270 km/h (FUJITA, 1985).

2.4.1 Registro de FUJITA (1985)

A Figura 2.8 mostra o primeiro registro de velocidade do vento de um *downburst* na Base Aérea do Aeroporto de John Kennedy, em 1983, obtido por um anemômetro a 4,9 metros do solo (FUJITA, 1985). Nesta figura o eixo horizontal apresenta o tempo medido em minutos da direita para a esquerda e na sua parte inferior tem-se o registro da direção do vento. Observa-se a curta duração do registro (em torno de 20 minutos), assim como a rápida variação de direção do vento durante a passagem da tormenta pela estação meteorológica. De acordo com esta figura, nos minutos que antecedem o primeiro pico de velocidade, nota-se a ocorrência de vento com velocidade média de 15m/s, que é a velocidade de transporte da tormenta ou velocidade de fundo. Após o registro do primeiro pico de velocidade ($67 \text{ m/s} \cong 241 \text{ km/h}$), observa-se a passagem do “olho” do fenômeno (a exemplo do olho do furacão) com baixas velocidades em cerca de 2 minutos. Em seguida, a velocidade apresenta um novo pico, passando de 15 m/s (54 km/h) a 43 m/s (155 km/h) em apenas 1 minuto, com variação de 180° na direção do vento. Observa-se que o primeiro pico de velocidade é maior que o segundo; isto se deve ao deslocamento da tormenta com velocidade de fundo.

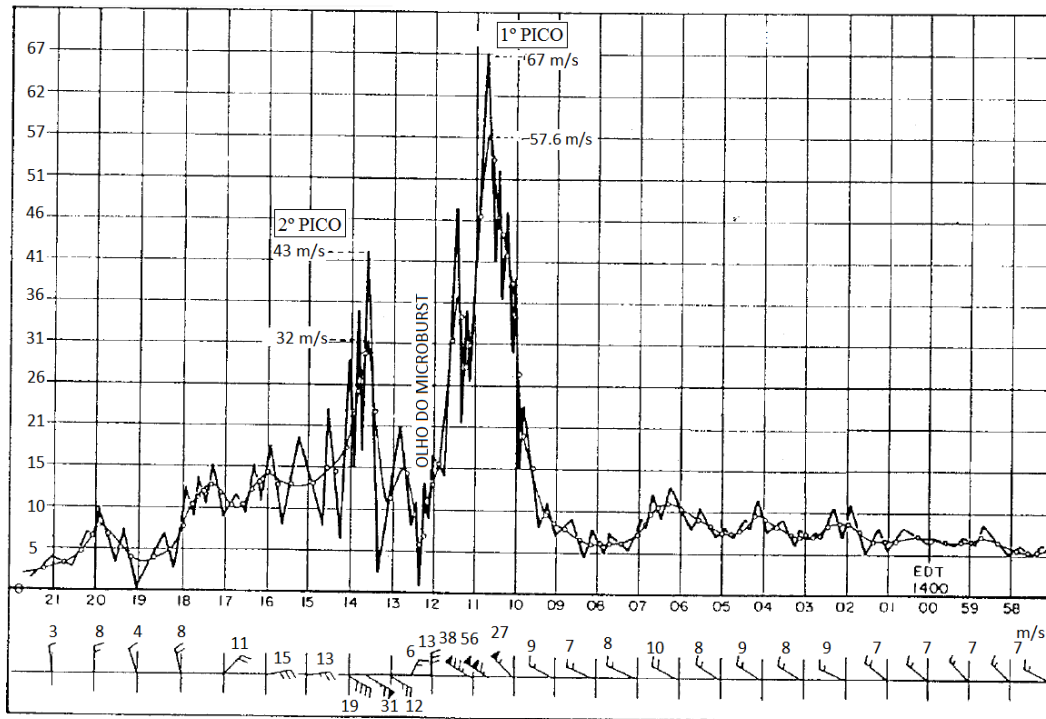


Figura 2.8 – Registro da velocidade e da direção do vento da Base da Força Aérea de Andrews. (Adaptado de (FUJITA, 1985)).

2.4.2 Registro da Texas Tech University (TTU) e análise dos sinais CHEN e LETCHFORD, 2005, 2006, 2007)

Com o objetivo de coletar dados sobre o vento originado por *downburst*, o Departamento de Ciências Atmosféricas do TTU construiu 7 torres autoportantes de 15 metros de altura, alinhadas e espaçadas de 263 metros, e nelas instalou anemômetros conforme mostra a Figura 2.9 (CHEN e LETCHFORD, 2006). Em junho de 2002, dois eventos de *downburst* de naturezas diferentes foram registrados e denominados RFD (*rear-flank downdraft*) e *derecho*.

A Figura 2.10 (CHEN e LETCHFORD, 2005) apresenta os sinais de velocidade de vento coletados na torre 4 ao longo da altura nos dois eventos. Após a separação dos sinais em velocidade média variável e velocidade flutuante, CHEN e LETCHFORD (2006) determinaram a variação com a altura da velocidade média variável, além de propriedades estatísticas, tais como intensidade de turbulência e sua variação no tempo, funções de densidade espectral e funções densidade espectral evolucionária (para processos aleatórios não estacionários).

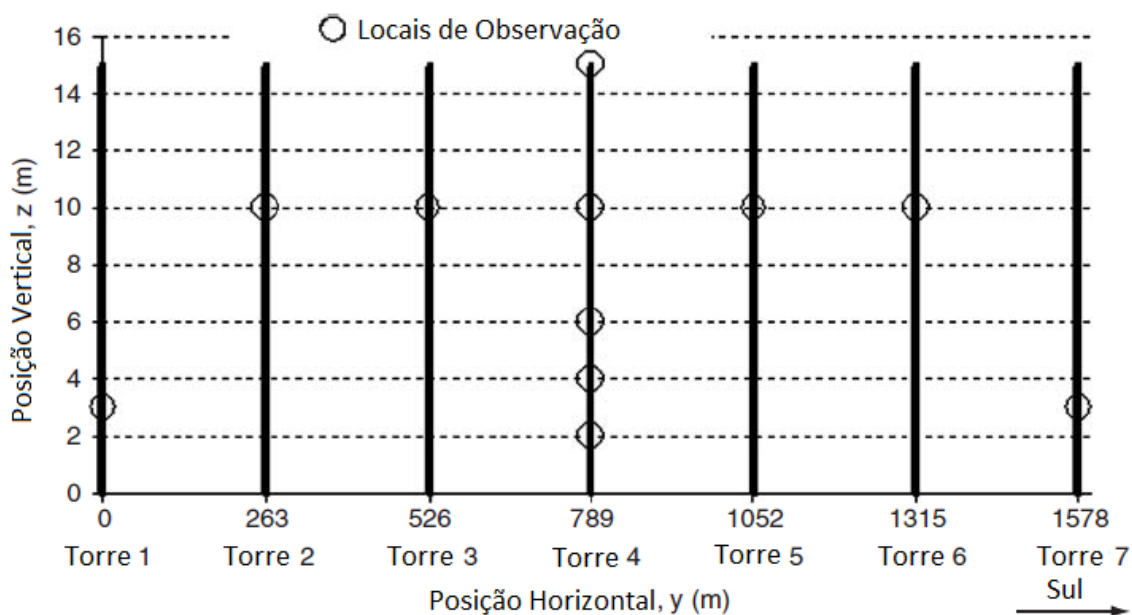


Figura 2.9 – Sete torres e seus locais de observação. (Adaptado de (CHEN e LETCHFORD, 2006)).

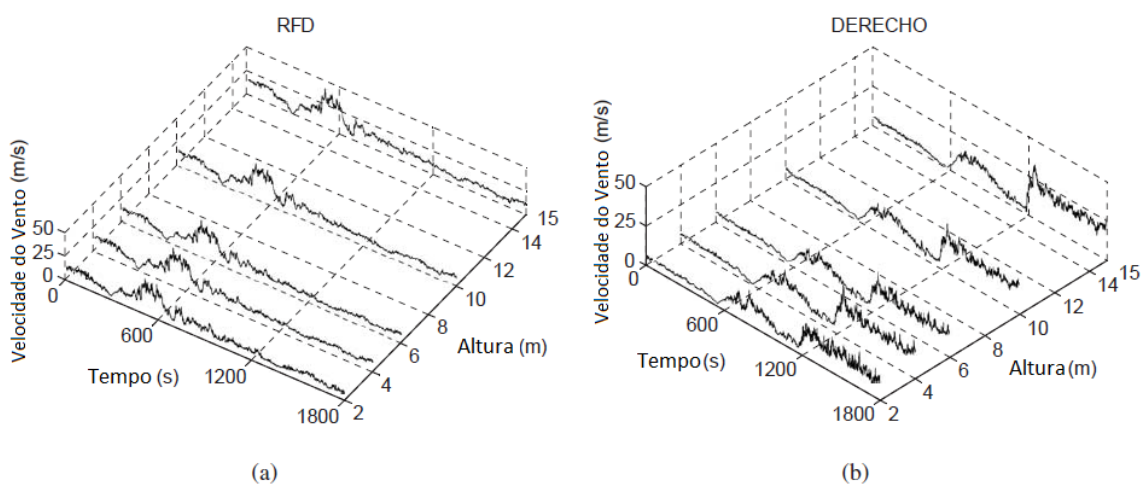


Figura 2.10 – Histórias de tempo de velocidade do vento da torre 4 do RFD e do derecho, respectivamente, gravados simultaneamente a uma altura de 2, 4, 6, 10 e 15 metros com uma taxa de amostragem de 1,0 Hz. (Adaptado de (CHEN e LETCHFORD, 2005)).

Algumas das principais conclusões da análise dos sinais são resumidas como se segue:

- a) A velocidade média variável apresentou pequenas variações ao longo da altura entre 2 e 15 metros nos dois eventos;

- b) O desvio padrão da velocidade flutuante varia ao longo do tempo e é proporcional a velocidade média variável; a intensidade de turbulência variável (definida pela razão entre o desvio padrão e a velocidade média, ambos variáveis no tempo) apresentou o valor médio igual a 0,1;
- c) Definiu-se a velocidade flutuante normalizada como a razão entre a velocidade flutuante e o desvio padrão variável; as funções de densidade espectral dos sinais de velocidade flutuante normalizada são semelhantes nos dois eventos e pouco variaram com a altura. A Figura 2.11 (CHEN e LETCHFORD, 2006) apresenta uma comparação entre a função de densidade espectral (FDE) a 10 metros de altura e o espectro de Harris - Von Karman referentes a velocidade flutuante de ventos em camada limite (2.7).

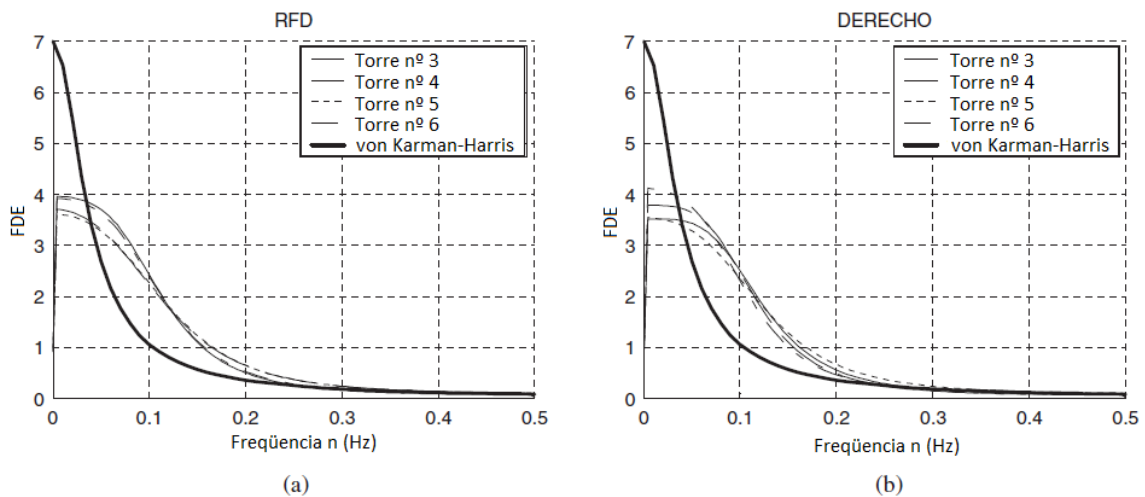


Figura 2.11 – Comparação da FDE a 10 metros de altura com o espectro de Harris (Adaptado de (CHEN e LETCHFORD, 2006)).

A Figura 2.12 (CHEN e LETCHFORD, 2006) apresenta os registros de velocidade de vento obtidos a 10 metros de altura nas torres 3 a 6 para o vento RFD e 2 a 4 e 6 para o evento derecho. Estes sinais foram analisados por CHEN e LETCHFORD (2006) com intuito de estudar a correlação lateral das velocidades de vento em diferentes escalas: da velocidade média variável, do desvio padrão da velocidade flutuante e da própria velocidade flutuante.

A análise dos sinais conduziu as seguintes conclusões:

- A velocidade média variável e o desvio padrão variável das flutuações apresentaram correlação espacial praticamente total;

- A intensidade de turbulência variável apresentou pequenas oscilações, na faixa de 0,08 e 0,11;
- Os sinais de velocidade flutuante normalizada se apresentaram sem correlação espacial, já que a distância lateral entre os pontos de medição foi de 263 metros.

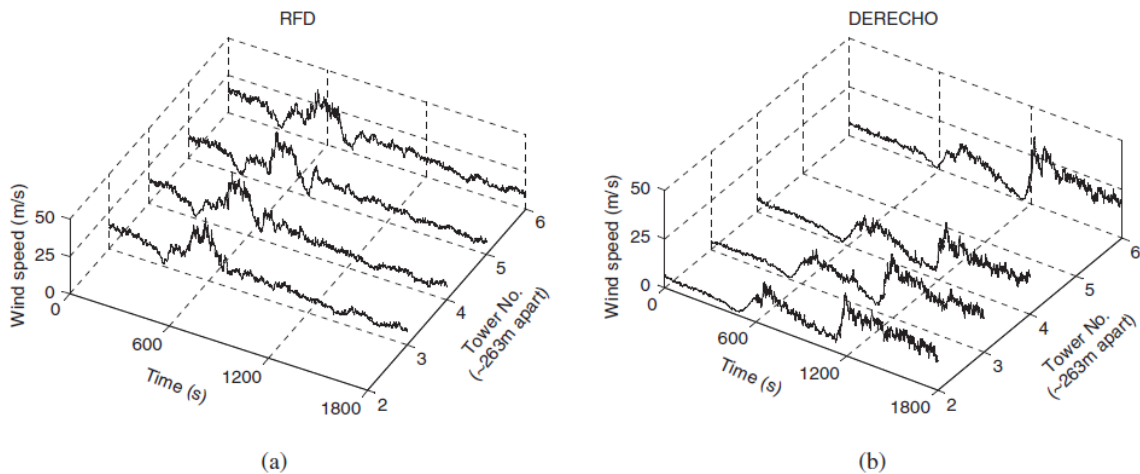


Figura 2.12 – História de tempo completa de velocidade de vento do RFD em 4 de junho de 2002 (a) e o derecho em 15 de junho de 2002 (b), gravados simultaneamente das torres 2 a 6, a 10 metros com uma taxa de amostragem de 1,0 Hz.

Observa-se ainda na Figura 2.8 a linha que corresponde aos valores médios do sinal variando ao longo do tempo de tal modo que o registro pode ser decomposto em um sinal que varia lentamente com o tempo e outro de flutuações em torno do primeiro. Esta decomposição está ilustrada na Figura 2.13 obtido no Texas em junho de 2002 (HOLMES, 2007). A parcela que varia lentamente pode ser obtida por média móvel e pode ser chamada de velocidade média móvel. A outra parcela tem o aspecto de um sinal aleatório e pode ser descrita como velocidade flutuante devida à turbulência.

Verifica-se que a velocidade de vento em um *downburst* é um processo aleatório não estacionário. Dessa forma, a análise dinâmica de estruturas no domínio da frequência, como tradicionalmente é efetuada para os ventos de camada limite, não pode ser aplicada. No caso de ação de ventos originados de *downburst*, a análise de estruturas deve ser realizada no domínio do tempo.

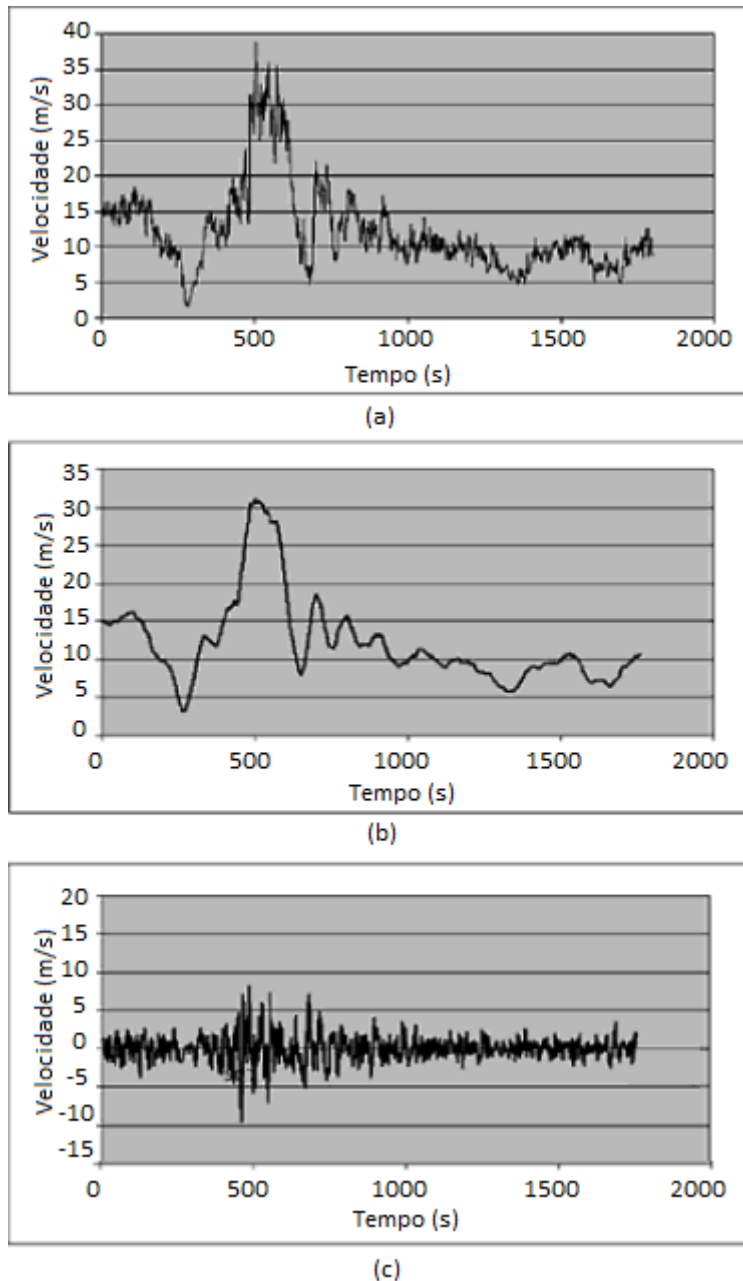


Figura 2.13 – História de tempo do RFD. (a) Velocidades como foram gravadas; (b) História de tempo filtrada com 40 s de filtro de média móvel; (c) “turbulência” residual obtida pela subtração. (Adaptado de (HOLMES, 2007)).

2.4.3 Registro de PALUCH *et al* (2003)

PALUCH *et al.*, (2003) fizeram registros de velocidade do vento ao longo do tempo para várias alturas de uma torre de observação de 40 metros que são mostrados nas Figura 2.14.a a c. Pode ser visto que a velocidade do vento de fundo tem uma pequena variação com a elevação da altura, ao contrário da parcela inerente ao *downburst*, que

atinge um pico quase que constante em relação à altura e ao tempo, indicando uma aparente correlação total do evento em termos de velocidade média variável.

Pode-se notar, na Figura 2.14.d, o momento exato da passagem do evento pela torre de observação (em torno de 2:10 h) caracterizado pela inversão da velocidade de vento.

Infelizmente não houve informações adicionais para poder determinar a distância entre a torre de observação e o caminho tempestade.

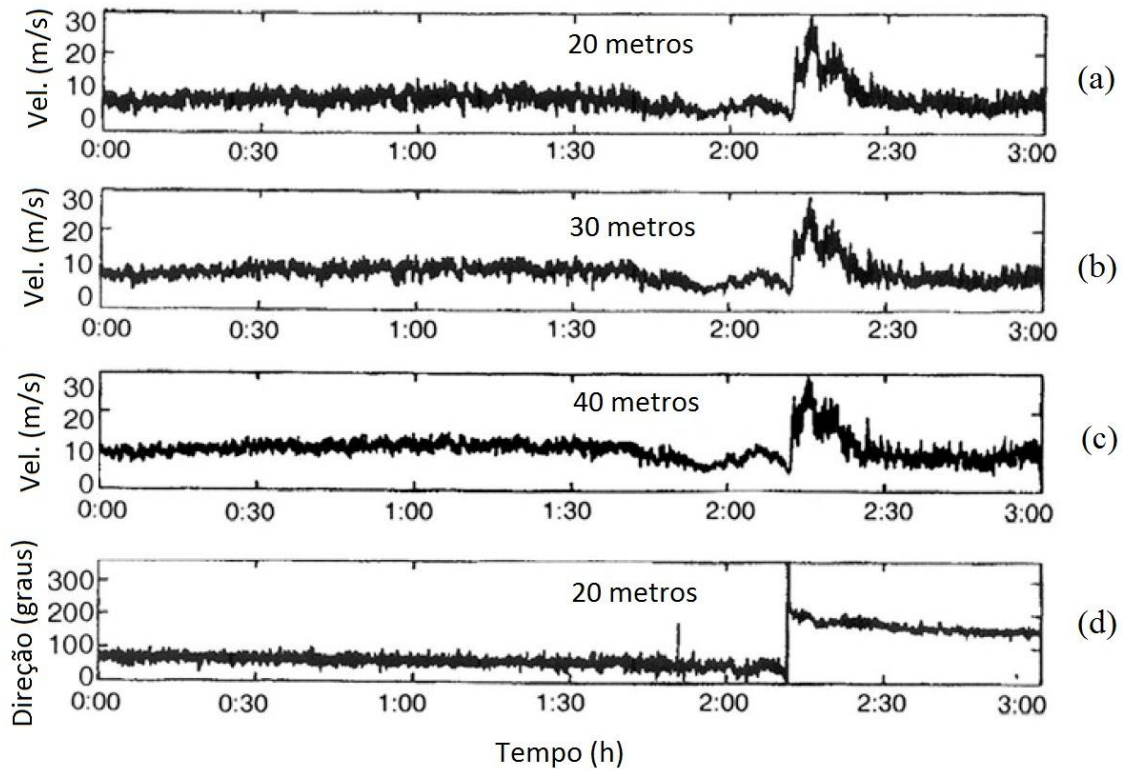


Figura 2.14 – Registro da velocidade do vento de um *downburst* PALUCH *et al.*, (2003).

3 Modelagem para campo de velocidade de vento durante um *downburst*

3.1 Introdução

Os primeiros modelos matemáticos desenvolvidos para descrever o campo de velocidades de vento durante um *downburst* consideram a ação de um jato de ar descendente e contínuo atingindo uma superfície plana. Desenvolvimentos subsequentes incorporaram aos modelos algumas particularidades, tais como:

- O deslocamento da tormenta que gera o assim chamado vento de fundo;
- O decaimento ao longo do tempo do fenômeno;
- A turbulência.

O campo de velocidade do jato de ar do *downburst* é considerado como sendo axissimétrico, podendo a velocidade $V_t(r, z, t)$ ser descrita em termos das suas componentes vertical (V_z) e radial (V_r), como mostra a Figura 3.1.

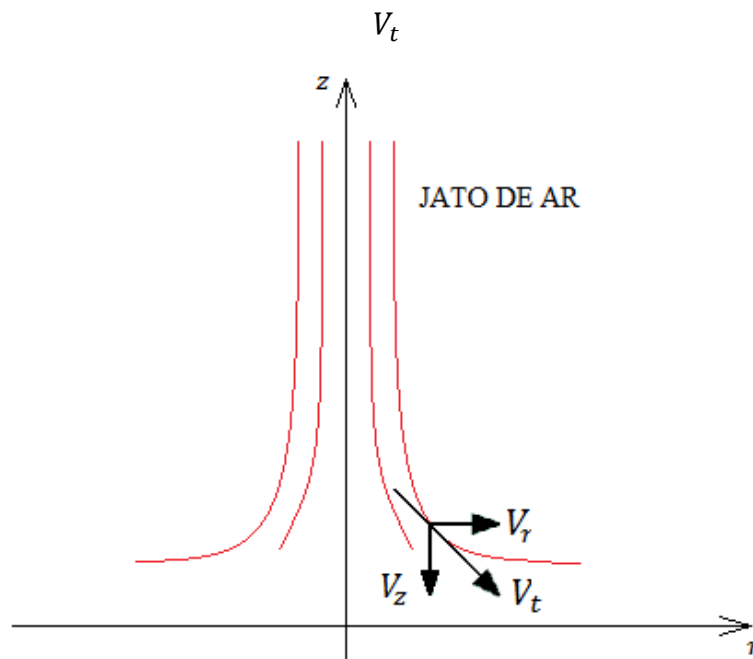


Figura 3.1 – Componente vertical e radial da velocidade do vento.

Para a engenharia estrutural, considerando a ação de *downburst* em estruturas altas como torres e edificações, somente tem interesse a componente horizontal V_r . Já para elementos estruturais suspensos e leves, tais como cabos de linhas de transmissão e

coberturas, a componente vertical V_z da velocidade de vento pode gerar forças verticais importantes se o “olho” do *downburst* atinge estes elementos.

A maioria dos modelos tem como objetivo descrever o campo de velocidade de vento de um *downburst* através apenas da sua componente V_r . Esta varia de acordo com a altura em relação ao solo (perfil vertical de velocidade do vento) e também com a distância radial do ponto analisado ao centro do *downburst* (perfil radial de velocidades do vento).

A Figura 3.2 ilustra ambos os perfis de acordo como modelo de um *microburst* típico de HJELMFELT (1988). Esta figura também apresenta alguns dados típicos do fenômeno, tais como:

- A altura $\bar{z}_{V_{max}}$ situada a 80 metros do solo, correspondente a máxima velocidade radial de vento;
- O raio $\bar{r}_{V_{max}}$ de 1,5 km do centro do *microburst*, correspondente ao ponto de máxima velocidade de vento radial;
- O diâmetro do jato igual a 1,8 km;
- O raio máximo de influência do fenômeno igual a $2\bar{r}_{V_{max}}$, correspondendo a 3,0 km.

O perfil radial de $V_r(r)$ se caracteriza por um acréscimo linear da velocidade V_r entre o centro do *microburst* ($r = 0$) até uma distância de $\bar{r}_{V_{max}}$ e uma curva de decaimento entre a distância de $\bar{r}_{V_{max}}$ a $2\bar{r}_{V_{max}}$.

O perfil vertical $V_r(z)$ se caracteriza por uma curva exponencial de acréscimo da velocidade V_r entre o solo ($z = 0$) até uma altura até $\bar{z}_{V_{max}}$. Acima desta altura, a velocidade V_r apresenta um decaimento suave entre $\bar{z}_{V_{max}}$ a $4\bar{z}_{V_{max}}$.

A seguir, serão descritos alguns dos modelos encontrados na literatura, os quais foram comparados entre si em termos de perfil vertical de velocidade, sendo o modelo de WOOD e KWOK (1998) o selecionado para a elaboração do programa desenvolvido neste trabalho.

Os modelos de variações da velocidade V_r em relação ao tempo t e ao raio r , utilizados neste trabalho, são os desenvolvidos por HOLMES e OLIVER (2000). O modelo de turbulência adotado foi o proposto por CHEN e LETCHFORD (2007). Apesar de ser abordada por alguns modelos descritos a seguir, a componente vertical V_z da velocidade do jato não será utilizada nos exemplos elaborados neste trabalho.

Tabela 3.1 – Modelos encontrados na literatura.

Autor	Ano	Caracterização do Modelo
ZHU E ETKIN	1983	$V(x, y, z)$
RIERA E ROCHA	1998	$V(x, y, z)$
OSEGUERA E BOWLES	1988	$V_r(r, z)$ e $V_z(r, z)$
VICROY	1992	$V_r(r, z)$ e $V_z(r, z)$
WOOD E KWOK	1998	$V_r(z)$
HOLMES E OLIVER	2000	$V_r(r, t)$
CHEN E LETCHFORD	2007	$v(z, t)$
PONTE JÚNIOR	2005	$V_r(r, z, t)$

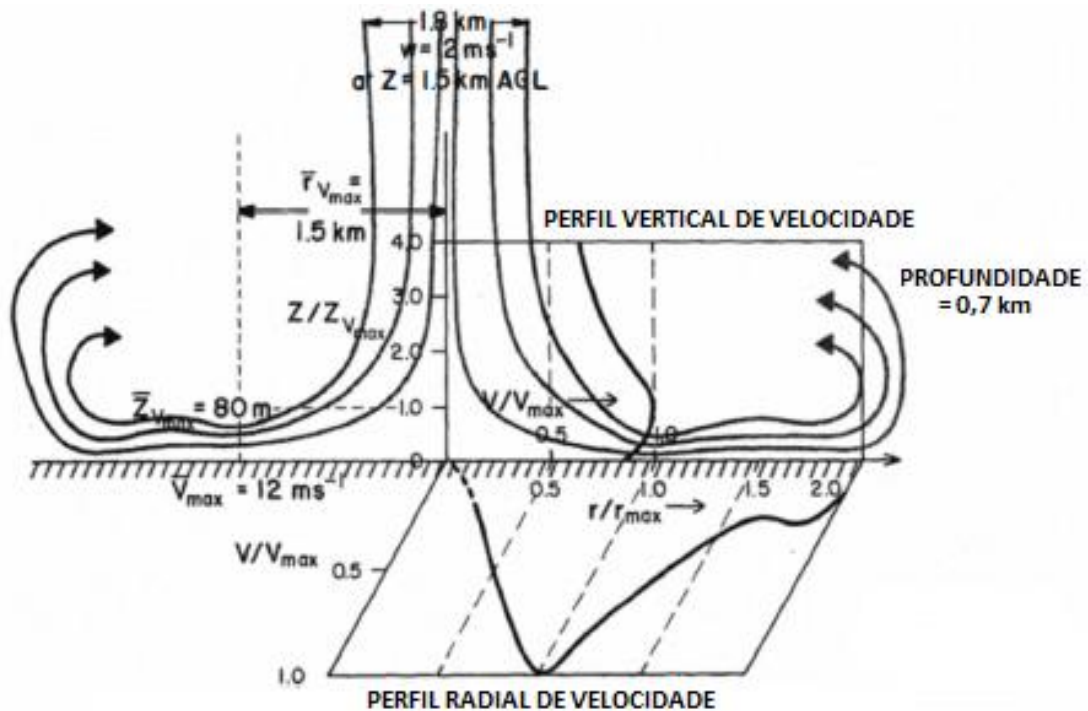


Figura 3.2 – Perfis de velocidade V_r de um *microburst* típico. (Adaptado de (HJELMFELT, 1988)).

3.2 Modelo de ZHU e ETKIN (1983 *apud* (PONTE JÚNIOR, 2005))

ZHU e ETKIN (1983 *apud* (PONTE JÚNIOR, 2005)) tiveram, como base para motivação deste estudo, estatísticas de desastres aéreos ocorridos nos procedimentos de

decolagens e aterrissagens com presença de tempestades elétricas, fornecidas pela base da Força Aérea de Andrews, EUA.

Com base em considerações da mecânica dos fluidos, foi desenvolvido um modelo tridimensional denominado dupla folha (*double sheet model*), que descreve o campo de velocidades de um *downburst* estacionário, com um jato de ar descendente e contínuo a partir de uma altura H_s . Tal modelo fornece o vetor velocidade e as componentes de velocidade vertical V_z e radial V_x e V_y em função da posição num campo tridimensional. O campo produzido simula um fluxo de ar descendente e se baseia em parâmetros como a distribuição de velocidades e a intensidade da tormenta. A sugestão foi adotar uma área circular de origem da tempestade, com um diâmetro igual a D_s a uma altura H_s a partir da superfície da terra (Figura 3.3). As hipóteses adotadas foram:

- O ar é incompressível e não viscoso (fluido ideal);
- Não inclui efeitos de variação de temperatura;
- O escoamento é irrotacional;
- Consideração de um fluxo descendente a partir de uma altura $z = H_s$ sobre o solo.

O fluxo descendente sobre a superfície S paralelo ao eixo z a partir da altura H_s tem intensidade $\sigma(\xi, \eta)$ por unidade de área e gera num ponto $P(x, y, z)$ sobre a superfície S as seguintes componentes:

$$V_x = -\frac{3}{4\pi} \left\{ \iint_S \sigma(\xi, \eta) \left[\frac{(z - H_s)(x - \xi)}{r^5} \right] d\xi d\eta \right\} \quad (3.1)$$

$$V_y = -\frac{3}{4\pi} \left\{ \iint_S \sigma(\xi, \eta) [(z - H_s)(y - \eta)/r^5] d\xi d\eta \right\} \quad (3.2)$$

$$V_z = -\frac{1}{4\pi} \left\{ \iint_S \sigma(\xi, \eta) [3(z - H_s)^2/r^5 - 1/r^3] d\xi d\eta \right\} \quad (3.3)$$

com:

$$r^2 = (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - H)^2 \quad (3.4)$$

onde:

- V_x, V_y e V_z são as componentes do campo de velocidade $V_w(x, y, z)$;

- (ξ, η) São as coordenadas de um diferencial da área de origem da tempestade, $d\xi d\eta$, contribuindo para a velocidade de vento total a uma dada coordenada (x, y, z) ;
- H_s altura da superfície terrestre da área S de origem tempestade;
- $\sigma(\xi, \eta)$ função de distribuição da intensidade da tempestade.

ZHU e ETKIN (1983 *apud* (PONTE JÚNIOR, 2005)) ainda sugeriram a adoção de uma função de distribuição senoidal de intensidade:

$$\sigma(\xi, \eta) = \sigma_s \left[1 - \sin \left(\frac{\pi \sqrt{\xi^2 + \eta^2}}{D_s} \right) \right] \quad (3.5)$$

onde:

- σ_s é a intensidade característica da tempestade;

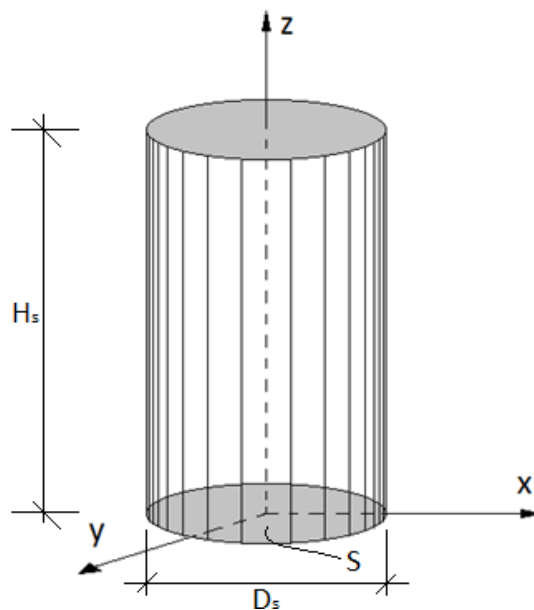


Figura 3.3 – Representação do modelo do jato descendente de ZHU E ETKIN.

(Adaptado de (PONTE JÚNIOR, 2005)).

Após várias simulações para valores de x , y e $z = H_s$, foram geradas curvas para velocidades nestas direções. Para ZHU e ETKIN (1983 *apud* (PONTE JÚNIOR, 2005)), o modelo foi satisfatório.

3.3 Modelo de RIERA e ROCHA (1998 *apud* (PONTE JÚNIOR, 2005))

RIERA e ROCHA (1998 *apud* (PONTE JÚNIOR, 2005)) propuseram simplificações no modelo de ZHU e ETKIN (1983 *apud* (PONTE JÚNIOR, 2005)) tais como a consideração da propriedade axissimétrica do campo de velocidades V_w e funções para aproximar a relação entre o parâmetro adimensional $V_w = D_s/\sigma_s$ no fator de forma $V_w = \rho/D_s$ para diferentes valores de D_s/H_s . Além disso, incorporaram no modelo a velocidade de fundo do vento (V_0). Uma vez definido o modelo, os autores realizaram simulações de tempestades elétricas numa região de controle, conforme ilustrado na Figura 3.4, com a finalidade de construir um histograma de máximos anuais, a ser comparado com observações experimentais em estações meteorológicas. O histograma mostrado na Figura 3.5 resultou de uma simulação com 60 tempestades por ano e distribuições de Gumbel para V_0 , T_s , σ_s e D_s e distribuições uniformes para as coordenadas do ponto A de início da tempestade, θ_s e D_s/H_s , sendo θ_s a direção da tempestade em relação ao eixo x da Figura 3.4. Os autores observam que, apesar da escolha arbitrária dos parâmetros do modelo de simulação, o histograma resultante apresenta uma boa comparação com dados reais.

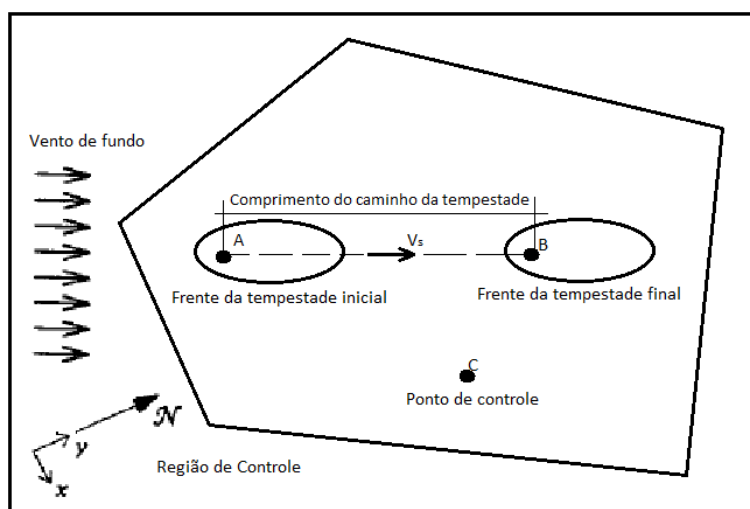


Figura 3.4 – Características básicas de um modelo para uma frente de tempestade.

(Adaptado de (PONTE JÚNIOR, 2005)).

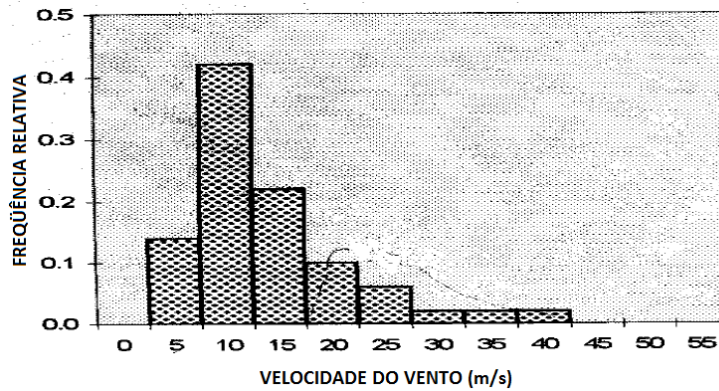


Figura 3.5 – Histograma de máxima velocidade de vento anual por simulação de tormenta TS. (Adaptado de (PONTE JÚNIOR, 2005)).

3.4 Modelo de OSEGUERA e BOWLES (1988)

Partindo das equações completas de *Euler* e das equações de continuidade de massa, OSEGUERA e BOWLES (1988) admitiram algumas hipóteses simplificadoras sobre as condições do escoamento em um *downburst*. Efeitos da viscosidade foram explicitamente parametrizados, e o escoamento foi considerado como sendo invariante no tempo. O *downburst* é axissimétrico em coordenadas cilíndricas, e caracterizado por um ponto de estagnação na base do eixo da coluna de fluxo descendente (no solo). O fluido é incompressível, sem forças externas ou momentos que atuam sobre ele.

Resulta então a equação de conservação de massa:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (3.6)$$

cuja forma completa é dada pela equação:

$$\frac{\partial V_r(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial V_z(r, z)}{\partial z} + \frac{V_r(r, z)}{r} = 0 \quad (3.7)$$

esta equação é satisfeita por soluções de forma como:

$$V_z(r, z) = g(r^2)q(z) \quad (3.8)$$

$$V_r(r, z) = \frac{f(r^2)}{r} p(z) \quad (3.9)$$

desde que:

$$f'(r^2) = \frac{\lambda}{2} g(r^2) \quad (3.10)$$

$$q'(z) = -\lambda p(z) \quad (3.11)$$

OSEGUERA e BOWLES (1988) buscaram perfis de velocidade para este modelo analítico de modo a apresentar as mesmas variações com a altura z e com a distância r do modelo numérico denominado TASS (*Terminal Area Simulation System*), o qual é baseado em dados do projeto JAWS.

Em relação a variação no tempo da velocidade radial, as características desejadas foram a presença de dois picos de igual magnitude e direções opostas localizados para um certo raio dado, com uma transição suave e quase linear entre estes picos. Além dos picos, a velocidade deve mostrar um decaimento exponencial para zero. A velocidade vertical deve apresentar um pico ao longo do eixo de simetria ($r = 0$) e decair exponencialmente ao aumentar o raio.

As equações (3.12) e (3.13) mostram um par de funções modais que forneceram perfis de velocidade correspondentes aos dados de TASS, conforme requerido.

$$g(r^2) = e^{-(r/R)^2} \quad (3.12)$$

$$p(z) = e^{-(z/z^*)} - e^{-(z/\varepsilon)} \quad (3.13)$$

As soluções restantes foram encontradas através da integração das equações (3.10) e (3.11), resultando em:

$$V_z(r, z) = -\lambda e^{-(r/R)^2} [\varepsilon(e^{-(z/\varepsilon)} - 1) - z^*(e^{-(z/z^*)} - 1)] \quad (3.14)$$

$$V_r(r, z) = \frac{\lambda R^2}{2r} [1 - e^{-(r/R)^2}] [e^{-(z/z^*)} - e^{-(z/\varepsilon)}] \quad (3.15)$$

onde:

- r é a coordenada radial (m);
- R é o raio de um *downburst* (m);
- z^* é a altura característica fora da camada limite (m);
- z é a altitude acima do solo (m);

- $V_r(r, z)$ é a componente radial da velocidade numa coordenada radial r a uma altura z ;
- $V_z(r, z)$ é a componente vertical da velocidade numa coordenada radial r a uma altura z ;
- ε é a altura característica dentro da camada limite (m);
- λ é um fator de escala (s^{-1}).

3.5 Modelo de VICROY (1992 *apud* (QU e JI, 2009))

VICROY (1992 *apud* (QU e JI, 2009)) modificou o modelo de OSEGUERA e BOWLES (1988) definindo uma nova função de forma. Com isso, o modelo ficou mais preciso para a caracterização do perfil vertical de velocidade de vento radial de um *downburst*. A velocidade radial e vertical, variando de acordo com o raio e com a altura, assumiram respectivamente as seguintes formas:

$$V_r(r, z) = \frac{\lambda r}{2} [e^{C1(z/z_m)} - e^{C2(z/z_m)}] e^{\left[\frac{2 - (r^2/r_p^2)^\alpha}{2\alpha} \right]} \quad (3.16)$$

$$V_z(r, z) = -\lambda \left\{ \frac{z_m}{C1} [e^{C1(z/z_m)} - 1] - \frac{z_m}{C2} [e^{C2(z/z_m)} - 1] \right\} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r^2}{r_p^2} \right)^\alpha \right] e^{\left[\frac{2 - (r^2/r_p^2)^\alpha}{2\alpha} \right]} \quad (3.17)$$

onde:

- $\alpha, C1, C2$ são constantes do modelo;
- r_p é o raio onde a velocidade máxima é atingida (m);
- z_m é a altura em que o velocidade máxima é atingida (m);

Os outros parâmetros têm o mesmo significado que as equações (3.15) e (3.14). VICROY (1992 *apud* (QU e JI, 2009)) recomendou para as constantes do modelo os valores de $\alpha = 2$; $C1 = -0,15$; $C2 = -3,2175$. O fator escala fica definido como:

$$\lambda = 2 \frac{V_{r,máx}}{r_p} \left[\frac{1}{e^{\frac{1}{2\alpha}} (e^{C1} - e^{C2})} \right] \quad (3.18)$$

onde:

- $V_{r,máx}$ é a máxima velocidade radial do *downburst* a uma determinada altura z .

Substituindo o valor de r para o valor de r_p e, utilizando os valores recomendados para as constantes do modelo na equação (3.16), se tem os valores das máximas velocidades

radiais V_r de um *downburst* ao longo da altura, ou seja, tem-se o perfil vertical de velocidades, como mostra a equação (3.19).

$$V_r(z) = 1,22[e^{-0,15(z/z_m)} - e^{-3,2175(z/z_m)}]V_{r,m\acute{a}x} \quad (3.19)$$

Pelo fato de VICROY (1992 *apud* (QU e JI, 2009)) aperfeiçoar a componente do vento radial de um *downburst* a partir das conclusões de OSEGUERA e BOWLES (1988), esse modelo ficou sendo apontado como o modelo Oseguera e Bowles / Vicroy (de forma mais curta, modelo OBV).

3.6 Modelo de WOOD e KWOK (1998)

WOOD e KWOK (1998) fizeram estudos do fenômeno em túnel de vento, no qual um *downburst* foi modelado por um jato descendente estacionário sobre uma superfície plana. Eles desenvolveram uma expressão empírica para o perfil vertical da velocidade radial, dado pela equação (3.20).

$$V_r(z) = 1,55 \left(\frac{z}{\delta}\right)^{1/6} \left[1 - erf\left(0,70 \frac{z}{\delta}\right)\right] V_{r,m\acute{a}x} \quad (3.20)$$

onde:

- z é a altitude acima do solo (m);
- $V_r(z)$ é a velocidade radial a uma altura z ;
- $V_{r,m\acute{a}x}$ é a máxima velocidade radial do *downburst*;
- δ é a altura onde $V_r(\delta) = \frac{V_{r,m\acute{a}x}}{2}$
- *erf* é a função erro que é dada por:

$$erf|x| = [1 - (1 + 0,2784|x| + 0,2314|x|^2 + 0,0781|x|^4)^{-4}] \quad (3.21)$$

3.7 Modelo de HOLMES e OLIVER (2000)

HOLMES e OLIVER (2000) tiveram como motivação para seu trabalho os registros sobre falhas causadas por *downbursts* em torres de linhas de alta tensão no leste australiano. O objetivo foi de realizar a reprodução dos registros de anemômetros produzidos por *downburst* e, com isso, determinar as dimensões físicas destes eventos.

Um modelo empírico foi criado para descrever a velocidade e a direção do vento radial de um *downburst* em movimento. Essa descrição é feita pela soma vetorial de um vento ambiental (vento de translação) e o vento radial gerado pelo jato descendente.

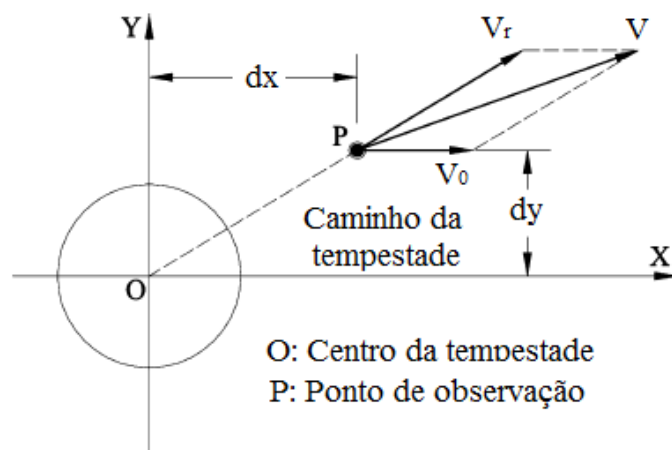


Figura 3.6 – Exemplo genérico da soma vetorial do vento ambiental com o vento radial do *downburst*. (Adaptado de (CHEN e LETCHFORD, 2004)).

A premissa do modelo era de que, na região de estagnação (região situada dentro do diâmetro do jato descendente do *downburst* ilustrada na Figura 3.7), a velocidade radial (V_r) aumenta quase linearmente com o acréscimo da distância radial do ponto central da tempestade até uma velocidade radial máxima ($V_{r,m\acute{a}x}$). Fora da região de estagnação, a velocidade radial, a uma altura fixa qualquer, pode ser razoavelmente aproximada pela equação (3.23). A Figura 3.7 mostra o perfil radial de velocidade do vento dentro e fora da região de estagnação, representado pelas equações (3.22) e (3.23), respectivamente.

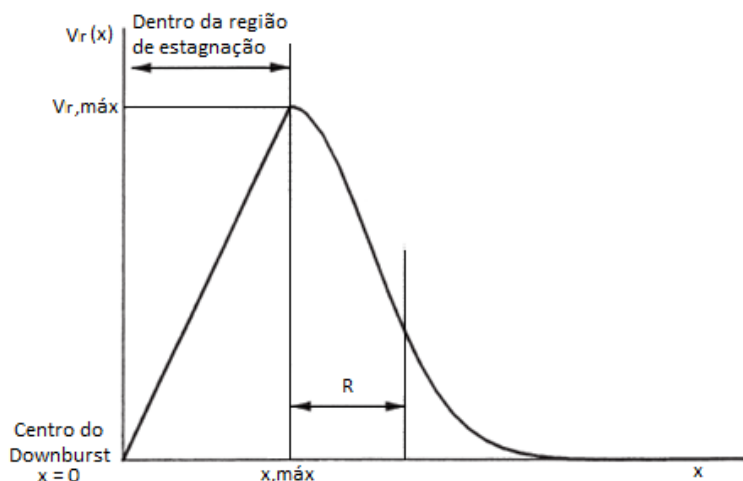


Figura 3.7 – Modelo de perfil radial de velocidade do vento. (Adaptado de (HOLMES e OLIVER, 2000)).

$$V_r(x) = V_{r,máx} \frac{x}{x_{máx}}, \quad x < r_{máx} \quad (3.22)$$

$$V_r(x) = V_{r,máx} \cdot e^{-\left(\frac{x-x_{máx}}{R}\right)^2}, \quad x \geq r_{máx} \quad (3.23)$$

onde:

- V_r é a velocidade radial a uma altura z qualquer;
- $V_{r,máx}$ é a velocidade radial máxima de z ;
- x é a distância radial a partir do centro da tormenta;
- $x_{máx}$ é a distância na qual ocorre $V_{r,máx}$;
- R é uma escala de comprimento radial.

O modelo também considera um decaimento exponencial da velocidade em função do tempo para um fluxo descendente com um tempo de duração T .

Assim, as equações (3.22) e (3.23) ficam da seguinte forma:

$$V_r(x) = V_{r,máx} \cdot e^{\left(-\frac{t}{T}\right)} \cdot \frac{x}{r_{máx}}, \quad x < r_{máx} \quad (3.24)$$

$$V_r(x) = V_{r,máx} e^{\left(-\frac{t}{T}\right)} \cdot e^{-\left(\frac{x-r_{máx}}{R}\right)^2}, \quad x \geq r_{máx} \quad (3.25)$$

onde:

- t é tempo medido a partir de quando o *downburst* está no pico de intensidade;
- T é a duração característica da tormenta.

A velocidade resultante (V_R) é a soma vetorial das velocidades radial do *downburst* e a velocidade de translação do vento de fundo (V_r e V_o). Holmes comparou as previsões do modelo com os registros na Base da Força Aérea de Andrews, EUA (Figura 2.8). Em conclusão, verificou uma boa aproximação da simulação feita com os valores reais.

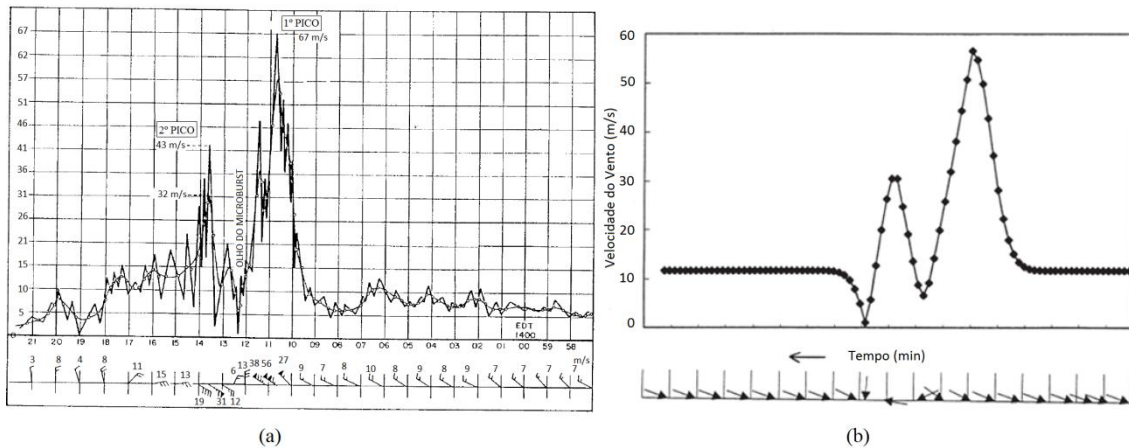


Figura 3.8 – Comparação da simulação. (a) Registro da velocidade e direção do vento da BFAA. (Adaptado de (FUJITA, 1985)); (b) Simulação de Holmes. (Adaptado de (HOLMES e OLIVER, 2000)).

3.8 Modelo de CHEN e LETCHFORD (2007)

Baseados nas análises estatísticas dos sinais de velocidade de vento de dois *downbursts* coletados nas torres instrumentadas da TTU (CHEN e LETCHFORD, 2005, 2006) (ver item 2.4.2), CHEN e LETCHFORD (2007) propuseram um modelo denominado NDESH (*nonparametric deterministic-stochastic hybrid*), para caracterizar e simular histórias de velocidade radial de vento (neste item, com a notação simplificada para V em lugar de V_r) correlacionada não estacionária.

O modelo baseia-se na separação do sinal em duas parcelas conforme ilustrado na Figura 2.13 e pode ser descrito pela seguinte série de equações:

$$V(z, t) = \bar{V}(z, t) + \tilde{V}(z, t) \quad (3.26)$$

onde:

- $V(z, t)$ indica a velocidade radial do vento a uma altura z num instante de tempo t ;
- $\bar{V}(z, t)$ é a velocidade média variando lentamente ao longo do tempo, doravante denominada velocidade média; esta parcela é considerada determinística no modelo;
- $\tilde{V}(z, t)$ é a velocidade flutuante induzida pela turbulência.

A velocidade $\tilde{V}(z, t)$ é tratada como um processo aleatório não estacionário. De acordo com as análises dos sinais experimentais realizados em (CHEN e LETCHFORD, 2005, 2006), (ver item 2.4.2), \tilde{V} tem um desvio padrão $\tilde{\sigma}$ aproximadamente proporcional à velocidade média \bar{V} por um fator 0,1. Torna-se conveniente, então, fatorar \tilde{V} da seguinte forma:

$$\tilde{V}(z, t) = \tilde{\sigma}(z, t) \times v(z, t) \quad (3.27)$$

onde:

- $\tilde{\sigma}(z, t)$ é o desvio padrão variável;
- $v(z, t)$ é a velocidade de vento flutuante normalizada em relação ao desvio padrão, portanto com variância e desvio padrão unitários.

A velocidade média é caracterizada ao longo da altura e no decorrer do tempo, por meio de uma separação de variáveis, em uma base de \bar{N} perfis verticais (ou formas modais) $\bar{\phi}_i(z)$ e suas correspondentes amplitudes no tempo $\bar{V}_i(t)$:

$$\bar{V}(z, t) \cong \sum_{i=1}^{\bar{N}} \bar{\phi}_i(z) \bar{V}_i(t) \quad (3.28)$$

O desvio padrão é descrito no mesmo formato de velocidade média.

Define-se ainda a intensidade de turbulência, também variável no tempo como:

$$I_v(z, t) = \frac{\tilde{\sigma}(z, t)}{\bar{V}(z, t)} \quad (3.29)$$

CHEN e LETCHFORD (2007) verificaram que o modelo empírico para a variação ao longo da altura da intensidade de turbulência de vento da “tradicional” camada limite, proposto na ASCE7-98 também é aplicável para *downburst*.

$$I_v^*(z) = I_{v10} \left(\frac{10}{z} \right)^{1/6} \quad (3.30)$$

onde:

- I_{v10} é a intensidade de turbulência a 10 metros de altura do solo.

A equação (3.30) foi ajustada para estimar as densidades da turbulência através do método dos mínimos quadrados e os valores de I_{v10} encontrados para os dois *downbursts* coletados nas torres instrumentadas da TTU (CHEN e LETCHFORD, 2005, 2006) foram de 0,088 e 0,085 para os eventos RFD e derecho, respectivamente.

A velocidade flutuante normalizada $v(z, t)$ pode ser caracterizada por funções de densidade espectral cruzada $S_v(z_1, z_2, \omega)$ se for estacionária e por funções de densidade espectral cruzada variável no tempo (ou evolucionária) $S_v(z_1, z_2, \omega, t)$ se for não estacionária.

As funções de formas modais e suas correspondentes funções temporais da velocidade média e do desvio padrão, além das funções de densidade espectral da velocidade flutuante normalizada, devem ser identificadas por meio de ajuste a registros experimentais. Isto foi realizado por CHEN e LETCHFORD (2005, 2006), que aplicaram o método de decomposição ortogonal própria aos sinais de velocidade média e de desvio padrão para inferir as formas modais. Em relação à velocidade flutuante normalizada, concluíram que, em um dos *downbursts*, $v(z, t)$ era estacionário e em outro não.

A partir da identificação das funções do modelo, os citados autores propuseram um modelo empírico, baseado em apenas uma forma modal e intensidade de turbulência constante:

$$V(z, t) = \bar{\phi}_1(z) \times \bar{V}(t) \times [1 + I_v^*(z) \times v(z, t)] \quad (3.31)$$

A aplicação deste modelo simplificado aos sinais dos dois *downbursts* levou-os as seguintes conclusões (CHEN e LETCHFORD, 2007):

- a) O perfil vertical $\bar{\phi}_1(z)$ se ajustou bem ao perfil proposto no modelo de WOOD e KWOK (1998) (ver item 3.10) nos dois *downbursts*;

As funções temporais $\bar{V}(t)$ dos dois *downbursts* apresentaram diferenças significativas. Como alternativa, pode-se aplicar o modelo de HOLMES e OLIVER (2000) (ver item 3.7);

- b) A função ao longo da altura z da intensidade de turbulência média se ajustou bem à equação proposta pela norma americana ASCE 7-98 para ventos “tradicionais” (do tipo camada limite);
- c) Admitindo a velocidade flutuante normalizada como estacionária, propuseram um modelo de função densidade espectral $S_v(\omega, z)$ que se ajustou bem aos dois registros de *downburst*.
- d) Para identificar a função de correlação espacial da velocidade flutuante normalizada seriam necessários mais dados experimentais. Entretanto, baseados

no conceito tradicional de que a correlação entre sinais em dois pontos é uma função exponencial da distância Δz entre elas e da frequência ω , os autores citados ajustaram parâmetros em uma equação do mesmo tipo da tradicional para obter uma boa comparação teórico-experimental.

3.9 Modelo de PONTE JÚNIOR (2005)

PONTE JÚNIOR (2005) parte do modelo numérico proposto por RIERA e ROCHA (1998 *apud* (PONTE JÚNIOR, 2005)). Seu objetivo é o desenvolvimento de um modelo que descreva o campo de velocidades de ventos oriundos das tempestades elétricas.

A velocidade tangencial do vento é descrita partindo do pressuposto que, na atmosfera estável para alturas H_c e z (Figura 3.9), a equação de Bernoulli fornece a seguinte relação:

$$\frac{P(H_c) - P(z)}{\rho g} = z - H_c \quad (3.32)$$

onde:

- H_c é a altura do solo ao centro da nuvem;
- z é a altura do solo a um ponto de estudo;
- $P(H_c)$ é a pressão para uma altura H_c ;
- $P(z)$ é a pressão para uma altura z ;
- ρ é a massa específica do ar;
- g é a aceleração da gravidade.

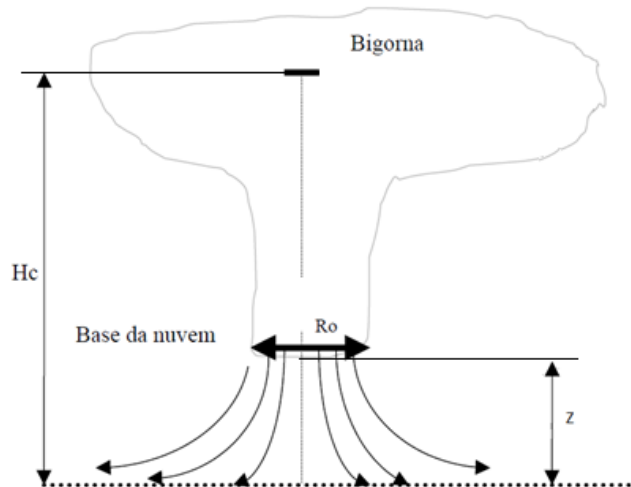


Figura 3.9 – Esquema da tempestade elétrica (PONTE JÚNIOR, 2005).

Admitindo, então que o ar é incompressível e não viscoso, e que ρ e g são constantes, foi determinado que a velocidade do escoamento de ar na atmosfera alterada com a seguinte equação:

$$\frac{V_{H_c}^2}{2g} + \frac{P_a(H_c)}{\rho g} + H_c = \frac{V_z^2}{2g} + \frac{P_a(z)}{\rho g} + z \quad (3.33)$$

Admitindo ainda que, no instante inicial do movimento do fluxo de ar em H_c a velocidade $V_{H_c} = 0$, e que, ao nível do solo, a diferença de pressão seja ΔP_0 e que ΔP varia linearmente com a altura entre o solo à H_c chega-se a:

$$V_t = \sqrt{\frac{2(H_c - z)\Delta P_0}{H_c \rho}} \quad (3.34)$$

As componentes radial e vertical da velocidade tangencial, representadas na Figura 3.10, é calculada através da linha de corrente do fluxo de ar do *downburst*. As linhas de corrente se desenvolvem de forma axial simétrica em relação ao eixo central da nuvem.

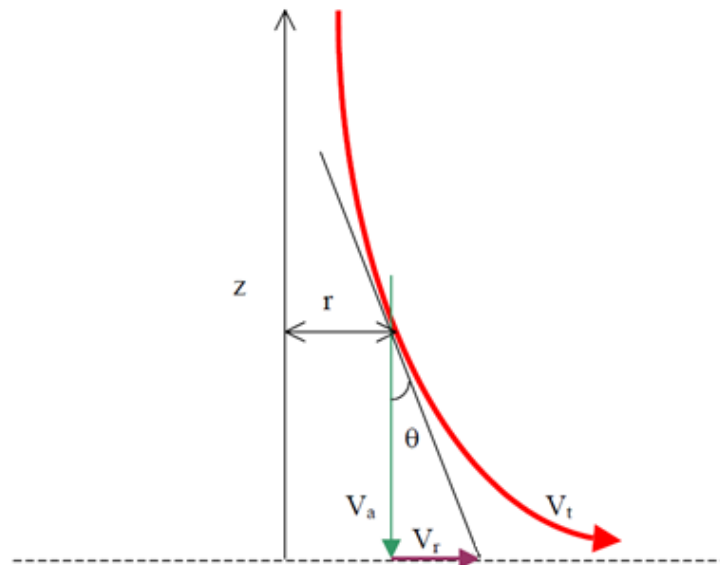


Figura 3.10 – Representação das componentes da velocidade tangencial e da linha de corrente (PONTE JÚNIOR, 2005).

Para uma linha de corrente qualquer, a derivada de $z(r)$ fornece a tangente do ângulo em relação ao eixo r . Num ponto qualquer (r, z) , as velocidade radial e axial para uma altura z de interesse é dada por:

$$V_r = V_t \sin(\theta) \quad (3.35)$$

$$V_a = V_t \cos(\theta) \quad (3.36)$$

onde:

- $\sin(\theta)$ e $\cos(\theta)$ podem ser escritos em função da derivada da função $z(r)$ que descreve a linha de corrente;
- V_a é a velocidade axial do jato;
- V_r é a velocidade radial do jato;
- r é a distância radial do centro da nuvem à linha.

Tomando como referência o raio do jato na altura H_c , para uma linha de corrente que passa a uma distância R nesta base de referência, a expressão da linha de corrente fica da seguinte forma:

$$z(r) = \frac{RH_c}{r} \quad (3.37)$$

Desta forma, as equações para as velocidades radial e axial são, respectivamente:

$$V_r = V_t \sqrt{\frac{r^4}{(R \cdot H_c)^2 + r^4}} \quad (3.38)$$

$$V_a = V_t \sqrt{\frac{(R \cdot H_c)^2}{(R \cdot H_c)^2 + r^4}} \quad (3.39)$$

sendo:

- R é a distância do centro da nuvem ao ponto de interesse;
- r é a distância do eixo central a um ponto de referência.

PONTE JÚNIOR (2005) adotou para a evolução temporal o modelo de Holmes e Oliver, admitindo que a velocidade tangencial $V(t)$ se ajusta em função do tempo da seguinte forma:

$$V(t) = 1,58 \cdot V_t \left[1 - e^{\left(\frac{-t}{T}\right)} \right], \quad t \leq T \quad (3.40)$$

$$V(t) = V_t \cdot e^{\left[\frac{-(t-T)}{T}\right]}, \quad t > T \quad (3.41)$$

onde:

- 1,58 é um parâmetro que corrige o modelo para estabelecer as condições de contorno, ou seja, para $t = T$ tem-se $V(t) = V_t$;
- V_t é a velocidade tangencial a uma altura h ;
- T é a duração característica da tormenta. Representa o tempo em que uma partícula percorre a distancia $D_n + H_c$;

3.10 Comparação dos Perfis Verticais

CHEN e LETCHFORD (2004) utilizaram os valores indicados na Tabela 3.2 para construir os perfis verticais de velocidade radial segundo os modelos de OSEGUERA e BOWLES (1988), VICROY (1992 *apud* (QU e JI, 2009)), WOOD e KWOK (1998). Utilizando os registros da TTU (ver item 2.4.2) obtidos da passagem dos dois *downbursts*, CHEN e LETCHFORD (2004) puderam fazer uma análise crítica sobre estes perfis verticais, conforme mostrado na Figura 3.11. Desta forma, avaliaram que o modelo de WOOD e KWOK (1998) é o mais apropriado dentre os modelos comparados.

Tabela 3.2 – Parâmetros utilizados por CHEN e LETCHFORD (2004).

Parâmetros	OSEGUERA E BOWLES	VICROY	WOOD E KWOK
r (m)	1121		
R (m)	1000		
Z^* (m)	200		
ε (m)	30		
λ (1/s)	0.414		
$V_{MÁX}$ (m/s)	80*	80	80
$Z_{MÁX}$ (m)	65*	67	73*
δ (m)			400

*Esses valores são calculados por outros parâmetros independentes.

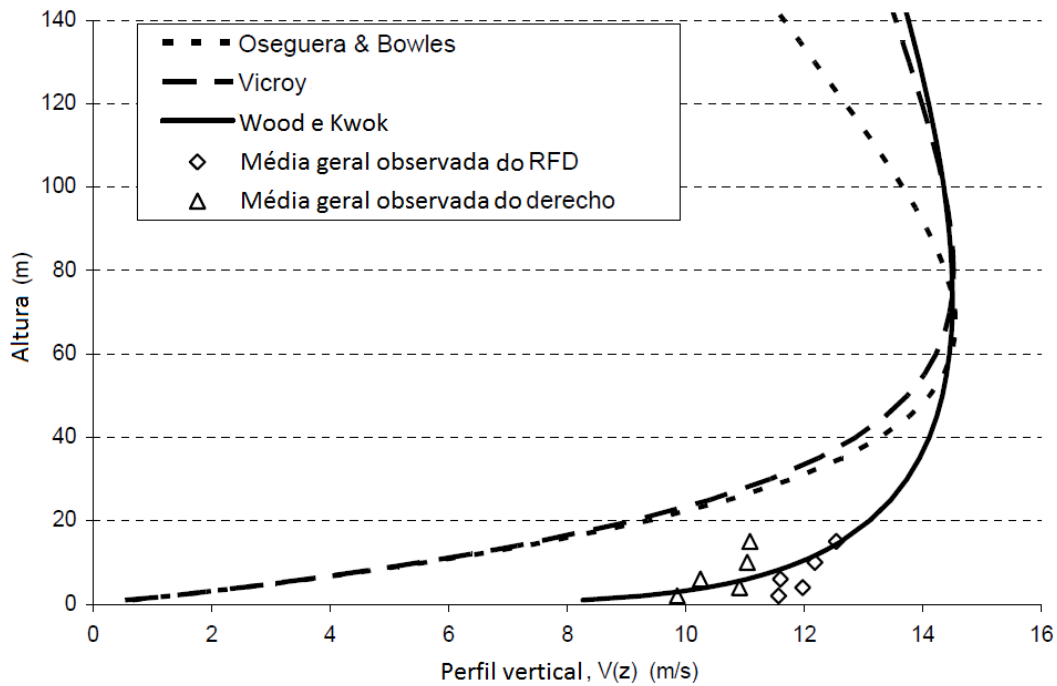


Figura 3.11 – Comparação entre três modelos para perfis verticais de velocidade média do vento. (Adaptado de (CHEN e LETCHFORD, 2004)).

PONTE JÚNIOR (2005) utilizou os mesmos parâmetros da Tabela 3.2 para fazer a verificação do seu modelo. Através de três valores diferentes de distâncias radiais, ele obteve os resultados comparativos apresentados na Figura 3.12:

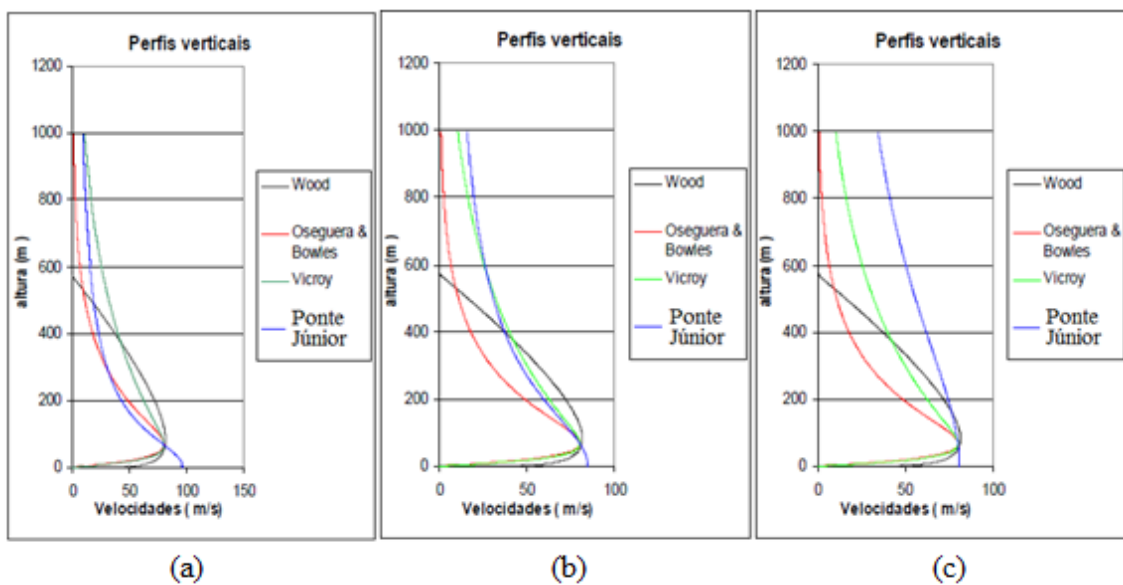


Figura 3.12 – Comparação dos perfis verticais de velocidade média do vento para diferentes distâncias radiais r . (a) $r = 100\text{m}$; (b) $r = 200\text{m}$; (c) $r = 1211\text{m}$. (PONTE JÚNIOR, 2005)

Observa-se que para baixas altitudes o modelo de PONTE JÚNIOR (2005) apresenta resultados afastados dos modelos de OSEGUERA e BOWLES (1988), VICROY (1992 *apud* (QU e JI, 2009)), WOOD e KWOK (1998). Isto pode estar relacionado a hipótese adotada de fluido sem viscosidade.

Para altitudes acima de 80m e com o valor da distância radial de 100m, o resultado de PONTE JÚNIOR (2005) se aproximou do modelo de OSEGUERA e BOWLES (1988) (Figura 3.12.a). Para o valor da distância radial de 200m, o resultado se aproximou do modelo de VICROY (1992 *apud* (QU e JI, 2009)), (Figura 3.12.b). Com o valor da distância radial de 1211m, o resultado de PONTE JÚNIOR (2005) se aproximou apenas do pico de velocidade dos modelos comparados, não se aproximando de nenhum deles (Figura 3.12.c).

Fazendo uma análise crítica relacionada as medições obtidas por CHEN e LETCHFORD (2004) de todos os modelos em baixas altitudes, foi escolhido para este trabalho o modelo de WOOD e KWOK (1998) para o cálculo do perfil vertical de velocidades radiais.

4 Simulação do campo de velocidade e das forças de vento

4.1 Implementação do programa SubDown

O programa SubDown é um programa computacional em linguagem Fortran desenvolvido neste trabalho com o intuito de simular o campo de velocidade de vento de um *downburst* em movimento com velocidade de vento de fundo (V_0) constante e fornecer, em um ponto qualquer situado no espaço, a velocidade e a direção da componente radial da velocidade de vento ao longo do tempo.

Os modelos utilizados no desenvolvimento deste programa para caracterizar a velocidade de vento encontram-se listados na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Modelos utilizados no programa SubDown

Descrição	Simbologia	Equação	Autores
Perfil Vertical de Velocidades	$V_r(z)$	(3.20)	WOOD E KWOK
Perfil Radial de Velocidades	$V_r(r)$	(3.24) e (3.25)	HOLMES E OLIVER
Decaimento Exponencial	$V_r(t)$	(3.24) e (3.25)	HOLMES E OLIVER
Flutuação	$v(z, t)$	(3.31)	CHEN E LETCHFORD

A adição da velocidade de vento de fundo na velocidade radial do *downburst* foi feita através do mesmo método aplicado por HOLMES e OLIVER (2000), somando-se vetorialmente as duas velocidades.

As etapas de cálculo do programa para cálculo de velocidade de vento em um ponto de coordenadas (x, y, z) são:

- Cálculo da máxima velocidade radial do *downburst* na coordenada z (altura) do ponto de análise através do perfil vertical de velocidades;
- Atualização das coordenadas no plano horizontal (x, y) do eixo central do *downburst* devido ao deslocamento causado pelo vento de fundo (V_0);
- Cálculo da distância r do centro do *downburst* ao ponto de análise;
- Cálculo da velocidade radial V_r em função da distância atualizada do ponto de análise ao centro do *downburst* através do perfil radial de velocidades;
- Cálculo da direção da velocidade radial no ponto de análise através da soma vetorial das velocidades V_0 e V_r ;

- Cálculo da parcela flutuante da velocidade e adição da mesma à velocidade radial do item anterior;
- Cálculo das componentes horizontais x e y da velocidade do *downburst* somadas as componentes x e y da velocidade do vento de fundo.

Os dados de entrada são:

- A máxima velocidade radial do *downburst* ($V_{r,máx}$);
- A altura onde a velocidade é igual a metade de $V_{r,máx}$ (δ);
- A distância na qual ocorre $V_{r,máx}$ ($r_{máx}$);
- A escala de comprimento radial (R);
- A constante de tempo (T).
- O tempo T_0 em que o *downburst* inicia;
- A posição inicial do *downburst* (x, y);
- A velocidade do vento de fundo e o ângulo que ele faz em relação ao eixo x.

4.2 Programa para análise estrutural

Para as análises estruturais foi utilizado o programa ANEST (BATTISTA *et al.*, 2000). Ele faz a análise estática linear de estruturas planas modeladas por elementos de barra e calcula, através do método dos deslocamentos, os esforços, os deslocamentos e as reações destas estruturas.

Algumas implementações foram feitas neste programa (DAMASCENO NETO *et al.*, 2011, DAMASCENO NETO e PAULA, 2011). São elas:

- Análise estática não linear, através do método incremental, que consiste em aplicar o carregamento total em incrementos, correspondendo uma configuração de equilíbrio a cada etapa;
- Análise de vibrações livres não amortecidas pelo método de Jacobi, etapa preliminar a qualquer estudo de dinâmica estrutural, possibilitando a determinação das características dinâmicas da estrutura, tais como frequências naturais e modos naturais de vibração.
- Análise dinâmica linear no domínio do tempo, através do método de Runge Kutta, que gera a resposta de equações diferenciais de segunda ordem. Nesta implementação, utilizou-se o método de superposição modal.

O programa SubDown foi utilizado como uma sub-rotina do programa ANEST, já com as três implementações descritas acima. Desta forma, este programa se torna capaz de

simular os valores de velocidade de vento originados de um *downburst* sobre uma estrutura e analisá-la no plano, calculando deslocamentos estáticos e dinâmicos.

4.3 Validação do Programa SubDown

Para a validação do programa, foi utilizado o estudo de SAVORY (2001), que teve como referência o estudo de HOLMES e OLIVER (1996) e VICROY (1992 *apud* (QU e JI, 2009)).

Em (SAVORY, 2001) foi feita uma análise numérica do campo de velocidade tridimensional de um *downburst* sendo transladado por um vento de fundo em direção a uma torre de transmissão, como mostra a Figura 4.1.

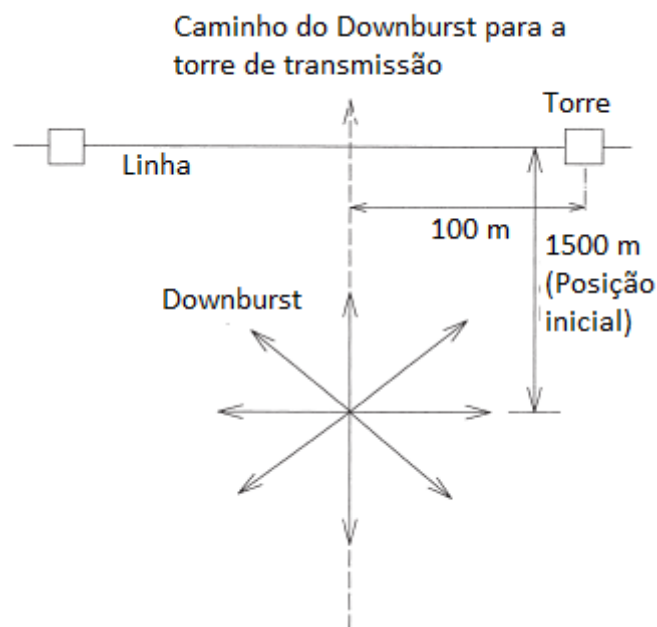


Figura 4.1 – Modelo esquemático do *downburst* e seu caminho em direção a torre de transmissão. (Adaptado de (SAVORY, 2001)).

Os dados adotados para as características do *downburst* foram:

- $V_{r,máx} = 80 \text{ m/s}$;
- $z_m = 60 \text{ m}$;
- $r_{máx} = 650 \text{ m}$;
- $R = 350 \text{ m}$;
- $T = 200 \text{ s}$;
- Coordenadas do ponto de análise na torre $(x, y, z) = (0; 0; 43,7)$.

Para o cálculo do perfil vertical, não foi utilizado em (SAVORY, 2001) o fator de 1,22 conforme consta na equação (3.19) do modelo de VICROY (1992 *apud* (QU e JI, 2009)), ficando o cálculo deste perfil da seguinte forma:

$$V_h(z) = [e^{-0,15(z/z_m)} - e^{-3,2175(z/z_m)}]V_{h,máx} \quad (4.1)$$

A comparação entre os resultados obtidos por SAVORY (2001) e pelo programa SubDown utilizando a equação (4.1) para o perfil vertical de velocidades é apresentada na Figura 4.2.

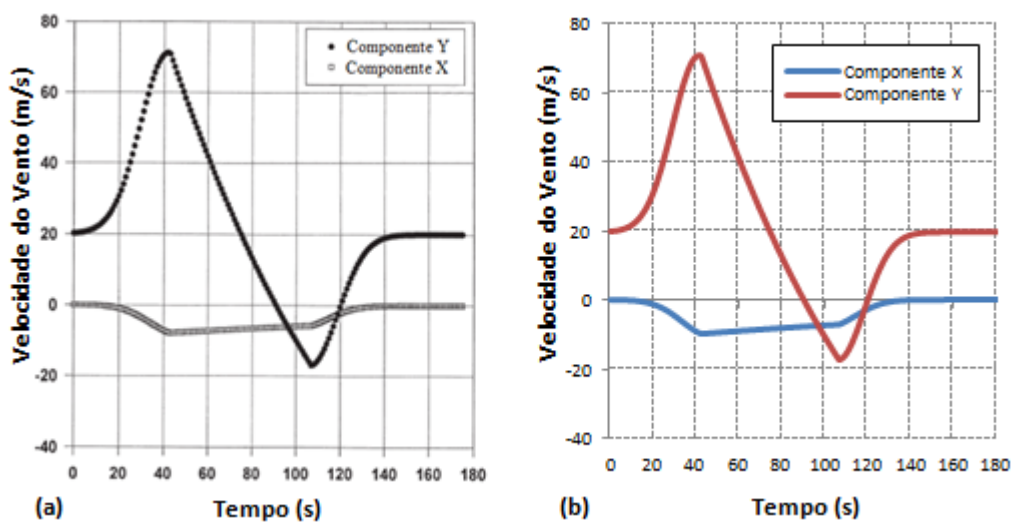


Figura 4.2 – Validação com o modelo de SAVORY (2001). (a) Resultado de SAVORY (2001); (b) Resultado do programa SubDown.

Conclui-se através desta resposta que o programa SubDown reproduziu um resultado esperado para as duas componentes de velocidade e também para o decaimento da mesma ao longo do tempo com o modelo apresentado.

Na Figura 3.11 apresentou-se uma comparação entre alguns modelos de perfil vertical e resultados experimentais, da qual se concluiu que o perfil vertical de WOOD e KWOK (1998) é o mais adequado.

Dessa forma, este modelo será utilizado nas análises subsequentes deste trabalho. Aproveitando o exemplo de Savory (Figura 4.1), apresenta-se na Figura 4.3 uma comparação da velocidade radial ao longo do tempo obtida com os modelos de WOOD e KWOK (1998) e de SAVORY (2001) obtidos com o programa SubDown.

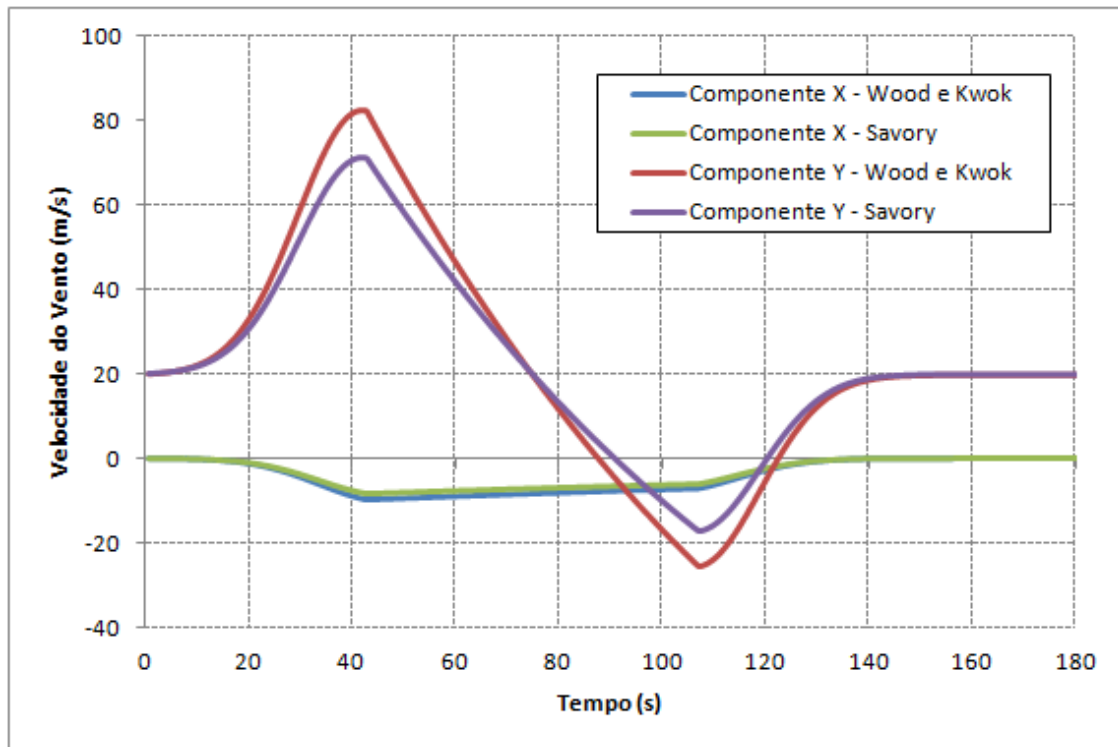


Figura 4.3 – Comparação entre perfil vertical de WOOD e KWOK (1998) e de SAVORY (2001).

O resultado obtido mostra uma evolução das velocidades ao longo do tempo bem semelhante uma da outra, com o detalhe de que no modelo de WOOD e KWOK (1998) o valor da velocidade do primeiro e do segundo pico é de 83,21 m/s e 26,26 m/s respectivamente, enquanto que no modelo de VICROY (1992 *apud* (QU e JI, 2009)), estes valores são de 71,62 m/s e 17,95 m/s respectivamente, dando resultados maiores no modelo de WOOD e KWOK (1998) da ordem de 15% para o primeiro pico e 45% para o segundo.

Além desta validação, utilizou-se o programa SubDown para tentar reproduzir a velocidade média variável do registro de velocidades de vento do anemômetro na Base da Força Aérea de Andrews (BFAA) (Figura 2.8). Um estudo similar foi realizado por HOLMES e OLIVER (2000) que, através de tentativas e erro, encontraram alguns dados para caracterização do *downburst*:

- $V_{r,máx}(z = 5m) = 47m/s$;
- $r_{máx} = 1000m$;
- $R = 700m$;
- Vento de fundo $V_0 = 12 m/s$;
- Coordenadas do ponto de análise na torre $(x, y, z) = (0; 0; 5)$;

- Offset do caminho do *downburst* em relação ao ponto de análise = 150 m.

Utilizando esses valores adotados e substituindo o valor de $V_{r,máx}$ pelo valor calculado do programa, os dados utilizados foram:

- $V_{r,máx}(z = z_{v_r,máx}) = 80\text{m/s}$;
- $\delta = 400\text{m}$;
- $T = 1000\text{s}$;
- Coordenadas do ponto inicial do *downburst* $(x, y) = (-3500; -150)$.

A Figura 4.4 apresenta uma comparação entre o resultado de HOLMES e OLIVER (2000) e o resultado obtido pelo programa:

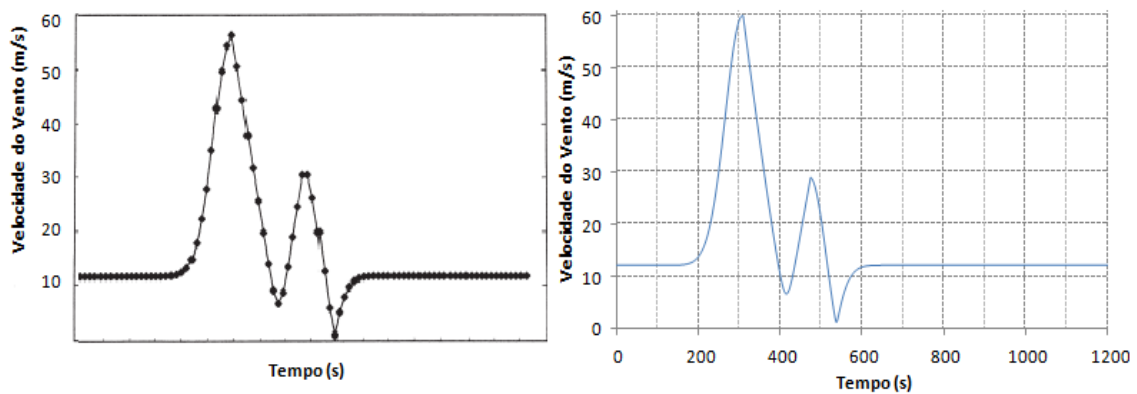


Figura 4.4 – Validação com a reprodução do registro da BFAA por HOLMES e OLIVER (2000). (a) Reprodução do registro da BFAA (HOLMES e OLIVER, 2000); (b) Reprodução dos resultados realizada no programa SubDown.

Os resultados encontrados nas duas validações foram satisfatórios para o prosseguimento de um estudo mais aprofundado deste evento em estruturas civis.

5 Exemplos numéricos e resultados de estruturas sob ação de vento do tipo *downburst*

5.1 Introdução

Concluída a validação do programa SubDown, foram então desenvolvidas duas análises. A primeira delas trata de um trecho de uma linha de transmissão com torres autoportantes e tem por objetivo a determinação do número de torres que podem colapsar por ação de um *downburst*. A segunda análise focaliza o comportamento dinâmico de uma estrutura de torre para chaminé, em concreto armado e com 180 m de altura, sujeita à ação de um *downburst* e comparação em relação ao seu comportamento quando sujeita a ventos EPS. Antes da apresentação das análises citadas, é feito um estudo paramétrico a fim de se obter uma sensibilidade mais apurada da influência das variáveis do modelo utilizado para geração do campo de velocidades.

5.2 Estudo dos parâmetros do modelo da velocidade radial (V_r)

A Figura 5.1 ilustra o aspecto da variação da velocidade média V_r ao longo do tempo, mostrando as características do sinal que serão analisadas neste item em função dos parâmetros do modelo. As características são as seguintes:

- V_1, V_2 – Valores de pico de V_r ;
- Δt – Afastamento no tempo entre os picos de V_r ;
- α – Inclinação do crescimento de V_r em direção ao 1º pico.

O ponto de análise localiza-se a uma altura $z = 10\text{m}$ e será considerada a passagem de um *downburst* típico situado a uma distância inicial D a este ponto (Figura 5.2).

Os parâmetros do modelo de V_r são os seguintes:

$$V_{r,m\acute{a}x}, \delta, T, r_{m\acute{a}x}, R \text{ e } D$$

cujas definições encontram-se no capítulo 3.

O valor de R , será considerado tipicamente como a metade do valor de $r_{m\acute{a}x}$. Para $V_{r,m\acute{a}x}$ e δ , serão adotados os valores constantes iguais a 80m/s e 400m, respectivamente.

Variando então os parâmetros T , $r_{m\acute{a}x}$ e D , pretende-se avaliar a influência de cada um no aspecto do gráfico $V_r \times t$.

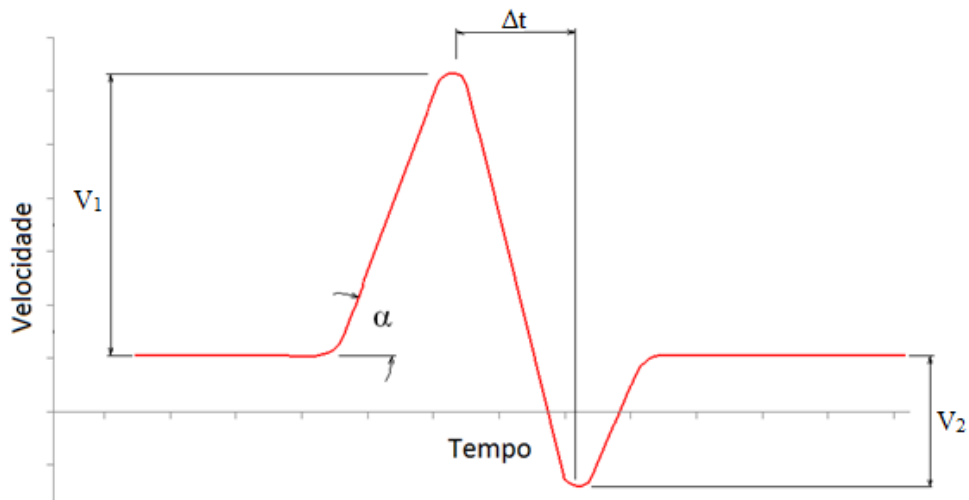


Figura 5.1 – Aspecto da variação de V_r ao longo do tempo.

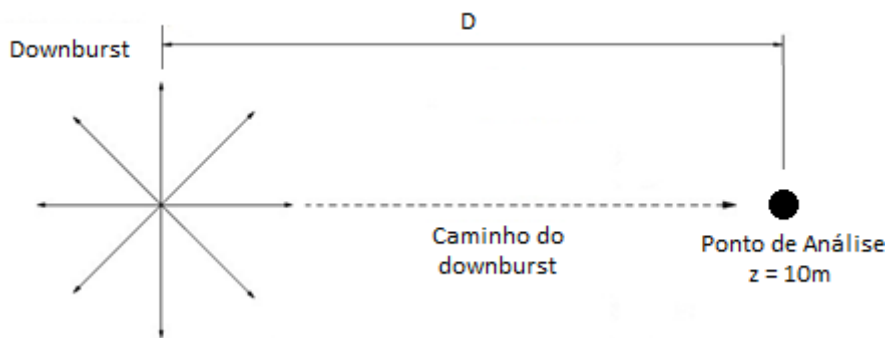


Figura 5.2 – Caminho de um *downburst* típico em direção a um ponto de análise.

5.2.1 Variação de T

As Figura 5.3a e b mostram os gráficos $V_r \times t$ para valores de T iguais a 200s e 600s, respectivamente, mantendo-se:

- $r_{m\acute{a}x} = 1500\text{m}$;
- $D = 2000\text{m}$.

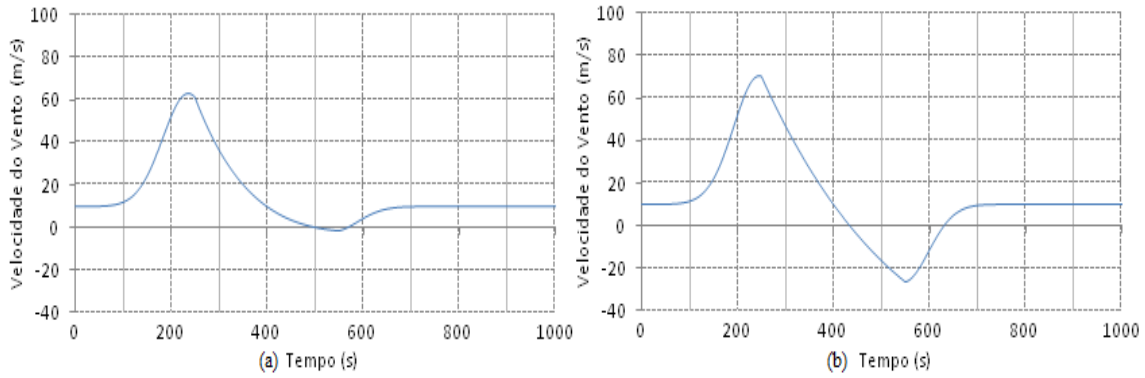


Figura 5.3 – Variação do parâmetro T. (a) T = 200s; (b) T = 600s

Observa-se nas Figura 5.3a e b que, quanto maior o T maiores são os valores de pico V_1 e V_2 e também maior é a razão V_2 / V_1 . Vê-se que o intervalo de tempo Δt entre picos não se altera.

5.2.2 Variação de $r_{m\acute{a}x}$

As Figura 5.4a e b mostram os gráficos $V_r \times t$ para valores de $r_{m\acute{a}x}$ iguais a 1000m e 2000m, respectivamente, mantendo-se:

- $T = 400s$;
- $D = 2000m$.

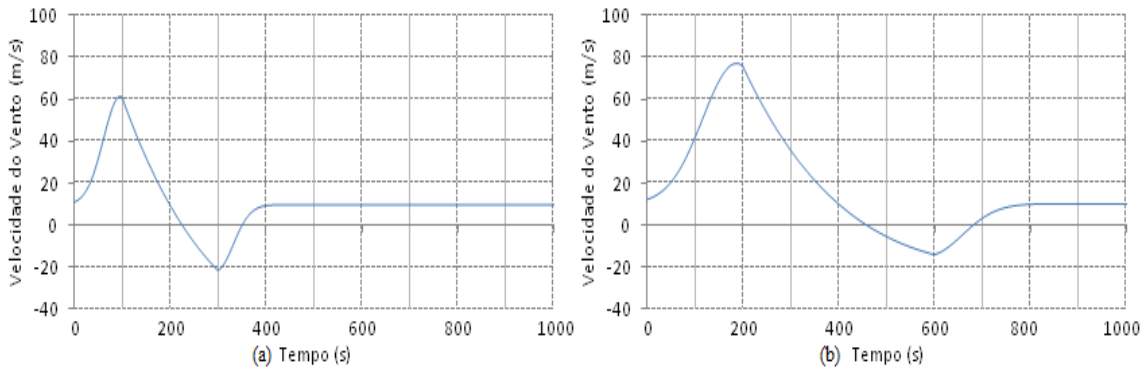


Figura 5.4 – Variação do parâmetro $r_{m\acute{a}x}$. (a) $r_{m\acute{a}x} = 1000m$; (b) $r_{m\acute{a}x} = 2000m$

Com o acréscimo de $r_{m\acute{a}x}$, têm-se um aumento de V_1 e um decréscimo de V_2 , além de um acréscimo do intervalo de tempo Δt . A inclinação α diminui com o aumento de $r_{m\acute{a}x}$.

5.2.3 Variação de D

As Figura 5.5a e b mostram os gráficos $V_r \times t$ para valores de D iguais a 1500m e 3000m, respectivamente, mantendo-se:

- $r_{m\acute{a}x} = 1500\text{m}$;
- $T = 400\text{s}$.

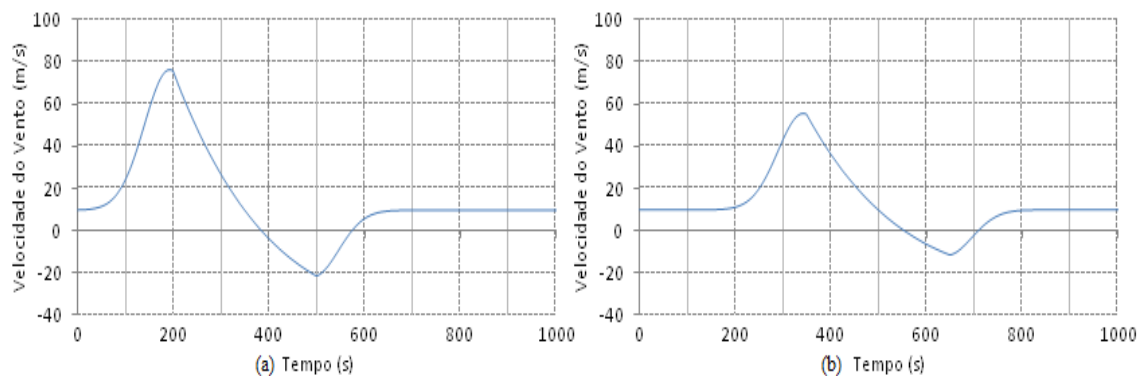


Figura 5.5 – Variação do parâmetro D. (a) $D = 1500\text{m}$; (b) $D = 3000\text{m}$

Vê-se que quanto mais distante inicia-se o *downburst*, menor é a influência no ponto de análise.

5.3 Trecho de linha de transmissão com sete torres

5.3.1 Descrição da estrutura e das análises efetuadas

Para poder avaliar a dimensão da área de influência que um *downburst* pode atingir em termos de torres colapsadas em uma linha de transmissão, foram feitas duas simulações com este tipo de evento, sendo transladado por um vento de fundo a 90° e a 45° com o eixo da linha. Utiliza-se o exemplo de linha de transmissão analisado em trabalhos anteriores (RODRIGUES, 1999, BATTISTA, 2010, 2011, KOELLER, 2012). Trata-se de uma linha de torres de alta tensão, espaçadas de 450 metros (Figura 5.6). As torres são do tipo autoportantes, com base quadrada e 32,86 metros de altura, executadas com perfis cantoneira de aço conforme a silhueta ilustrada na Figura 5.7. As linhas aéreas são compostas por 3 condutores e 2 para-raios, com diâmetros de respectivamente 21,9 mm e 9,15 mm cada. Eles encontram-se fixados às torres a uma altura de 31 m e 32,86 m respectivamente (Figura 5.7).

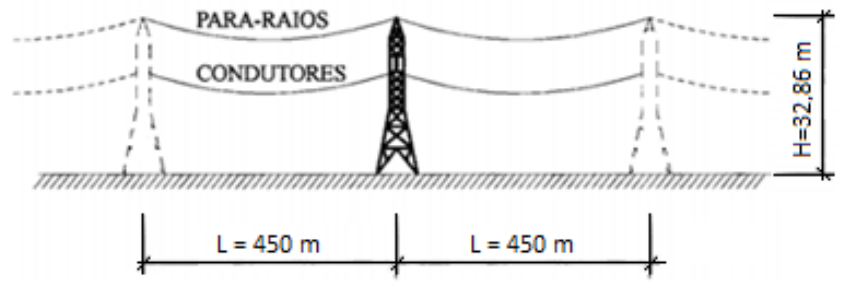


Figura 5.6 – Esquema estrutural adotado para análise. (Adaptado de (RODRIGUES, 1999)).

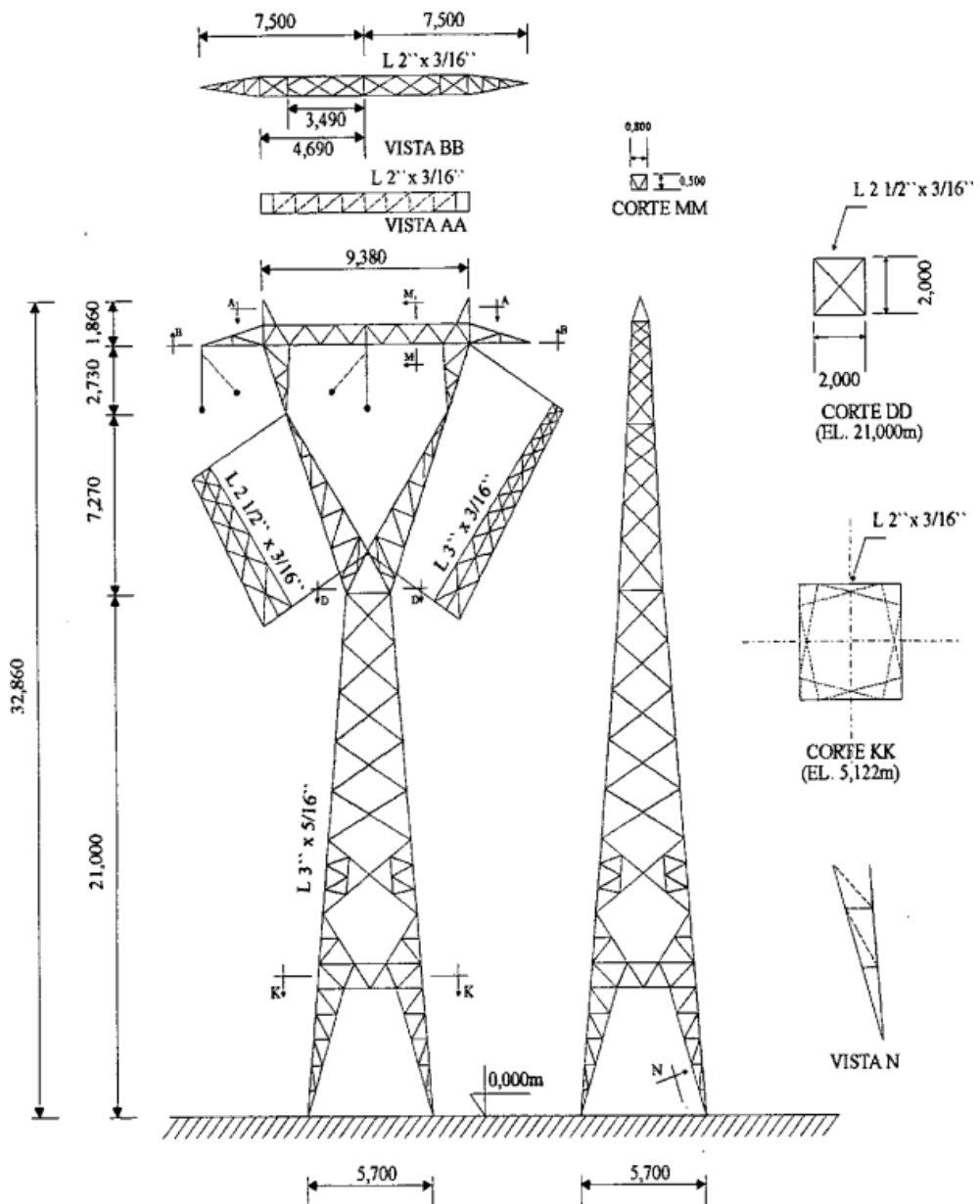


Figura 5.7 – Silhueta da torre (dimensões em metros). (Adaptado de (RODRIGUES, 1999)).

Foi escolhido para a região de análise, um trecho composto por sete destas torres de transmissão (Figura 5.8).

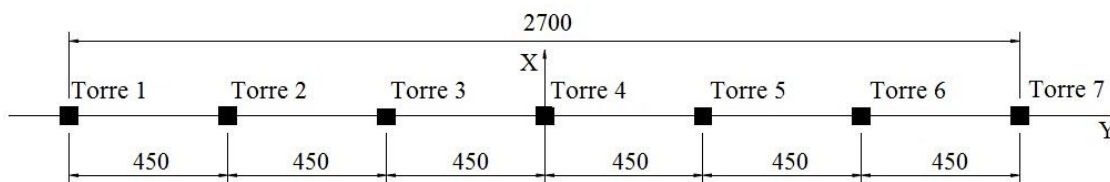


Figura 5.8 – Modelo esquemático da região da análise.

Nesta configuração, a componente horizontal da velocidade do vento na direção x é predominante para o colapso da estrutura. Isso ocorre devido aos cabos, que atuam como um apoio elástico para flexão no plano YZ , o que não na flexão no plano XZ , onde cada torre se comporta como engastada na base e livre no topo.

O cálculo do número de torres colapsadas será efetuado por comparação entre os momentos solicitantes máximos na base das torres (momento de tombamento) devidos à passagem do *downburst* e o momento resistente, no plano de flexão da torre transversal à linha (plano XZ). Esta verificação de segurança é feita desprezando-se os seguintes efeitos:

- Esforços devido ao peso próprio das linhas e torres;
- Esforços devido à componente Y da velocidade do vento;
- Esforços do colapso de uma torre nos esforços nas torres adjacentes.

Foram desenvolvidas duas hipóteses para o deslocamento do *downburst*. Uma delas será com um vento de fundo a 90° em relação ao eixo Y e a outra, um vento de fundo a 45° . A posição inicial do *downburst* para os dois casos foi de 1900 metros, ortogonal a linha de transmissão. Dessa forma, pretende-se fazer uma comparação através dos momentos causados pelo *downburst* e pela ação de vento da norma NBR6123 na direção X .

Para calcular o momento na base das torres, foi aproveitado do trabalho de KOELLER (2012), as divisões dos módulos da torre e o posicionamento do centro de gravidade de cada um deles (Figura 5.9). Para o cálculo do momento de tombamento máximo devido à passagem do *downburst*, utilizou-se o perfil vertical de velocidade de vento correspondente ao instante de tempo em que ocorre a máxima velocidade em cada torre.

KOELLER (2012) efetuou para este exemplo de torre verificações de segurança dos elementos em perfil cantoneira na base da torre para ações de peso próprio e vento segundo as normas NBR5422 e NBR6123. Para uma velocidade de vento básica igual a

41 m/s conforme a definição da NBR6123, o montante mais solicitado em compressão atendeu sem folga a margem de segurança requerida no projeto representada pelos coeficientes de segurança γ_f igual a 1,4 e γ_{a1} igual a 1,10. Considerando que este montante é o elemento crítico do projeto, isto significa que o momento de tombamento nominal correspondente a esta velocidade de vento multiplicado pelos coeficientes γ_f e γ_{a1} pode ser tomado como momento resistente ou momento último da torre (M_u)

Para o cálculo de M_u foram então considerados os seguintes dados:

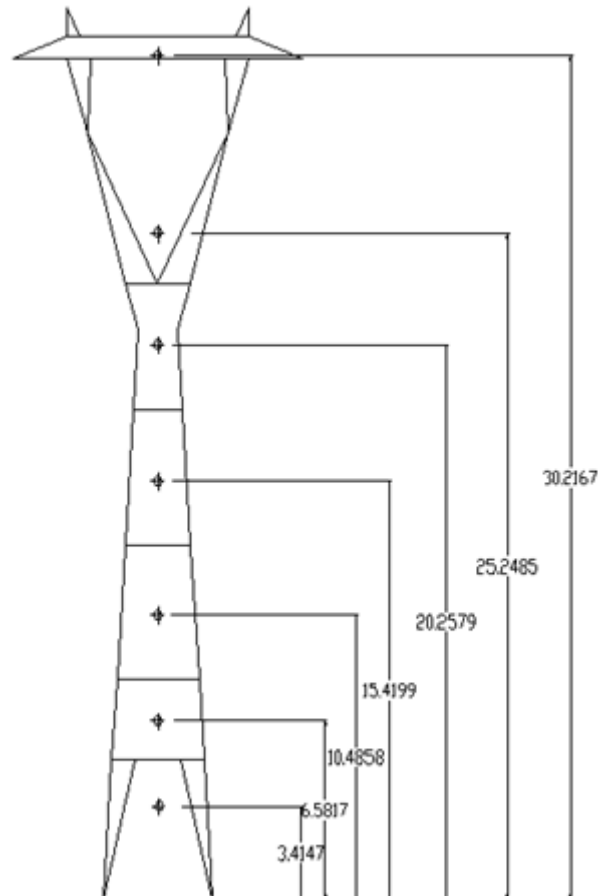


Figura 5.9 – Projeção do tronco de pirâmide no plano vertical (cotas em metros),
Battista (2010, 2011).

5.3.2 Momento de tombamento último

- Velocidade básica de vento: $V_0 = 41$ m/s, medido a 10 metros do solo, com tempo de integração de 3 segundos;
- O terreno com categoria II, Classe B;
- Fator topográfico $S_1 = 1,0$;
- Fator S_2 , de acordo para cada altura (exemplificados nas tabelas das análises);

➤ Fator $S_3 = 1,10$.

Para o vento incidindo nos cabos, foi adotada uma altura para o cálculo da correção do fator S_2 de 22,9 metros para os cabos condutores e de 28,4 metros para os cabos para-raios. Vale ressaltar que, as forças que eles aplicam na torre encontram-se nas alturas de 31 m e 32,86 m respectivamente.

Tabela 5.1 – Momento na base das torres de 1 a 7 para ação de vento de projeto segundo a NBR 6123 com $V_0 = 41$ m/s, $S_1 = 1,0$, $S_3 = 1,10$.

Momento na base das Torres - EPS								
Módulo	Altura	S_2	Vk (m/s)	q (N/m ²)	Ca	AEV (m ²)	F (kN)	M (kN.m)
1	3.41	0.92	41.49	1055	2.38	1.09	2.7	9
2	6.58	0.93	41.94	1078	3.25	1.86	6.5	43
3	10.49	0.98	44.20	1197	3.50	1.11	4.6	49
4	15.42	1.02	46.00	1297	3.42	1.71	7.6	117
5	20.26	1.04	46.90	1349	3.23	1.59	6.9	140
6	25.25	1.06	47.81	1401	3.21	1.58	7.1	179
7	30.22	1.08	48.71	1454	2.70	1.18	4.6	140
ΣM (kN.m)								677

Momento na base das torres devido aos Cabos - EPS									
Cabo	Altura	S_2	Vk (m/s)	q (N/m ²)	Ca	AEV (m ²)	F (kN)	Altura de aplicação de F (m)	M (kN.m)
3 Cond.	22.90	0.90	40.59	1010	1.00	29.57	29.9	31.0	926
2 P. Raio	28.40	0.93	41.94	1078	1.00	8.24	8.9	32.9	292
ΣM (kN.m)									1281
ΣM Total (kN.m)									1895

Somando as parcelas de momento devidas ao vento na torre e nos cabos, tem-se o momento máximo de projeto na base das torres igual a 1895 kN.m. Estas torres foram projetadas para ventos originados de ciclones extratropicais, conforme modelo de ação de vento da norma NBR6123. A verificação de segurança supõe um coeficiente global de segurança igual a $1,4 \times 1,10$, igual a 1,54.

Com as hipóteses já mencionadas, pode-se concluir que o momento global na base que levaria ao colapso da torre é igual a:

$$M_u = 1,54 \times 1895 = 2918 \text{ kN.m} \quad (5.1)$$

5.3.3 Vento de fundo a 90° com o eixo da linha de transmissão

Nesta análise, a posição inicial do *downburst* é em cima do eixo X, a 1900 metros de distância da torre 4, sendo transladado por um vento de fundo que faz um ângulo de 90° com o eixo Y (Figura 5.10).

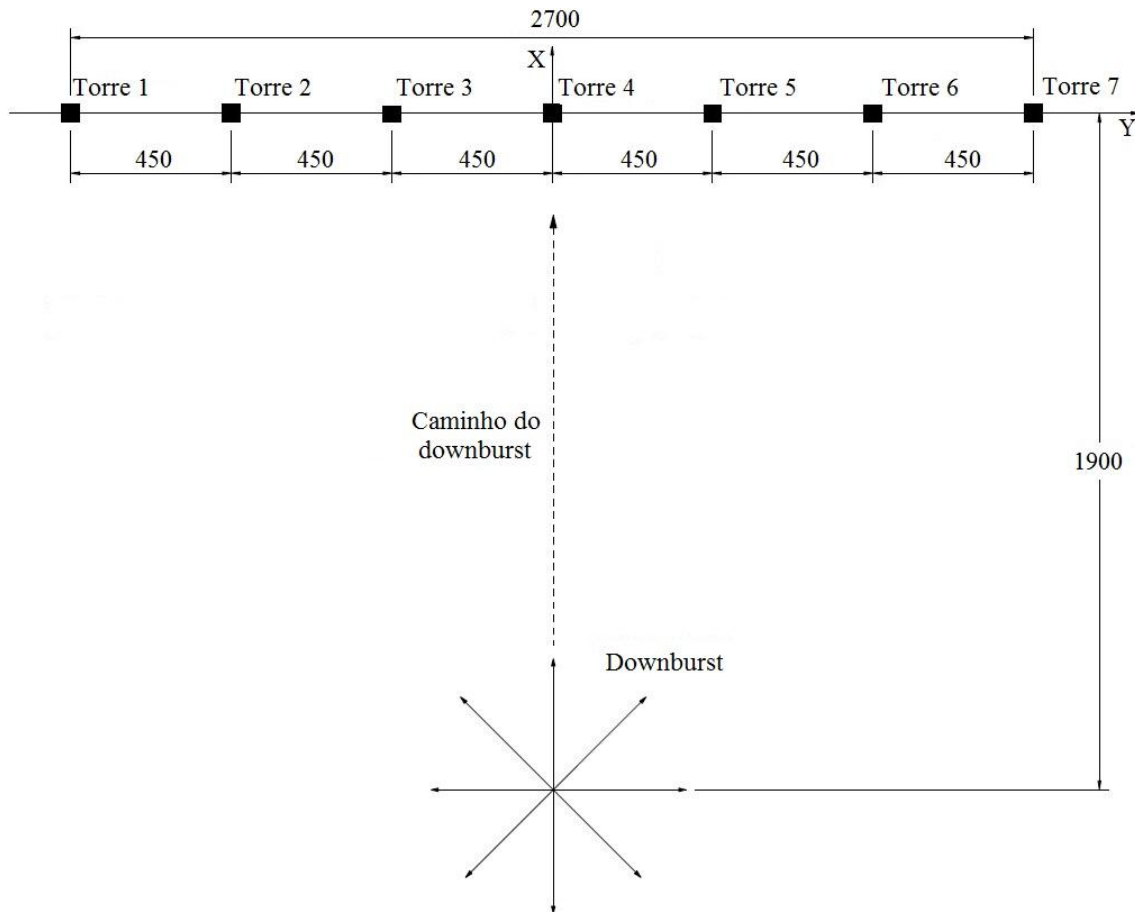


Figura 5.10 – Modelo esquemático do *downburst* se movimentando a 90° em relação ao eixo Y (cotas em metro).

Para esta situação, foram adotadas as seguintes hipóteses:

Dados do downburst

- Velocidade radial máxima ($V_{r,máx}$) : 80 m/s
- Altura onde a velocidade é igual a metade de $V_{r,máx}$: 400 m
- Distância radial do centro do *downburst* ao ponto onde ocorre $V_{r,máx}$: 1500m
- Escala de comprimento radial: 750m
- Duração característica da tormenta: 300s
- Tempo inicial do *downburst*: 100s

Posição inicial da tormenta

- Coordenada X = -1900 m
- Coordenada Y = 0 m

Vento de fundo

- Velocidade: 20 m/s
- Angulação com a linha de transmissão: 90°

A Figura 5.11 apresenta as variações das componentes X da velocidade de vento no tempo obtidas para cada um dos 7 pontos observados (topo das torres 1 a 7). Os instantes em que estas velocidades são máximas (em torno de $t = 160$ s) são selecionados para elaborar os perfis verticais instantâneos de velocidade, mostrados na Figura 5.12, com os quais serão calculados os momentos de tombamento máximos. Estes perfis são comparados na figura ao perfil de velocidade V_k usado para o cálculo do momento último de tombamento da torre.

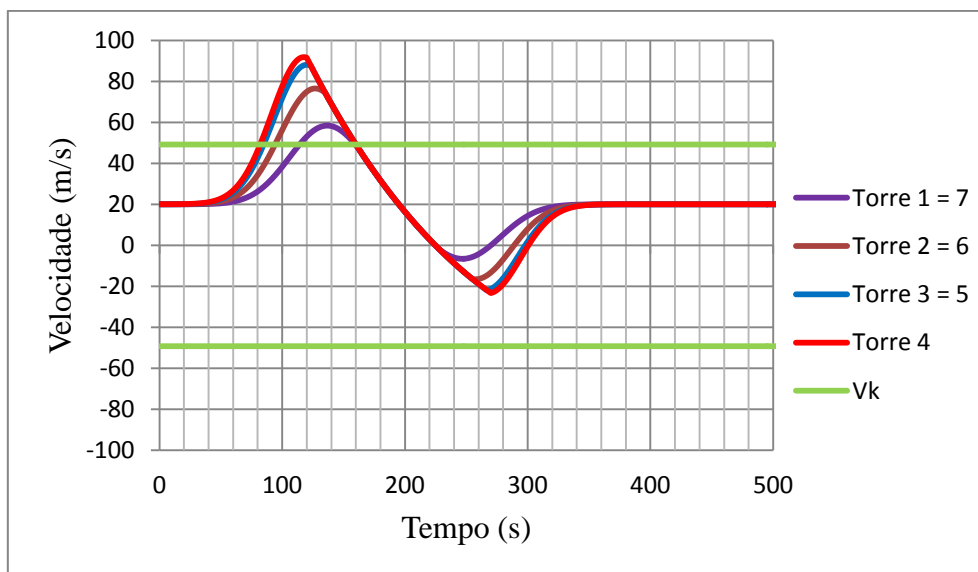


Figura 5.11 – Componente x da velocidade horizontal do vento no topo das torres (altura $z = 32,8$ metros).

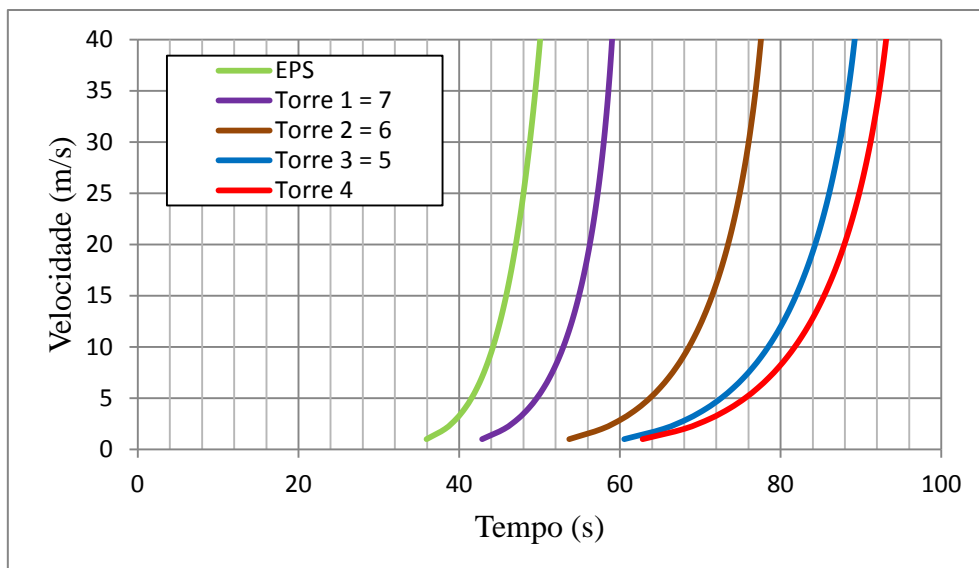


Figura 5.12 – Perfil de velocidade ao longo da altura para vento EPS e vento *downburst* nas torres de 1 a 7 no instante de velocidade máxima (aproximadamente $t = 160s$ na Figura 5.11).

Tabela 5.2.a – Momento na base das torres 1 e 7 para ação do *downburst* no instante em que a velocidade V_x é máxima.

<i>Downburst</i>		Momento na base da Torre - Torre 1 = 7					
Módulo	Altura (m)	V_x (m/s)	q (N/m ²)	C_a	AEV (m ²)	F (kN)	M (kN.m)
1	3.41	47.91	1407	2.38	1.09	3.6	12
2	6.58	50.94	1591	3.25	1.86	9.6	63
3	10.49	53.18	1734	3.50	1.11	6.7	70
4	15.42	55.03	1857	3.42	1.71	10.9	167
5	20.26	56.30	1943	3.23	1.59	10.0	202
6	25.25	57.28	2011	3.21	1.58	10.2	257
7	30.22	58.02	2063	2.70	1.18	6.6	199
ΣM (kN.m)							972

<i>Downburst</i>		Momento na base das torres devido aos Cabos - Torre 1 = 7						
Cabo	Altura (m)	V_x (m/s)	q (N/m ²)	C_a	AEV (m ²)	F (kN)	Altura de aplicação de F (m)	M (kN.m)
3 Cond.	22.90	56.85	1981	1.00	29.57	58.6	31.0	1816
2 P. Raio	28.40	57.77	2046	1.00	8.24	16.9	32.9	554
ΣM (kN.m)								2370
ΣM Total (kN.m)								3342

Tabela 5.2.b – Momento na base das torres 2 e 6 para ação do *downburst* no instante em que a velocidade V_x é máxima.

<i>Downburst</i>		Momento na base da Torre - Torre 2 = 6					
Módulo	Altura (m)	V_x (m/s)	q (N/m ²)	C_a	AEV (m ²)	F (kN)	M (kN.m)
1	3.41	61.17	2294	2.38	1.09	5.9	20
2	6.58	65.64	2641	3.25	1.86	16.0	105
3	10.49	68.94	2914	3.50	1.11	11.3	118
4	15.42	71.68	3149	3.42	1.71	18.4	284
5	20.26	73.55	3316	3.23	1.59	17.0	345
6	25.25	74.99	3447	3.21	1.58	17.5	441
7	30.22	76.08	3548	2.70	1.18	11.3	342
ΣM (kN.m)							1656

<i>Downburst</i>		Momento na base das torres devido aos Cabos - Torre 2 = 6						
Cabo	Altura (m)	V_x (m/s)	q (N/m ²)	C_a	AEV (m ²)	F (kN)	Altura de aplicação de F (m)	M (kN.m)
3 Cond.	22.90	74.36	3390	1.00	29.57	100.2	31.0	3107
2 P. Raio	28.40	75.71	3514	1.00	8.24	28.9	32.9	951
ΣM (kN.m)								4058
ΣM Total (kN.m)								5713

Tabela 5.2.c – Momento na base das torres 3 e 5 para ação do *downburst* no instante em que a velocidade V_x é máxima.

<i>Downburst</i>		Momento na base da Torre - Torre 3 = 5					
Módulo	Altura (m)	V_x (m/s)	q (N/m ²)	C_a	AEV (m ²)	F (kN)	M (kN.m)
1	3.41	69.51	2962	2.38	1.09	7.7	26
2	6.58	74.89	3438	3.25	1.86	20.8	137
3	10.49	78.86	3812	3.50	1.11	14.8	155
4	15.42	82.15	4137	3.42	1.71	24.2	373
5	20.26	84.40	4367	3.23	1.59	22.4	454
6	25.25	86.13	4547	3.21	1.58	23.0	582
7	30.22	87.44	4687	2.70	1.18	14.9	452
ΣM (kN.m)							2179

Downburst		Momento na base das torres devido aos Cabos - Torre 3 = 5						
Cabo	Altura (m)	Vx (m/s)	q (N/m ²)	Ca	AEV (m ²)	F (kN)	Altura de aplicação de F (m)	M (kN.m)
3 Cond.	22.90	85.38	4468	1.00	29.57	132.1	31.0	4095
2 P. Raio	28.40	87.00	4640	1.00	8.24	38.2	32.9	1256
ΣM (kN.m)								5351
ΣM Total (kN.m)								7530

Tabela 5.2.d – Momento na base da torre 4 para ação do *downburst* no instante em que a velocidade Vx é máxima.

Downburst		Momento na base da Torre - Torre 4					
Módulo	Altura (m)	Vx (m/s)	q (N/m ²)	Ca	AEV (m ²)	F (kN)	M (kN.m)
1	3.41	72.30	3204	2.38	1.09	8.3	28
2	6.58	77.98	3727	3.25	1.86	22.5	148
3	10.49	82.17	4139	3.50	1.11	16.0	168
4	15.42	85.65	4497	3.42	1.71	26.3	406
5	20.26	88.03	4750	3.23	1.59	24.4	494
6	25.25	89.85	4949	3.21	1.58	25.1	633
7	30.22	91.24	5103	2.70	1.18	16.3	492
ΣM (kN.m)							2369

Downburst		Momento na base das torres devido aos Cabos - Torre 4						
Cabo	Altura (m)	Vx (m/s)	q (N/m ²)	Ca	AEV (m ²)	F (kN)	Altura de aplicação de F (m)	M (kN.m)
3 Cond.	22.90	89.06	4862	1.00	29.57	143.7	31.0	4456
2 P. Raio	28.40	90.77	5051	1.00	8.24	41.6	32.9	1367
ΣM (kN.m)								5823
ΣM Total (kN.m)								8192

Tabela 5.3 – Resumo dos momentos nas bases das torres de 1 a 7 para um vento de fundo a 90° da linha de transmissão.

Resumo dos Momentos na Base das Torres (kN.m)			
Torre 1 = 7	Torre 2 = 6	Torre 3 = 5	Torre 4
3342	5713	7530	8192

As Tabelas 5.2.a a 5.2.d apresentam o cálculo do momento de tombamento máximo nas torres de 1 a 7 durante a passagem do *downburst*. A Tabela 5.3 apresenta o resumo dos resultados.

Nesta situação, sendo o momento resistente igual a 2918 kN, e sem levar em conta a influência da queda de uma torre nas torres adjacentes, todas as torres seriam levadas ao colapso pela passagem do *downburst*.

5.3.4 Vento de fundo a 45° com o eixo da linha de transmissão

Nesta análise, o *downburst* foi criado a uma distância de 2687 metros da torre 4, como é mostrado na Figura 5.13. O vento de fundo faz um ângulo de 45° com o eixo Y, e faz com que o *downburst* passe exatamente em cima desta torre.

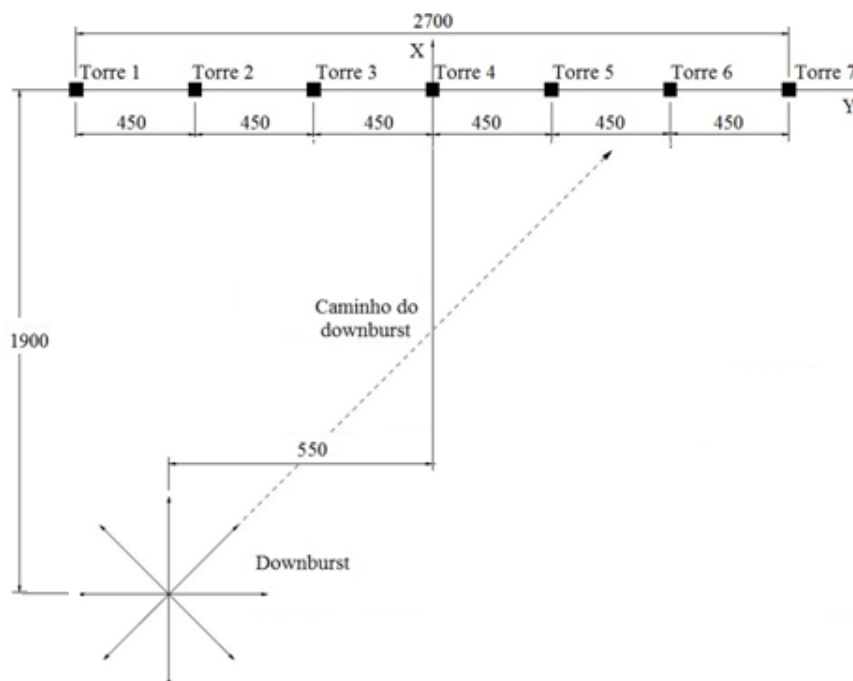


Figura 5.13 – Modelo esquemático do *downburst* se movimentando a 45° do eixo Y (cotas em metro).

Para esta situação, foram adotadas as seguintes hipóteses:

Dados do downburst

- Velocidade radial máxima ($V_{r,máx}$) : 80 m/s
- Altura onde a velocidade é igual a metade de $V_{r,máx}$: 400 m
- Distância radial do centro do *downburst* ao ponto onde ocorre $V_{r,máx}$: 1500m

- Escala de comprimento radial: 750m
- Duração característica da tormenta: 300s
- Tempo inicial do *downburst*: 100s

Posição inicial da tormenta

- Coordenada X = -1900 m
- Coordenada Y = -550 m

Vento de fundo

- Velocidade: 20 m/s
- Angulação com a linha de transmissão: 45°

A Figura 5.14 apresenta as variações das componentes X da velocidade de vento no tempo obtidas para cada um dos 7 pontos observados (topo das torres 1 a 7). Os instantes em que estas velocidades são máximas (em torno de $t = 180$ s) são selecionados para elaborar os perfis verticais instantâneos de velocidade, mostrados na Figura 5.15 com os quais serão calculados os momentos de tombamento máximos. Estes perfis são comparados ao perfil de velocidade V_k usado para o cálculo do momento último de tombamento da torre.

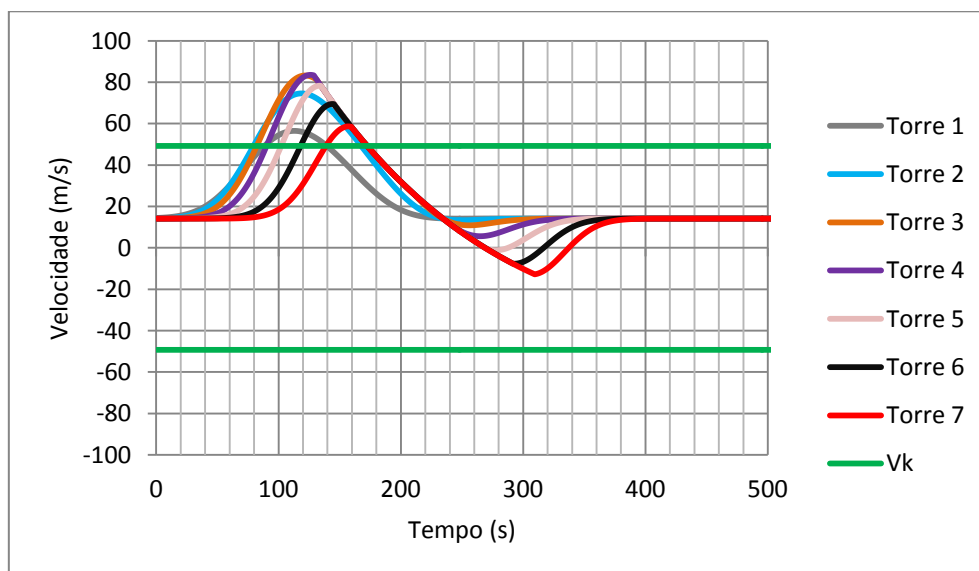


Figura 5.14 – Componente x da velocidade horizontal do vento.

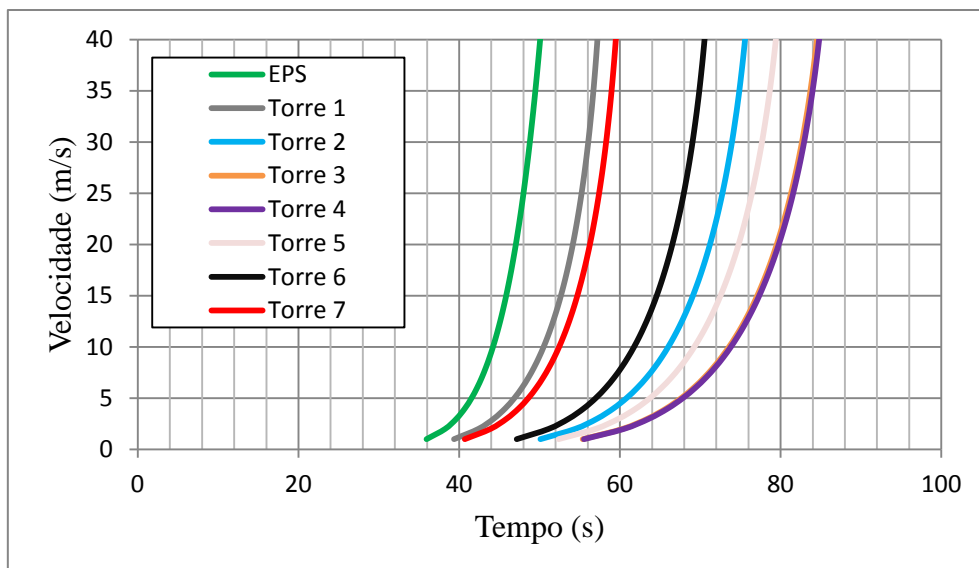


Figura 5.15 – Perfil de velocidade ao longo da altura para vento EPS e vento *downburst* nas torres de 1 a 7 no instante de velocidade máxima (aproximadamente $t = 120s$ na Figura 5.14).

Tabela 5.4.a – Momento na base da torre 1 para ação do *downburst* no instante em que a velocidade V_x é máxima.

<i>Downburst</i>		Momento na base da Torre - Torre 1					
Módulo	Altura (m)	V_x (m/s)	q (N/m ²)	C_a	AEV (m ²)	F (kN)	M (kN.m)
1	3.41	44.95	1239	2.38	1.09	3.2	11
2	6.58	48.30	1430	3.25	1.86	8.6	57
3	10.49	50.77	1580	3.50	1.11	6.1	64
4	15.42	52.82	1710	3.42	1.71	10.0	154
5	20.26	54.22	1802	3.23	1.59	9.3	187
6	25.25	55.29	1874	3.21	1.58	9.5	240
7	30.22	56.11	1930	2.70	1.18	6.2	186
ΣM (kN.m)							899

<i>Downburst</i>		Momento na base das torres devido aos Cabos - Torre 1						
Cabo	Altura (m)	V_x (m/s)	q (N/m ²)	C_a	AEV (m ²)	F (kN)	Altura de aplicação de F (m)	M (kN.m)
3 Cond.	22.90	54.83	1843	1.00	14.78	27.2	31.0	844
2 P. Raio	28.40	55.83	1911	1.00	4.12	7.9	32.9	259
ΣM (kN.m)								1103
ΣM Total (kN.m)								2002

Tabela 5.4.b – Momento na base da torre 2 para ação do *downburst* no instante em que a velocidade V_x é máxima.

<i>Downburst</i>		Momento na base da Torre - Torre 2					
Módulo	Altura (m)	V_x (m/s)	q (N/m ²)	C_a	AEV (m ²)	F (kN)	M (kN.m)
1	3.41	58.08	2068	2.38	1.09	5.4	18
2	6.58	62.85	2422	3.25	1.86	14.6	96
3	10.49	66.38	2701	3.50	1.11	10.5	110
4	15.42	69.29	2943	3.42	1.71	17.2	266
5	20.26	71.30	3116	3.23	1.59	16.0	324
6	25.25	72.83	3251	3.21	1.58	16.5	416
7	30.22	73.99	3356	2.70	1.18	10.7	323
ΣM (kN.m)							1553

<i>Downburst</i>		Momento na base das torres devido aos Cabos - Torre 2						
Cabo	Altura (m)	V_x (m/s)	q (N/m ²)	C_a	AEV (m ²)	F (kN)	Altura de aplicação de F (m)	M (kN.m)
3 Cond.	22.90	72.16	3192	1.00	14.78	47.2	31.0	1463
2 P. Raio	28.40	73.60	3321	1.00	4.12	13.7	32.9	449
ΣM (kN.m)								1912
ΣM Total (kN.m)								3465

Tabela 5.4.c – Momento na base da torre 3 para ação do *downburst* no instante em que a velocidade V_x é máxima.

<i>Downburst</i>		Momento na base da Torre - Torre 3					
Módulo	Altura (m)	V_x (m/s)	q (N/m ²)	C_a	AEV (m ²)	F (kN)	M (kN.m)
1	3.41	64.48	2549	2.38	1.09	6.6	23
2	6.58	69.95	3000	3.25	1.86	18.1	119
3	10.49	73.99	3356	3.50	1.11	13.0	136
4	15.42	77.33	3666	3.42	1.71	21.4	331
5	20.26	79.63	3887	3.23	1.59	20.0	404
6	25.25	81.38	4060	3.21	1.58	20.6	519
7	30.22	82.71	4194	2.70	1.18	13.4	404
ΣM (kN.m)							1937

<i>Downburst</i>		Momento na base das torres devido aos Cabos - Torre 3						
Cabo	Altura (m)	Vx (m/s)	q (N/m ²)	Ca	AEV (m ²)	F (kN)	Altura de aplicação de F (m)	M (kN.m)
3 Cond.	22.90	80.62	3984	1.00	14.78	58.9	31.0	1826
2 P. Raio	28.40	82.27	4149	1.00	4.12	17.1	32.9	562
ΣM (kN.m)								2387
ΣM Total (kN.m)								4324

Tabela 5.4.d– Momento na base da torre 4 para ação do *downburst* no instante em que a velocidade Vx é máxima.

<i>Downburst</i>		Momento na base da Torre - Torre 4					
Módulo	Altura (m)	Vx (m/s)	q (N/m ²)	Ca	AEV (m ²)	F (kN)	M (kN.m)
1	3.41	64.68	2564	2.38	1.09	6.7	23
2	6.58	70.17	3018	3.25	1.86	18.2	120
3	10.49	74.22	3377	3.50	1.11	13.1	137
4	15.42	77.58	3689	3.42	1.71	21.6	333
5	20.26	79.88	3912	3.23	1.59	20.1	407
6	25.25	81.64	4086	3.21	1.58	20.7	523
7	30.22	82.98	4221	2.70	1.18	13.5	407
ΣM (kN.m)							1949

<i>Downburst</i>		Momento na base das torres devido aos Cabos - Torre 4						
Cabo	Altura (m)	Vx (m/s)	q (N/m ²)	Ca	AEV (m ²)	F (kN)	Altura de aplicação de F (m)	M (kN.m)
3 Cond.	22.90	80.88	4010	1.00	14.78	59.3	31.0	1837
2 P. Raio	28.40	82.53	4175	1.00	4.12	17.2	32.9	565
ΣM (kN.m)								2403
ΣM Total (kN.m)								4352

Tabela 5.4.e– Momento na base da torre 5 para ação do *downburst* no instante em que a velocidade V_x é máxima.

<i>Downburst</i>		Momento na base da Torre - Torre 5					
Módulo	Altura (m)	V_x (m/s)	q (N/m ²)	C_a	AEV (m ²)	F (kN)	M (kN.m)
1	3.41	60.83	2268	2.38	1.09	5.9	20
2	6.58	65.90	2662	3.25	1.86	16.1	106
3	10.49	69.65	2973	3.50	1.11	11.5	121
4	15.42	72.75	3244	3.42	1.71	19.0	293
5	20.26	74.87	3437	3.23	1.59	17.6	358
6	25.25	76.50	3588	3.21	1.58	18.2	459
7	30.22	77.74	3704	2.70	1.18	11.8	357
ΣM (kN.m)							1713

<i>Downburst</i>		Momento na base das torres devido aos Cabos - Torre 5						
Cabo	Altura (m)	V_x (m/s)	q (N/m ²)	C_a	AEV (m ²)	F (kN)	Altura de aplicação de F (m)	M (kN.m)
3 Cond.	22.90	75.79	3521	1.00	14.78	52.1	31.0	1614
2 P. Raio	28.40	77.32	3665	1.00	4.12	15.1	32.9	496
ΣM (kN.m)								2110
ΣM Total (kN.m)								3823

Tabela 5.4.f – Momento na base da torre 6 para ação do *downburst* no instante em que a velocidade V_x é máxima.

<i>Downburst</i>		Momento na base da Torre - Torre 6					
Módulo	Altura (m)	V_x (m/s)	q (N/m ²)	C_a	AEV (m ²)	F (kN)	M (kN.m)
1	3.41	54.47	1818	2.38	1.09	4.7	16
2	6.58	58.85	2123	3.25	1.86	12.8	84
3	10.49	62.08	2362	3.50	1.11	9.1	96
4	15.42	64.76	2571	3.42	1.71	15.0	232
5	20.26	66.59	2719	3.23	1.59	14.0	283
6	25.25	68.00	2835	3.21	1.58	14.4	363
7	30.22	69.07	2924	2.70	1.18	9.3	282
ΣM (kN.m)							1356

<i>Downburst</i>		Momento na base das torres devido aos Cabos - Torre 6						
Cabo	Altura (m)	Vx (m/s)	q (N/m ²)	Ca	AEV (m ²)	F (kN)	Altura de aplicação de F (m)	M (kN.m)
3 Cond.	22.90	67.39	2784	1.00	14.78	41.2	31.0	1276
2 P. Raio	28.40	68.71	2894	1.00	4.12	11.9	32.9	392
ΣM (kN.m)								1667
ΣM Total (kN.m)								3023

Tabela 5.4.g – Momento na base da torre 7 para ação do *downburst* no instante em que a velocidade Vx é máxima.

<i>Downburst</i>		Momento na base da Torre - Torre 7					
Módulo	Altura (m)	Vx (m/s)	q (N/m ²)	Ca	AEV (m ²)	F (kN)	M (kN.m)
1	3.41	46.58	1330	2.38	1.09	3.4	12
2	6.58	50.10	1539	3.25	1.86	9.3	61
3	10.49	52.70	1703	3.50	1.11	6.6	69
4	15.42	54.85	1845	3.42	1.71	10.8	166
5	20.26	56.33	1945	3.23	1.59	10.0	202
6	25.25	57.46	2024	3.21	1.58	10.3	259
7	30.22	58.32	2085	2.70	1.18	6.6	201
ΣM (kN.m)							971

<i>Downburst</i>		Momento na base das torres devido aos Cabos - Torre 7						
Cabo	Altura (m)	Vx (m/s)	q (N/m ²)	Ca	AEV (m ²)	F (kN)	Altura de aplicação de F (m)	M (kN.m)
3 Cond.	22.90	56.97	1990	1.00	14.78	29.4	31.0	912
2 P. Raio	28.40	58.03	2064	1.00	4.12	8.5	32.9	279
ΣM (kN.m)								1191
ΣM Total (kN.m)								2162

Tabela 5.5 – Resumo dos momentos nas bases das torres de 1 a 7 para um vento de fundo a 45° do eixo y.

Resumo dos Momentos na Base das Torres (kN.m)						
Torre 1	Torre 2	Torre 3	Torre 4	Torre 5	Torre 6	Torre 7
2002	3465	4324	4352	3823	3023	2162

As Tabelas 5.4.a a 5.4.g apresentam o cálculo do momento de tombamento máximo nas torres de 1 a 7 durante a passagem do *downburst*. A Tabela 5.5 apresenta o resumo dos resultados.

Para esta situação, ao menos 5 torres seriam levadas ao colapso pela passagem do *downburst*, dentre elas as torres de 2 a 6.

Apesar de ser um cálculo simplificado para este tipo de análise, ficou comprovado que a consideração deste tipo de vento produziria alterações significativas no dimensionamento destas torres.

O número de torres colapsadas encontrado nos dois casos conduz a uma extensão de linha igual a 2700m. Os casos de quedas de torres no Brasil relatados em LIMA (2005) atingiram trechos de 2900 m das linhas em boa comparação com o valor encontrado neste trabalho.

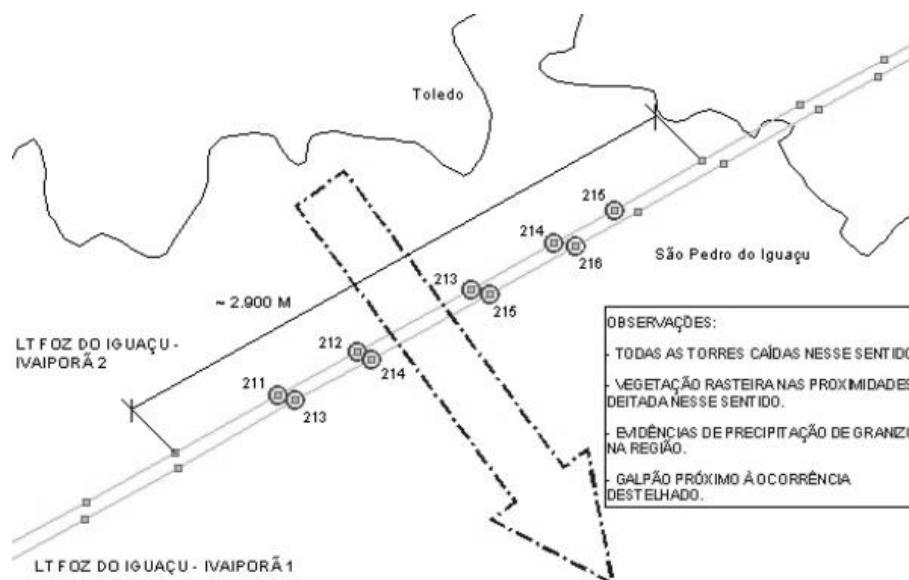


Figura 5.16 – Relato das quedas de 9 torres em São Pedro do Iguaçu (LIMA, 2005).

5.4 Chaminé com 180 metros de altura

5.4.1 Descrição da estrutura

A estrutura a ser analisada é uma chaminé em concreto armado de 180 metros de altura, de seção transversal circular com diâmetro variando de 9,86 metros na base a 4,75 metros no topo. A espessura também varia entre 60 cm na base e 17 cm no topo, conforme ilustrado na Figura 5.17.a.

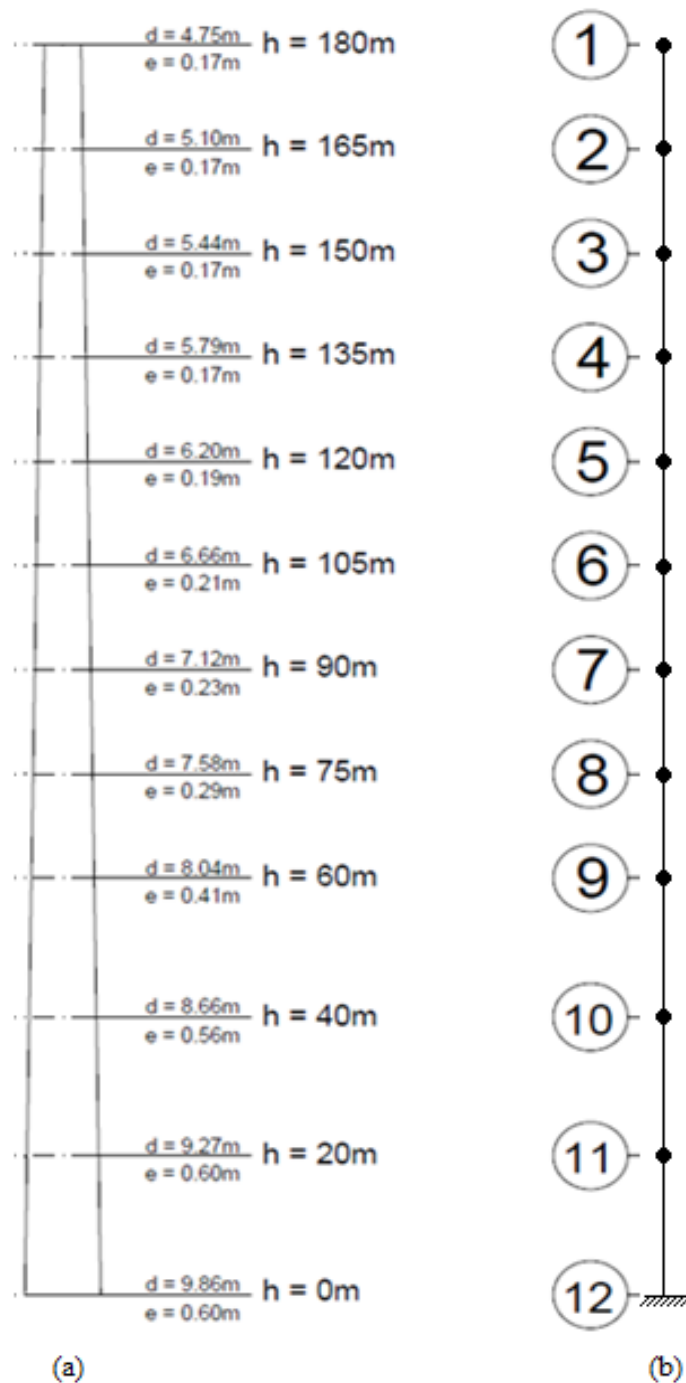


Figura 5.17 – Modelo esquemático do exemplo de Chaminé

Para a análise, a estrutura foi discretizada ao longo da altura em 11 elementos de pórtico plano de seção constante cujas propriedades físicas e geométricas encontram-se na Tabela 5.6. As massas dos elementos foram tomadas como concentradas com os valores mostrados na Tabela 5.7.

Tabela 5.6 – Características dos elementos da chaminé.

Características dos Elementos*			
Elementos	E (N/m ²)	A (m ²)	I (m ⁴)
1	2,80E+10	2,54	7,33
2	2,80E+10	2,72	9,19
3	2,80E+10	2,91	11,05
4	2,80E+10	3,26	14,65
5	2,80E+10	3,89	20,86
6	2,80E+10	4,66	27,94
7	2,80E+10	5,84	39,14
8	2,80E+10	8,17	62,70
9	2,80E+10	12,01	99,80
10	2,80E+10	15,31	138,36
11	2,80E+10	16,89	171,81

*E = módulo de elasticidade; A = área da seção transversal; I = momento de inércia.

Tabela 5.7 – Massas concentradas e forma modal.

Nó	Massa Concentrada (kg)	Forma Modal (ϕ)
1	70900	1.0000
2	146200	0.8422
3	153700	0.6880
4	163100	0.5432
5	174400	0.4137
6	195000	0.3029
7	232500	0.2123
8	292500	0.1417
9	463800	0.0886
10	750000	0.0388
11	1254000	0.0098

O valor da taxa de amortecimento do material da chaminé (ξ) adotado foi de 0.01 e a frequência natural obtida foi de 0.268 Hz.

Para este exemplo foram realizadas análises dinâmicas no domínio do tempo para ação de vento EPS e vento *downburst* com o programa ANEST modificado. Sendo a estrutura caracterizada por comportamento linear, as análises foram feitas separadamente para as forças devidas à velocidade média e aquelas devidas à velocidade flutuante do vento. Nestas análises utilizou-se um modo de vibração e o amortecimento aerodinâmico foi desprezado.

5.4.2 Dados para simulação de velocidade de vento

Os perfis verticais das velocidades médias do vento EPS e do *downburst* são descritos respectivamente pelas equações (2.2) e (3.20).

Para a simulação das histórias de velocidades flutuantes correlacionadas ao longo da altura para vento EPS utilizou-se o programa TurbHarris (PFEIL, 1993) que utiliza o método de autoregressão conforme apresentado em BUCHHOLDT *et al.* (1985). A partir do espectro de Harris (equação (2.4)) o programa faz a simulação de um conjunto de sinais não correlacionados aos quais se aplica a matriz de correlação construída com base na função do co-espectro normalizado (equação (2.7)) para transformá-los em sinais correlacionados.

Para este exemplo, foram geradas as simulações de velocidade flutuante de vento ao longo da altura para pontos correspondentes aos 11 nós do modelo.

Para o vento originado de microexplosões ainda não há medições suficientes que permitam estabelecer uma função de co-espectro normalizado para os casos de sinais estacionários. Considerou-se neste exemplo, para as parcelas flutuantes de velocidade normalizada $v(t)$, os sinais gerados para o vento EPS divididos pelo desvio padrão ($\sigma = 6,90$) e a partir destes chegou-se aos sinais correspondentes o *downburst* pelo modelo da equação (3.31). Para as características do *downburst*, foram utilizados os dados encontrados na reprodução do registro da BFAA no item 4.3. A seguir encontram-se os dados de partida das simulações:

Dados para geração do vento EPS

- Velocidade média em 10 minutos a 10m de altura: 23,74 m/s (correspondente a $V_0 = 40$ m/s);
- Rugosidade do terreno (Cat. III) Cas: 0,013 m;
- Comprimento L (equação (2.4) espectro de Harris): 1800 m;
- Tempo Máximo: 1000 s.
- Coeficiente de decaimento Cz: 10 (equação (2.7))

Dados para geração do vento downburst - SubDown

- Velocidade do vento de fundo - V_0 : 10 m/s;
- Velocidade radial máxima - $V_{\text{máx}}$: 80 m/s;
- Altura onde a velocidade é igual a metade de $V_{\text{máx}}$: 400 m;
- Distância do centro do *downburst* ao local onde ocorre a $V_{\text{máx}}$: 800 m;

- Distância para fora do raio do núcleo até onde ocorre o anel de alta pressão (m): 400 m;
- Duração característica da tormenta: 600 s;
- Tempo inicial do *downburst*: 300 s,

A parcela referente a velocidade média desta reprodução é ilustrada na Figura 5.18.

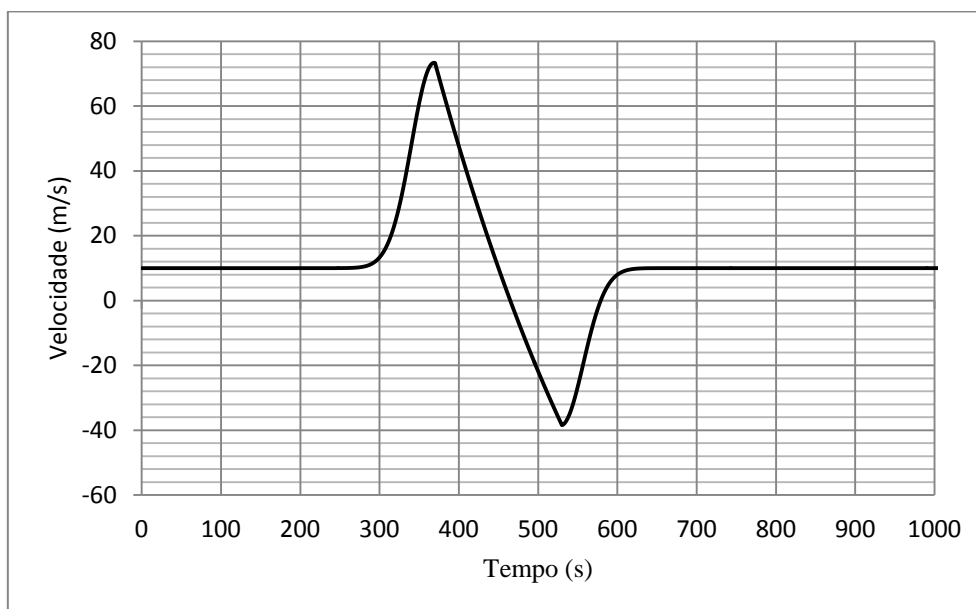


Figura 5.18 – Velocidade média do *downburst* reproduzido para o registro da BFAA no item 4.3.

A Figura 5.19 e a Figura 5.20 mostram as histórias das flutuações da velocidade do vento a uma altura de 180 metros de uma EPS gerada pelo programa TurbHarris e de um *downburst*, gerado pelo programa SubDown, respectivamente.

As intensidades de turbulência dos dois tipos de vento, definidas pela razão entre o desvio padrão e a velocidade média, estão apresentadas na Tabela 5.8. Verifica-se que a intensidade de turbulência no vento *downburst* é aproximadamente 3 vezes menor do que no vento de tormenta EPS.

Tabela 5.8 – Valores das intensidades de turbulência

Altura (m)	EPS	<i>Downburst</i>
	Iu (Cat III)	Iu - Eq. (3.30)
10	0,29	0,09
180	0,17	0,05

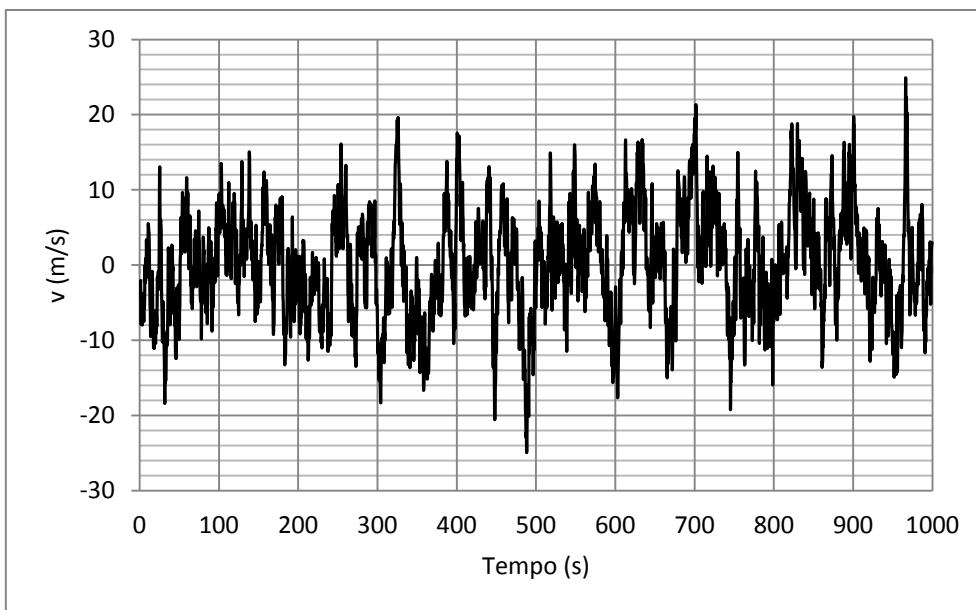


Figura 5.19 – Flutuação do vento ao longo do tempo de uma EPS gerada pelo programa TurbHarris a um ponto situado a 180 m do solo.

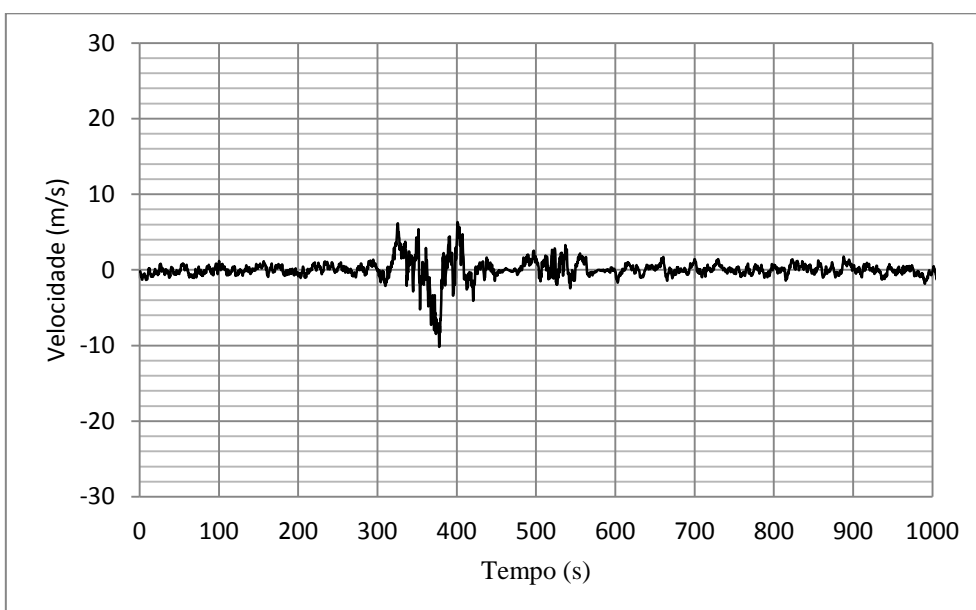


Figura 5.20 – Flutuação do vento ao longo do tempo de um *downburst* gerada pelo programa SubDown a um ponto situado a 180 m do solo.

5.4.3 Forças devidas a ação do vento

A determinação da força aplicada pelo vento é feita através de uma relação que leva em consideração a área da estrutura que está exposta ao vento; o coeficiente de arrasto o da mesma; velocidade do vento, tanto a média como a flutuação; além da massa específica

do ar. Como a velocidade varia ao longo do tempo, essa força também sofre uma variação:

$$F(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot Ca \cdot U^2(t) \quad (5.2)$$

sendo $U(t) = (\bar{U} + u)$ a equação (5.2) fica da seguinte forma:

$$F(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot Ca \cdot (\bar{U}^2 + 2\bar{U}u + u^2) \quad (5.3)$$

onde:

- ρ é a massa específica do ar;
- A é a área de exposição ao vento total da estrutura;
- Ca é o coeficiente de arrasto;
- \bar{U} é a velocidade média do vento;
- u é a velocidade flutuante do vento.

A Tabela 5.9 apresenta os dados necessários ao cálculo de forças para este exemplo.

Tabela 5.9 – Dados para cálculo das forças de vento

Nó	\bar{U} (m/s)	A (m ²)	Ca
1	40,52	36,3	0,6
2	39,87	76,4	0,6
3	39,17	81,6	0,6
4	38,42	86,9	0,6
5	37,59	93,0	0,6
6	36,67	99,9	0,6
7	35,64	107,2	0,6
8	34,46	114,0	0,6
9	33,06	141,4	0,6
10	30,68	173,2	0,6
11	26,98	282,5	0,6

O estudo do deslocamento no domínio do tempo foi feito considerando separadamente os efeitos da parte flutuante e da parte estática, representados respectivamente a seguir:

$$F(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot Ca \cdot (2\bar{U}u + u^2) \quad (5.4)$$

$$F(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_a \cdot \bar{U}^2 \quad (5.5)$$

5.4.4 Análise do deslocamento da estrutura devido a parcela média da velocidade do *downburst*

Primeiramente, foi realizado um estudo da parcela de velocidade média do *downburst* sem a parcela flutuante para identificar se ocorrem ou não respostas dinâmicas na estrutura.

A resposta obtida do deslocamento da chaminé ao longo do tempo pelo ANEST, já com as mudanças descritas no item 4.2, para o *downburst* está representada na Figura 5.21.

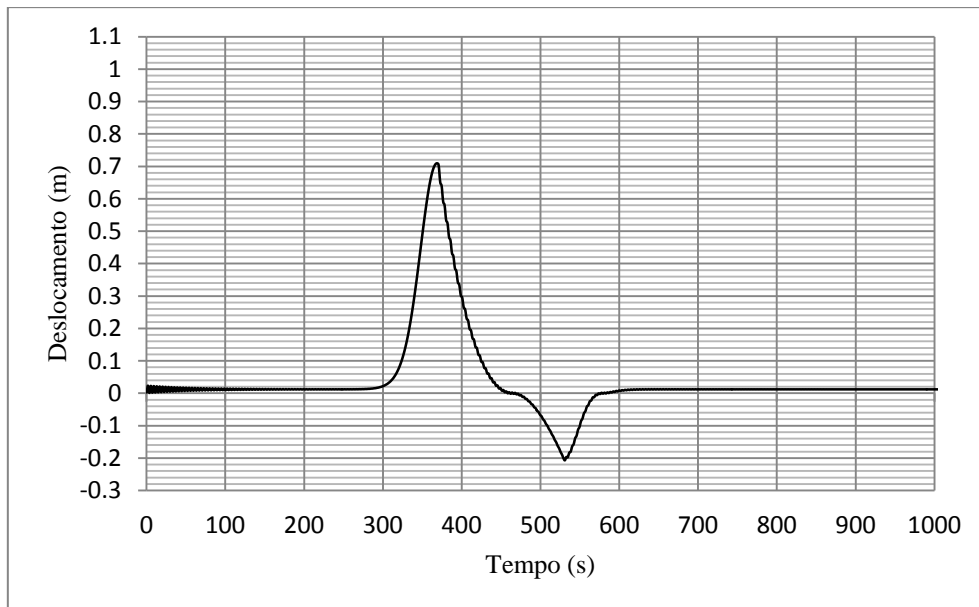


Figura 5.21 – Deslocamento ao longo do tempo do *downburst* reproduzido para o registro da BFAA no item 4.3.

Na resposta do *downburst*, o pico de deslocamento é de 0,71 m e se dá em um instante de tempo $t = 369$ s, onde as forças nodais são mostradas na Tabela 5.10:

Tabela 5.10 – Forças nodais no instante de tempo do pico máximo de deslocamento.

Nó	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Altura (m)	180	165	150	135	120	105	90	75	60	40	20
Força (kN)	72	157	175	194	214	236	257	276	340	399	573

Aplicando-se estas forças estaticamente à chaminé, obtém-se a resposta estática da estrutura com o deslocamento no nó do topo de 0.67m, o que resulta numa resposta 95% estática.

Conclui-se através desse estudo, que a parcela da velocidade média de um *downburst* produz uma resposta quase estática da estrutura.

5.4.5 Análise do deslocamento da estrutura devido ao vento *downburst*

Apresentam-se na Figura 5.22 e na Figura 5.23 respectivamente as respostas da estrutura em termos do deslocamento no topo devido as ações de vento originados de tormentas EPS e do *downburst*.

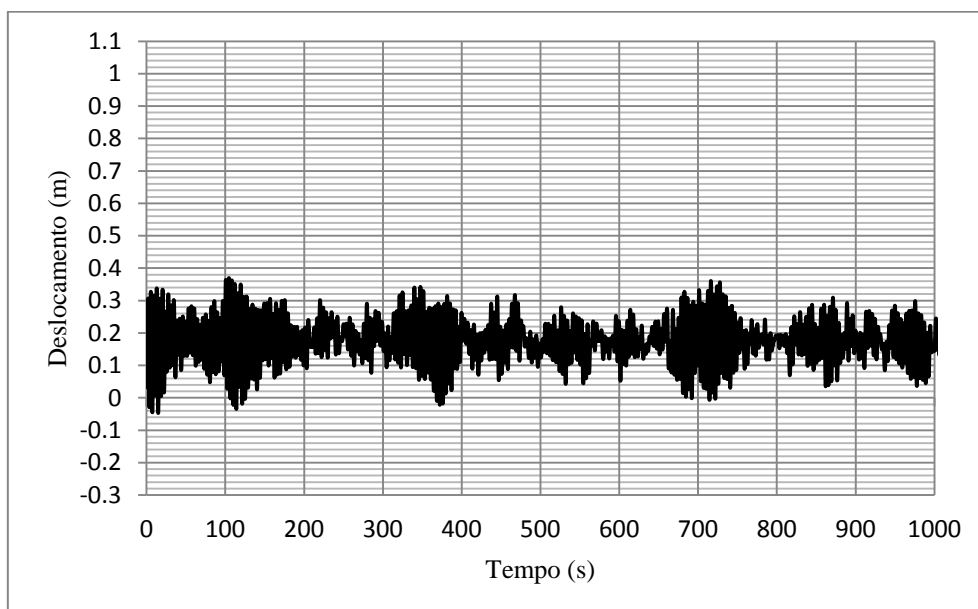


Figura 5.22 – Deslocamento da chaminé ao longo do tempo para flutuação de vento gerada através do TurbHarris.

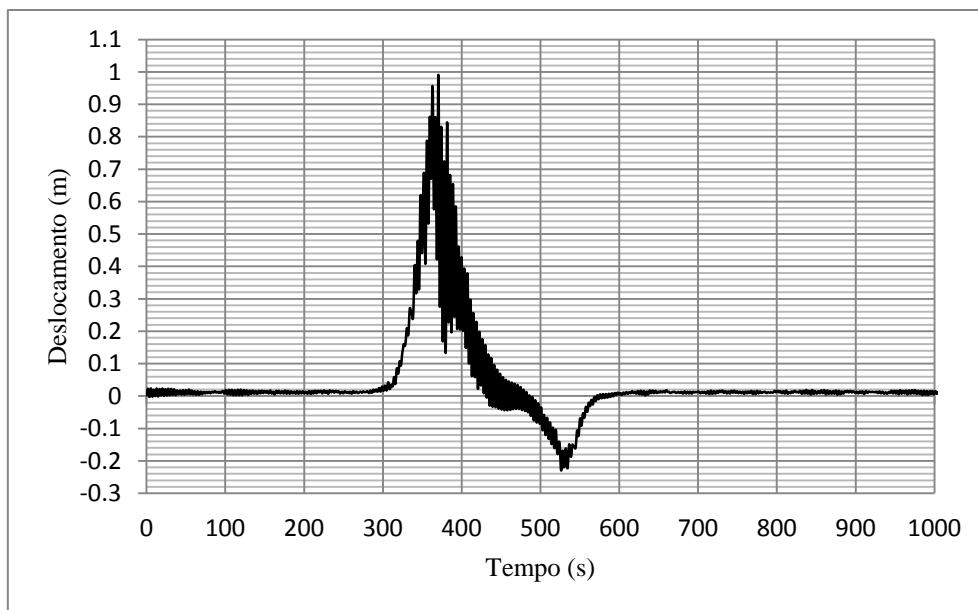


Figura 5.23 – Deslocamento da chaminé ao longo do tempo para um *downburst*.

Com os deslocamentos de pico das respostas mostradas na Figura 5.22 e na Figura 5.23 chega-se aos valores de coeficiente de amplificação dinâmica apresentados na Tabela 5.11. Esses valores foram calculados dividindo-se o pico de deslocamento da resposta dinâmica pelo máximo valor da resposta estática devida a força média do vento (no caso de *downburst*, força média variável). Verifica-se um menor coeficiente de amplificação dinâmica no caso de vento *downburst* devido a menor turbulência do vento neste tipo de tormenta.

Tabela 5.11 – Coeficiente de amplificação dinâmica.

Coeficiente de amplificação dinâmica	
EPS	<i>Downburst</i>
1.9	1.6

6 Conclusão

6.1 Comentários Finais e Conclusões

Apresentou-se neste trabalho uma revisão dos modelos empíricos encontrados na literatura para caracterização do campo de velocidade de vento durante um *downburst*. Em geral estes modelos foram desenvolvidos a partir da analogia a um jato sobre uma superfície plana (*wall jet model*) e ajuste a registros deste tipo de evento ou simulações em laboratório. Com base em alguns destes modelos, implementou-se aqui o programa computacional SubDown para geração das componentes horizontais da velocidade de vento o qual foi posteriormente incorporado a uma rotina para cálculo de forças devidas ao vento em um programa de análise estática e dinâmica de estruturas.

Devido à extensão dos sistemas estruturais de linhas aéreas de transmissão (LT), as torres são particularmente vulneráveis à ação de ventos oriundos de microexplosões. Com o intuito de identificar a dimensão dos danos em torres LT determinou-se o máximo momento de tombamento nas torres de um exemplo de LT durante a passagem de um *downburst* simulada pelo programa SubDown. Tomando-se os montantes principais da torre verificou-se que estes componentes atendiam sem folga aos critérios de segurança para ação de vento com $V_0=41\text{m/s}$ conforme a NBR 6123. Observou-se dos resultados para os dois casos de aproximação de um *downburst* desenvolvido a 2 km da LT que 5 torres, no mínimo, seriam levadas ao colapso configurando danos em uma extensão de 2700m. Este resultado comparou-se bem com os registros de quedas de torres em (LIMA, 2005, SOARES *et al.*, 2007), respectivamente atingindo extensões de 2900m e 2700m aproximadamente.

Uma chaminé em concreto armado de 180m de altura foi tomada como exemplo de estrutura flexível e de baixa frequência fundamental de vibração (igual a 0,26Hz) para se efetuar uma comparação entre respostas dinâmicas em termos de deslocamento no topo devidas às ações de ventos tipo EPS e *downburst*. Verificou-se que o vento devido a microexplosões pode produzir deslocamentos muito superiores àqueles gerados pelo vento de camada limite, principalmente devido à parcela quase estática da resposta. Em termos de resposta dinâmica, como a intensidade de turbulência no vento de *downburst* é menor do que no vento de tormenta EPS, o coeficiente de amplificação dinâmica da resposta foi também menor.

6.2 Sugestões para Pesquisa Futura

Como tópicos para continuação da pesquisa apresentam-se as seguintes sugestões.

- Aprofundamento dos temas interdisciplinares envolvendo a descrição do fenômeno físico do *downburst* com base na meteorologia e os modelos para descrição matemática do campo de velocidade para aplicação à engenharia estrutural.
- Implementação da função de densidade espectral da velocidade flutuante normalizada proposto por CHEN e LETCHFORD (2007) no programa de geração do conjunto de velocidade flutuante correlacionada. Vê-se na Figura 2.11 que este espectro apresenta maior energia em baixas frequências (abaixo de 0,2Hz) do que o espectro de Harris.
- Realizar com o programa SubDown simulações de outros registros de velocidade de vento de microexplosões além do registro de Fujita e da BFAA, que tenham menores tempos de duração e que possam causar maiores respostas dinâmicas em estruturas de baixas frequências fundamentais de vibração.
- Efetuar análises dinâmicas em modelos completos compostos de torres e linhas aéreas sob ação de vento originado de downburst.

7 Referências bibliográficas

BATTISTA, R.C., PFEIL, M.S., ALVES, R.V., 2000, **Notas de aula do curso de Análise Estrutural do Instituto COPPE/UFRJ.**

BATTISTA, R.C., **Relatórios Técnicos Controllato nº 8,10 e 14.** 2010 e 2011

BLESSMANN, J., 1995, **O vento na engenharia estrutural.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BUCHHOLDT, H.A.; IANNUZZI, A.; SPINELLI, P., **Time domain dynamic response of slender structures to wind loading.** Asia Pacific Symposium on Wind Engineering, University of Roorkee, Roorkee, India, 1985.

CHAY, M.T., 2001, **Physical modeling of thunderstorm downbursts for wind engineering applications.** M.Sc. dissertation, Texas Tech University, Broadway, Lubbock, USA.

CHEN, L., LETCHFORD, C.W., **A deterministic–stochastic hybrid model of downbursts and its impact on a cantilevered structure.** Eng Struct 26, pp. 619–629, 2004.

CHEN, L., LETCHFORD, C.W., **Multi-scale correlation analyses of two lateral profiles of full-scale downburst wind speeds.** J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. pp. 675–696, 2006.

CHEN, L., LETCHFORD, C.W., **Numerical simulation of extreme winds from thunderstorm downbursts,** JWEIA, pp. 977-990, 2007.

CHEN, L., LETCHFORD, C.W., **Proper orthogonal decomposition of two vertical profiles of full-scale nonstationary downburst wind speeds.** J. Wind Eng. Ind. Aerodyn, pp. 187–216, 2005

CHOI, E.C.C., **Field measurement and experimental study of wind speed profile during thunderstorms.** J. Wind Eng. Ind. Aerodyn, pp. 275–290, 2004.

CIGRE Working Group B2.06.09. **How overhead lines respond to localized high intensity winds,** CIGRE, France, 2008

CIGRE Working Group B2.16, **Report on current practices regarding frequencies and magnitude of high intensity winds.** CIGRE, France, 2004

DAMASCENO NETO, W.T., PAULA, R.L., **Análise dinâmica de uma torre de transmissão**, Trabalho de Curso de Dinâmica Estrutural, 2011.

DAMASCENO NETO, W.T., RAMBO, D.A.S., GRABOIS, T.M., **Análise não linear de uma torre de transmissão**, Trabalho de Curso de Análise Estrutural I, 2011.

DAVENPORT, A.G., **The application of statistical concepts to the wind loading of structures**, In: Proceedings, Institution of Civil Engineers, pp. 449-472, 1961.

FUJITA T.T. **The downburst. Report of projects NIMROD and JAWS**. University of Chicago, 1985.

FUJITA, T.T., **Andrews AFB microburst**. SMRP Research Paper 205. University of Chicago, 1985.

FUJITA, T.T., **The downburst: microburst and macroburst**, SMRP Research Paper 210, University of Chicago, 1985.

HJELMFELT, M.R., **Structure and life circle of microburst outflows observed in Colorado**, Journal of Applied Meteorology, pp. 900-927, 1988.

HOLMES JD, OLIVER SE. **A model of downburst winds near the ground for transmission line loading**. CSIRO Div. of Building, Construction and Engineering, Australia. Report DBCE Doc 96/3, January 1996.

HOLMES JD, OLIVER SE. **An empirical model of a downburst**. Engineering Structures, 2000.

HOLMES, J. D. **Wind loading of structures**. 1 ed. ed. London: Spon Press, 2001.

HOLMES, J. D. **Wind loading of structures**. 2 ed. USA and Canada: Taylor & Francis e-Library, 2007.

KOELLER, W.M., 2012, **Verificação estrutural de torre LTEE sob ação de vento**. M.Sc. Dissertação, Engenharia Civil, Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Brasil.

LI, C., LI, Q.S., XIAO, Y.Q., OU, J.P., **Simulations of moving downbursts using CFD**. The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, November 8-12, 2009, Taipei, Taiwan.

LIMA D. R. O E W. F. MENEZES, **Queda de estruturas de linha de transmissão de energia elétrica em cachoeira paulista (SP) e a ocorrência de tempestades severas – um estudo de caso**, Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2004.

LIMA, D. R. O., R. S. COSTA e R. V. SÁ, **Queda de torres de energia elétrica e a ocorrência de tempestades severas – o caso Palmital (SP)**, Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2004.

LIMA, D.O., 2005, **Slides da apresentação de tempestades severas: Alguns Exemplos de casos que afetam o sistema**, http://www.furnas.gov.br/rindat/workshop2005/Palestra_FURNAS_Daniele.pdf, workshop RINDAT, 25-27 julho de 2005, Rio de Janeiro.

MACGORMAN, D. R.; RUST, W. D., **The electrical nature of storms**. New York: Oxford University Press, 1998.

MASON, M.S., WOOD, G.S., FLETCHER, D.F., **Numerical simulation of downburst winds**. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn, 2009.

NASA 2012a, Disponível em: <<http://geology.com/articles/lightning-map.shtml>> Acesso: Janeiro de 2012a.

NASA 2012b, Disponível em: <<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=1869>>. Acesso: Janeiro de 2012b.

NASA 2012c, Disponível em: <http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_154_catalina.html>. Acesso: Janeiro de 2012c.

NATIONALGEOGRAPHIC, <http://news.nationalgeographic.com/news/2011/04/pictures/110428-alabama-tornado-pictures-news-tuscaloosa-birmingham-nation/#/arkansasz-tornado-funnel-cloud_35144_600x450.jpg> Acesso: Janeiro de 2012.

OSEGUERA RM, BOWLES RL. **A simple analytic 3-dimensional downburst model based on boundary layer stagnation flow**. NASA Technical Memorandum 100632, July 1988.

PALUCH MJ, TOAZZA R, ROCHA MM, MARROQUIM A.I., **O laboratório anemométrico da Universidade de Passo Fundo**. In: III Workshop Brasileiro de Micrometeorologia; UFSM, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil; 2003.

PFEIL, M.S., 1993. **Comportamento aeroelástico de pontes estaiadas**, Tese de

PONTE JÚNIOR, J., 2005, **Modelagem e simulação do campo de velocidades do vento em tormentas elétricas**. D.Sc. Tese, Porto Alegre, Universidade do Rio Grande do Sul, Brasil.

QU, W.L., JI, B. F., **Numerical simulation of downburst wind loads using modified OBV model**. APCWE-VII, The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, November 8-12, 2009, Taipei, Taiwan.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A., **Lightning: Physics and Effects**. Cambridge University, 2003.

RIERA, J.D., ROCHA, M.M., **Load definition for wind design and reliability assessments: Extreme wind climate**, in: Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, A.A. Balkema, Rotterdam, 1998.

RODRIGUES, R.S, 1999, **Colapso de torres TEE sob ação do vento**. M.Sc. Dissertação, Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 1999.

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**. Eng Struct 23, pp. 267-375, 2001.

SENGUPTA, A., SARKAR, P.P., **Experimental measurement and numerical simulation of an impinging jet with application to thunderstorm microburst winds**. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn, pp. 345–365, 2008.

SHEHATA, A.Y., EL DAMATY, A.A., SAVORY, E., **Finite element modeling of transmission line under downburst wind loading**. Finite elements in analysis and design, pp. 71-89, 2005

SIMI, E., SCALAN, R., **Wind effects on structures**. , 3 ed. John Wiley, 1996.

SOARES, F.G.; SILVA, P.R.L., MELLO, R.C., MARCÍLIO, L.E., **Acidentes na LT 138kV C.S. PCH Paraíso / Chapadão do sul: Evidências de atuação de vento de alta intensidade**, XIX SNPTEE, Rio de Janeiro, 2007.

VICROY, DD. **Assessment of microburst models for downdraft estimation**. Journal of Aircraft, 1992.

WIKIPEDIA, Disponível em <<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Microburstnasa.JPG>>. Acesso: Janeiro de 2012

WOOD GS, KWOK KCS. **An empirically derived estimate for the mean velocity profile of a thunderstorm downburst**. 7th AWES Workshop. Auckland, 1998.

WUNDERGROUND, <<http://marathi.wunderground.com/wximage/viewsingleimage.html?mode=singleimage&handle=mil25&number=308>>, Acesso: Janeiro de 2012

ZHU, S., ETKIN, B., **Fluid-dynamic model of a downburst**. UTIAS Report No. 271.
University of Toronto, Institute of Aerospace Studies, April 1983. Journal of aircrew.