

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Renata Maldonado Gheno**

**CAMPO DE VELOCIDADES GERADO PELA COMBINAÇÃO  
DE VENTOS CONVECTIVOS E SINÓTICOS EM CABOS  
SUSPENSOS**

Porto Alegre  
dezembro de 2014.

**RENATA MALDONADO GHENO**

**CAMPO DE VELOCIDADES GERADO PELA  
COMBINAÇÃO DE VENTOS CONVECTIVOS E  
SINÓTICOS EM CABOS SUSPENSOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil

**Orientador: Ruy Carlos Ramos de Menezes**

**Coorientador: Jorge Daniel Riera**

Porto Alegre  
dezembro de 2014.

**RENATA MALDONADO GHENO**

**CAMPO DE VELOCIDADES GERADO PELA COMBINAÇÃO  
DE VENTOS CONVECTIVOS E SINÓTICOS EM CABOS  
SUSPENSOS**

Porto Alegre, 05 de dezembro de 2014.

Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes  
Dr. techn. pela Universidade de Innsbruck,  
Áustria  
Orientador

Prof. Jorge Daniel Riera  
Ph.D pela Universidade de Princeton, EUA  
Coorientador

Prof. Armando Miguel Awruch  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Leandro Fleck Fadel Miguel**  
(UFSC)  
Dr. pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Brasil

**Dra. Tatiana Thomé de Oliveira (CEF)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Brasil

**Profa. Edith Beatriz Camano Schettini**  
(UFRGS)  
Dra. pelo Instituto Nacional Politécnico de  
Grenoble, França.

**Prof. Acir Mércio Loredou-Souza**  
(UFRGS)  
Ph.D pela Universidade de  
Western Ontario, Canadá

Dedico este trabalho a minha mãe, Clarice, por toda a sua dedicação para que eu pudesse realizar meus sonhos.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço ao professor Ruy Carlos Ramos de Menezes, orientador deste trabalho, pela dedicação, comprometimento e, especialmente, pela amizade.

Agradeço ao professor Jorge Daniel Riera pelas orientações e pelas, sempre pertinentes, conversas filosóficas.

Agradeço aos professores Leandro Fleck Fadel Miguel (UFSC), Luiz Augusto Magalhães Endres (UFRGS), Edith Beatriz Camano Schettini (UFRGS) e Eloir Dario Bittencourt (PUC-RS) pelas suas importantes contribuições ao trabalho.

Agradeço à minha mãe, Clarice, que demonstrou um esforço imensurável em me proporcionar a melhor educação possível e a quem serei eternamente grata.

Agradeço aos amigos que estiveram presentes na minha vida durante a realização deste trabalho e que demonstraram compreensão e forneceram o apoio e a motivação necessários para concluir esta fase.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC/UFRGS que auxiliaram, de alguma forma, na execução desse trabalho.

À CAPES e ao CNPq pelo auxílio financeiro.

A experiência nunca permite atingir a certeza absoluta.  
Não devemos procurar obter mais que uma probabilidade.

*Bertrand Russell*

## RESUMO

**GHENO, R. M. CAMPO DE VELOCIDADES GERADO PELA COMBINAÇÃO DE VENTOS CONVECTIVOS E SINÓTICOS EM CABOS.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

As forças devido aos efeitos do vento são, em geral, as solicitações predominantes em projeto de estruturas de linhas de transmissão. Apesar de ventos convectivos de alta intensidade serem frequentemente relacionados a falhas estruturais, as recomendações normativas mais utilizadas contemplam apenas ventos sinóticos, sem fazer considerações a carregamentos devido a ventos convectivos. É importante ressaltar que, devido às grandes dimensões lineares das linhas de transmissão, estes projetos são mais suscetíveis a danos causados por ventos de efeito localizado do que estruturas com localização pontual. Para complementar estudos anteriores a respeito do efeito de tormentas locais em linhas de transmissão, este trabalho tem como objetivo analisar as forças induzidas em cabos ocasionadas por uma combinação de tormentas descendentes e ventos sinóticos. Através de uma rotina computacional na plataforma MATLAB, os eventos a serem analisados foram simulados. Foram considerados diversos comprimentos de vãos, combinações e orientações de ventos nas simulações. Dos resultados obtidos, pode-se concluir que, para a mesma velocidade de vento a uma altura de 10 m acima do solo, um evento sinótico induz carregamentos mais severos nos cabos, quando sua direção é perpendicular aos cabos. Em outros casos analisados, observa-se que, pelo caráter axissimétrico do campo de velocidades de vento gerado, o caso composto por uma tormenta descendente poder ser o que induz carregamentos mais severos.

Palavras-chave: linhas de transmissão; tormentas elétricas; *downbursts*; ação do vento.

## **ABSTRACT**

**GHENO, R. M. CAMPO DE VELOCIDADES GERADO PELA COMBINAÇÃO DE VENTOS CONVECTIVOS E SINÓTICOS EM CABOS.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

The forces due to wind effects cause, in general, the most severe loading in the design of overhead transmission lines structures. Although high intensity winds are often related to structural failure, the most widely used standard recommendations include only synoptic winds, without regards to loadings due to convective winds. It is noteworthy that, due to the large linear dimensions of transmission lines, they are more susceptible to damages from localized winds than punctual structures. In order to complemente previous studies on the effect of localized high intensity localized winds on transmission lines, this research seeks to analyse cable tensions induced by a combination of both synoptic and high intensity localized winds. Through a computational routine in MATLAB, the events to be analysed were simulated. Several span lengths, orientations and combinations of winds were considered on the simulations. From the results obtained, it is possible to conclude that, from the same wind speed at a height of 10 m above the ground, a synoptic event with its direction perpendicular to the cables induced more severe loads. In other cases analysed, it was observed that due to the axisymmetric wind field generated, the more severe load case may be composed by a localized wind event.

Key-words: transmission lines; thunderstoms; downbursts; wind effects.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: nuvem do tipo <i>cumulonimbus</i> . (CIGRÉ, 2004) .....	5
Figura 2: esquema comparativo entre um perfil vertical gerado para uma TS, por um vento sinótico e um perfil uniforme. (Adaptado de Lombardo et al., 2013).....	5
Figura 3: relação de altitudes e temperaturas médias das camadas da atmosfera. (Adaptado de Ahrens, 2008) .....	9
Figura 4: relação de altitudes e temperaturas médias dos primeiros 120 km da atmosfera. (Adaptado de Ahrens, 2008) .....	10
Figura 5: estágios de desenvolvimento de um evento TS (BLESSMANN, 1995) .....	18
Figura 6: Mapa com indicação de quantos dias por ano possuem parâmetros ambientais favoráveis ao desenvolvimento de tormentas severas (BROOKS, 2003).....	18
Figura 7: distribuição acumulada de probabilidade do gradiente térmico para tormentas (Adaptado de Brooks, 2003) .....	19
Figura 8: falha de uma estrutura de 275 kV devido a ventos de alta intensidade (CIGRÉ, 2004).....	22
Figura 9: falha de uma estrutura de LT na Austrália (HOLMES, 2008).....	22
Figura 10: representação do peso aparente do cabo, considerando a ação do vento na horizontal (adaptado de LABEGALINI et al., 1992).....	24
Figura 11: curvas do coeficiente GC em função da altura para diferentes categorias de terreno (Adaptado de IEC, 2003).....	30
Figura 12: curva do coeficiente GL em função do vão médio (Adaptado de IEC, 2003) .....	30
Figura 13: Modelo <i>wall jet</i> (Adaptado de Savory et al., 2001) .....	31
Figura 14: comparação ds variação da velocidade com a distância (RIERA E ROCHA, 1998) .....	35
Figura 15: evolução da velocidade com a distância (adaptado de Holmes e Oliver, 2000).....	37
Figura 16: medição do evento analisado (HOLMES E OLIVER, 2000) .....	38
Figura 17: resultado da simulação do evento analisado (adaptado de Holmes e Oliver, 2000) .....	38
Figura 18: etapas de uma tormenta elétrica combinada com um vento de traslado (Adaptado de Chay et al., 2006).....	41
Figura 19: etapas de uma tormenta elétrica combinada com um vento de traslado em uma medição (CHAY et al., 2006).....	42
Figura 20: comparação entre valores medidos e simulados (adaptado de Chay et al., 2006) ..	44
Figura 21: esquema da tormenta elétrica .....	46
Figura 22: comparação dos dados da Tabela 1 com a (equação 42). .....	49
Figura 23: velocidade tangencial de uma tormenta elétrica em função do tempo (PONTE JR., 2005).....	51

Figura 24: linha de corrente genérica (PONTE JR., 2005) .....	52
Figura 25: eixos coordenados e ângulos (PONTE JR., 2005).....	54
Figura 26: modelo proposto para definição da área de ação da TS .....	56
Figura 27: representação do modelo adotado para expansão da tormenta. ....	57
Figura 28: variação de $V_{rel}$ ao longo da área de ação da tormenta para diferentes valores de $b$ . .....	59
Figura 29: variação de $V_{rel}$ ao longo da área de ação da tormenta para diferentes valores de $H_c$ . ....	60
Figura 30: variação de $V_{rel}$ ao longo da área de ação da tormenta para diferentes valores de $R_0$ . ....	61
Figura 31: variação do modelo da linha de corrente limite. ....	62
Figura 32: desenvolvimento da espessura da camada limite do escoamento com o aumento da distância.....	64
Figura 33: representação da região simulada. ....	65
Figura 34: função de distribuição de probabilidade da queda de pressão. ....	67
Figura 35: função de densidade acumulada da queda de pressão.....	67
Figura 36: função de distribuição de probabilidade da duração característica.....	68
Figura 37: função de densidade acumulada da duração característica. ....	69
Figura 38: função de distribuição de probabilidade do vento de traslado. ....	69
Figura 39: função de densidade acumulada do vento de traslado. ....	70
Figura 40: função de distribuição de probabilidade do vento de traslado, caso EPS.....	70
Figura 41: função de densidade acumulada do vento de traslado, caso EPS. ....	71
Figura 42: função de distribuição de probabilidade da altura da bigorna da nuvem.....	72
Figura 43: função de densidade acumulada da altura da bigorna da nuvem. ....	72
Figura 44: função de distribuição de probabilidade do raio da base de nuvem.....	73
Figura 45: função de densidade acumulada do raio da base de nuvem.....	73
Figura 46: representação das distâncias radiais analisadas na região simulada. ....	76
Figura 47: velocidade radial ao longo do tempo para as distâncias radiais simuladas.....	76
Figura 48: velocidade axial ao longo do tempo para as distâncias radiais simuladas. ....	77
Figura 49: perfil vertical de velocidades para $r = 100$ m.....	77
Figura 50: perfil vertical de velocidades para $r = 250$ m.....	78
Figura 51: perfil vertical de velocidades para $r = 500$ m.....	78
Figura 52: perfil vertical de velocidades para $r = 1000$ m.....	79
Figura 53: perfil vertical de velocidades para $r = 2000$ m.....	79
Figura 54: perfil vertical de velocidades para $r = 3000$ m.....	80
Figura 55: perfil vertical de velocidades para $r = 4000$ m.....	80

Figura 56: perfil vertical de velocidades para $r = 5000$ m.....	81
Figura 57: perfil vertical de velocidades para $r = 6000$ m.....	81
Figura 58: perfil vertical de velocidades para $r = 7000$ m.....	82
Figura 59: perfil vertical de velocidades para as distâncias radiais analisadas. ....	82
Figura 60: esquema do domínio da simulação. ....	83
Figura 61: velocidade radial dos pontos 1 a 5. ....	85
Figura 62: velocidade radial dos pontos 6 a 9. ....	85
Figura 63: velocidade radial dos pontos 10 a 13. ....	86
Figura 64: velocidade axial dos pontos 1 a 5.....	86
Figura 65: velocidade axial dos pontos 6 a 9.....	87
Figura 66: velocidade na direção x dos pontos 1 a 5.....	87
Figura 67: velocidade na direção y dos pontos 1 a 5.....	88
Figura 68: velocidade na direção y dos pontos 6 a 9.....	88
Figura 69: velocidade na direção y dos pontos 10 a 13.....	89
Figura 70: distribuição de probabilidade da série de velocidades anuais máximas simulada. .	90
Figura 71: comparação entre resultados observados por Santos (1989) e a distribuição simulada.....	91
Figura 72: comparação entre resultados observados por Santos (1989), trabalhos anteriores e a distribuição simulada.....	91
Figura 73: representação do cabo analisado, com os pontos de interesse destacados.....	92
Figura 74: esquema do domínio da simulação. ....	93
Figura 75: velocidade radial dos pontos de interesse. ....	94
Figura 76: velocidade na direção x dos pontos de interesse.....	94
Figura 77: velocidade na direção y dos pontos de interesse.....	95
Figura 78: velocidade axial dos pontos de interesse.....	95
Figura 79: força na direção x dos pontos de interesse. ....	96
Figura 80: força na direção y dos pontos de interesse.....	96
Figura 81: força na direção z dos pontos de interesse. ....	97
Figura 82: força resultante dos pontos de interesse. ....	97
Figura 83: esquema do domínio do caso 1. ....	99
Figura 84: esquema do domínio do caso 2. ....	99
Figura 85: esquema do domínio do caso 3. ....	100
Figura 86: resultados da tração (N) para o caso 1. ....	101
Figura 87: resultados da tração (N) para o caso 2. ....	102
Figura 88: resultados da tração (N) para o caso 3. ....	102
Figura 89: valores calculados para o coeficiente de redução de pressão de vento.....	105

Figura 90: valores calculados para o coeficiente de redução de velocidade de vento..... 105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: cálculo da massa específica relativa .....	48
Tabela 2: erro absoluto da equação proposta em relação ao valor calculado.....	49
Tabela 3: variação de $V_{rel}$ ao longo da área de ação da tormenta para diferentes valores de $b$ e erro em relação a $b = 100$ m. ....	60
Tabela 4: dados de tormentas elétricas (PONTE JR., 2005) .....	68
Tabela 5: coordenadas dos pontos de interesse. ....	84
Tabela 6: coordenadas dos pontos de interesse. ....	92
Tabela 7: parâmetros e velocidades a 10 m do solo. ....	98
Tabela 8: coordenadas iniciais da TS e direção do vento de fundo para os três casos.....	99
Tabela 9: coordenadas iniciais da TS e direção do vento de fundo para os três casos.....	100
Tabela 10: resultados da tração (N) para o caso 1.....	101
Tabela 11: resultados da tração (N) para o caso 2.....	101
Tabela 12: resultados da tração (N) para o caso 3.....	102
Tabela 13: valores do coeficiente GL e da velocidade média para os vãos analisados. ....	104
Tabela 14: valores dos coeficientes calculados. ....	104
Tabela 15: valores dos coeficientes calculados. ....	104

## LISTA DE SIGLAS

LT: linhas de transmissão

TS: *thunderstorms* (tormentas elétricas)

EPS: *extended pressure systems* (tormentas extratropicais)

CIGRÉ: *Conseil International des Grands Reseaux Électriques* (Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos)

CFD: *Computational Fluid Dynamics* (Dinâmica dos Fluidos Computacional)

LDEC: Laboratório de Dinâmica Estrutural e Confiabilidade da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

$dp$  – diferencial da pressão atmosférica

$\rho$  – massa específica do ar

$g$  – aceleração da gravidade

$dz$  – diferencial de altitude

$R$  – constante do ar

$T_e$  – temperatura

$p$  – pressão do fluido

$l_r$  – gradiente térmico do ar

$dT_e$  – diferencial de temperatura

$p_1$  – pressão de referência do fluido

$T_{e_1}$  – temperatura de referência

$z_1$  – altitude de referência

$z$  – altitude

$\bar{V}(z)$  – velocidade média horizontal do vento numa altura  $z$  acima do solo

$u_*$  – velocidade de fricção do fluxo do vento

$\kappa$  – constante de von Karman

$z_0$  – comprimento de rugosidade do vento

$\bar{V}(z_1)$  – velocidade horizontal do vento numa altura de referência  $z_1$  acima do solo

$\alpha$  – expoente adimensional de camada limite

$p_a$  – peso aparente do cabo

$p_r$  – peso real do cabo

$f_v$  – força do vento na direção horizontal

$V_k$  – velocidade característica do vento

$V_0$  – velocidade básica do vento

$S_1$  – fator de topografia do terreno

$S_2$  – fator que considera a combinação de fatores como a rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento acima do terreno e as dimensões da edificação (considerando dimensões horizontais e verticais)

$S_3$  – fator que corrige o tempo de retorno do vento para a estrutura proposta

$K$  – parâmetro meteorológico

$f_r$  – fator de rajada

$P$  – parâmetro meteorológico

$q$  – pressão dinâmica do vento

$F$  – componente de força

$C_f$  – coeficiente de força

$A_1$  – área de referência

$q_0$  – pressão dinâmica de referência do vento

$\tau$  – fator de correção da massa específica do ar

$\rho_{AR}$  – massa específica de referência do ar, igual a  $1,225 \text{ kg/m}^3$  correspondente a temperatura de  $15^\circ \text{ C}$  e pressão atmosférica de  $101,3 \text{ kPa}$  no nível do mar

$V_R$  – velocidade de referência do vento

$K_R$  – coeficiente adimensional de correção da rugosidade do terreno

$V_{RB}$  – velocidade de referência do vento para um terreno do tipo B

$q_k$  – valor característico da pressão do vento

$C_x$  – coeficiente que depende da forma e das propriedades da superfície do elemento considerado

$G$  – fator que considera a influência da altura em relação ao nível do solo do elemento considerado, da rugosidade do terreno, de rajadas de vento e da resposta dinâmica do componente

$A_C$  – solicitação transmitida à estrutura

$C_{XC}$  – coeficiente de arrasto do cabo, normalmente igual a 1

$G_C$  – coeficiente que depende da altura  $z$  e da rugosidade do terreno

$G_L$  – coeficiente de redução do vão

$d$  – diâmetro do cabo

$L$  – vão médio da estrutura

$\varphi$  – ângulo entre a direção do vento e o condutor

$\sigma(\xi, \eta)$  – função de distribuição da intensidade da TS

$\xi$  – coordenada de uma superfície diferencial de origem da TS

$\eta$  – coordenada de uma superfície diferencial de origem da TS

$\sigma_S$  – intensidade característica da TS

$D_S$  – diâmetro da origem da TS

$V_x$  – componente do campo de velocidade na direção  $x$

$V_y$  – componente do campo de velocidade na direção  $y$

$V_z$  – componente do campo de velocidade na direção  $z$

$H_S$  – altura do solo à superfície de origem da TS

$r_d$  – comprimento de escala radial

$\bar{V}_W$  – campo de velocidades considerando as direções x e y

$\chi$  – parâmetro relacionado a  $D_S/H_S$  pela aproximação  $1/\chi - 2,27\sqrt{D_S/H_S} - 0,36$

$\psi$  – parâmetro relacionado a  $D_S/H_S$  pela aproximação  $1/\psi - 0,0026\sqrt{D_S/H_S} - 0,02$

$V_r$  – velocidade radial do ponto de interesse

$V_{r,max}$  – velocidade radial máxima

$r$  – distância do centro da tempestade ao ponto de interesse

$r_{max}$  – distância do centro da tempestade à posição na qual ocorre  $V_{r,max}$

$t$  – tempo

$T_f$  – duração do evento TS

$\bar{U}_r$  – velocidade radial

$\bar{U}_z$  – velocidade vertical

$\lambda$  – fator de intensidade de escala

$c_1$  – constante do modelo

$c_2$  – constante do modelo

$c_3$  – constante do modelo

$z_m$  – elevação na qual ocorre a velocidade máxima do vento

$r_p$  – raio no qual ocorre a velocidade máxima do vento

$\bar{U}_{r,max}$  – velocidade radial máxima desejada

$\Pi$  – fator de intensidade

$r_t$  – raio onde a maior velocidade de escoamento ocorre, dependente do tempo e de  $r_p$

$z_r$  – altura da velocidade de vento máxima em função do raio

$\bar{U}_{\text{Trans}}$  – velocidade do vento de traslado

erf – função erro

$H_c$  – altura da bigorna do nuvem *cumulonimbus*

$h$  – altura da base da nuvem *cumulonimbus*

$R_0$  – raio do escoamento descendente na base da nuvem

$B$  – forças de campo

$V$  – velocidade de escoamento

$V_t$  – velocidade do fluido ao longo de uma linha de corrente

$\Delta p(z)$  – queda de pressão atmosférica na altura  $z$

$\Delta p_0$  – queda de pressão atmosférica no nível do mar

$\beta$  – coeficiente de ajuste da equação

$V_t$  – velocidade tangencial em uma linha de corrente para a altura  $z$

$H_c$  – altura do solo ao centro da bigorna

$\rho_0$  – massa específica do ar no nível do mar

$\zeta$  – coeficiente de ajuste da equação, neste caso,  $\beta = 0,000095 \text{ m}^{-1}$

$\Delta p_0$  – diferença da queda de pressão entre uma altura  $H_c$  e o nível do solo

$T$  – duração característica da tempestade

$a$  – constante

$k$  – constante

$z_h$  – altura do ponto conhecido da linha de corrente

$r_h$  – distância do centro da tormenta ao ponto conhecido

$V_r$  – velocidade radial em uma linha de corrente

$\theta$  – ângulo que a linha de corrente faz com o eixo vertical  $z$

$V_a$  – velocidade axial em uma linha de corrente

$z'(r)$  – derivada de  $z(r)$  em relação a distância  $r$

$V_x$  – velocidade na direção do eixo  $x$

$V_y$  – velocidade na direção do eixo  $y$

$V_z$  – velocidade na direção do eixo  $z$

$\beta$  – ângulo da projeção da linha de corrente no plano  $xy$  em relação ao eixo  $x$

$V_{ox}$  – velocidade do vento de fundo na direção do eixo  $x$

$V_{oy}$  – velocidade do vento de fundo na direção do eixo  $y$

$V_o$  – velocidade do vento de fundo

$\gamma$  – ângulo entre a direção do vento de fundo  $V_o$  e o eixo  $x$

$R_{max}$  – raio da área de atuação da TS

$b$  – altura média de ação dos ventos da TS

$R_t$  – raio da área atingida pela TS em um instante  $t$

$b$  – altura limite média dos ventos atingidos pela TS

$V_{ef}$  – velocidade efetiva da tormenta

$V_{rel}$  – velocidade relativa da tormenta

$\delta$  – espessura da camada limite

Re – número de Reynolds

$\nu$  – viscosidade dinâmica do fluido

$x_0$  – coordenada x inicial da tormenta

$y_0$  – coordenada y inicial da tormenta

$G_L'$  – coeficiente de redução da pressão de vento calculado

$F_y$  – força transmitida à estrutura

$\bar{V}_y$  – velocidade média na direção y

d – diâmetro do cabo

L – vão analisado

CRV – coeficiente de redução da velocidade de vento calculado

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>4</b>
<b>2 MÉTODO DE PESQUISA .....</b>	<b>7</b>
2.1 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	7
2.2 PRESSUPOSTOS.....	7
2.3 DELIMITAÇÕES.....	8
2.4 LIMITAÇÕES .....	8
<b>3 CONSIDERAÇÕES SOBRE METEOROLOGIA .....</b>	<b>9</b>
3.1 DESCRIÇÃO DA ATMOSFERA.....	9
3.2 GRADIENTES DE TEMPERATURA .....	11
3.3 CÁLCULO DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA.....	12
3.4 CICLONES EXTRATROPICAIS (EPS) .....	15
3.4 TORMENTAS ELÉTRICAS (TS).....	16
<b>4 AÇÃO DO VENTO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO .....</b>	<b>20</b>
4.1 LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO .....	20
4.2 CARREGAMENTO DO VENTO EM TORRES DE LT .....	23
4.3 METODOLOGIA PRESENTE EM NORMAS TÉCNICAS .....	25
<b>5 MODELOS EXISTENTES DE EVENTOS TS .....</b>	<b>31</b>
5.1 MODELOS NUMÉRICOS .....	31
5.2 MODELO DE ZHU E ETKIN .....	32
5.3 MODELO DE RIERA E ROCHA .....	34
5.4 MODELO DE HOLMES E OLIVER .....	36
5.5 MODELO DE OSV.....	39
5.6 MODELO DE CHAY, ALBERMANI E WILSON.....	40
<b>6 MODELO ADOTADO .....</b>	<b>45</b>
6.1 PREMISSAS DO MODELO .....	45
6.2 QUEDA DE PRESSÃO .....	47
6.3 MASSA ESPECÍFICA DO AR.....	47
6.4 CÁLCULO DA VELOCIDADE TANGENCIAL .....	50
6.5 DECOMPOSIÇÃO DA VELOCIDADE TANGENCIAL .....	51
6.6 VENTO DE TRASLADO .....	55
6.7 ÁREA DE AÇÃO DA TS .....	55
6.8 VELOCIDADE DE EXPANSÃO DA TS .....	57
6.9 LINHA DE CORRENTE LIMITE.....	61
6.10 CAMADA LIMITE DO ESCOAMENTO.....	63
<b>7 SIMULAÇÕES .....</b>	<b>65</b>

7.1 DEFINIÇÃO DE VALORES PARA OS PARÂMETROS .....	65
7.1.1 Dimensão da área .....	65
7.1.2 Frequência de TS e EPS .....	66
7.1.3 Diferença de pressão na TS .....	66
7.1.4 Duração característica .....	67
7.1.5 Velocidade e direção do vento de traslado .....	69
7.1.6 Altura da bigorna .....	71
7.1.7 Raio do escoamento descendente na base da nuvem .....	72
7.2 ROTEIRO DAS SIMULAÇÕES .....	74
7.3 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO DE UMA TS ISOLADA.....	75
7.4 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO DE UMA TS COMBINADA COM VENTO DE TRASLADO .....	83
7.5 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO DE UMA SÉRIE DE VELOCIDADES ANUAIS MÁXIMAS .....	89
7.6 VALIDAÇÃO DO MODELO .....	90
7.7 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO DE UMA TS COMBINADA COM VENTO DE FUNDO APLICADA A UM CABO.....	92
<b>8 RESULTADOS .....</b>	<b>98</b>
8.1 SITUAÇÕES SIMULADAS .....	98
8.2 RESULTADOS .....	101
8.3 ANÁLISE DAS FORÇAS HORIZONTAIS .....	103
9.1 CONCLUSÕES .....	106
9.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	108
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>109</b>
<b>APÊNDICE 1 .....</b>	<b>112</b>
<b>APÊNDICE 2 .....</b>	<b>116</b>
<b>APÊNDICE 3 .....</b>	<b>121</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No projeto de linhas aéreas de transmissão, em países que não apresentam acúmulo de gelo nas estruturas e nos cabos, as forças devido aos efeitos do vento possuem ação dominante no projeto das estruturas. Procedimentos normativos utilizam, em geral, ventos sinóticos para fornecer parâmetros para o projeto de torres. Ventos convectivos de alta intensidade não costumam ser considerados no projeto.

Ventos sinóticos costumam atingir grandes extensões horizontais. O perfil vertical do campo de velocidades horizontais gerado pode ser descrito por de uma variação exponencial ou logarítmica, até uma altura gradiente, a partir da qual a rugosidade do solo não afeta mais o escoamento. Ciclones extratropicais, também chamados de tormentas EPS, são eventos sinóticos de alta velocidade.

Tormentas elétricas ou *thunderstorms* (TS) se caracterizam por serem ventos de origem convectiva, normalmente provenientes de uma nuvem do tipo *cumulonimbus* (figura 1), e de efeito localizado. O perfil vertical gerado por este tipo de evento difere do gerado por ventos sinóticos por concentrar as velocidades mais altas de vento mais próximas do solo. Uma comparação da forma aproximada dos perfis pode ser observada na figura 2.

É importante ressaltar que, devido às grandes dimensões lineares das linhas de transmissão (LT), estes projetos são mais suscetíveis de serem afetados por ventos de efeito localizado do que estruturas com localização pontual. Devido à área de ação de tormentas localizadas poder chegar a alguns quilômetros de diâmetro, além do efeito do vento nas estruturas, é importante considerar o efeito das forças exercidas pelo vento sobre os cabos no cálculo das estruturas. Adicionalmente, ventos de alta intensidade são frequentemente relacionados com falhas de torres, o que indica que os procedimentos atuais de projeto não estão adequados.



Figura 1: nuvem do tipo *cumulonimbus*. (CIGRÉ, 2004)

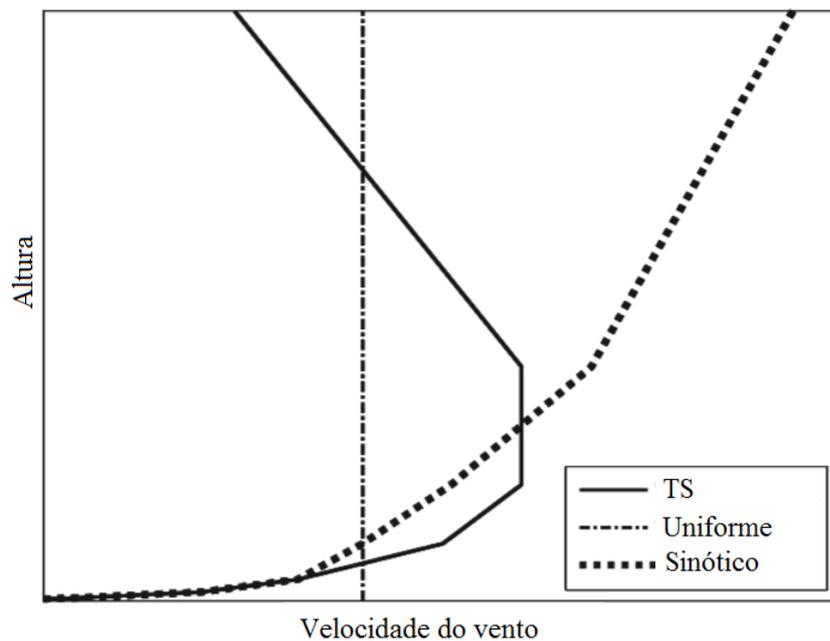


Figura 2: esquema comparativo entre um perfil vertical gerado para uma TS, por um vento sinótico e um perfil uniforme. (Adaptado de Lombardo et al., 2013)

Ponte Jr. (2005) desenvolveu um modelo numérico de tormentas TS combinados com ventos sinóticos (que poderiam ou não ser eventos EPS) visando reproduzir dados de estações meteorológicas. Ponte Jr. e Riera (2010) aprimoraram este modelo ajustando a dedução da

equação de Bernoulli utilizada para calcular a velocidade da tormenta e a distribuição probabilística da altura da bigorna da nuvem *cumulonimbus*. Fadel Miguel e Riera (2013) adaptaram o modelo proposto previamente por Ponte Jr. para analisar os carregamentos em estruturas altas devido à combinação de eventos TS e ventos sinóticos. Este trabalho tem como proposta, baseado no modelo desenvolvido nos estudos anteriores, a determinação do campo de velocidades gerado pela combinação de eventos TS e ventos sinóticos em cabos suspensos e dos carregamentos transmitidos às estruturas.

No capítulo 2 estão apresentados os objetivos do trabalho, assim como seus pressupostos, limitações e delimitações. Também estão descritas as etapas realizadas para a sua conclusão. Um resumo dos principais conceitos meteorológicos utilizados no trabalho está exposto no capítulo 3, visando facilitar a compreensão das definições a serem apresentadas nos capítulos posteriores. A importância do estudo dos carregamentos gerados pelo vento em LT é descrita, junto com as principais recomendações normativas aplicadas, no capítulo 4. No capítulo 5, são apresentados diferentes modelos numéricos de tormentas descendentes existentes. O modelo numérico proposto para este trabalho, está detalhadamente descrito no capítulo 6. No capítulo 7 estão presentes as definições de variáveis e as simulações realizadas para ilustrar o comportamento do modelo em diversos tipos de análises. A descrição das simulações realizadas e a apresentação dos resultados obtidos para a análise e comparação das forças geradas em cabos para diferentes situações estão apresentadas no capítulo 8. No capítulo 9 se encontram as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 MÉTODO DE PESQUISA

Para o desenvolvimento deste trabalho foram definidas as seguintes diretrizes.

### 2.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e são apresentados abaixo.

O objetivo principal deste trabalho é a caracterização do campo de velocidades e das forças geradas pela combinação de ventos convectivos (eventos TS) e sinóticos (vento de fundo ou eventos EPS), na região de Porto Alegre, em cabos suspensos.

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- a) propor um modelo de determinação do raio do jato descendente da nuvem;
- b) propor um modelo para definir a área de atuação de uma TS;
- c) propor um modelo para determinar a expansão do fluxo de vento da TS;
- d) propor um modelo para o desenvolvimento da camada limite em um escoamento descendente;
- e) compatibilizar a rotina de simulação numérica existente para analisar um problema tridimensional.

### 2.2 PRESSUPOSTOS

São pressupostos do trabalho que:

- a) o modelo de eventos EPS adotado é válido;
- b) o modelo de eventos TS adotado é válido;
- c) os dados observados são suficientemente representativos para validar o modelo;
- d) a turbulência do vento influencia de maneira significativa a resposta dinâmica, define-se que para a primeira análise de ordem estática ela pode ser desconsiderada.

## 2.3 DELIMITAÇÕES

Os estudos apresentados neste trabalho, são delimitados à região da cidade de Porto Alegre. A análise das trações no cabo é válida apenas para as situações descritas. A metodologia de cálculo adotada é a descrita na IEC 60826 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003).

## 2.4 LIMITAÇÕES

Considera-se uma limitação do trabalho as simplificações realizadas no modelo, de maneira que o tornasse numericamente viável para ser aplicado no método de Monte Carlo, possibilitando uma análise probabilística dos dados obtidos. Entende-se que as simplificações permitem que o modelo seja utilizado para fins de engenharia estrutural de maneira satisfatória.

### 3 CONSIDERAÇÕES SOBRE METEOROLOGIA

Este capítulo tem como objetivo descrever, de maneira simplificada, os fenômenos meteorológicos abordados neste trabalho.

#### 3.1 DESCRIÇÃO DA ATMOSFERA

A atmosfera, camada de gases que envolve a Terra e corresponde a cerca de 1% do seu raio, é composta por cinco camadas com distintos gradientes térmicos: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera. Entre duas camadas diferentes existe uma área de transição na qual ocorre uma descontinuidade do gradiente térmico. Estas áreas são denominadas: tropopausa, estratopausa, mesopausa e termopausa. Conforme Barry e Chorley (2003), a altitude e a espessura destas camadas variam com as condições climatológicas e com a latitude. A figura 3 apresenta altitudes e variações de temperatura médias para as camadas da atmosfera. Um esquema mais detalhado da estrutura vertical da atmosfera até a termosfera é apresentado na figura 4.

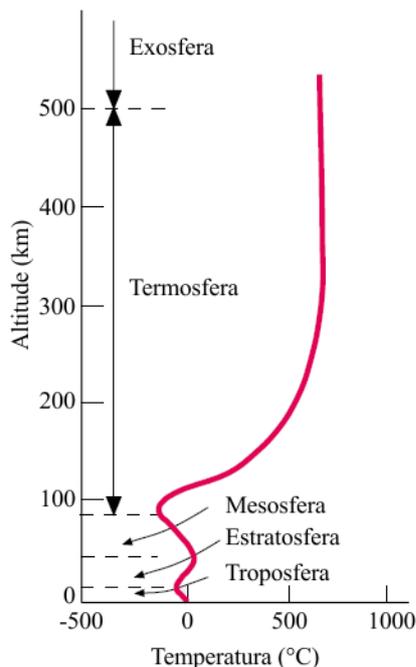


Figura 3: relação de altitudes e temperaturas médias das camadas da atmosfera.  
(Adaptado de Ahrens, 2008)

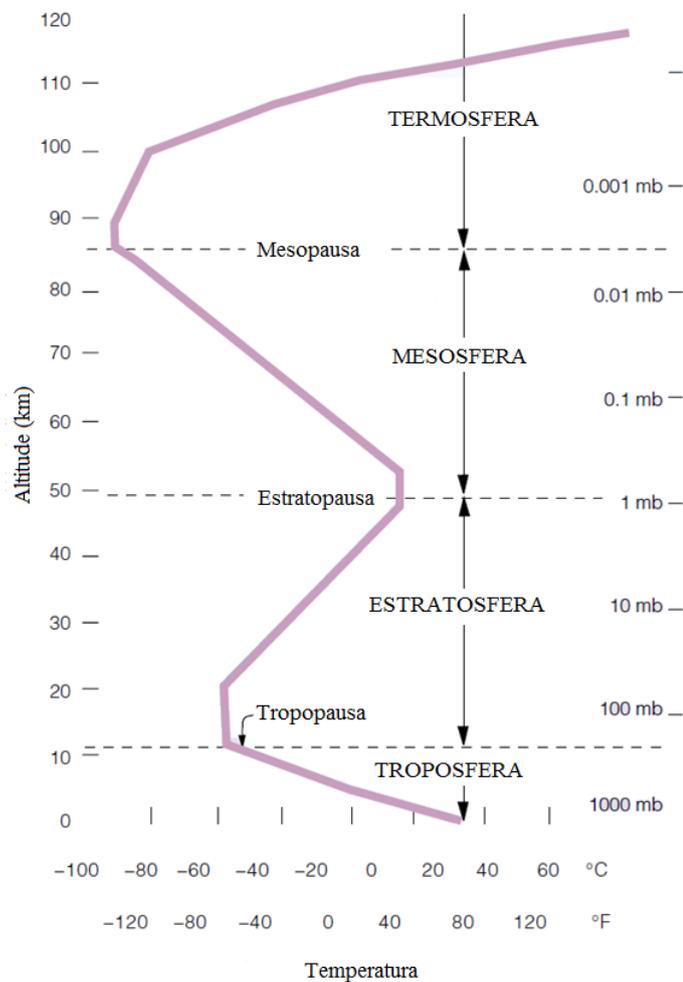


Figura 4: relação de altitudes e temperaturas médias dos primeiros 120 km da atmosfera. (Adaptado de Ahrens, 2008)

A troposfera é a camada da atmosfera mais próxima do solo. Nesta camada, há uma queda de temperatura com o aumento da altitude. Esta queda na temperatura ocorre devido à compressibilidade do ar e, conseqüentemente, à alteração de sua massa específica com a altitude, pois ao expandir-se há um resfriamento do ar. Acima da troposfera existe uma região de inversão térmica (onde a temperatura do ar aumenta com a altitude) ou de isotermia (onde a temperatura do ar não se altera com a altitude) chamada tropopausa. O gradiente térmico desta região limita a convecção entre a troposfera e a estratosfera. (BARRY e CHORLEY, 2003).

Na estratosfera e na estratopausa há um acréscimo na temperatura devido a absorção da radiação ultravioleta do sol através do ozônio. Apesar da maior parte do ozônio se encontrar na estratosfera (sua concentração máxima ocorre a cerca de 22 km de altitude), o maior acréscimo de temperatura ocorre na estratopausa, onde a temperatura do ar pode ultrapassar 0 °C. Isto

ocorre devido à baixa massa específica do ar nestas altitudes, que faz uma absorção de radiação limitada resultar em grandes acréscimos de temperatura. (BARRY e CHORLEY, 2003).

Acima da estratopausa a temperatura cai a cerca de  $-133\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Esta camada é denominada mesosfera. A partir de, aproximadamente, 80 km de altitude ocorre uma nova inversão térmica, na região denominada mesopausa. Acima desta região, a temperatura aumenta novamente, na camada denominada termosfera. Este aumento de temperatura se deve a absorção de radiação ultravioleta pelo oxigênio na forma molecular ( $\text{O}_2$ ) e atômica ( $\text{O}$ ) que compõem a camada, juntamente com o nitrogênio ( $\text{N}_2$  e  $\text{N}$ ). A exosfera, camada mais externa da atmosfera, é composta por átomos de oxigênio, hidrogênio e hélio. Nesta camada, as leis dos gases (que relacionam pressão, volume e temperatura) deixam de ser válidas. A região que separa estas duas camadas se chama termopausa. (BARRY e CHORLEY, 2003).

### 3.2 GRADIENTES DE TEMPERATURA

O gradiente de temperatura representa a taxa com a qual a temperatura do ar varia com a altura. Na troposfera, o gradiente térmico médio do ambiente é de  $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ . Este gradiente varia e pode, inclusive, ser negativo, condição denominada inversão térmica, que representa o aumento da temperatura com a altitude. (AHRENS, 2008)

Movimentos convectivos do ar são, normalmente, adiabáticos (não existe troca de calor com o ambiente). O processo pode ser descrito como o ar se deslocando verticalmente de um ambiente para outro de menor pressão. Esta alteração na pressão resulta em um aumento de volume e uma queda de temperatura. Se o movimento convectivo não produz condensação, a energia da expansão resultará em uma queda de temperatura no ar de  $9,8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , valor conhecido como razão adiabática seca. A presença de umidade no ar reduz o seu resfriamento com a expansão. A razão adiabática úmida, aplicável quando o ar está saturado, varia em função inversa da temperatura. (BARRY e CHORLEY, 2003).

Se uma parcela de ar seco estável, em um ambiente de gradiente térmico igual a  $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , se move verticalmente devido a uma força externa, assim que a força cessar, ela tende a retornar à posição inicial. Isto ocorre porque, por exemplo, caso a parcela de ar tenha se deslocado para cima, ela terá uma temperatura inferior ao ambiente (devido à diferença entre a razão adiabática

seca e o gradiente térmico ambiental), resultando em uma parcela de ar com massa específica superior, com a tendência de descer. Porém, caso o gradiente térmico ambiental fosse superior à razão adiabática seca, a situação apresentada seria a contrária. A parcela de ar deslocada para cima teria massa específica menor do que a ambiental e teria a tendência de continuar subindo. O comportamento de transição entre estes dois casos é denominado como neutro, no qual a parcela de ar tende a permanecer na sua nova posição. (BARRY e CHORLEY, 2003).

Conforme as diferenças entre as razões adiabáticas e o gradiente térmico ambiental, Barry e Chorley (2003) citam cinco estados de estabilidade estática:

- a) equilíbrio estável: ocorre quando o gradiente térmico ambiental é inferior à razão adiabática úmida;
- b) equilíbrio neutro saturado: ocorre quando o gradiente térmico ambiental é igual à razão adiabática úmida;
- c) equilíbrio condicionalmente instável: ocorre quando o gradiente térmico ambiental é superior à razão adiabática úmida e inferior à razão adiabática seca;
- d) equilíbrio neutro seco: ocorre quando o gradiente térmico ambiental é igual à razão adiabática seca;
- e) equilíbrio incondicionalmente instável: ocorre quando o gradiente térmico ambiental é superior à razão adiabática seca.

### 3.3 CÁLCULO DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA

A equação de equilíbrio hidrostático de um fluido, aplicada à atmosfera, fornece a equação 1, conforme apresentado por White (2002). O sinal negativo representa que a pressão atmosférica diminui conforme a altitude aumenta.

$$dp = -\rho \cdot g \cdot dz \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

$dp$  = diferencial da pressão atmosférica;

$\rho$  = massa específica do ar;

$g$  = aceleração da gravidade;

$dz$  = diferencial de altitude.

Definindo que o ar se comporta como um gás ideal, utiliza-se a equação de estado (equação 2), apresentada pelo mesmo autor.

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T_e} \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

$\rho$  = massa específica do ar;

$p$  = pressão do fluido;

$R$  = constante do ar, igual a  $287 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{K}}$ ;

$T_e$  = temperatura.

Combinando as equações 1 e 2, se obtém uma equação para a pressão atmosférica em função da temperatura do ar e da altitude (equação 3).

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{R \cdot T_e} \cdot dz \quad (\text{equação 3})$$

Considera-se, inicialmente, que a temperatura varia linearmente com um gradiente térmico constante, conforme representado na equação 4.

$$dT_e = -\Gamma_r \cdot dz \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

$dTe$  = diferencial de temperatura;

$lr$  = gradiente de temperatura do ar.

Combinando as equações 3 e 4, se obtém a equação 5 para a variação da pressão.

$$\frac{dp}{p} = \frac{g}{lr \cdot R} \cdot \frac{dTe}{Te} \quad (\text{equação 5})$$

Integrando a equação 5, a equação que define a pressão atmosférica é obtida (equação 6).

$$p = p_1 \cdot \left( \frac{Te}{Te_1} \right)^{\frac{g}{lr \cdot R}} \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

$p_1$  = pressão de referência do fluido;

$Te_1$  = temperatura de referência.

Para regiões nas quais a temperatura é constante com a altitude, integra-se diretamente a equação 3, resultando na equação para o cálculo da pressão atmosférica apresentada na equação 7.

$$p = p_1 \cdot e^{-\frac{g}{R \cdot Te} \cdot (z - z_1)} \quad (\text{equação 7})$$

Onde:

$z_1$  = altitude de referência;

$z$  = altitude.

### 3.4 CICLONES EXTRATROPICAIS (EPS)

Ciclones extratropicais, também denominados eventos ou tormentas EPS (*extended mature pressure systems* ou *extratropical pressure systems*), são os ventos fortes mais bem estudados e que embasam os cálculos de carregamento do vento na maior parte das normas existentes. Podem ser originados por de dois fenômenos: a ação mecânica de cadeias de montanhas sobre correntes atmosféricas de grandes dimensões ou a interação de massas de ar ao longo das frentes. (BLESSMANN, 1995).

Kaminski Jr. (2007) lista as seguintes características para tormentas EPS:

- a) apresentam longa duração;
- b) atingem regiões de grandes dimensões (geralmente centenas de quilômetros);
- c) possuem atmosfera verticalmente estável;
- d) apresentam velocidade média do vento razoavelmente constante ao longo da sua duração.

O conhecimento extenso sobre ciclones extratropicais pode ser atribuído, conforme Santos (1989), às grandes dimensões e duração elevada dos eventos, que permite a coleta de dados em muitas estações meteorológicas. O mesmo autor afirma que eventos EPS são a principal fonte de ventos extremos em latitudes temperadas, região na qual a cidade analisada neste trabalho se localiza. Em regiões tropicais, conforme a atividade térmica aumenta, o autor afirma que sua influência diminui. Destaca-se que, devido ao conhecimento sobre estes eventos, há modelos matemáticos consolidados para descrever o perfil vertical de velocidades médias horizontais na camada limite, como a lei logarítmica ou potencial, representados pelas equações 8 e 9, respectivamente. Na lei logarítmica, o comprimento de rugosidade,  $z_0$ , é ligado à altura dos obstáculos que formam a rugosidade do terreno. (BLESSMANN, 1995).

$$\bar{V}(z) = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (\text{equação 8})$$

$$\bar{V}(z) = \bar{V}(z_1) \cdot \left(\frac{z}{z_1}\right)^\alpha \quad (\text{equação 9})$$

Onde:

$\bar{V}(z)$  = velocidade média horizontal do vento numa altura  $z$  acima do solo;

$u_*$  = velocidade de fricção do fluxo do vento;

$\kappa$  = constante de von Karman;

$z$  = altura para a qual a velocidade é calculada;

$z_0$  = comprimento de rugosidade do vento;

$\bar{V}(z_1)$  = velocidade horizontal do vento numa altura de referência  $z_1$  acima do solo;

$z_1$  = altura de referência;

$\alpha$  = expoente adimensional de camada limite.

### 3.4 TORMENTAS ELÉTRICAS (TS)

Fujita (1990) define uma tempestade elétrica como uma tempestade local produzida por uma nuvem *cumulonimbus* que é acompanhada por relâmpagos e trovões. Uma TS severa induz rajadas de vento com velocidade elevada, chuva, granizo e, algumas vezes, tornados.

Kaminski Jr. (2007) explica que “As tempestades TS são chamadas elétricas porque a fricção das partículas sólidas descendentes (gotas, cristais e gelo) com o ar circundante gera uma diferença de potencial elétrico entre as nuvens e o solo, produzindo descargas elétricas.”. O mesmo autor lista as seguintes características para estas tempestades:

- a) apresentam curta duração (entre 3 e 30 minutos);
- b) possuem um efeito localizado;
- c) apresentam fortes rajadas de vento;
- d) possuem atmosfera verticalmente instável.

Eventos TS formam escoamentos descendentes, que podem ser classificados como macro ou microescoamentos, os quais consistem em um fluxo de ar com velocidade elevada que desce verticalmente. Macroescoamentos (*macrobursts*) apresentam: diâmetro superior a 4 km, duração entre 5 e 30 minutos e velocidades de vento que podem atingir 188 km/h. Microescoamentos (*microbursts*) apresentam: diâmetro inferior a 4 km, duração entre 5 e 15 minutos e velocidades de vento que podem atingir 235 km/h. (PONTE JR, 2005).

Blessmann (1995) define três estágios, descritos abaixo, para caracterizar o desenvolvimento de um evento TS (representado na figura 5).

O estágio 1 consiste na elevação de ar quente e úmido até uma altura de aproximadamente 8 km, onde ocorre a formação de uma nuvem do tipo *cumulus*.

No estágio 2, a nuvem gerada no estágio anterior se transforma em uma nuvem do tipo *cumulonimbus* com, pelo menos, 12 km de altura. São originadas correntes descendentes de ar, que ocorrem simultaneamente com correntes ascendentes. As correntes descendentes costumam atingir o solo bruscamente, gerando violentas rajadas de vento. Este estágio é chamado de estágio maduro e normalmente dura entre 5 e 30 minutos.

No estágio 3, as correntes descendentes aumentam em área transversal até tomarem conta da nuvem, neste momento, as correntes ascendentes cessam.

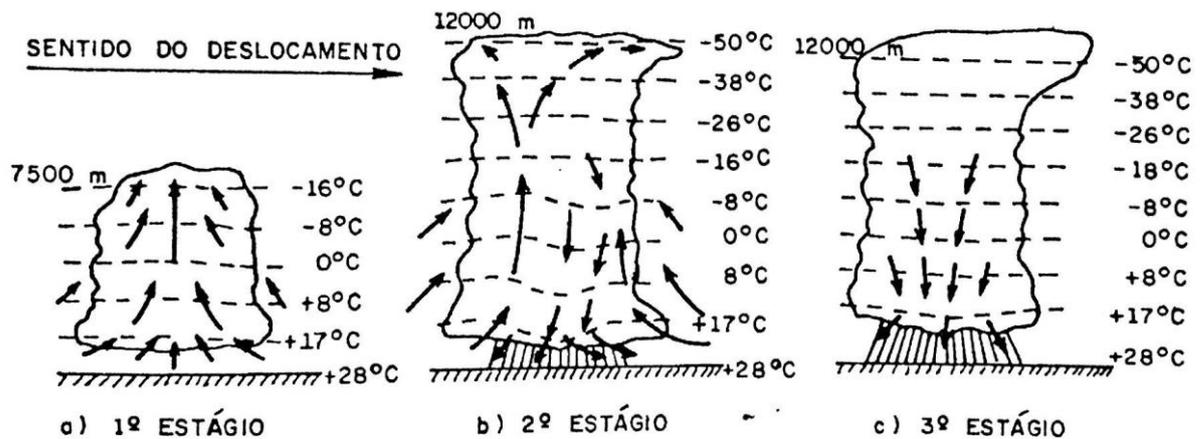


Figura 5: estágios de desenvolvimento de um evento TS (BLESSMANN, 1995)

Brooks et al. (2003) elaboraram um mapa com a distribuição espacial da frequência de fatores favoráveis para a formação de tempestades severas – definidas como tempestades que geram granizo com diâmetro igual ou superior a 5 cm ou rajadas de vento com velocidade igual ou superior a 120 km/h – nos EUA através da análise de fatores ambientais. Este mapa foi extrapolado mundialmente e é apresentado na figura 6. Nele, é possível observar que a região sul e sudeste do Brasil, juntamente com o Uruguai, o Paraguai e parte da Argentina, estão em destaque na incidência de tempestades severas, conforme a definição do autor. Esta análise reforça que, apesar de tempestades elétricas não serem os eventos predominantes no sul do Brasil, existe a tendência de que elas possuam velocidades mais elevadas, causando maiores danos.

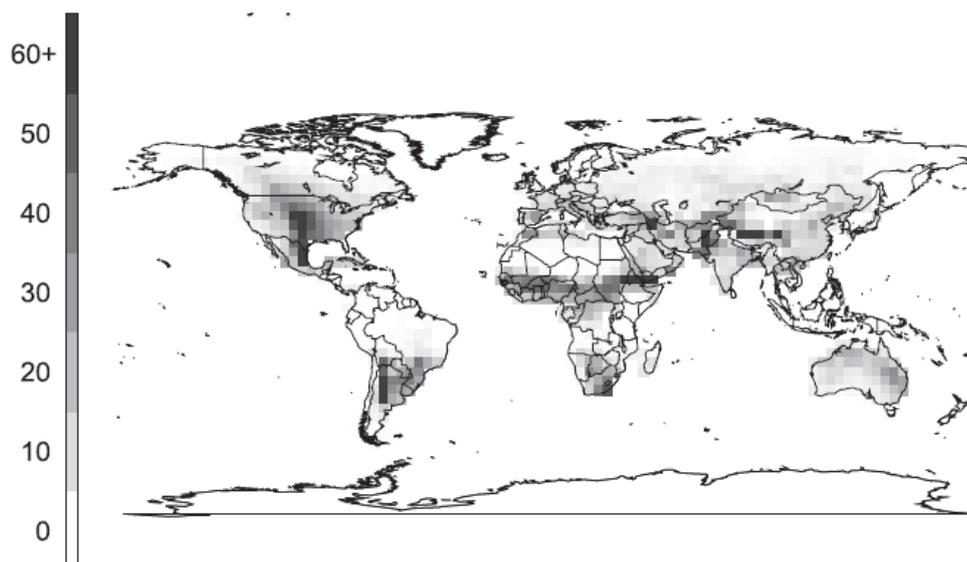


Figura 6: Mapa com indicação de quantos dias por ano possuem parâmetros ambientais favoráveis ao desenvolvimento de tempestades severas (BROOKS, 2003)

Brooks et al. (2003) também revela uma relação encontrada na análise dos gradientes de temperatura para os EUA. Conforme pode ser visto na figura 7, os gradientes de temperatura entre 2 km e 4 km de altitude costumam ser superiores para tormentas consideradas severas. A linha de referência na figura está representada em  $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$  e indica que 78% das tormentas severas possui um gradiente de temperatura superior a este valor, enquanto apenas 30% das tormentas menos severas se apresentam tão verticalmente instáveis.

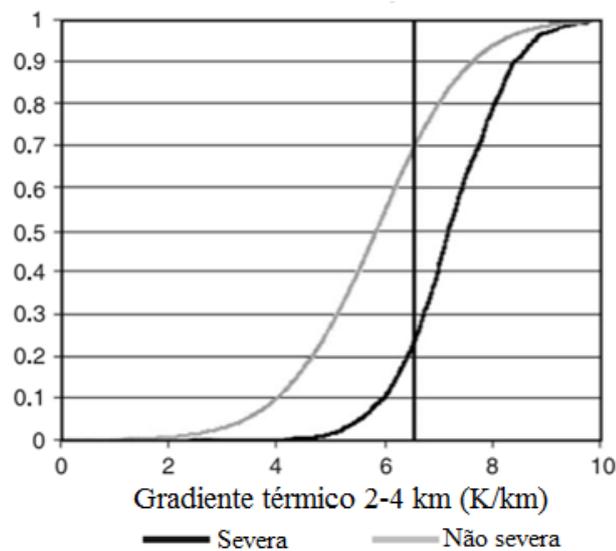


Figura 7: distribuição acumulada de probabilidade do gradiente térmico para tormentas (Adaptado de Brooks, 2003)

## 4 AÇÃO DO VENTO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

A contextualização sobre a importância do estudo aprofundado dos efeitos do vento em linhas de transmissão e as principais recomendações normativas estão descritas nos itens abaixo.

### 4.1 LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO

Kiessling et al. (2003) afirma que métodos atuais de projeto de linhas de transmissão as consideram como um sistema constituído por componentes individuais. O projeto do sistema permite coordenar a resistência mecânica destes componentes considerando o fato de que a falha de qualquer componente pode resultar na perda da capacidade de transmissão. O sistema de transmissão aéreo é dividido em quatro componentes: estruturas, fundações, condutores e ferragens.

Conforme o mesmo autor, tratar linhas de transmissão como um sistema exige que a resistência de seus componentes seja coordenada considerando os seguintes critérios:

- a) a menor confiabilidade deve ser designada ao componente que, em caso de falha, resultaria nos menores efeitos secundários de carregamentos (tanto estáticos quanto dinâmicos) em outros componentes, visando minimizar a probabilidade de propagação da falha ou de efeito cascata;
- b) a resistência dos componentes individuais deve ser selecionada e ajustada com a dos outros componentes para minimizar o tempo de reparo em caso de falha;
- c) o componente com a menor confiabilidade deveria apresentar, idealmente, uma pequena diferença entre a solicitação que causa dano e ruptura completa, assim como a menor dispersão da resistência possível;
- d) um componente de baixo custo ligado em série (onde a falha do sistema ocorre a partir da falha de qualquer componente) com um de alto custo deve ser projetado para ser tão resistente quanto o componente principal, caso as consequências de sua falha sejam tão severas quanto as da falha do componente principal (uma exceção deste critério é quando o componente é utilizado como um limitador de carregamento para outro componente).

Com os critérios expostos anteriormente, o autor apresenta as seguintes conclusões:

- a) baseado nos três primeiros critérios, o condutor não deve ser o componente de menor confiabilidade;

- b) as ferragens não devem ser selecionadas como o componente de menor confiabilidade por causa do último critério;
- c) baseado nos primeiros dois critérios, as estruturas de ancoragem não devem ser os componentes de menor confiabilidade;
- d) as fundações não se enquadram no segundo e no terceiro critério e, portanto, não devem ser selecionadas como componente de menor confiabilidade.

Como uma consequência lógica das considerações acima, as estruturas de suspensão deveriam ser os componentes de menor confiabilidade. Se uma LT é projetada com esta premissa, carregamentos climatológicos excedendo os carregamentos de projeto causariam falhas nas estruturas de suspensão. O dano estaria limitado a uma ou a algumas estruturas. Novas estruturas poderiam ser rapidamente reerguidas em fundações que não sofreram danos. Porém, para que esta estimativa de confiabilidade seja feita de maneira correta, deve-se possuir uma boa estimativa da distribuição de probabilidade das solicitações.

Em um trabalho realizado pelo Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos (CIGRÉ, 2008), é apresentado que há uma crescente conscientização dos profissionais da área de projeto de linhas de transmissão de que as características dos ventos normalmente utilizados para o projeto (valores extremos calculados em função de ventos sinóticos) nem sempre fornecem parâmetros que previnem ou explicam as falhas causadas pelo vento. O trabalho sugere que ventos de alta intensidade são, com frequência, a causa primária de falhas de torres de linhas de transmissão e até de alguns eventos cascata (eventos nos quais a falha de uma estrutura ocasiona a falha de uma ou mais estruturas adjacentes). Também é descrito que a maior parte das falhas estruturais atribuídas a ventos de alta intensidade acontecem em locais nos quais as principais solicitações de projeto não são devido ao gelo. Este fato explica o extenso estudo destes fenômenos em países como a Austrália, a África do Sul, a Argentina e o Brasil.

Devido a efeitos de ventos de alta intensidade, estima-se que na Austrália, a cada ano, acontecem uma ou duas grandes falhas estruturais em linhas de transmissão e muitos relatos de danos em redes de distribuição de eletricidade. No Brasil, a experiência de profissionais da área mostra que espera-se entre duas e quatro falhas ao ano. Na Argentina, espera-se uma falha a cada 1000 km de LT por ano. (CIGRÉ, 2004).

A figura 8 ilustra a falha de uma estrutura de 275 kV devido a ventos de alta intensidade. Outro exemplo de uma falha em torre de LT é apresentado na figura 9.

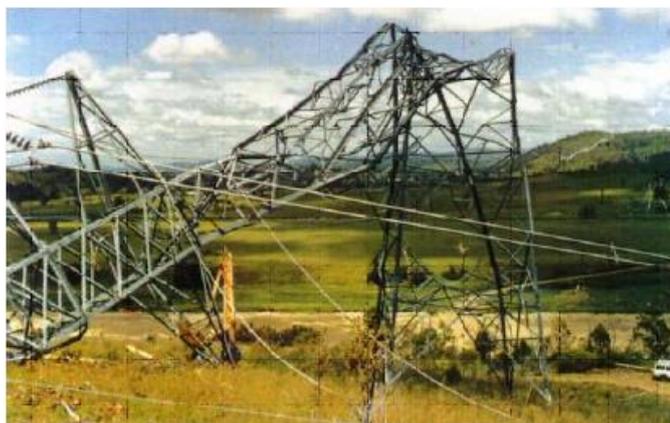


Figura 8: falha de uma estrutura de 275 kV devido a ventos de alta intensidade (CIGRÉ, 2004)



Figura 9: falha de uma estrutura de LT na Austrália (HOLMES, 2008)

Projetar estruturas de linhas de transmissão para tormentas elétricas é um equilíbrio entre o custo inicial da estrutura ou o custo para reforçá-la e o custo de interrupção no fornecimento de energia e de reposição de torres danificadas. Com esta justificativa, Oliver et al. (2000) propuseram um modelo de análise de risco para projeto de LT submetidos a escoamentos descendentes oriundos de tormentas elétricas. Esta metodologia de análise reafirma a necessidade de modelos confiáveis para que os custos e riscos sejam avaliados de maneira adequada.

## 4.2 CARREGAMENTO DO VENTO EM TORRES DE LT

Conforme Savory et al. (2001), a natureza do carregamento gerado por um evento TS em uma estrutura de uma linha de transmissão depende do estágio de desenvolvimento da tormenta que interage com a torre. Se o escoamento ainda não atingiu o solo, pode haver um carregamento vertical significativo, que pode agir nos dois sentidos dependendo de como o vórtice de vento afeta a estrutura, tornando este carregamento muito difícil de prever. Entretanto, se o escoamento já alcançou o solo e está em sua fase de espalhamento quando chega na estrutura o maior carregamento seria no plano horizontal.

Labegalini et al. (1992) equaciona a combinação da força exercida pelo vento, na horizontal, com o peso próprio, na vertical, resultando no cabo descrevendo uma catenária no plano inclinado. Esta ação conjunta de forças resulta em um aumento virtual no peso do cabo, representado na figura 10 e equação 10, que passa a atuar no plano da catenária deslocada. Como consequência desse aumento virtual do peso do cabo, há um aumento na tração do cabo, na flecha no plano da catenária e nas solicitações que a estrutura deve absorver. Esta teoria pode ser aplicada a tormentas TS, considerando que a força do vento não é, necessariamente, na direção horizontal.

$$p_a = \sqrt{p_r^2 + f_v^2} \quad (\text{equação 10})$$

Onde:

$p_a$  = peso aparente do cabo;

$p_r$  = peso real do cabo;

$f_v$  = força do vento na direção horizontal.

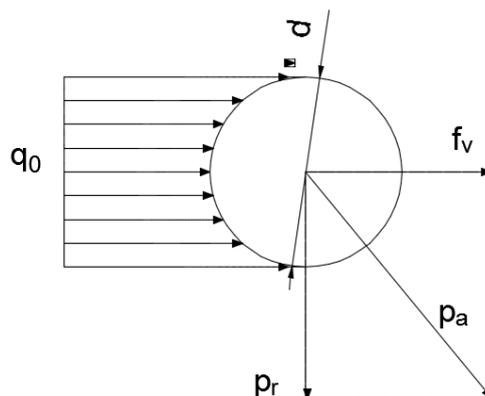


Figura 10: representação do peso aparente do cabo, considerando a ação do vento na horizontal (adaptado de LABEGALINI et al., 1992)

Exemplos de estudos dos efeitos de ventos de alta intensidade em linhas de transmissão podem ser encontrados nos trabalhos de Savory et al. (2001) e Shehata et al. (2005).

Savory et al. (2001) estudou o efeito de uma estrutura de LT de suspensão autoportante de 50,5 m sob o efeito de ventos gerados por tornados e *microbursts*. A restrição que os condutores exercem no topo da estrutura e o carregamento do seu peso próprio foram inseridos, porém, o carregamento do vento foi aplicado apenas na estrutura.

Um trecho de estruturas de suspensão estaiadas submetido a um evento TS foi estudado por Shehata et al. (2005). O estudo é justificado por uma grande falha do sistema de transmissão do Canadá em 1996, na qual 19 torres apresentaram falhas e houve um prejuízo de cerca de dez milhões de dólares americanos. O autor cita que, apesar da maior parte das falhas em LT relacionadas a ventos serem devido a ventos convectivos de alta intensidade, poucas orientações de projeto são fornecidas em normas para representar este tipo de carregamento. O modelo considerou a estrutura, cabos condutores e para-raios para a análise.

Em relação ao efeito de ventos de tormentas elétricas nos cabos, Holmes (2008) faz algumas considerações em relação ao coeficiente de redução do vão, adotado no projeto de linhas de transmissão para compensar o fato de que as rajadas de vento não atingem seu valor máximo simultaneamente ao longo de uma distância horizontal normal à direção média do vento. O autor indica que estes fatores são consideravelmente maiores para ventos convectivos do que para ventos sinóticos. Esta diferença, conforme o autor, pode gerar carregamentos nos cabos da ordem de 40-50% maiores para ventos oriundos de tormentas elétricas.

### 4.3 METODOLOGIA PRESENTE EM NORMAS TÉCNICAS

As normas técnicas utilizadas no Brasil se baseiam em ventos sinóticos para a sua formulação. Portanto, as metodologias de cálculo propostas não são indicadas para serem empregadas em ventos de alta intensidade. A seguir, estão descritos os procedimentos indicados por duas normas distintas.

A NBR 5422 – Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1985), atualmente em revisão, propõe metodologia similar à da NBR 6123 – Forças devido ao vento em edificações (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988) para o cálculo das velocidades do vento. Considerando que a NBR 5422 se encontra em desuso em projetos de linhas de transmissão, a metodologia da NBR 6123 será analisada em seu lugar.

Determina-se a velocidade básica do vento, denominada  $V_0$ , que consiste na máxima velocidade média medida sobre 3 segundos, com tempo de retorno de 50 anos, a 10m sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano, com poucos obstáculos isolados, na localização geográfica na qual a estrutura se localizará.

Esta velocidade é corrigida para a situação de projeto, denominada  $V_k$ , considerando três fatores, utilizando a equação 11.

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (\text{equação 11})$$

Onde:

$V_k$  = velocidade característica do vento;

$V_0$  = velocidade básica do vento;

$S_1$  = fator de topografia do terreno;

$S_2$  = fator que considera a combinação de fatores como a rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento acima do terreno e as dimensões da edificação (considerando dimensões horizontais e verticais);

$S_3$  = fator que corrige o tempo de retorno do vento para a estrutura proposta.

A altura sobre o terreno é corrigida no fator  $S_2$  para uma altura  $z$  através da expressão apresentada na equação 12, desde que  $z$  não ultrapasse o valor definido de  $z_g$  que define o limite superior da camada limite.

$$S_2 = K \cdot f_r \cdot \left(\frac{z}{z_1}\right)^P \quad (\text{equação 12})$$

Onde:

$K$  = parâmetro meteorológico;

$f_r$  = fator de rajada;

$z$  = altura acima do solo para o qual se deseja calcular o fator  $S_2$ ;

$z_1$  = altura de referência, neste caso igual a 10 m;

$P$  = parâmetro meteorológico.

Com a velocidade corrigida, chamada de velocidade característica do vento, é possível calcular a pressão dinâmica do vento usando a equação 13.

$$q = \frac{\rho}{2} \cdot V_k^2 \quad (\text{equação 13})$$

Onde:

$q$  = pressão dinâmica do vento em  $N/m^2$ ;

$\rho$  = massa específica do ar, igual a  $1,225 \text{ kg/m}^3$  a  $15^\circ \text{ C}$  e pressão atmosférica de  $101,3 \text{ kPa}$  no nível do mar;

$V_k$  = velocidade característica do vento em  $m/s$ .

De um modo geral, componentes de força  $F$  podem ser calculadas através da equação 14.

$$F = C_f \cdot q \cdot A_1 \quad (\text{equação 14})$$

Onde:

$F$  = componente de força;

$C_f$  = coeficiente de força, especificado para cada caso;

$A_1$  = área de referência, especificada para cada caso.

Uma norma muito utilizada para o projeto de linhas de transmissão é a IEC 60826 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003). A metodologia de cálculo das forças geradas pelo vento, descrita a seguir, sugere correções na velocidade e na pressão dinâmica do vento. A norma ressalta que não considera ventos localizados de alta intensidade, que podem causar danos consideráveis a linhas de transmissão.

Parte-se de uma velocidade referência de vento  $V_R$ , relacionada ao tempo de retorno desejado e medida a 10m de altura, sobre um período 10 minutos. Normalmente esta velocidade é medida em lugar aberto e plano, com poucos obstáculos isolados, caracterizando um terreno do tipo B (neste caso, a velocidade é denominada como  $V_{RB}$ ). A velocidade de referência  $V_R$  pode ser encontrada corrigindo o valor de  $V_{RB}$  com um fator de rugosidade do terreno  $K_R$ .

A pressão dinâmica de referência é calculada pela equação 15.

$$q_0 = \frac{1}{2} \cdot \tau \cdot \rho_{AR} \cdot V_R^2 \quad (\text{equação 15})$$

$$V_R = K_R \cdot V_{RB} \quad (\text{equação 16})$$

Onde:

$q_0$  = pressão dinâmica de referência do vento em  $N/m^2$ ;

$\tau$  = fator de correção da massa específica do ar;

$\rho_{AR}$  = massa específica de referência do ar, igual a  $1,225 \text{ kg/m}^3$  correspondente a temperatura de  $15^\circ \text{ C}$  e pressão atmosférica de  $101,3 \text{ kPa}$  no nível do mar;

$V_R$  = velocidade de referência do vento em  $m/s$ ;

$K_R$  = coeficiente adimensional de correção da rugosidade do terreno;

$V_{RB}$  = velocidade de referência do vento para um terreno do tipo B.

O valor característico da pressão do vento pode ser calculado, de maneira geral, utilizando a equação 17.

$$q_k = q_0 \cdot C_X \cdot G \quad (\text{equação 17})$$

Onde:

$q_k$  = valor característico da pressão do vento;

$C_X$  = coeficiente que depende da forma e das propriedades da superfície do elemento considerado;

$G$  = fator que considera a influência da altura em relação ao nível do solo do elemento considerado, da rugosidade do terreno, de rajadas de vento e da resposta dinâmica do componente.

A particularização da equação para a solicitação do vento nos cabos transmitida à torre é expressa pela equação 18. A recomendação da norma é que o valor adotado para o coeficiente de arrasto ( $C_{XC}$ ) seja igual a 1,00. Indica-se, porém, que outros valores podem ser adotados se forem provenientes de medições diretas em campo ou de testes em um túnel de vento.

$$A_C = q_0 \cdot C_{XC} \cdot G_C \cdot G_L \cdot d \cdot L \cdot \sin^2 \varphi \quad (\text{equação 18})$$

Onde:

$A_C$  = solicitação transmitida à estrutura;

$C_{XC}$  = coeficiente de arrasto do cabo;

$G_C$  = coeficiente que depende da altura  $z$  e da rugosidade do terreno;

$G_L$  = coeficiente de redução do vão;

$d$  = diâmetro do cabo;

$L$  = vão médio da estrutura;

$\varphi$  = ângulo entre a direção do vento e o condutor.

Devido ao fato de normalmente as medições de velocidades do vento serem realizadas em terrenos planos com poucos obstáculos, definidos como categoria B, neste trabalho foram adotadas estas características de terreno. Para este tipo de terreno, o coeficiente  $G_C$  pode ser calculado através da equação 19, resultando na curva B do gráfico apresentado na figura 11. O coeficiente  $G_L$  pode ser calculado utilizando a equação 20, resultando no gráfico apresentado na figura 12. Como a altura do cabo  $z$  varia com a distância, a norma sugere a possibilidade de utilizar o ponto de fixação dos cabos para o cálculo de  $G_C$ , de maneira a obter um resultado a favor da segurança.

$$G_C = 0,3733 \cdot \ln(z) + 0,9762 \quad (\text{equação 19})$$

$$G_L = 4 \cdot 10^{-10} \cdot L^3 - 5 \cdot 10^{-7} \cdot L^2 - 10^{-4} \cdot L + 1,0403 \quad (\text{equação 20})$$

Onde:

$z$  = altura do condutor.

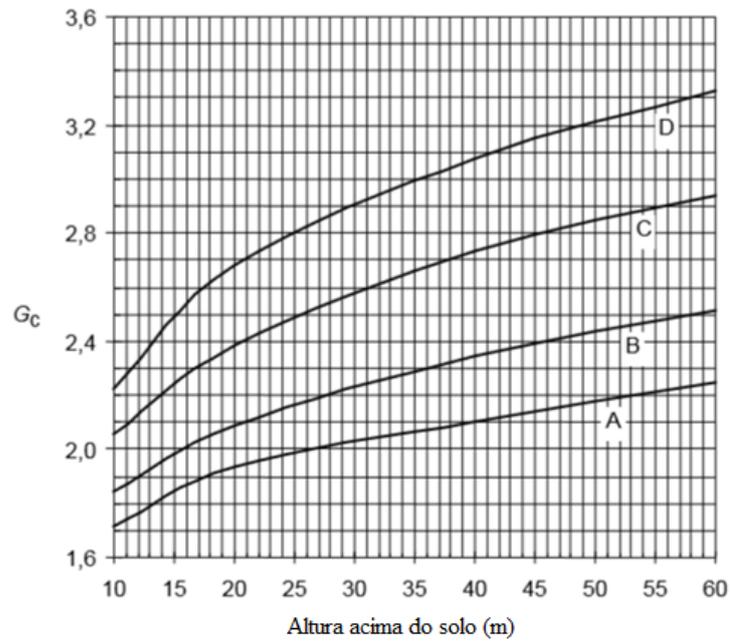


Figura 11: curvas do coeficiente  $G_c$  em função da altura para diferentes categorias de terreno (Adaptado de IEC, 2003)

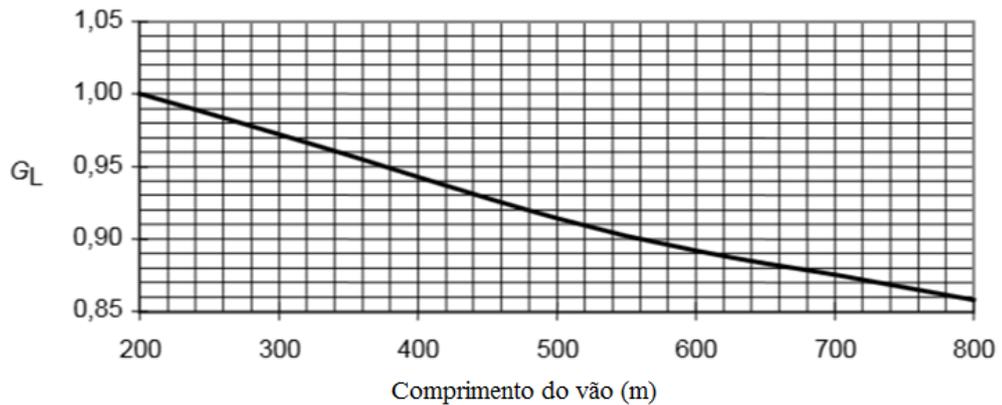


Figura 12: curva do coeficiente  $G_L$  em função do vão médio (Adaptado de IEC, 2003)

## 5 MODELOS EXISTENTES DE EVENTOS TS

Os principais modelos numéricos de tormentas descendentes, incluindo os que serviram de base para o desenvolvimento do modelo adotado, estão descritos neste capítulo.

### 5.1 MODELOS NUMÉRICOS

Inicialmente, nas simulações numéricas de eventos TS, meteorologistas estavam frequentemente interessados no processo completo de fluxos convectivos e não focavam na distribuição de ventos de velocidade elevada próximo ao solo. Entretanto, do ponto de vista da engenharia estrutural, ventos danosos são melhor representados pelo modelo de *wall jet* (figura 13), que consiste em um jato incidindo verticalmente sobre uma superfície e gerando um campo de velocidades horizontais. (CIGRÉ, 2008).

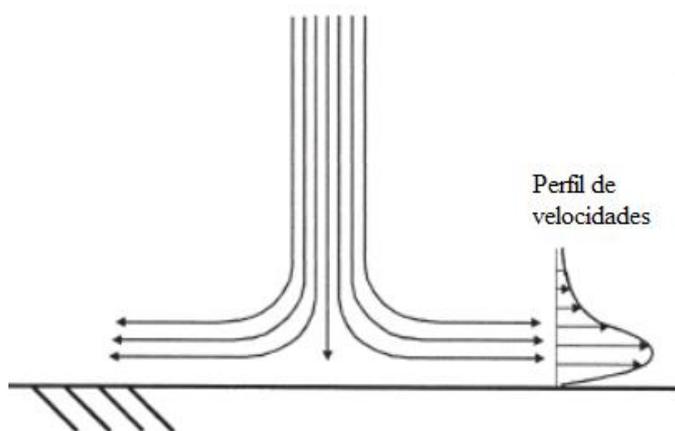


Figura 13: Modelo *wall jet* (Adaptado de Savory et al., 2001)

O modelo que deu origem ao utilizado neste trabalho, desenvolvido por Ponte Jr. (2005), foi baseado nos modelos de Zhu e Etkin (1985), Riera e Rocha (1998) e Holmes e Oliver (2000), descritos a seguir.

## 5.2 MODELO DE ZHU E ETKIN

Com interesse nos efeitos de tormentas elétricas na aviação, Zhu e Etkin (1985 apud PONTE JR., 2005) propuseram um modelo estacionário para determinação do campo de velocidades de um evento TS. O modelo foi denominado de *three-dimensional double-sheet model*, e satisfaz as seguintes condições:

- a) o vetor da velocidade deve ser fornecido em função da posição em um campo tridimensional;
- b) devem ser fornecidos os gradientes de velocidade vertical, horizontal e lateral;
- c) deve ser produzido um campo que simule um fluxo de ar descendente e considere parâmetros como a distribuição de velocidades e a intensidade da tormenta.

As hipóteses a serem respeitadas neste modelo são as seguintes:

- a) o fluxo de ar é considerado incompressível e não viscoso;
- b) efeitos hidrostáticos, de temperatura e de resfriamento devido à evaporação não são considerados;
- c) o fluxo não é rotacional;
- d) o fluxo é descendente a uma altura  $z = H_S$  do solo.

O fluxo descendente sobre a superfície  $S$ , perpendicular ao eixo  $z$ , a partir de uma altura  $H_S$  possui intensidade por unidade de área  $\sigma(\xi, \eta)$  e gera em um ponto  $P(x, y, z)$  sobre a superfície  $S$  as componentes de velocidade  $x$ ,  $y$  e  $z$  descritas através das equações 21 a 25.

$$\sigma(\xi, \eta) = \sigma_S \cdot \left[ 1 - \sin \left( \frac{\pi \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}}{D_S} \right) \right] \quad (\text{equação 21})$$

$$V_x = -\frac{3}{4 \cdot \pi} \cdot \iint_S \sigma(\xi, \eta) \cdot \frac{(z - H_S) \cdot (x - \xi)}{r_d^5} d\xi d\eta \quad (\text{equação 22})$$

$$V_y = -\frac{3}{4 \cdot \pi} \cdot \iint_S \sigma(\xi, \eta) \cdot \frac{(z - H_S) \cdot (y - \eta)}{r_d^5} d\xi d\eta \quad (\text{equação 23})$$

$$V_z = -\frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \iint_S \sigma(\xi, \eta) \cdot \frac{3 \cdot (z - H_S)^2 - r_d^2}{r_d^5} d\xi d\eta \quad (\text{equação 24})$$

$$r_d^2 = (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - H_S)^2 \quad (\text{equação 25})$$

Onde:

$\sigma(\xi, \eta)$  = função de distribuição da intensidade da TS;

$\xi$  = coordenada de uma superfície diferencial de origem da TS;

$\eta$  = coordenada de uma superfície diferencial de origem da TS;

$\sigma_S$  = intensidade característica da TS;

$D_S$  = diâmetro da origem da TS;

$V_x$  = componente do campo de velocidade na direção x;

$V_y$  = componente do campo de velocidade na direção y;

$V_z$  = componente do campo de velocidade na direção z;

$H_S$  = altura do solo à superfície de origem da TS;

$r_d$  = comprimento de escala radial.

Após várias simulações, foram geradas curvas para as velocidades nas direções x, y e z. O modelo foi considerado como satisfatório.

### 5.3 MODELO DE RIERA E ROCHA

Baseado no modelo de Zhu e Etkin (1985), Riera e Rocha (1998) propuseram um modelo que permite simular as velocidades horizontais de eventos TS, com ou sem a presença de um vento de fundo, visando aplicações na engenharia estrutural.

O modelo sugere que, devido aos registros de velocidade de vento serem compostos por uma combinação de diferentes eventos, a sua distribuição de probabilidade poderia ser representada pela soma das distribuições dos eventos isolados. No modelo proposto, os eventos seriam tormentas EPS e TS.

As premissas básicas sobre eventos TS nas quais o modelo se baseia são:

- a) ventos originados em eventos TS têm propriedades estatísticas particulares;
- b) o modelo se restringe a representar apenas algumas características de ventos originados em eventos TS, como a velocidade e a direção;
- c) a TS é um fenômeno meteorológico localizado e se desenvolve a partir de uma nuvem *cumulonimbus*, com diâmetro e altura de, aproximadamente, 5000 m e 10000 m, respectivamente;
- d) ar quente e úmido se desloca verticalmente a partir da superfície até a nuvem se tornar saturada em água e gelo;
- e) a partir da saturação da nuvem, um fluxo de ar descendente ocorre, chamado de *downburst*;
- f) próximo ao solo, o jato de ar se curva, se espalhando radialmente;
- g) a TS se desloca horizontalmente devido a um vento de fundo (ou vento de traslado);
- h) o movimento da TS gera uma área de ação de forma alongada, que depende da velocidade do vento de traslado (que varia de 5 m/s a 15 m/s) e da duração do evento (que varia de 3 a 30 minutos);
- i) a intensidade e a frequência da ocorrência de TS são características locais.

A partir destas premissas, é definida uma região de controle em um plano Cartesiano. Os autores sugerem que o modelo de Zhu e Etkin (1985) pode ser simplificado para ser aplicado na engenharia estrutural. Inicialmente, considera-se a propriedade axissimétrica do campo de velocidades. Posteriormente, relaciona-se a equação à distribuição de Rayleigh, conforme pode ser observado na equação 27. A comparação com as curvas apresentadas por Zhu e Etkin está na figura 14.

$$\frac{|\bar{V}_W|D_S}{\sigma_S} = \frac{\rho/D_S}{\chi^2 \cdot \psi} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\rho/D_S}{\chi} \right)^2 \right] \quad (\text{equação 26})$$

Onde:

$\bar{V}_W$  = campo de velocidades considerando as direções x e y;

$D_S$  = diâmetro da origem da tempestade;

$\sigma_S$  = intensidade característica da tempestade;

$\chi$  = parâmetro relacionado a  $D_S/H_S$  pela aproximação  $1/\chi = 2,27\sqrt{D_S/H_S} - 0,36$ ;

$\psi$  = parâmetro relacionado a  $D_S/H_S$  pela aproximação  $1/\psi = 0,0026\sqrt{D_S/H_S} - 0,02$ .

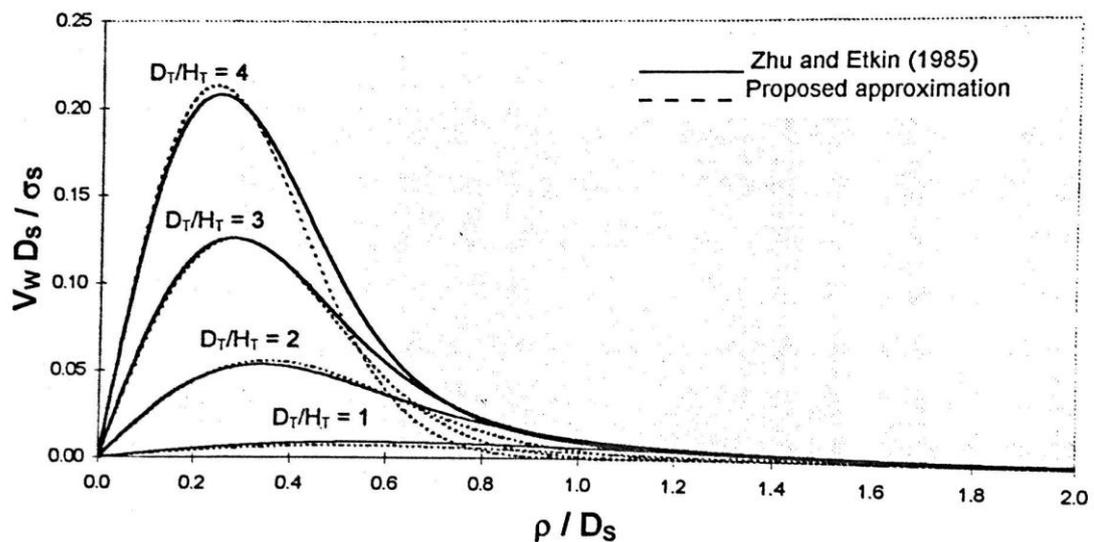


Figura 14: comparação ds variação da velocidade com a distância (RIERA E ROCHA, 1998)

Foram realizadas simulações suficientes para definir um histograma de velocidades que, ao comparado com dados existentes, comprovou a consistência do modelo.

## 5.4 MODELO DE HOLMES E OLIVER

Holmes e Oliver (2000) propuseram um modelo empírico para a determinação da direção e da velocidade horizontal do vento devido a uma TS combinada com um vento de traslado. O desenvolvimento do trabalho foi motivado visando reproduzir dados registrados por anemômetros e desenvolver um modelo de carregamento devido ao vento gerado por eventos TS.

A figura 15 representa a evolução da velocidade radial em relação à distância. Os autores definem como região de estagnação a região na qual a velocidade radial evolui, quase que linearmente, até atingir seu valor máximo, conforme equação 27. Fora desta região, a velocidade radial em uma altura fixa pode ser descrita pela equação 28.

$$V_r = V_{r,\max} \cdot (r/r_{\max}), \text{ para } r < r_{\max} \quad (\text{equação 27})$$

$$V_r = V_{r,\max} \cdot e^{-[(r-r_{\max})/R]^2}, \text{ para } r \geq r_{\max} \quad (\text{equação 28})$$

Onde:

$V_r$  = velocidade radial do ponto de interesse;

$V_{r,\max}$  = velocidade radial máxima;

$r$  = distância do centro da tempestade ao ponto de interesse;

$r_{\max}$  = distância do centro da tempestade à posição na qual ocorre  $V_{r,\max}$ ;

$r_d$  = comprimento de escala radial.

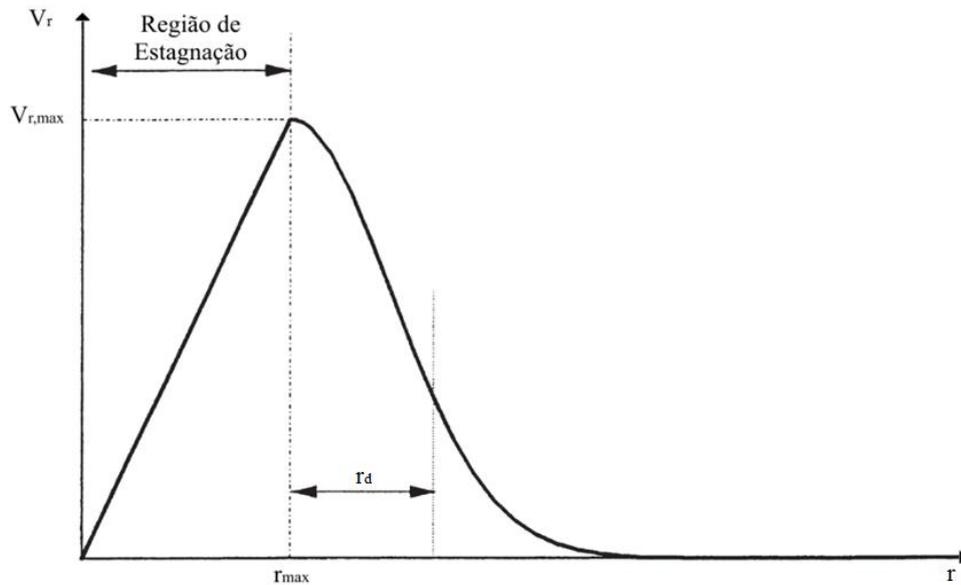


Figura 15: evolução da velocidade com a distância (adaptado de Holmes e Oliver, 2000)

Em relação ao tempo, o modelo considera que o evento possui duração  $T$  e a velocidade radial decai exponencialmente ao longo do tempo, conforme equações 29 e 30.

$$V_r = V_{r,max} \cdot e^{-t/T_f} \cdot (r/r_{max}), \text{ para } r < r_{max} \quad (\text{equação 29})$$

$$V_r = V_{r,max} \cdot e^{-t/T_f} \cdot e^{-[(r-r_{max})/r_d]^2}, \text{ para } r \geq r_{max} \quad (\text{equação 30})$$

Onde:

$t$  = tempo;

$T_f$  = duração do evento TS.

Conforme o modelo, a velocidade radial e a direção do vento resultante da combinação de um evento TS com um vento de traslado podem ser obtidas através da soma vetorial das duas

grandezas. Para validar o modelo, simulou-se um evento registrado pela base da Força Aérea Andrews, nos Estados Unidos, e descrito por Fujita (1985). A medição da velocidade de vento (módulo e direção) ao longo do tempo está apresentada na figura 16 e o resultado simulado pelo modelo na figura 17.

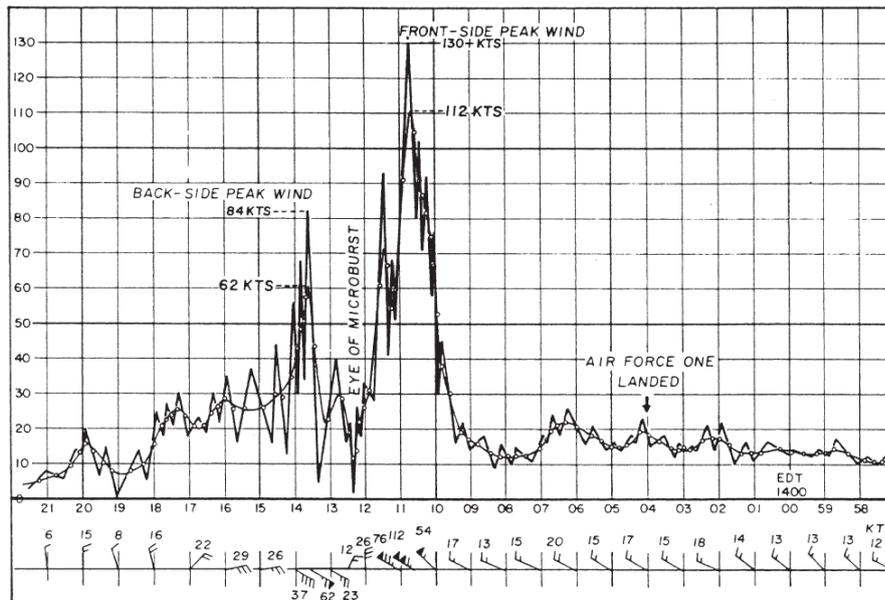


Figura 16: medição do evento analisado (HOLMES E OLIVER, 2000)

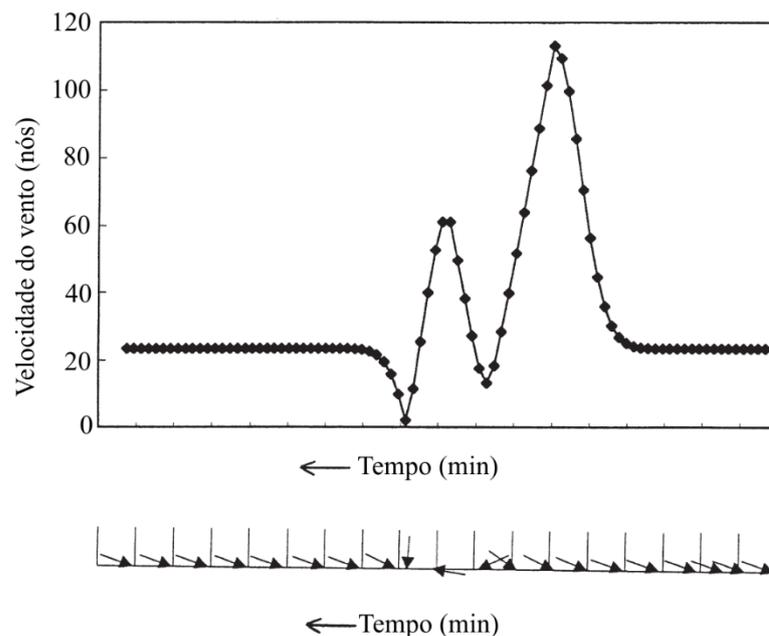


Figura 17: resultado da simulação do evento analisado (adaptado de Holmes e Oliver, 2000)

## 5.5 MODELO DE OSV

Oseguera e Bowles (1988) e depois Vicroy (1991) descreveram um modelo analítico para ventos não turbulentos de uma *downburst* estacionária. É um modelo independente do tempo e não considera ventos de traslado. As velocidades radial e vertical são descritas pelas equações 31 e 32, respectivamente.

$$\bar{U}_r(r, z) = \frac{\lambda \cdot r}{2} [e^{c_1(z/z_m)} - e^{c_2(z/z_m)}] e^{\left[ \frac{2 - (r^2/r_p^2)^{c_3}}{2 \cdot c_3} \right]} \quad (\text{equação 31})$$

$$\bar{U}_z(r, z) = -\lambda \left\{ \frac{z_m}{c_1} [e^{c_1(z/z_m)} - 1] - \frac{z_m}{c_2} [e^{c_2(z/z_m)} - 1] \right\} \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{r^2}{r_p^2} \right)^{c_3} \right] e^{\left[ \frac{2 - (r^2/r_p^2)^{c_3}}{2 \cdot c_3} \right]} \quad (\text{equação 32})$$

Onde:

$\bar{U}_r$  = velocidade radial;

$\bar{U}_z$  = velocidade vertical;

$r$  = distância do centro da tormenta ao ponto analisado;

$z$  = altura do ponto;

$\lambda$  = fator de intensidade de escala;

$c_1$  = constante do modelo, sugerida como -0,22 (VICROY,1991) ou -0,15 (VICROY,1992);

$c_2$  = constante do modelo, sugerida como -2,75 (VICROY,1991) ou -3,2175 (VICROY,1992);

$z_m$  = elevação na qual ocorre a velocidade máxima do vento;

$r_p$  = raio no qual ocorre a velocidade máxima do vento;

$c_3$  = constante do modelo, sugerida como 2 (VICROY,1991).

Apesar do modelo não contemplar o vórtice formado, conforme Wilson et al. (1984), este anel tende a se formar a centenas de metros de altitude, o que não influencia a análise aplicada em LT de maneira relevante.

## 5.6 MODELO DE CHAY, ALBERMANI E WILSON

Chay et al. (2006) propuseram um modelo para a determinação da direção e da velocidade horizontal do vento devido a uma TS combinada com um vento de traslado que considerasse uma componente flutuante na velocidade do vento. Inicialmente, 30 cenários de *downburst* (com diferentes diâmetros e velocidades) foram modelados usando fluidodinâmica computacional (CFD), com a intenção de gerar um modelo estacionário, para, posteriormente, acrescentar empiricamente as variações no tempo.

Baseados no modelo descrito no item 5.5, foram propostas melhorias, descritas a seguir:

- a) o fator  $\lambda$  determina a intensidade do campo de velocidade do vento gerado e precisa ser recalculado, conforme proposto na equação 33, ao alterar os valores de  $r_p$  ou de  $z_m$  para que a velocidade máxima do escoamento seja mantida;
- b) para considerar o crescimento da camada limite conforme o ponto de interesse se afasta do centro da tormenta,  $z_m$  foi substituído por  $z_r$ , que é função de  $z_m$  e de  $r$  (não foi apresentada uma relação entre  $z_r$  e  $r$  devido a falta de dados).

$$\lambda = \frac{2 \cdot \bar{U}_{r,\max}}{r_p} \left[ \frac{1}{e^{\frac{1}{2 \cdot c_3}} (e^{c_1} - e^{c_2})} \right] \quad (\text{equação 33})$$

Onde:

$\bar{U}_{r,\max}$  = velocidade radial máxima desejada.

Chay et al. (2006) descrevem quatro etapas de uma tempestade combinada com um vento de traslado que passa por um ponto fixo (figura 18). Inicialmente (instante a), os ventos percebidos no ponto fixo são de pequena intensidade, pois ele se encontra fora do alcance do escoamento da tempestade. O instante b representa um rápido aumento na velocidade de vento detectada, pela combinação dos ventos de traslado e da tempestade possuírem o mesmo sentido. No instante c há um decréscimo nas velocidades de vento, conforme o ponto fixo se encontra na região de estagnação da tempestade. E no instante d, há uma inversão no sentido do vento proveniente da tempestade, conforme ela se afasta do ponto de interesse, até que a velocidade do vento retorne aos valores apresentados antes da interferência da tempestade. A figura 19 representa estes distintos instantes em um registro de anemômetro da Base da Força Aérea Andrews de 1983, publicado por Fujita (1985).

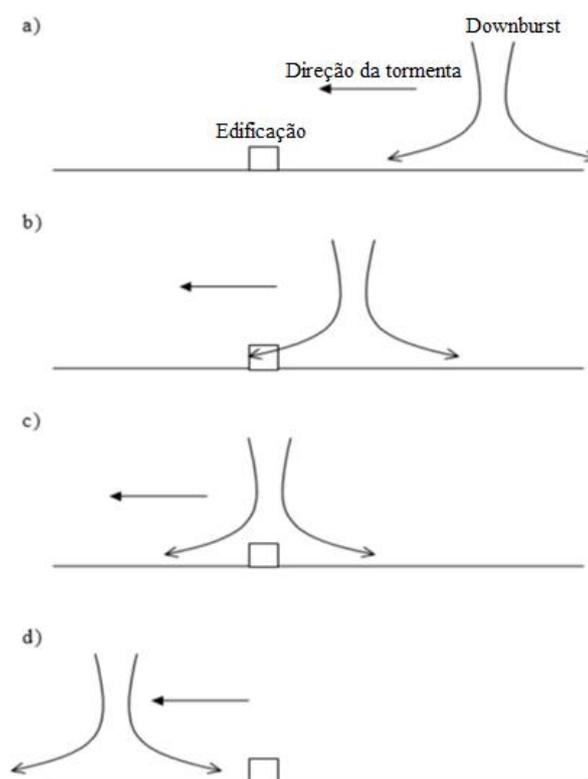


Figura 18: etapas de uma tempestade elétrica combinada com um vento de traslado  
(Adaptado de Chay et al., 2006)

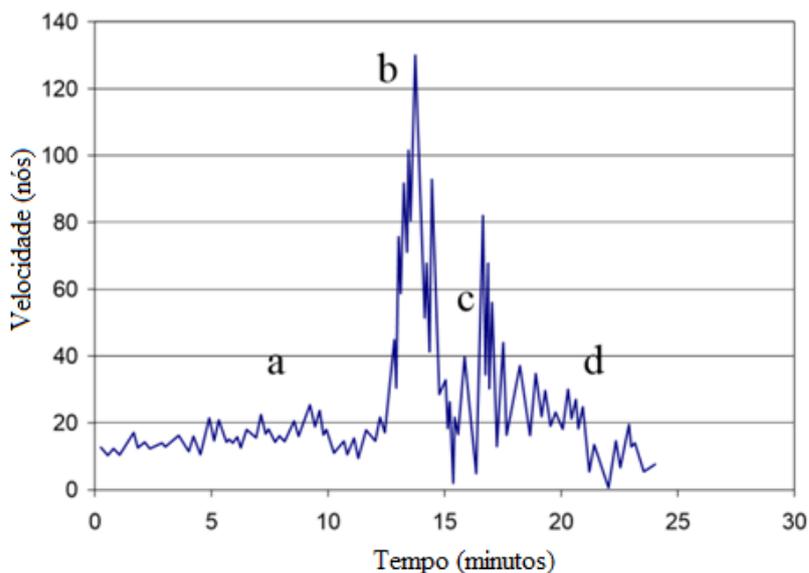


Figura 19: etapas de uma tormenta elétrica combinada com um vento de traslado em uma medição (CHAY et al., 2006)

O modelo de combinação de vento de traslado proposto por Holmes e Oliver (2000) e o modelo de consideração da dependência do tempo apresentados nas equações 29 e 30, foram incorporados ao modelo. A componente de velocidade radial e vertical foi multiplicada por um fator de intensidade dependente do tempo (equações 34 e 35). Considerou-se um aumento linear da velocidade do vento nos primeiros 5 minutos da tormenta, seguido de um decaimento exponencial.

$$\Pi = t/5, \text{ para } t \leq 5 \quad (\text{equação 34})$$

$$\Pi = e^{\frac{-(t-5)}{11,542}}, \text{ para } t > 5 \quad (\text{equação 35})$$

Onde:

$\Pi$  = fator de intensidade;

t = tempo.

Com as alterações propostas, o modelo respeita as equações 36 e 37, para velocidade radial e vertical, respectivamente.

$$\bar{U}_r(x, y, z, t) = \Pi \frac{\bar{U}_{r,\max} \cdot r}{r_t} \frac{[e^{c_1(z/z_r)} - e^{c_2(z/z_r)}]}{(e^{c_1} - e^{c_2})} e^{\left[ \frac{1-(r^2/r_t^2)^{c_3}}{2 \cdot c_3} \right]} + \bar{U}_{\text{Trans}} \quad (\text{equação 36})$$

$$\bar{U}_z(x, y, z, t) = -2\Pi \frac{\bar{U}_{r,\max} \cdot z_m}{r_t} \frac{\left\{ \frac{1}{c_1} [e^{c_1(z/z_r)} - 1] - \frac{1}{c_2} [e^{c_2(z/z_r)} - 1] \right\}}{(e^{c_1} - e^{c_2})} \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{r^2}{r_t^2} \right)^{c_3} \right] e^{\left[ \frac{1-(r^2/r_t^2)^{c_3}}{2 \cdot c_3} \right]} \quad (\text{equação 37})$$

Onde:

$r_t$  = raio onde a maior velocidade de escoamento ocorre, dependente do tempo e de  $r_p$ ;

$z_r$  = altura da velocidade de vento máxima em função do raio;

$\bar{U}_{\text{Trans}}$  = velocidade do vento de traslado.

O modelo foi utilizado para reproduzir o registro de anemômetro da Base da Força Aérea Andrews. A comparação pode ser visualizada na figura 20.

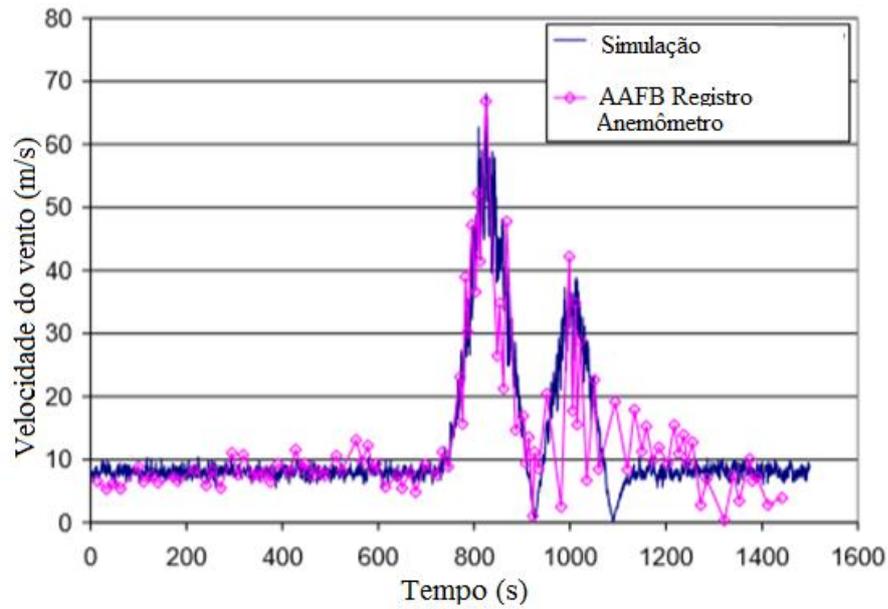


Figura 20: comparação entre valores medidos e simulados (adaptado de Chay et al., 2006)

O modelo foi aprimorado por Chay et al. (2006), para alterar o perfil vertical de velocidades radiais, de maneira a concordar com o perfil proposto por Wood et al (2001), resultando na equação 38. A equação da velocidade axial permaneceu a mesma (equação 37).

$$\bar{U}_r = 1,55 \cdot \bar{U}_{r,\max} \left( \frac{z}{5 \cdot z_r} \right)^{1/6} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( 0,70 \frac{z}{5 \cdot z_r} \right) \right] \frac{r}{r_t} e^{\left[ \frac{1 - (r^2/r_t^2)^{c_3}}{2 \cdot c_3} \right]} + \bar{U}_{\text{Trans}} \quad (\text{equação 38})$$

Onde:

erf = função erro.

## 6 MODELO ADOTADO

O modelo numérico utilizado neste trabalho é baseado no modelo proposto por Ponte Jr. (2005) e aprimorado por Ponte Jr. e Riera (2010) e Fadel Miguel e Riera (2013), descrito abaixo. As alterações realizadas neste trabalho consistem em:

- a) alteração da curva da pressão atmosférica do ar;
- b) limitação da área de ação da TS;
- c) limitação vertical da ação da TS;
- d) efeito de expansão da TS, que faz com os efeitos da tormenta cheguem em instantes diferentes em pontos distintos do espaço;
- e) modelo de desenvolvimento de camada limite para o escoamento horizontal da TS;
- f) distribuição probabilística da altura da bigorna da nuvem *cumulonimbus*;
- g) modelo probabilístico para o raio do escoamento descendente na base da nuvem.

### 6.1 PREMISSAS DO MODELO

Inicialmente define-se que uma região está sob atmosfera em condições estáveis. As variáveis meteorológicas desta atmosfera estável são alteradas devido a mudanças nas condições climáticas, resultando na formação de uma nuvem *cumulonimbus* (representada na figura 21), seguindo as premissas apresentadas a seguir:

- a) a base da nuvem encontra-se a uma altura  $h$  em relação ao solo, definida como  $h = 0,1 \cdot H_c$ ;
- b)  $H_c$  é a altura do solo ao centro da bigorna;
- c) a base da nuvem é circular, de raio  $R_0$ ;
- d) existe uma queda de pressão em relação à atmosfera estável ao longo da altura  $H_c$ , suficiente para desencadear um escoamento descendente de ar.

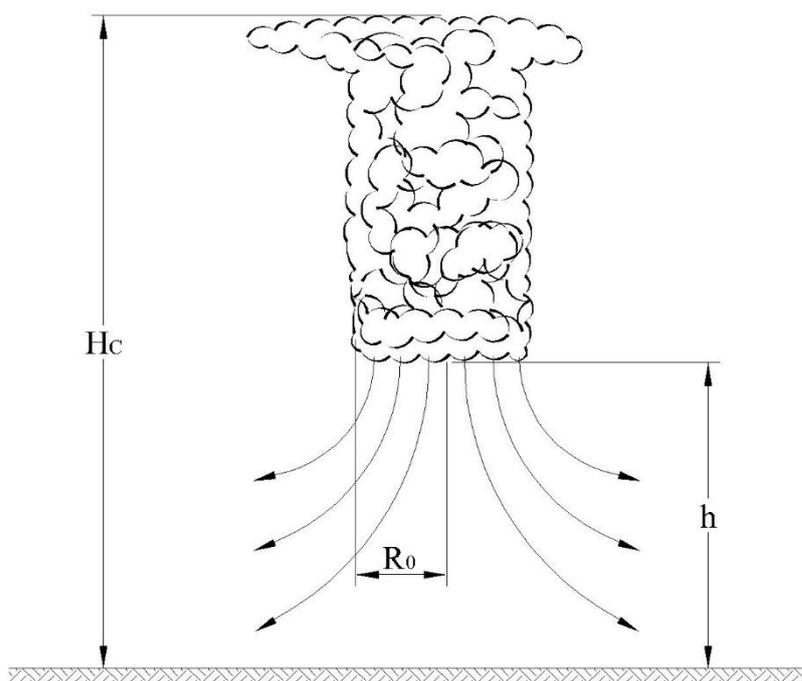


Figura 21: esquema da tempestade elétrica

Definindo que o ar é um fluido não viscoso e que escoar em caráter permanente ao longo de linhas de corrente, aplica-se, então, a equação de Bernoulli apresentada abaixo (equação 39):

$$-B - \frac{dp}{\rho} = V \cdot dV \quad (\text{equação 39})$$

Onde:

B = forças de campo;

p = pressão;

$\rho$  = massa específica do fluido;

V = velocidade de escoamento.

Considera-se que a queda de pressão entre a atmosfera estável e a instável é a única força motriz do escoamento, o que possibilita desconsiderar os efeitos das forças de campo. Integrando a equação 39, obtém-se a equação 40.

$$V_t = \sqrt{2 \int \frac{dp}{\rho}} \quad (\text{equação 40})$$

Onde:

$V_t$  = velocidade do fluido ao longo de uma linha de corrente.

## 6.2 QUEDA DE PRESSÃO

Como definido anteriormente, a alteração na pressão atmosférica ao longo da linha de corrente considerada na equação de Bernoulli corresponde à queda de pressão em relação a atmosfera estável. Admitindo que a queda de pressão possui valor  $\Delta p_0$  no nível do solo e é nula na altitude  $H_c$ , define-se que a variação entre os dois pontos é linear, resultando na equação 41.

$$\Delta p(z) = \Delta p_0 \cdot \left(1 - \frac{z}{H_c}\right) \quad (\text{equação 41})$$

Onde:

$\Delta p(z)$  = queda de pressão atmosférica na altura  $z$ ;

$\Delta p_0$  = queda de pressão atmosférica no nível do mar.

## 6.3 MASSA ESPECÍFICA DO AR

Na definição da variação da massa específica do ar na atmosfera para aplicação na equação 40, as seguintes hipóteses são adotadas:

- a) na região simulada, a troposfera se estende até 10km de altitude;
- b) o gradiente de temperatura da atmosfera é de 10°C/km, que representa uma atmosfera incondicionalmente instável;

- c) a temperatura no nível do mar é de 20°C;  
 d) a queda de pressão não altera a massa específica do ar de maneira significativa.

Utilizando estes parâmetros, a equação de estado para gases ideais, abordado no capítulo 3.2, é possível calcular a variação da massa específica do ar. Esta variação é apresentada de forma adimensional em relação à massa específica no nível do mar ( $\rho_0$ ). A tabela 1 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 1: cálculo da massa específica relativa

Altitude z (m)	T (°C)	p (Pa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho/\rho_0$
0	20,0	101325	1,20	1,00
1000	10,0	90060	1,11	0,92
2000	0,0	79832	1,02	0,85
3000	-10,0	70565	0,93	0,78
4000	-20,0	62189	0,86	0,71
5000	-30,0	54637	0,78	0,65
6000	-40,0	47845	0,72	0,59
7000	-50,0	41754	0,65	0,54
8000	-60,0	36307	0,59	0,49
9000	-70,0	31449	0,54	0,45
10000	-80,0	27132	0,49	0,41
11000	-80,0	22732	0,41	0,34
12000	-80,0	19933	0,36	0,30
13000	-80,0	16964	0,31	0,25

Baseado nos dados anteriores ajustou-se a equação 42.

$$\rho(z) = \rho_0 \cdot e^{-\zeta z} \quad (\text{equação 42})$$

Onde:

$\rho$  = massa específica do ar;

$\rho_0$  = massa específica do ar de referência, neste caso no nível do mar,  $\rho(z = 0)$ ;

$\zeta$  = coeficiente de ajuste da equação, neste caso,  $\zeta = 0,000095 \text{ m}^{-1}$ ;

$z$  = altitude.

Verifica-se o ajuste da equação 42 na figura 22 e na tabela 2.

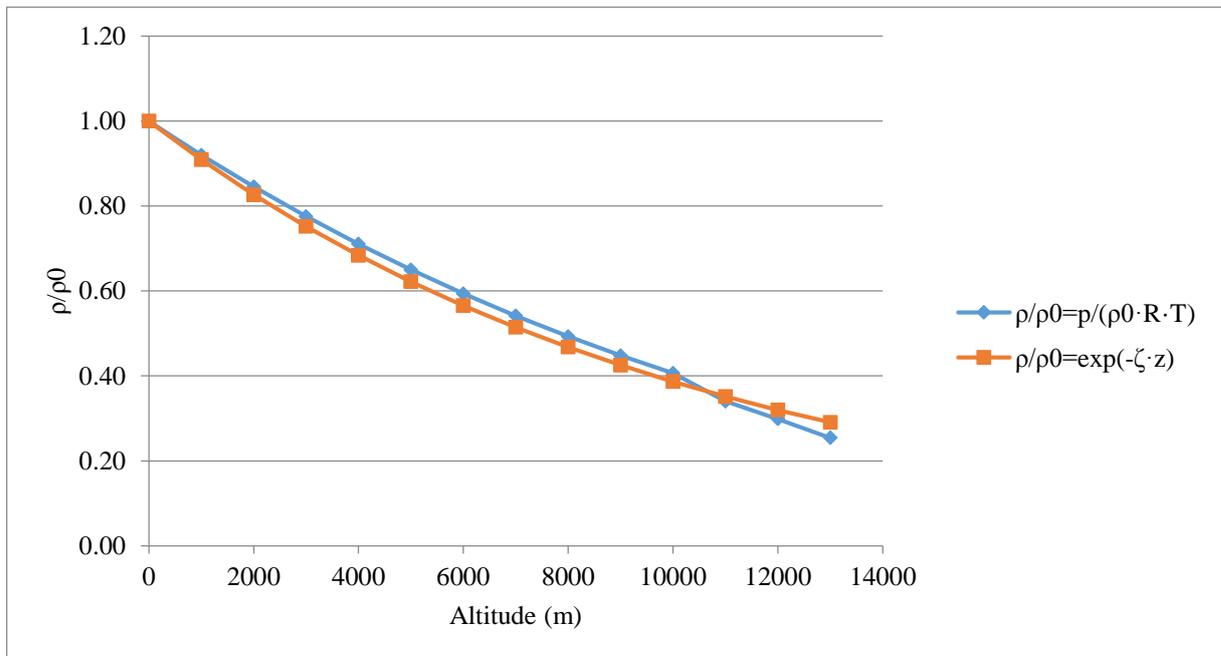


Figura 22: comparação dos dados da Tabela 1 com a (equação 42).

Tabela 2: erro absoluto da equação proposta em relação ao valor calculado.

Altitude (m)	$\frac{p}{\rho_0 \cdot R \cdot T}$	$e^{-\zeta z}$	Erro
0	1,00	1,00	0,00%
1000	0,92	0,91	1,19%
2000	0,85	0,83	2,25%
3000	0,78	0,75	3,17%
4000	0,71	0,68	3,94%
5000	0,65	0,62	4,55%
6000	0,59	0,57	5,00%
7000	0,54	0,51	5,28%
8000	0,49	0,47	5,40%
9000	0,45	0,43	5,34%
10000	0,41	0,39	5,11%
11000	0,34	0,35	3,16%
12000	0,30	0,32	6,62%
13000	0,25	0,29	12,60%

## 6.4 CÁLCULO DA VELOCIDADE TANGENCIAL

A partir da equação 40, adotando a equação 41 para a queda de pressão e a equação 42 para a massa específica do ar, é possível expressar a velocidade do fluxo de ar descendente com a equação 43.

$$V_t = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_0}{H_c \cdot \rho_0 \cdot \zeta} \cdot (e^{\zeta \cdot H_c} - e^{\zeta \cdot z})} \quad (\text{equação 43})$$

Onde:

$V_t$  = velocidade tangencial em uma linha de corrente para a altura  $z$ ;

$H_c$  = altura do solo ao centro da bigorna;

$\rho_0$  = massa específica do ar no nível do mar;

$\zeta$  = coeficiente de ajuste da equação, neste caso,  $\zeta = 0,000095 \text{ m}^{-1}$ ;

$\Delta p_0$  = diferença da queda de pressão entre uma altura  $H_c$  e o nível do solo.

Tormentas elétricas são eventos de curta duração, portanto é válido considerar a variação da velocidade em função do tempo. Ponte Jr. (2005) segue o mesmo raciocínio de Holmes e Oliver (2000) para esta consideração, apresentado nas equações 44 e 45.

$$V(t) = 1,58 \cdot V_t \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right)\right], \text{ para } t \leq T \quad (\text{equação 44})$$

$$V(t) = 1,58 \cdot V_t \cdot \exp\left(-\frac{t-T}{T}\right), \text{ para } t > T \quad (\text{equação 45})$$

Onde:

$T$  = duração característica da tormenta.

O parâmetro  $T$  representa o tempo que uma partícula leva para percorrer a distância  $D_n + H_c$ , onde  $D_n$  é o diâmetro da bigorna e  $H_c$  é altura do solo ao centro da bigorna. O termo 1,58 ajusta as equações para respeitarem a condição de contorno de que em  $t = T$ ,  $V(t) = V_t$ . A figura 23 mostra o desenvolvimento da velocidade em função do tempo.

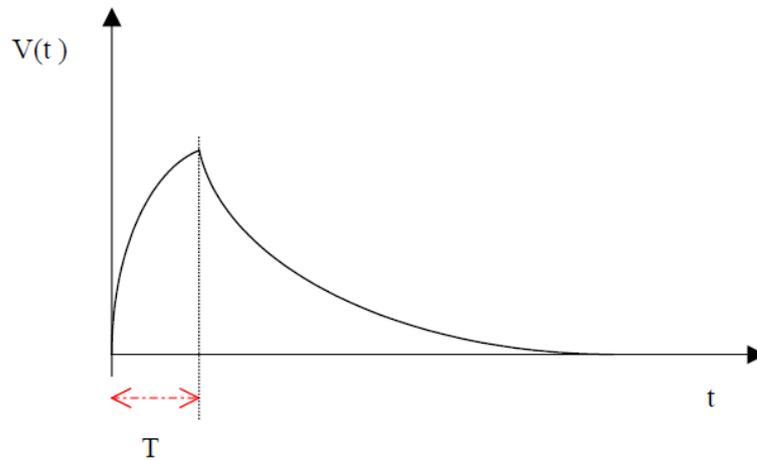


Figura 23: velocidade tangencial de uma tormenta elétrica em função do tempo (PONTE JR., 2005)

## 6.5 DECOMPOSIÇÃO DA VELOCIDADE TANGENCIAL

O modelo de Ponte Jr. (2005) propõe que as linhas de corrente da tormenta podem ser descritas por hipérbolas, que se desenvolvem de forma axissimétrica em relação ao eixo central da nuvem. A equação 46 descreve, genericamente, as linhas de corrente adotadas neste trabalho.

$$z(r) = \frac{k}{r^a} \quad (\text{equação 46})$$

Onde:

$a, k =$  constantes;

$r =$  distância do eixo central da tormenta a um ponto de referência.

A particularização da equação 46 para uma linha de corrente que passa por um ponto qualquer, definido como  $(r_h, z_h)$ , pode ser representada pela equação 47. A figura 24 representa graficamente esta linha de corrente e as componentes radial ( $V_r$ ) e axial ( $V_a$ ), referente ao eixo  $z$ , da velocidade tangencial ( $V_t$ ), apresentadas pelas equações 48 e 49, respectivamente.

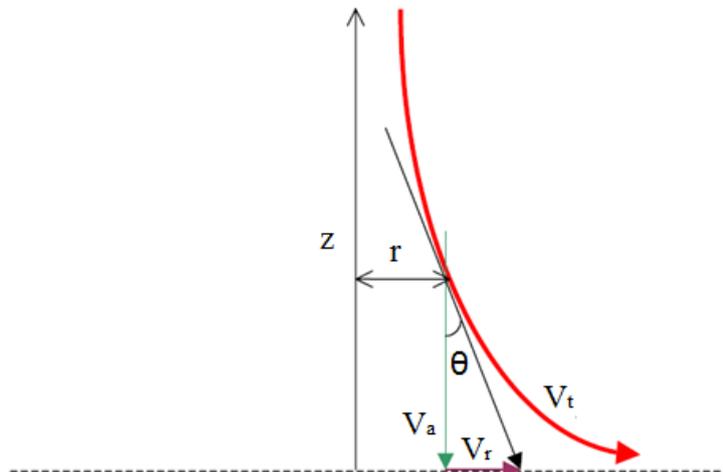


Figura 24: linha de corrente genérica (PONTE JR., 2005)

$$z(r) = \frac{z_h \cdot r_h^{1,2}}{r^{1,2}} \quad (\text{equação 47})$$

$$V_r = V_t \cdot \text{sen}(\theta) \quad (\text{equação 48})$$

$$V_a = V_t \cdot \text{cos}(\theta) \quad (\text{equação 49})$$

Onde:

$z_h$  = altura do ponto conhecido da linha de corrente;

$r_h$  = distância do centro da tormenta ao ponto conhecido;

$r$  = distância do eixo central da tormenta a um ponto de referência;

$V_r$  = velocidade radial em uma linha de corrente;

$\theta$  = ângulo que a linha de corrente faz com o eixo vertical  $z$ ;

$V_a$  = velocidade axial em uma linha de corrente.

Os termos  $\text{sen}(\theta)$  e  $\text{cos}(\theta)$  podem ser descritos em função da derivada da altitude da linha de corrente  $z(r)$  (equação 52), como exposto nas equações 50 e 51, respectivamente.

$$\text{sen}(\theta) = \frac{1}{\sqrt{1 + (z'(r))^2}} \quad (\text{equação 50})$$

$$\text{cos}(\theta) = \frac{(z'(r))^2}{\sqrt{1 + (z'(r))^2}} \quad (\text{equação 51})$$

$$z'(r) = -\frac{1,2 \cdot r_h^{1,2} \cdot z_h}{r^{2,2}} \quad (\text{equação 52})$$

Onde:

$z'(r)$  = derivada de  $z(r)$  em relação a distância  $r$ .

Após a determinação das velocidades radial e axial, definem-se as componentes Cartesianas da velocidade, conforme a figura 25. Ao longo das linhas de corrente, as velocidades nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  são dadas pelas equações 53, 54 e 55, respectivamente.

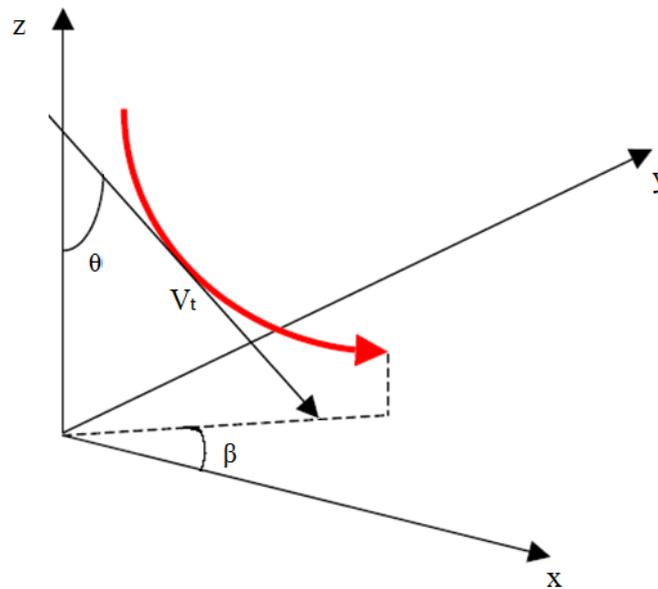


Figura 25: eixos coordenados e ângulos (PONTE JR., 2005)

$$V_x = V_t \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \text{cos}(\beta) = V_r \cdot \text{cos}(\beta) \quad (\text{equação 53})$$

$$V_y = V_t \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \text{sen}(\beta) = V_r \cdot \text{sen}(\beta) \quad (\text{equação 54})$$

$$V_z = V_t \cdot \text{cos}(\theta) = V_a \quad (\text{equação 55})$$

Onde:

$V_x$  = velocidade na direção do eixo x;

$V_y$  = velocidade na direção do eixo y;

$V_z$  = velocidade na direção do eixo z;

$\beta$  = ângulo da projeção da linha de corrente no plano xy em relação ao eixo x.

## 6.6 VENTO DE TRASLADO

Além do vento gerado pela tormenta TS, o modelo considera um vento de fundo agindo horizontalmente. Este vento pode ser decomposto em componentes Cartesianas, conforme as equações 56 e 57.

$$V_{ox} = V_o \cdot \cos(\gamma) \quad (\text{equação 56})$$

$$V_{oy} = V_o \cdot \sin(\gamma) \quad (\text{equação 57})$$

Onde:

$V_{ox}$  = velocidade do vento de fundo na direção do eixo x;

$V_{oy}$  = velocidade do vento de fundo na direção do eixo y.

$V_o$  = velocidade do vento de fundo;

$\gamma$  = ângulo entre a direção do vento de fundo  $V_o$  e o eixo x.

Com estes dados, é possível calcular a combinação da TS com o vento de traslado, através da soma das velocidades calculadas.

## 6.7 ÁREA DE AÇÃO DA TS

Como TS são eventos localizados, é necessário limitar a região afetada. Considera-se, inicialmente, a TS isolada (sem a presença de vento de traslado). Desta maneira, a região afetada pelo evento é circular, de raio  $R_{max}$ .

O modelo proposto para definir a área de ação da TS baseia-se na simplificação do evento em três estágios. O primeiro estágio consiste em um cilindro de altura  $H_c$  e raio  $R_0$  (figura 26a). O

segundo estágio representa a expansão da tormenta, em um cilindro concêntrico, de altura  $b$  (altura média de ação dos ventos da TS, definida como 100m) e raio  $R$  (figura 26b). No terceiro estágio o volume do cilindro de expansão atinge o valor do volume do cilindro inicial, se transformando em um cilindro de altura  $b$  e raio  $R_{\max}$  (figura 26c). Nesta simplificação o ar é considerado como um fluido incompressível. Igualando volumes define-se a equação 58, de onde  $R_{\max}$  pode ser expresso na equação 59.

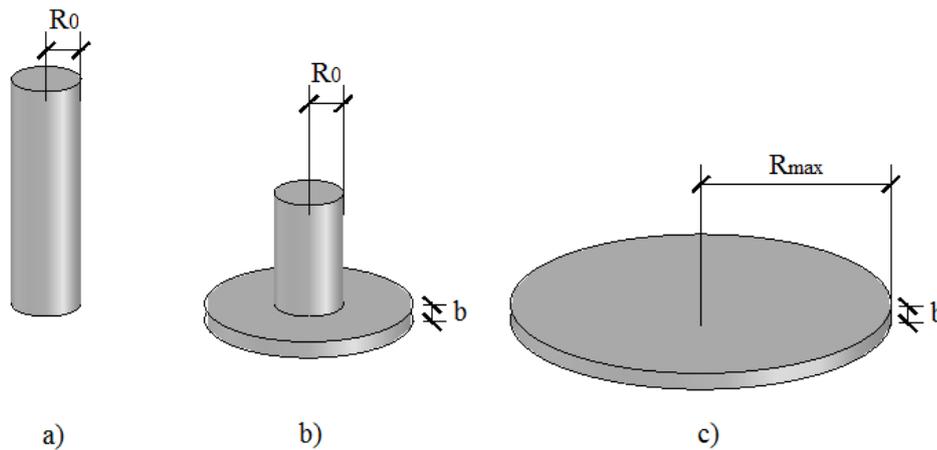


Figura 26: modelo proposto para definição da área de ação da TS

$$\pi \cdot R_0^2 \cdot H_c = \pi \cdot R_{\max}^2 \cdot b \quad (\text{equação 58})$$

$$R_{\max} = R_0 \cdot \sqrt{\frac{H_c}{b}} \quad (\text{equação 59})$$

Onde:

$R_0$  = raio do escoamento na base da nuvem;

$H_c$  = altura do centro da bigorna da nuvem;

$R_{\max}$  = raio da área de atuação da TS;

$b$  = altura média de ação dos ventos da TS.

Quando o vento de traslado é inserido, o centro da tormenta e, conseqüentemente, da área de ação se desloca com o escoamento, definindo o rastro da TS.

## 6.8 VELOCIDADE DE EXPANSÃO DA TS

Ao considerar a ação de tormentas locais em obstáculos não pontuais, como cabos suspensos, é necessário considerar que, em diferentes pontos do espaço, os efeitos do vento chegam em instantes distintos. Esta premissa será considerada no trabalho utilizando o modelo descrito abaixo.

Adota-se como hipótese que um cilindro de raio  $R_0$  que transfere seu volume a outro cilindro de raio  $R_t$  e altura  $b$  (figura 27), fixada em 100m, até o raio atingir o valor  $R_{max}$ . O volume transferido pela base da nuvem deve ser igual ao volume de ar contido no cilindro externo, conforme demonstrado na equação 60. Através desta equação, é possível definir a equação para o tempo  $t$  (equação 61).

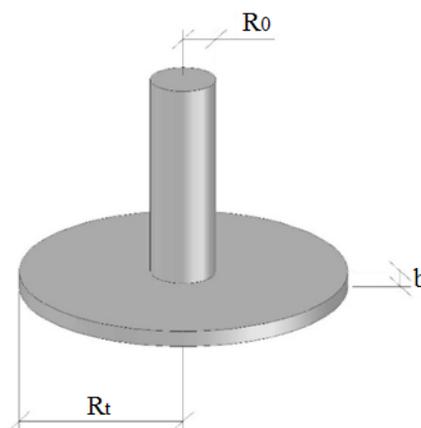


Figura 27: representação do modelo adotado para expansão da tormenta.

$$\pi \cdot V \cdot t \cdot R_0^2 = \pi \cdot b \cdot (R_t^2 - R_0^2) \quad (\text{equação 60})$$

$$t = \frac{b}{V} \cdot \frac{(R_t^2 - R_0^2)}{R_0^2} \quad (\text{equação 61})$$

Onde:

$R_0$  = raio da base da nuvem;

$R_t$  = raio da área atingida pela TS em um instante  $t$ ;

$b$  = altura limite média dos ventos atingidos pela TS;

$V$  = velocidade do escoamento.

A partir da equação 61 é possível determinar a velocidade com a qual o efeito da tormenta se expande, denominada como velocidade efetiva da TS (equação 62). Define-se como velocidade relativa de expansão a razão entre a velocidade efetiva e a velocidade do escoamento (equação 63).

$$V_{ef} = \frac{R_t}{t} = \frac{R_t \cdot R_0^2}{b \cdot (R_t^2 - R_0^2)} \cdot V \quad (\text{equação 62})$$

$$V_{rel} = \frac{R_t \cdot R_0^2}{b \cdot (R_t^2 - R_0^2)} \quad (\text{equação 63})$$

Onde:

$V_{ef}$  = velocidade efetiva da tormenta;

$V_{rel}$  = velocidade relativa da tormenta.

Para analisar o comportamento do modelo proposto ao longo de sua área de ação, foi realizado um estudo com os seguintes parâmetros: altura limite média da região de expansão ( $b$ ), altura do centro da bigorna ( $H_c$ ) e raio do escoamento ( $R_0$ ).

A altura limite média da região de expansão ( $b$ ) havia sido, anteriormente, fixada como constante. Para analisar o sensibilidade do modelo a variações neste parâmetro, fixou-se  $H_c = 10000$  m e  $R_0 = 1000$  m. Foram adotados os seguintes valores para o parâmetro  $b$ : 80 m, 100 m, 120 m e 140 m. Através dos resultados apresentados na figura 28 e na tabela 3, conclui-se que as variações em  $b$  não afetaram significativamente o valor de  $V_{rel}$  ao longo de uma tormenta em relação ao valor adotado, justificando sua definição como constante, igual a 100m.

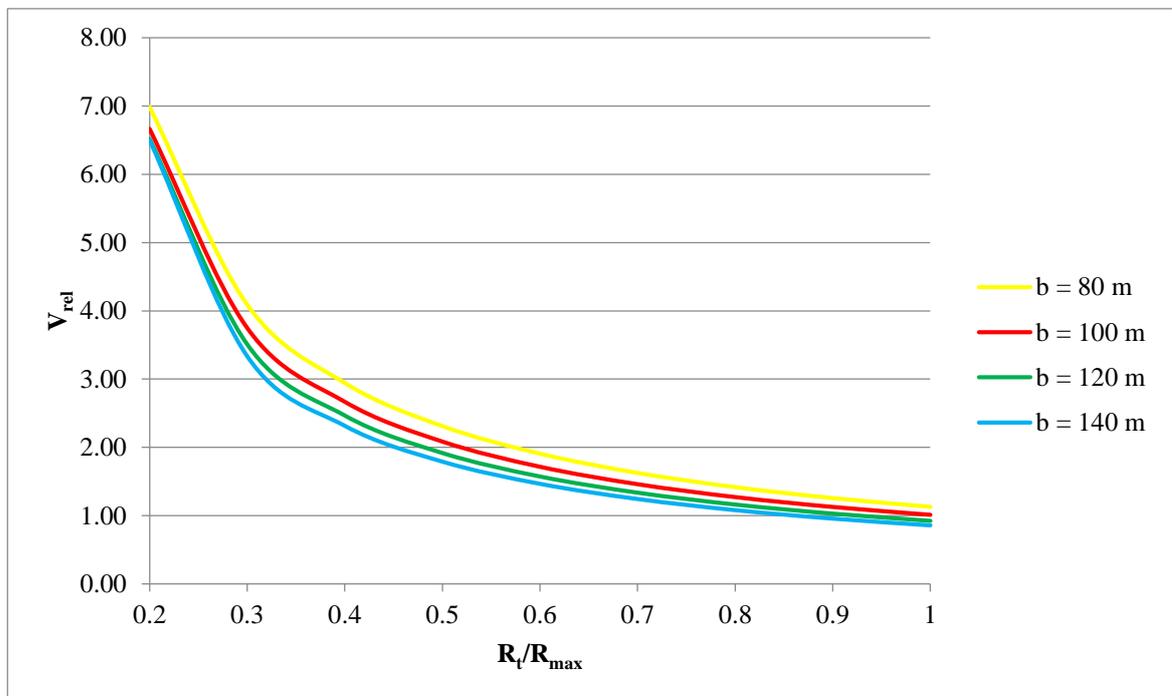


Figura 28: variação de  $V_{rel}$  ao longo da área de ação da tormenta para diferentes valores de  $b$ .

Tabela 3: variação de  $V_{rel}$  ao longo da área de ação da tormenta para diferentes valores de  $b$  e erro em relação a  $b = 100$  m.

$R_i/R_{max}$	$b = 100$ m	$b = 80$ m		$b = 120$ m		$b = 140$ m	
	$V_{rel}$	$V_{rel}$	Erro	$V_{rel}$	Erro	$V_{rel}$	Erro
0,20	6,67	6,99	5%	6,52	2%	6,50	2%
0,30	3,75	4,09	9%	3,51	6%	3,34	11%
0,40	2,67	2,94	10%	2,47	7%	2,32	13%
0,50	2,08	2,31	11%	1,92	8%	1,79	14%
0,60	1,71	1,91	11%	1,57	8%	1,47	15%
0,70	1,46	1,62	11%	1,34	8%	1,24	15%
0,80	1,27	1,42	11%	1,16	8%	1,08	15%
0,90	1,13	1,25	12%	1,03	8%	0,96	15%
1,00	1,01	1,13	12%	0,92	9%	0,86	15%

A altura do centro da bigorna ( $H_c$ ) é um dos parâmetros utilizados para o cálculo de  $R_{max}$ . Portanto, consiste em um parâmetro relevante para analisar as variações de  $V_{rel}$  ao longo da área de expansão da tormenta. Com o intuito de analisar a sensibilidade do modelo a variações no parâmetro, fixou-se  $b = 100$  m e  $R_0 = 1000$  m. Foram adotados os seguintes valores para o parâmetro  $H_c$ : 8000 m, 10000 m, 12000 m e 14000 m. Os resultados são apresentados na figura 29.

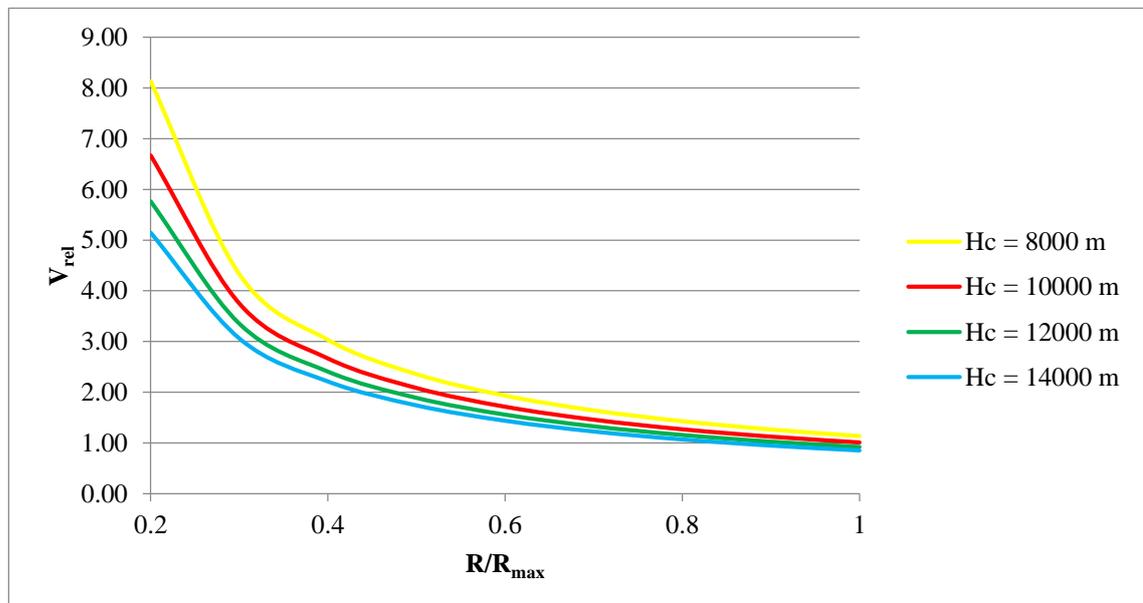


Figura 29: variação de  $V_{rel}$  ao longo da área de ação da tormenta para diferentes valores de  $H_c$ .

Assim como a altura do centro da bigorna ( $H_c$ ), o raio do escoamento ( $R_0$ ) é considerado relevante por ser um dos parâmetros utilizados para o cálculo de  $R_{max}$ . Com o intuito de analisar a sensibilidade do modelo a variações no parâmetro, fixou-se  $b = 100$  m e  $H_c = 10000$  m. Foram adotados os seguintes valores para o parâmetro  $R_0$ : 300 m, 600 m, 1000 m, 1500 m e 2000 m. Os resultados são apresentados na figura 30.

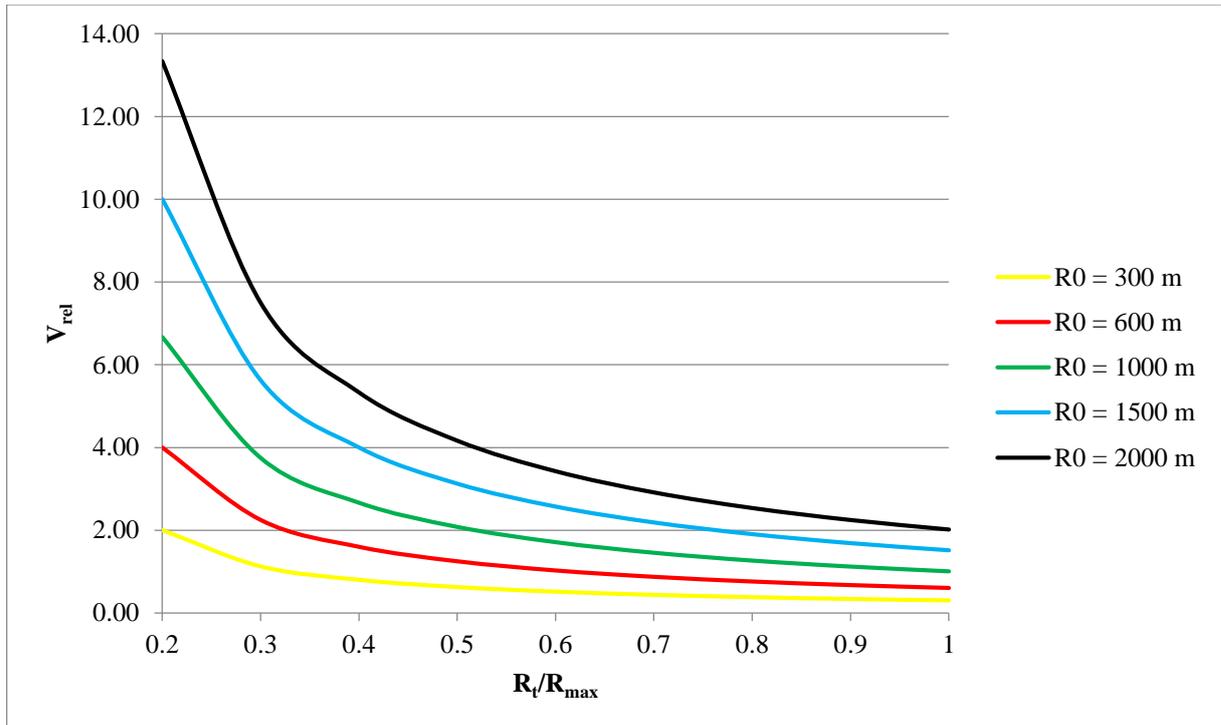


Figura 30: variação de  $V_{rel}$  ao longo da área de ação da tormenta para diferentes valores de  $R_0$ .

Por meio da análise das figuras 29 e 30 é possível visualizar a influência dos parâmetros analisados na variação da velocidade relativa de expansão  $V_{rel}$ .

## 6.9 LINHA DE CORRENTE LIMITE

Tem-se como premissa que existe uma limitação vertical para as rajadas de vento, representada por uma linha de corrente considerada como superior. Define-se que esta linha de corrente é a que passa pelo ponto  $(R_0, h)$ , no qual  $h$  representa a altura da base da nuvem, definida como  $0,1 \cdot H_c$ . Particularizando a equação 47 para o ponto  $(R_0, h)$ , define-se que a altura máxima que

o campo de vento gerado pela TS atinge ( $z_{\max}$ ), em função do afastamento da origem da tormenta ( $r$ ) é definida pela equação 64, desde que  $r > R_0$ .

$$z_{\max} = \frac{R_0^{1,2} \cdot (0,1 \cdot H_c)}{r^{1,2}} \quad (\text{equação 64})$$

Onde:

$R_0$  = raio do jato descendente da TS, na base da nuvem;

$H_c$  = altura do solo ao centro da bigorna;

$r$  = distância do eixo central da tormenta a um ponto de referência.

Para ilustrar o modelo proposto, foram realizados testes com alguns valores para  $R_0$  e para  $H_c$ . Os resultados obtidos estão na figura 31.

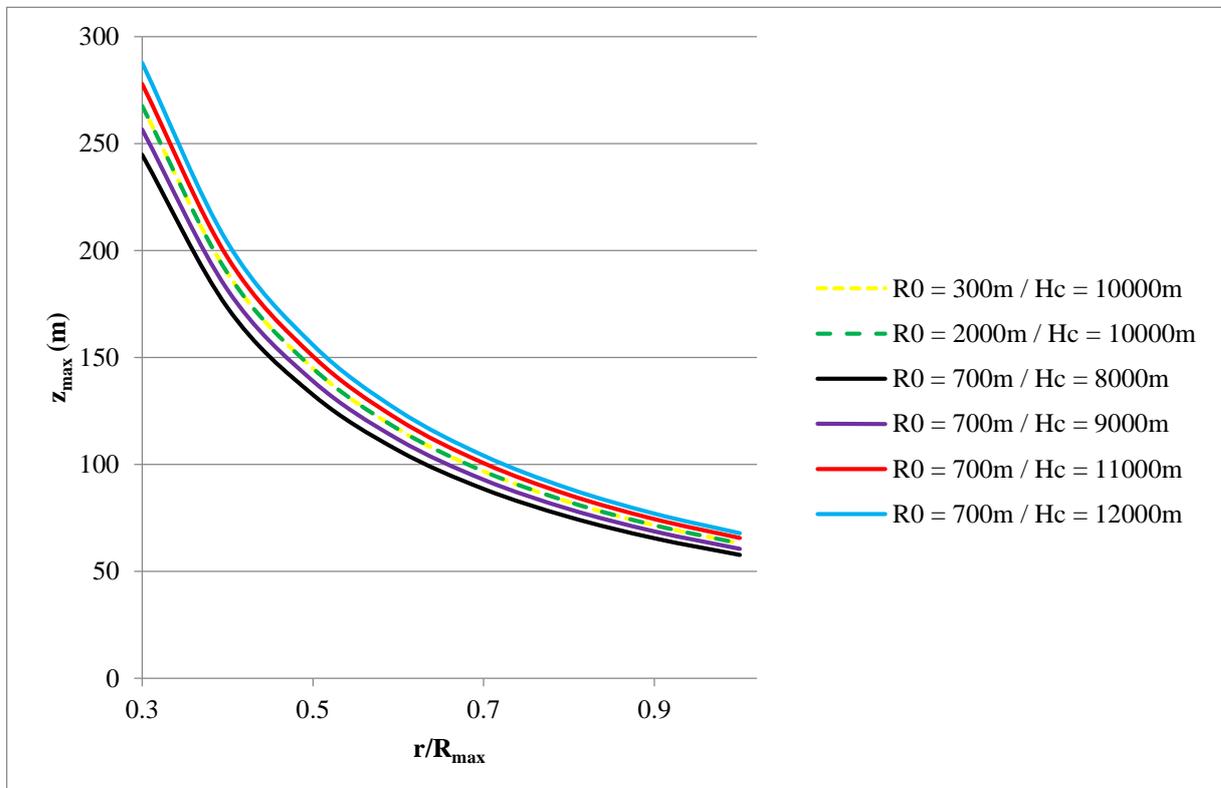


Figura 31: variação do modelo da linha de corrente limite.

## 6.10 CAMADA LIMITE DO ESCOAMENTO

Para considerar o desenvolvimento de uma camada limite do escoamento horizontal dos eventos TS, considerou-se a equação da espessura de camada limite turbulenta fornecida por Fox e McDonald (2001) e apresentada abaixo nas equações 65 e 66. A camada limite se desenvolve ao longo da distância horizontal percorrida pelo escoamento, considerada como sendo a distância a partir do raio do escoamento na base da nuvem até o ponto de interesse. A figura 32 ilustra o desenvolvimento da espessura da camada limite ao longo da distância.

$$\delta = \frac{0,382 \cdot (r - R_0)}{Re^5} \quad (\text{equação 65})$$

$$Re = \frac{V \cdot (r - R_0)}{\nu} \quad (\text{equação 66})$$

Onde:

$\delta$  = espessura da camada limite;

$r$  = distância do centro da tempestade ao ponto de interesse;

$R_0$  = raio do escoamento na base da nuvem;

$Re$  = número de Reynolds;

$V$  = velocidade do fluido;

$\nu$  = viscosidade cinemática do fluido, igual a  $1,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  para o ar.

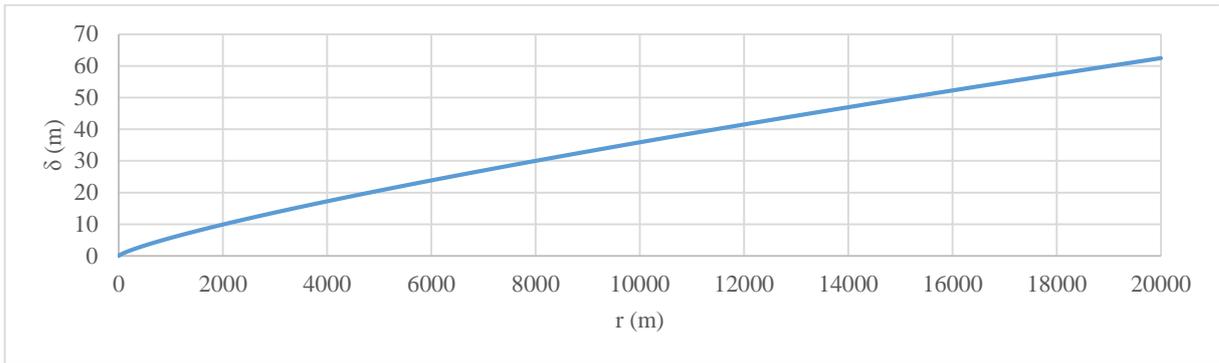


Figura 32: desenvolvimento da espessura da camada limite do escoamento com o aumento da distância.

Com a espessura da camada limite do escoamento calculada, define-se que, na região definida como  $\delta$ , existe uma alteração na velocidade do vento. Adota-se que esta variação respeita a lei potencial apresentada na equação 9, utilizando o mesmo coeficiente de camada limite  $\alpha$  aplicado na correção dos ventos sinóticos.

## 7 SIMULAÇÕES

A partir do modelo descrito no capítulo 6, foram atribuídos valores às variáveis para a realização das simulações descritas neste capítulo. As simulações têm como objetivo ilustrar as aplicações do modelo.

### 7.1 DEFINIÇÃO DE VALORES PARA OS PARÂMETROS

Com ajustes nos parâmetros utilizados no modelo, é possível obter, realizando simulações computacionais, informações estatísticas sobre as velocidades extremas de uma região. O modelo proposto por Ponte Jr. (2005) foi validado utilizando dados fornecidos por Santos (1989) para estações meteorológicas em Porto Alegre, Uruguaiana e Bagé.

#### 7.1.1 Dimensão da área

A área adotada foi de um quadrado de 20000 m de lado (representado na figura 33). A dimensão foi baseada na capacidade auditiva de um observador localizado no centro da área, pois considera-se que, usualmente, os registros disponíveis sobre o número de tormentas são coletados a partir da audição do som do trovão após a descarga elétrica. (PONTE JR., 2005).

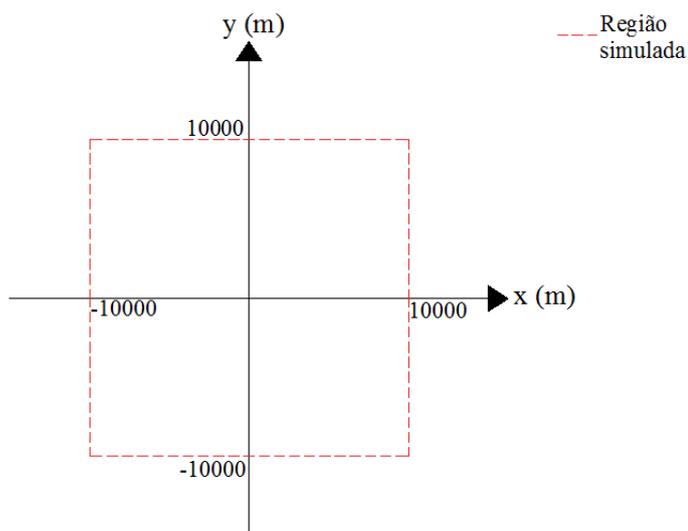


Figura 33: representação da região simulada.

### **7.1.2 Frequência de TS e EPS**

Com base no mapa isocerâunico fornecido pela NBR 5419 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005), define-se que, para a área adotada, localizada na região de Porto Alegre, acontecem 20 eventos TS anualmente.

Admite-se que existe um vento de traslado sempre presente, que, eventualmente, pode ser substituído por uma tormenta EPS. Adota-se a mesma hipótese sugerida por Ponte Jr. (2005), de que a cada 50 eventos TS, um ocorreria simultaneamente com um evento EPS.

### **7.1.3 Diferença de pressão na TS**

Não foram encontrados dados na literatura sobre a distribuição estatística da queda de pressão no nível do solo. Caracena et al. (2000) citam alguns eventos nos quais as quedas de pressão chegam a atingir 50 Pa. Neste trabalho foi adotada a mesma distribuição utilizada por Ponte Jr. (2005), uma distribuição de Gumbel, com fator de forma de 50 Pa e de posição de 100 Pa, que visualmente satisfaz os valores sugeridos por Caracena et al. (2000). As figuras 34 e 35 representam a função de densidade de probabilidade (fdp) e a função de distribuição acumulada (fda), respectivamente.

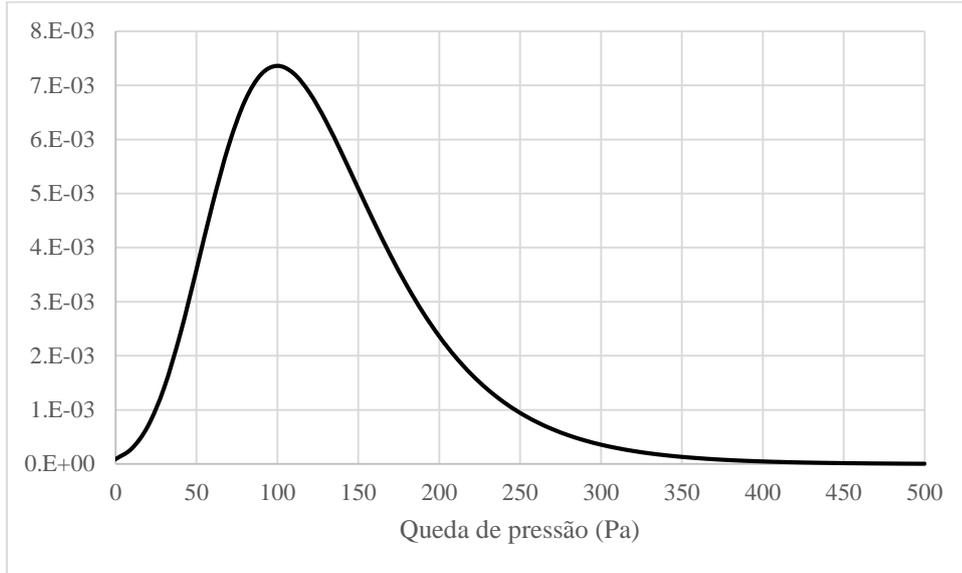


Figura 34: função de distribuição de probabilidade da queda de pressão.

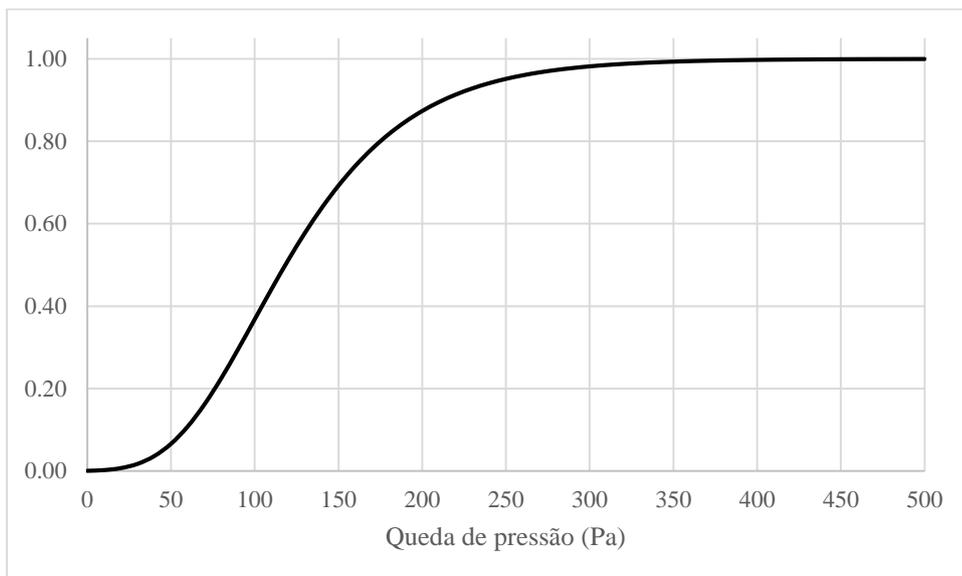


Figura 35: função de densidade acumulada da queda de pressão.

#### 7.1.4 Duração característica

Ponte Jr. (2005) define a distribuição e os parâmetros adotados para descrever a duração característica utilizando registros de estações meteorológicas de Passo Fundo e São Luiz Gonzaga, municípios localizados no estado do Rio Grande do Sul, reproduzidos na tabela 4. Através dos registros, ajusta-se uma distribuição de extremos tipo I (Gumbel) com fator de forma igual a 127 s e fator de posição igual a 306 s. Para representar a distribuição utilizada

no trabalho, os valores dos parâmetros são aproximados para fator de forma de 150 s e fator de posição de 300 s. As figuras 36 e 37 representam a função de densidade de probabilidade (fdp) e a função de distribuição acumulada (fda), respectivamente.

Tabela 4: dados de tormentas elétricas (PONTE JR., 2005)

Estação	Data	Duração	Velocidade máxima
Passo Fundo	17/10/90	330 s	15,6 m/s
Passo Fundo	10/02/89	480 s	15,6 m/s
Passo Fundo	20/12/87	510 s	18,1 m/s
São Luiz Gonzaga	01/07/93	180 s	25,0 m/s
São Luiz Gonzaga	11/11/88	570 s	25,8 m/s
São Luiz Gonzaga	05/01/85	210 s	20,8 m/s

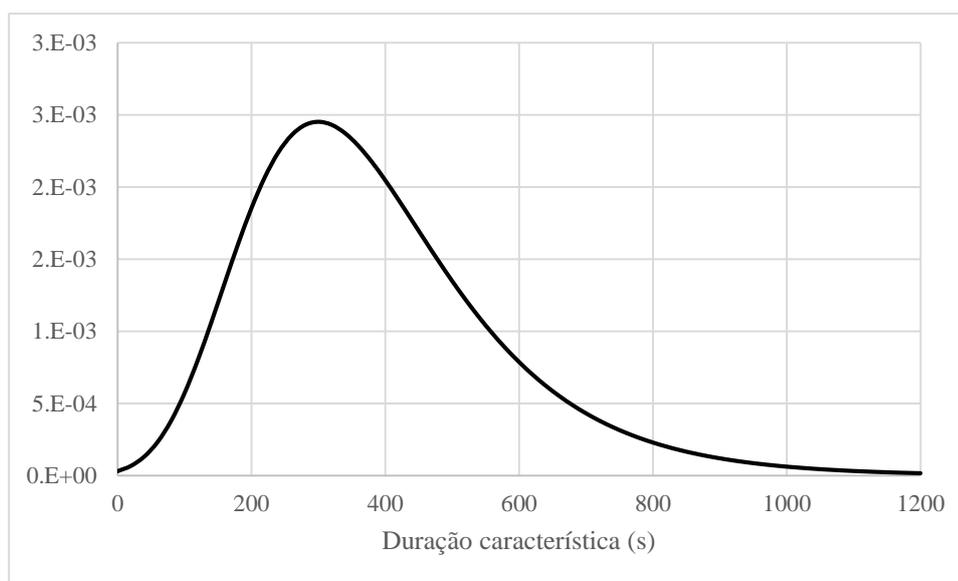


Figura 36: função de distribuição de probabilidade da duração característica.

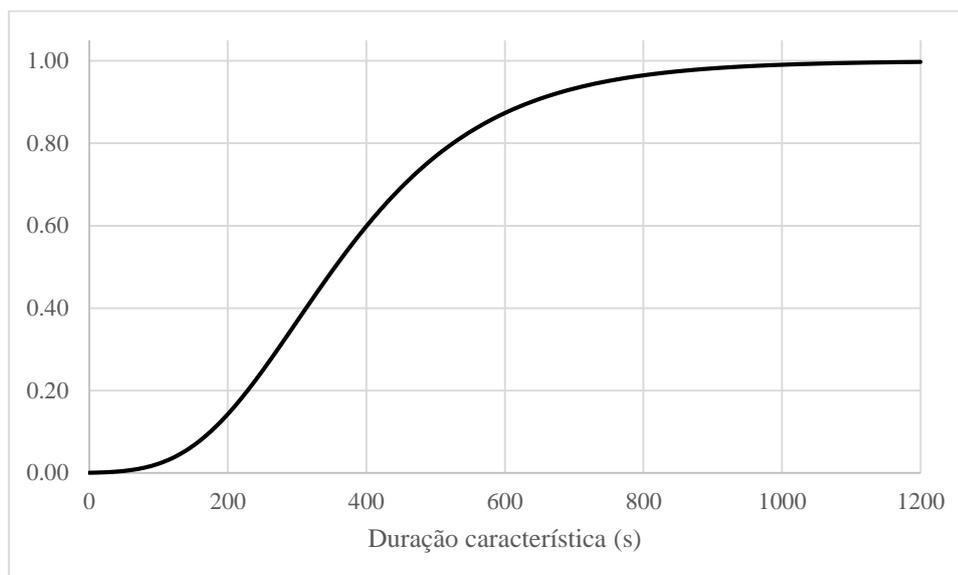


Figura 37: função de densidade acumulada da duração característica.

### 7.1.5 Velocidade e direção do vento de traslado

Através de valores sugeridos pelo Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (2002), adota-se o modelo Weibull, com fator de forma de 2,5 m/s e fator de posição de 3,0 m/s, para descrever a velocidade do vento de fundo em termos estatísticos. As figuras 38 e 39 representam a função de densidade de probabilidade (fdp) e a função de distribuição acumulada (fda), respectivamente.

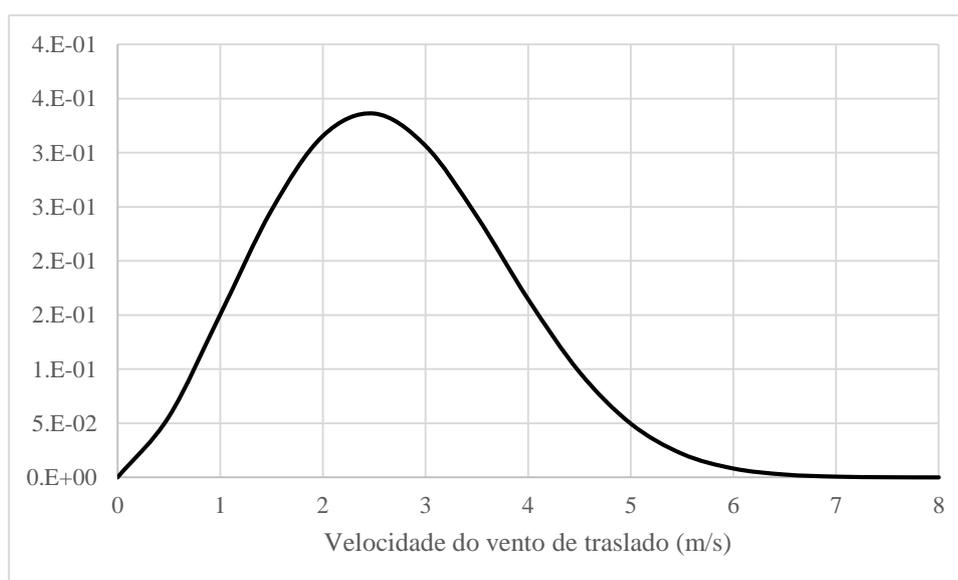


Figura 38: função de distribuição de probabilidade do vento de traslado.

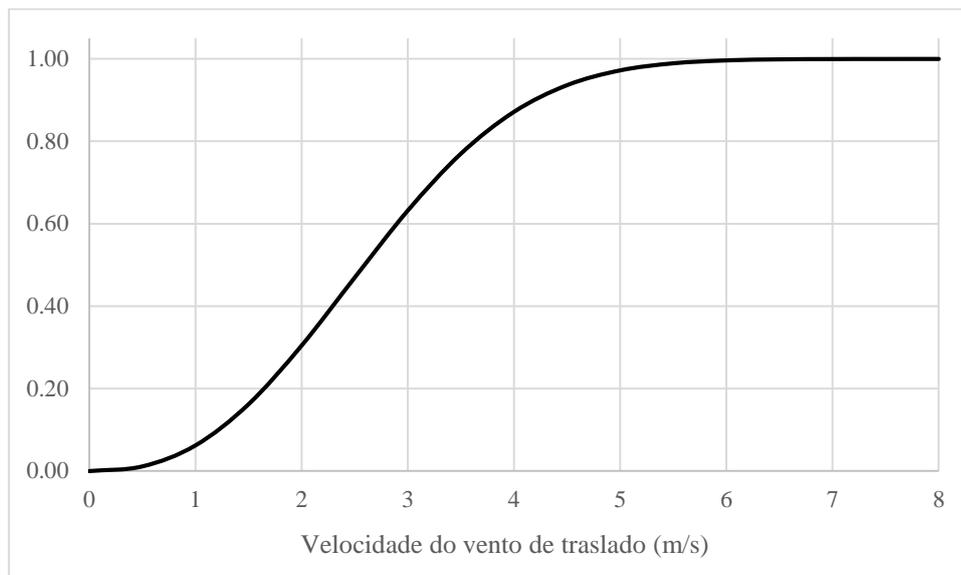


Figura 39: função de densidade acumulada do vento de traslado.

Nos casos em que o vento de fundo é substituído por um evento EPS, adota-se uma distribuição de extremos tipo I (Gumbel) com fator de forma 3 m/s e fator de posição 21,5 m/s, conforme valores sugeridos por Santos (1989). As figuras 40 e 41 representam a função de densidade de probabilidade (fdp) e a função de distribuição acumulada (fda), respectivamente.

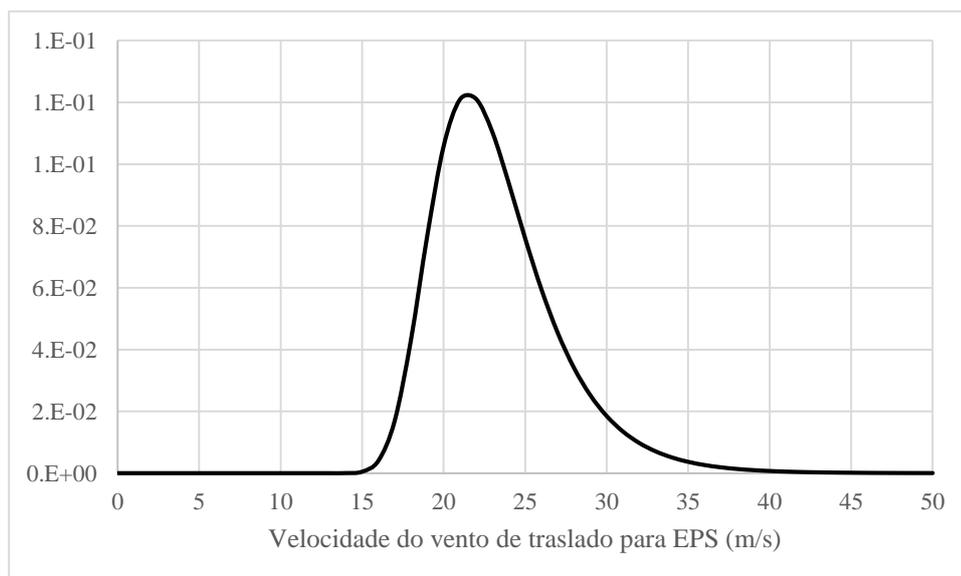


Figura 40: função de distribuição de probabilidade do vento de traslado, caso EPS.

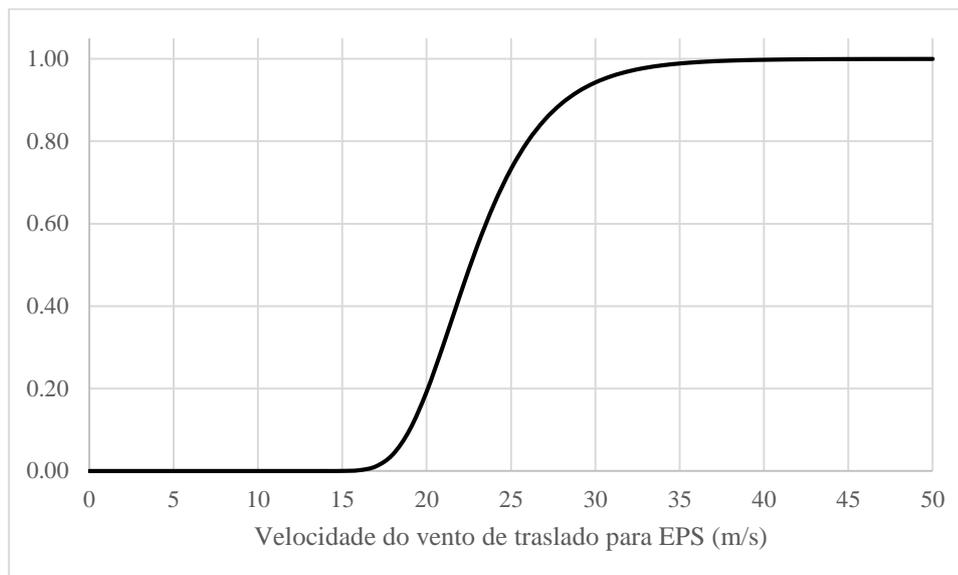


Figura 41: função de densidade acumulada do vento de traslado, caso EPS.

A direção do vento de fundo é determinada, seguindo a mesma metodologia adotada por Ponte Jr. (2005), através de uma distribuição de probabilidade constante variando entre  $0^\circ$  e  $360^\circ$ .

Para os dois casos utiliza-se o coeficiente  $\alpha$ , indicado na equação 9, igual a 0,085, conforme sugerido por Blessmann (1995).

### 7.1.6 Altura da bigorna

A bigorna de uma nuvem do tipo *cumulonimbus* costuma ter sua altura limitada pelo fim da camada atmosférica conhecida como tropopausa, conforme visto no capítulo 3. Considerando a latitude de Porto Alegre (aproximadamente  $30^\circ\text{S}$ ), define-se que a altura da bigorna pode ser representada estatisticamente por uma distribuição normal, de média 11000 m e desvio padrão 500 m. As figuras 42 e 43 representam a função de densidade de probabilidade (fdp) e a função de distribuição acumulada (fda), respectivamente.

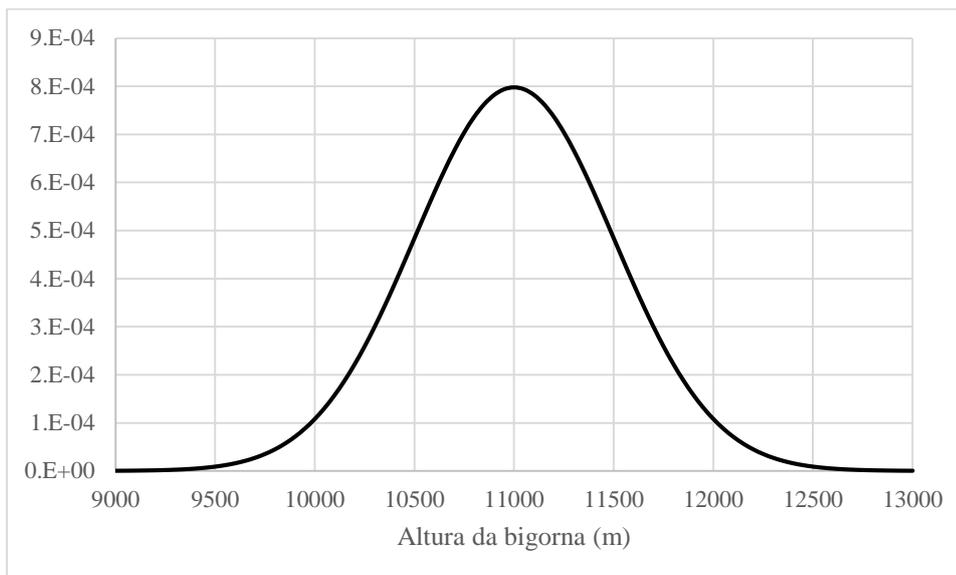


Figura 42: função de distribuição de probabilidade da altura da bigorna da nuvem.

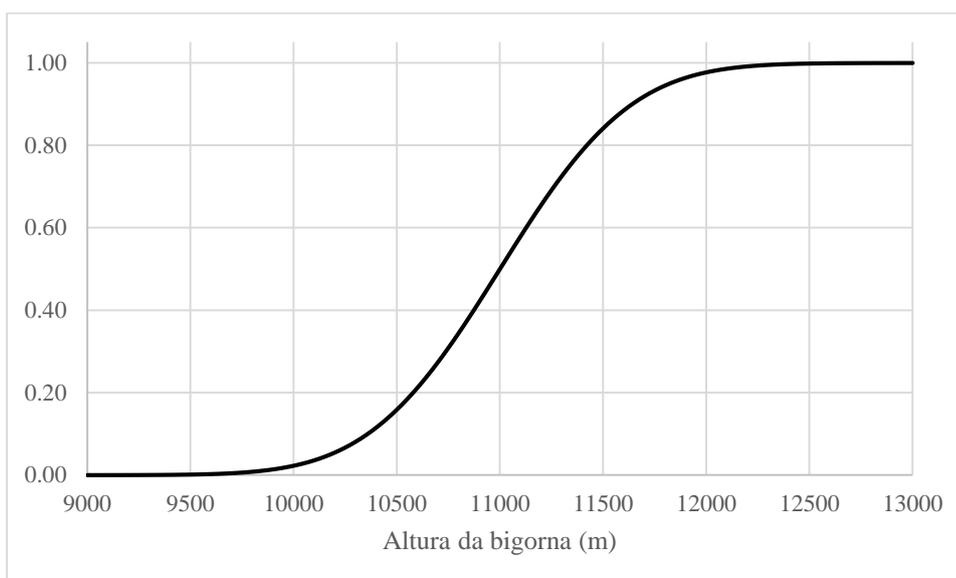


Figura 43: função de densidade acumulada da altura da bigorna da nuvem.

### 7.1.7 Raio do escoamento descendente na base da nuvem

O modelo proposto para a determinação do raio do escoamento na base da nuvem na tempestade elétrica é baseado em trabalhos de Hjelmfelt (1987 e 1988), os quais analisaram dados obtidos no projeto JAWS (*Joint Airport Weather Studies*).

Define-se que o raio do escoamento na base da nuvem ( $R_0$ ) pode variar entre 300 m e 2000 m em uma distribuição de probabilidade triangular de moda igual a 700m. As figuras 44 e 45

representam a função de densidade de probabilidade (fdp) e a função de distribuição acumulada (fda), respectivamente.

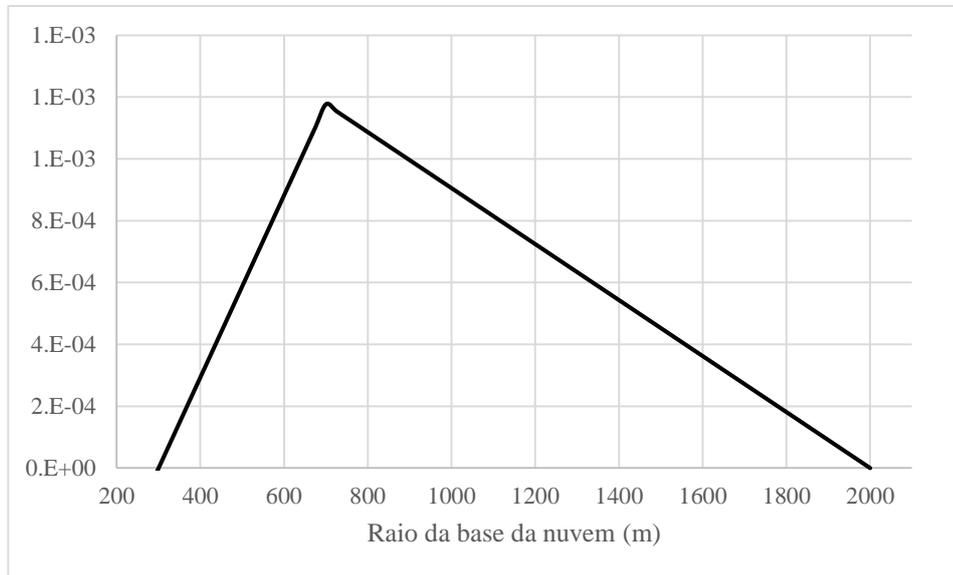


Figura 44: função de distribuição de probabilidade do raio da base de nuvem.

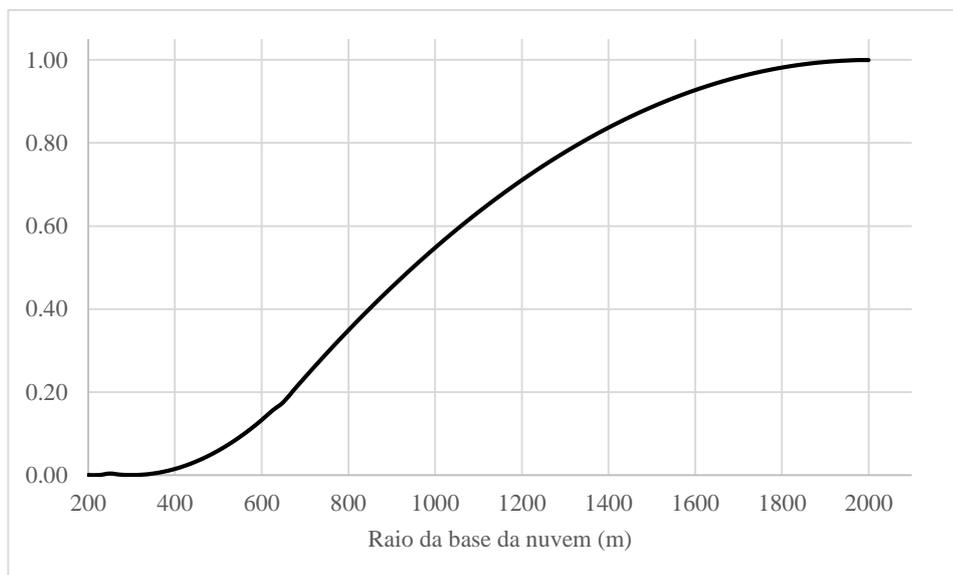


Figura 45: função de densidade acumulada do raio da base de nuvem.

## 7.2 ROTEIRO DAS SIMULAÇÕES

Inicialmente, para realizar a simulação de uma TS são definidas as coordenadas dos pontos de interesse que serão analisados. A seguir, são determinadas, de maneira aleatória, os seguintes parâmetros:

- a) as coordenadas do ponto de origem da TS;
- b) a altura da bigorna ( $H_c$ );
- c) a diferença de pressão ( $\Delta p_0$ );
- d) a duração característica da tormenta ( $T$ );
- e) o raio do escoamento descendente na base da nuvem ( $R_0$ );
- f) a velocidade do vento de traslado ( $V_0$ );
- g) a direção do vento de traslado ( $\gamma$ ).

Para cada ponto de interesse, os seguintes passos são realizados:

- a) a velocidade tangencial ( $V_t$ ) da linha de corrente que passa pelo ponto é calculada;
- b) a velocidade do vento de traslado é corrigida considerando a altura do ponto;
- c) as coordenadas posição da tormenta em cada instante de tempo são calculadas;
- d) a distância entre a tormenta e o ponto de interesse para cada instante de tempo é calculada;
- e) é realizada a modulação no tempo da velocidade da tormenta e são aplicadas as correções em função da distância do ponto à origem da TS;
- f) caso o ponto esteja fora da área de ação da TS, a velocidade é anulada.

Desta maneira, é definida a velocidade gerada pela TS em cada instante de tempo, para cada ponto de interesse. A partir destes dados, a velocidade resultante pode ser calculada pela combinação vetorial da velocidade gerada pela TS com a velocidade do vento de traslado, combinando as equações 53, 54 e 55 com as equações 56 e 57. A rotina, programada no software MATLAB, se encontra no apêndice 1.

Para simular uma série de velocidades anuais máximas, junto com as coordenadas dos pontos de interesse, deve-se definir o número de anos a serem simulados e o número de eventos em cada ano. A seguir, para cada evento, os passos apresentados anteriormente são executados. Ao final de cada evento, a velocidade máxima no ponto é registrada. Se repete este processo para todos os eventos que ocorrem no ano. Ao realizar este procedimento para o número de anos

definido, se tem a série de velocidades anuais máximas. A rotina, programada no software MATLAB, se encontra no apêndice 2.

Nos casos em que se deseja determinar a tração em elementos de cabo, depois de definidas as velocidades do vento nos nós, as forças resultantes são calculadas e o problema é resolvido pela integração direta da equação de movimento. A rotina, programada no software MATLAB, se encontra no apêndice 3.

### 7.3 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO DE UMA TS ISOLADA

Para verificar a velocidade de vento ao longo do tempo a 10 m de altura e os perfis verticais da velocidade horizontal do vento ao longo da área de ação de uma TS sem a presença do vento de traslado, foi simulado o exemplo descrito a seguir. Seguindo o roteiro do item 7.2, foram definidos os seguintes valores para os parâmetros da TS (adotados por serem valores com a maior probabilidade de ocorrência):

- a) coordenadas do ponto de origem da TS:  $x_0 = 0$  e  $y_0 = 0$ ;
- b) a altura da bigorna:  $H_c = 11000$  m;
- c) a diferença de pressão:  $\Delta p_0 = 100$  Pa;
- d) a duração característica da tormenta:  $T = 300$  s;
- e) o raio do escoamento descendente na base da nuvem:  $R_0 = 700$  m.

Com estes dados, calcula-se a área de ação da TS e se obtém o valor  $R_{\max} = 7000$  m. Como a tormenta sem a presença do vento de traslado apresenta efeitos axissimétricos na área de ação, foram definidos pontos de interesse para a representação dos resultados em apenas uma direção, com as seguintes distâncias da origem da tormenta: 100 m, 250 m, 500 m, 1000 m, 2000 m, 3000 m, 4000 m, 5000 m, 6000 m e 7000 m. A representação gráfica da região simulada pode ser visualizada na Figura 46.

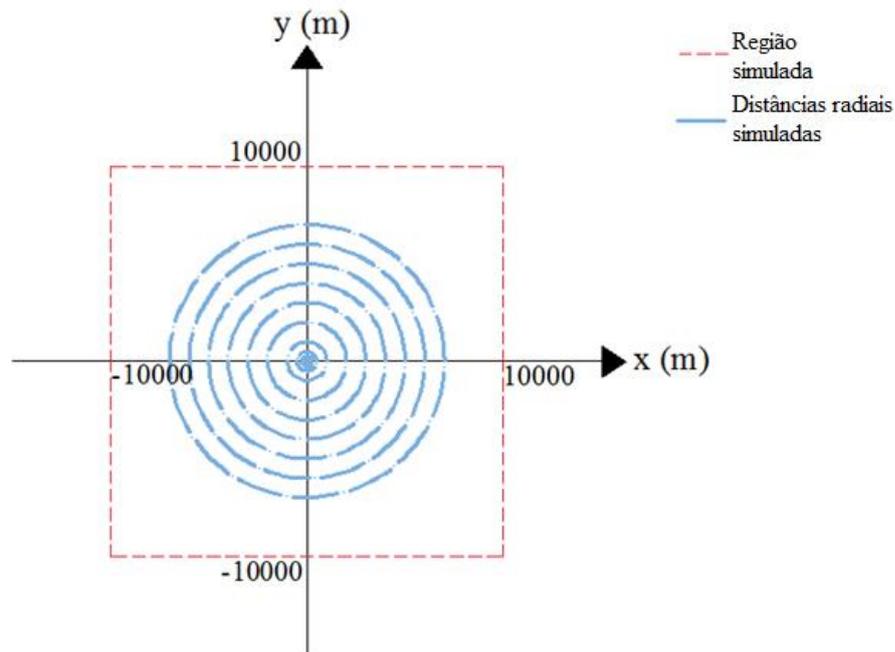


Figura 46: representação das distâncias radiais analisadas na região simulada.

A velocidade radial ao longo do tempo nos principais pontos de interesse está representada na figura 47 e a velocidade axial, na direção z, está representada na figura 48. Alguns pontos foram omitidos por não apresentarem variação de velocidade graficamente perceptível com os pontos adjacentes. Os perfis verticais de velocidade radial, no instante da velocidade máxima em cada ponto, estão representados da figura 49 à figura 59.

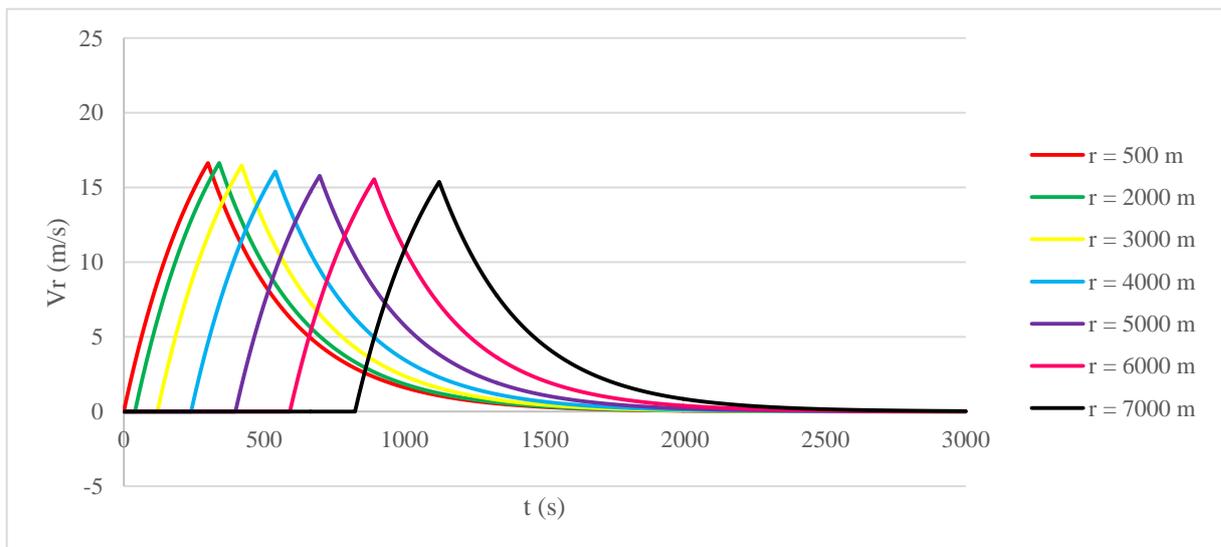


Figura 47: velocidade radial ao longo do tempo para as distâncias radiais simuladas.

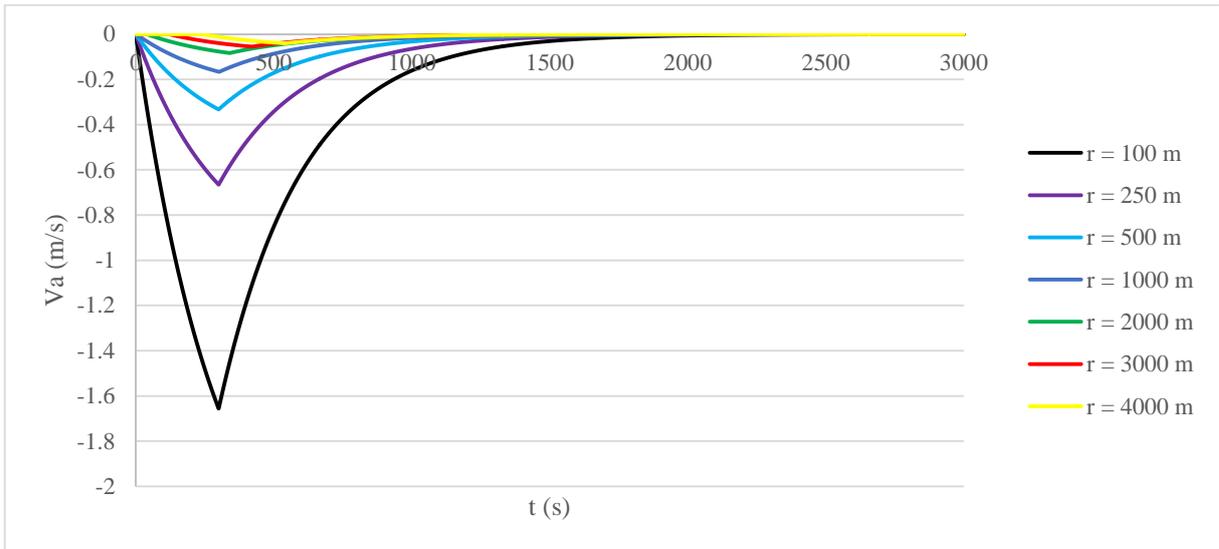


Figura 48: velocidade axial ao longo do tempo para as distâncias radiais simuladas.

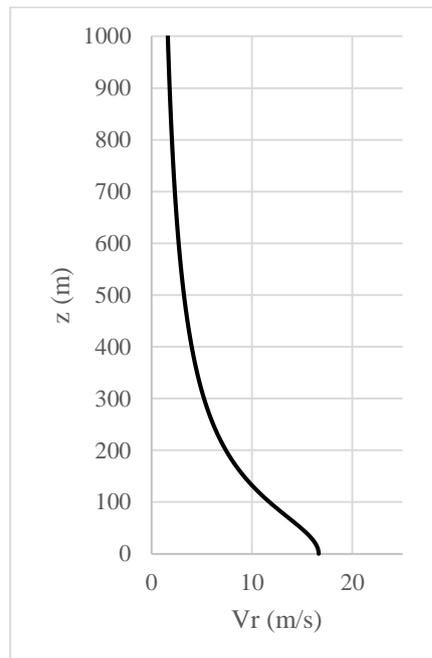


Figura 49: perfil vertical de velocidades para  $r = 100$  m.

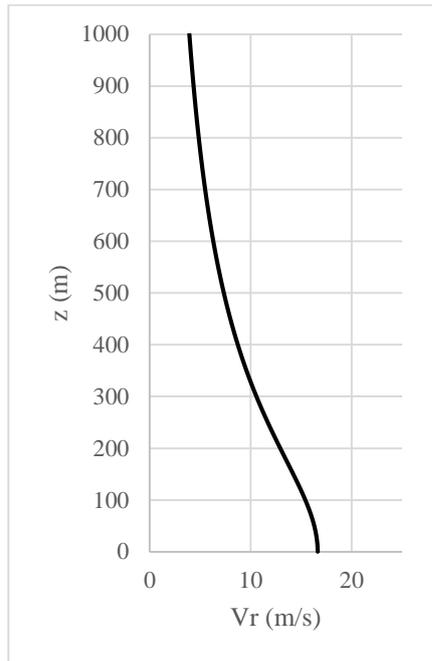


Figura 50: perfil vertical de velocidades para  $r = 250$  m.

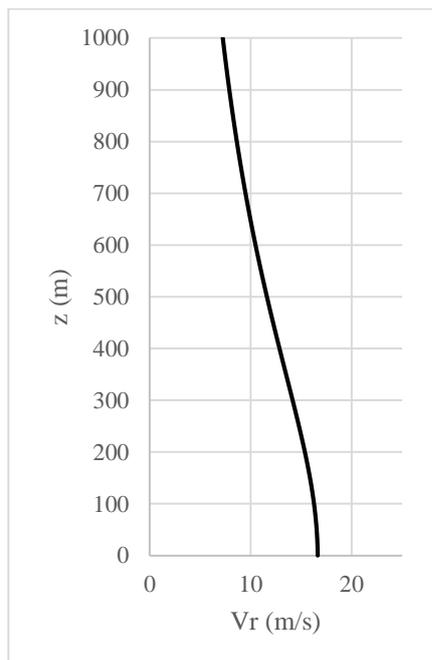


Figura 51: perfil vertical de velocidades para  $r = 500$  m.

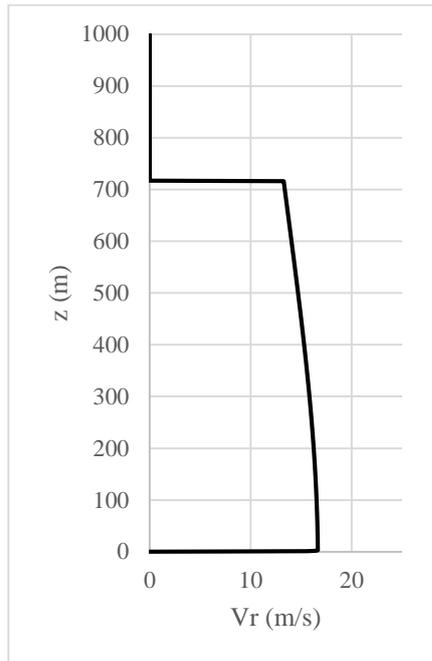


Figura 52: perfil vertical de velocidades para  $r = 1000$  m.

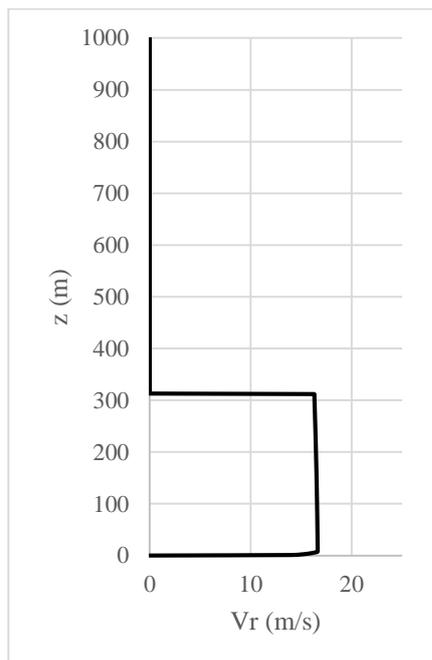


Figura 53: perfil vertical de velocidades para  $r = 2000$  m.

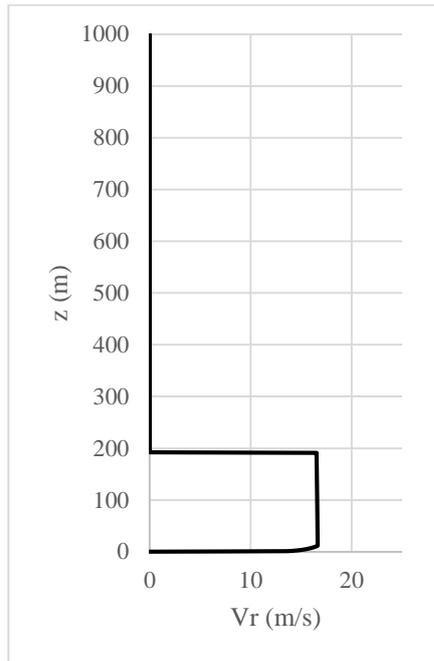


Figura 54: perfil vertical de velocidades para  $r = 3000$  m.

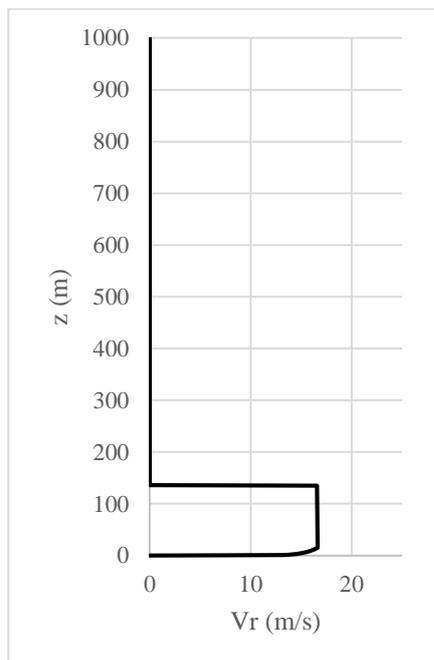


Figura 55: perfil vertical de velocidades para  $r = 4000$  m.

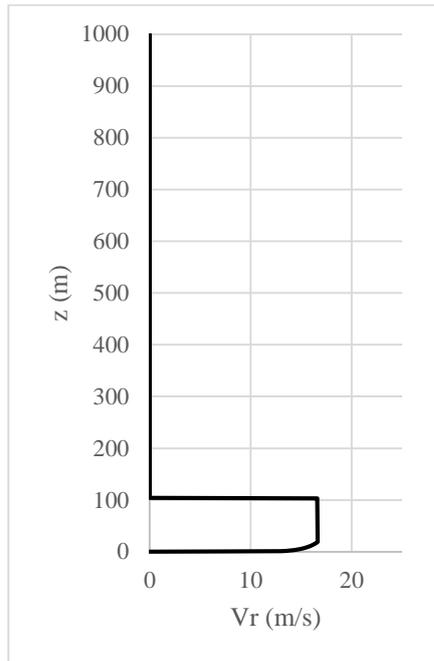


Figura 56: perfil vertical de velocidades para  $r = 5000$  m.

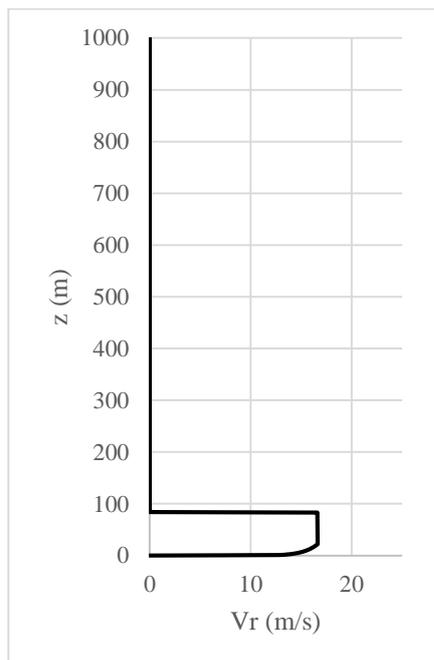


Figura 57: perfil vertical de velocidades para  $r = 6000$  m.

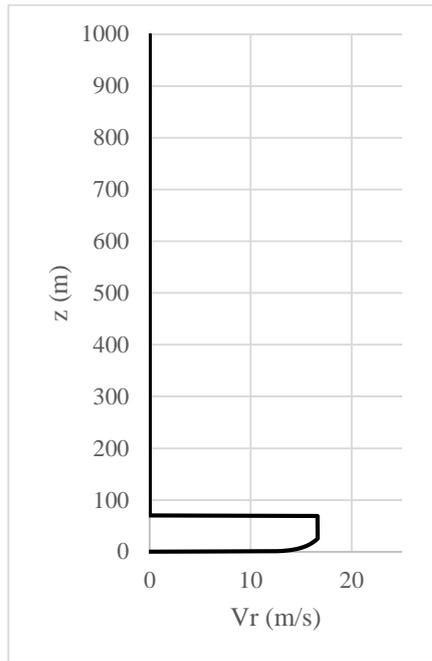


Figura 58: perfil vertical de velocidades para  $r = 7000$  m.

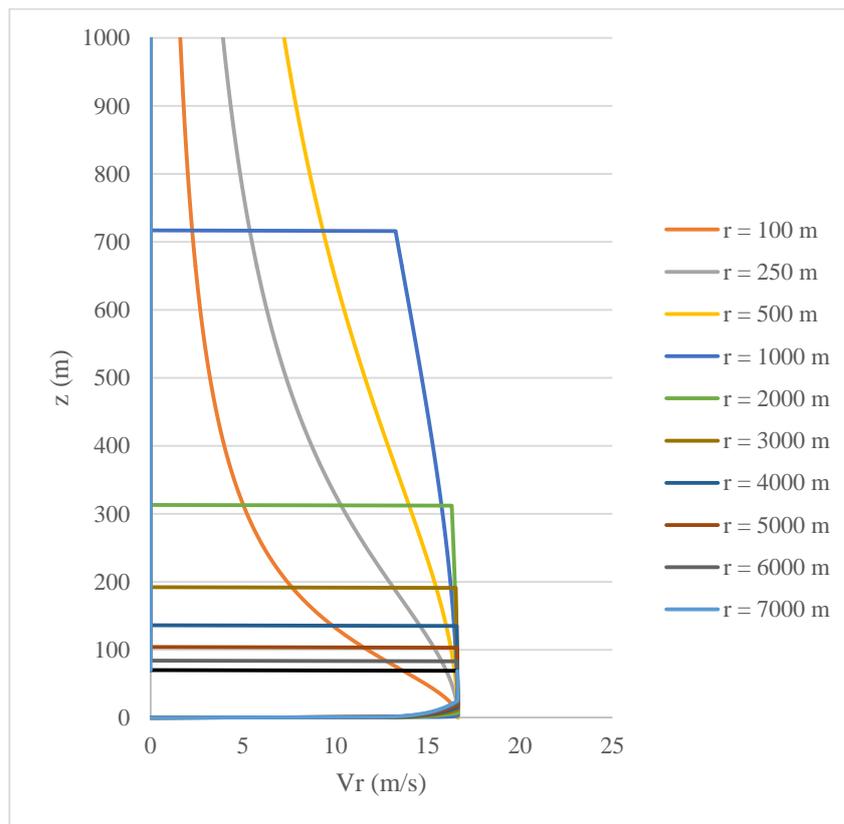


Figura 59: perfil vertical de velocidades para as distâncias radiais analisadas.

## 7.4 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO DE UMA TS COMBINADA COM VENTO DE TRASLADO

Utilizando os mesmos parâmetros do item 7.3, foi adicionado um vento de traslado  $V_0 = 3 \text{ m/s}$ , com orientação de  $90^\circ$ . As coordenadas dos pontos de interesse, nos quais a velocidade é descrita, estão apresentadas na tabela 5. A figura 60 representa graficamente a região simulada.

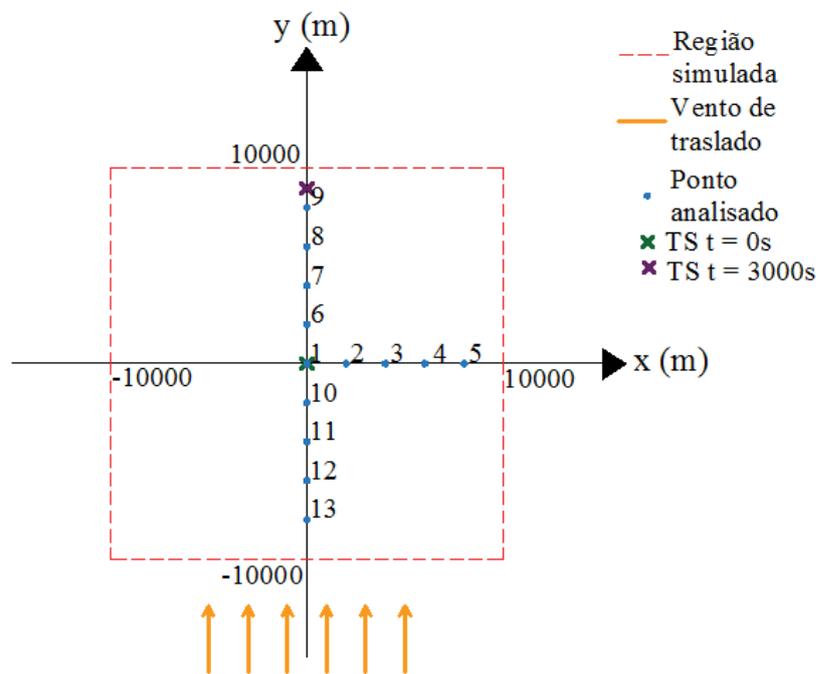


Figura 60: esquema do domínio da simulação.

Tabela 5: coordenadas dos pontos de interesse.

Ponto	x (m)	y (m)
1	0	0
2	2000	0
3	4000	0
4	6000	0
5	8000	0
6	0	2000
7	0	4000
8	0	6000
9	0	8000
10	0	-2000
11	0	-4000
12	0	-6000
13	0	-8000

A velocidade radial ao longo do tempo nos pontos de interesse está representada nas figuras 61, 62 e 63, a velocidade axial, na direção z, está representada nas figuras 64 e 65 e a decomposição da velocidade radial, nas direções x e y está representada nas figuras 66 e 67, 68 e 69, respectivamente. Os efeitos da TS não chegam aos pontos 5, 12 e 13, que foram suprimidos dos gráficos. Devido ao fato da tempestade se deslocar com sua origem no eixo y, os pontos de 6 a 11 não possuem componente em x de velocidade, sendo suprimidos dos gráficos. Por serem afetados por uma parcela predominantemente horizontal do escoamento da TS, a componente axial da velocidade nos pontos 3, 4, 8, 9, 10 e 11 não apresentava valores significativos para serem identificados nos gráficos, justificando sua supressão.

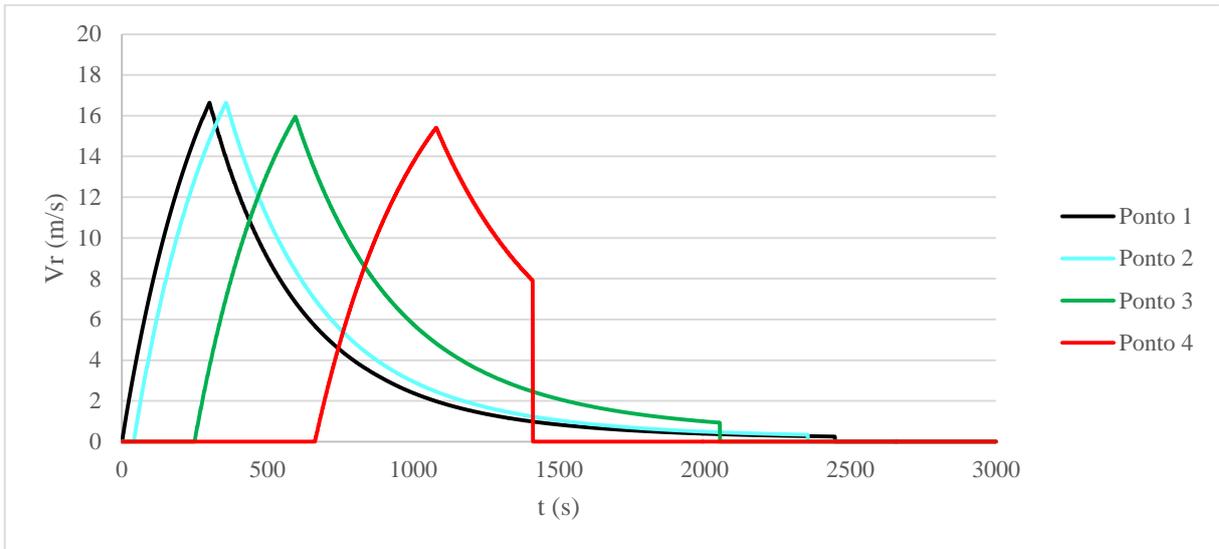


Figura 61: velocidade radial dos pontos 1 a 5.

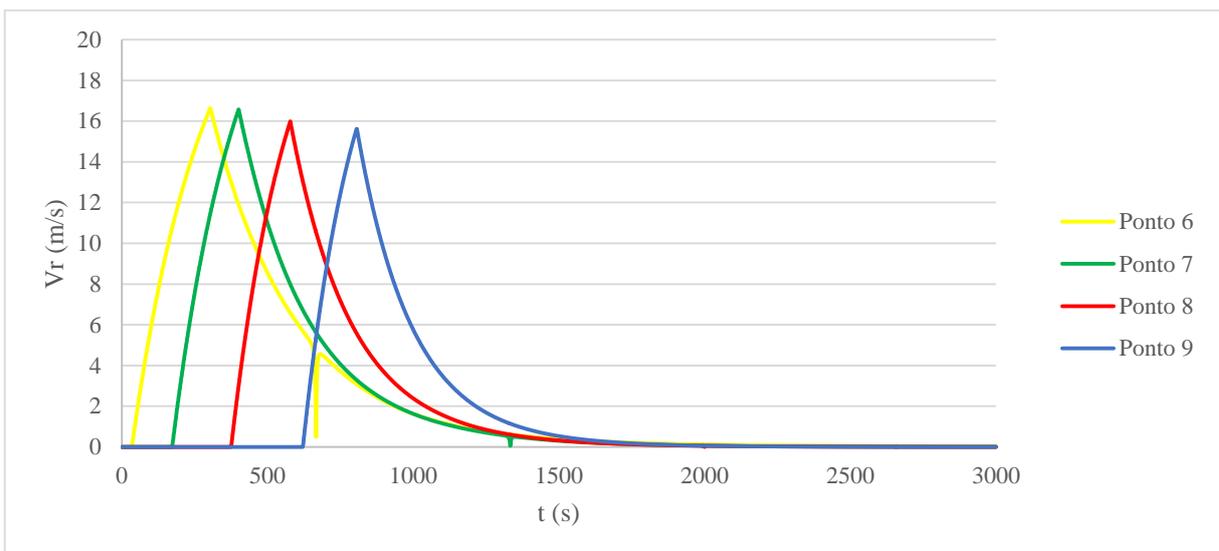


Figura 62: velocidade radial dos pontos 6 a 9.

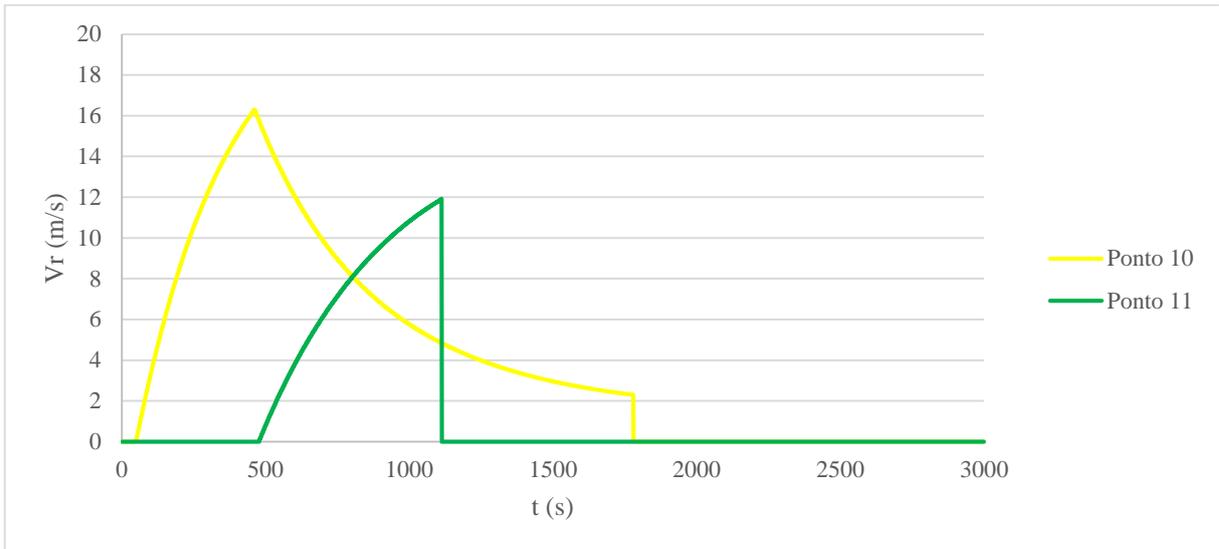


Figura 63: velocidade radial dos pontos 10 a 13.

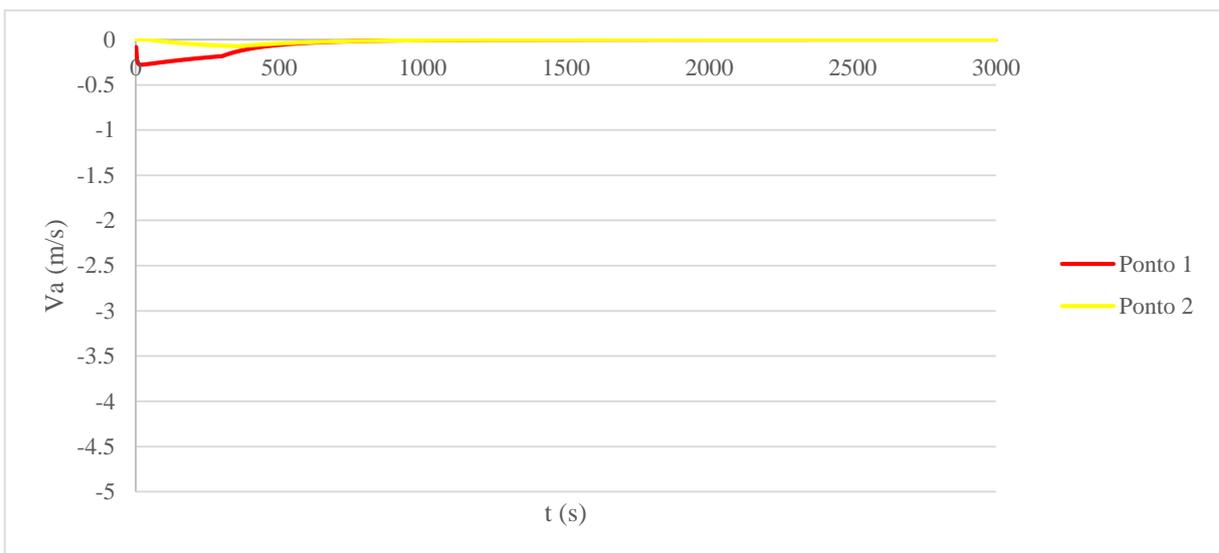


Figura 64: velocidade axial dos pontos 1 a 5.

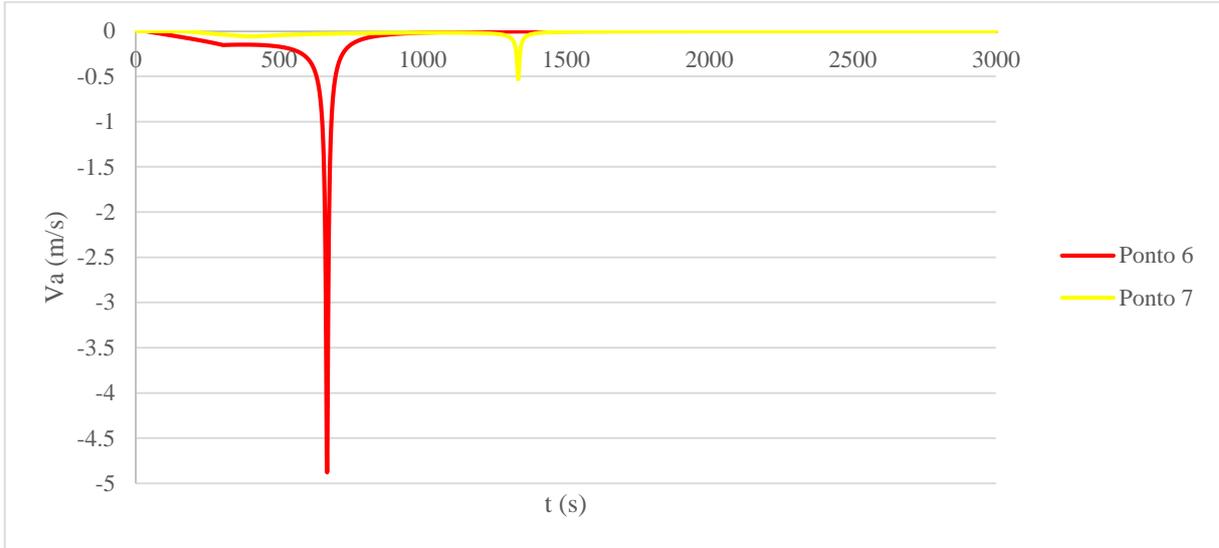


Figura 65: velocidade axial dos pontos 6 a 9.

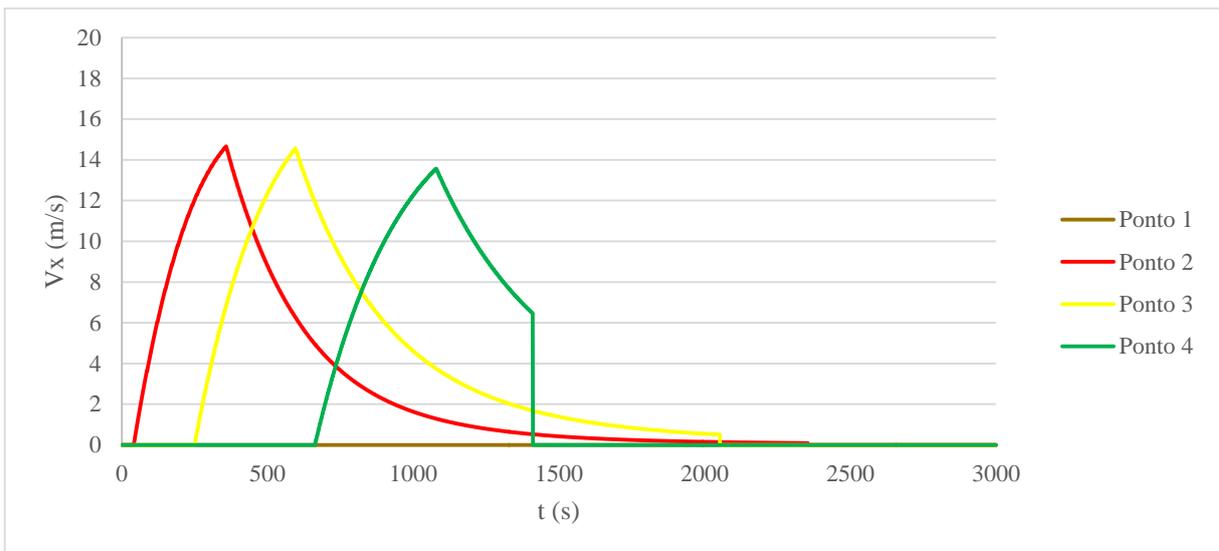


Figura 66: velocidade na direção x dos pontos 1 a 5.

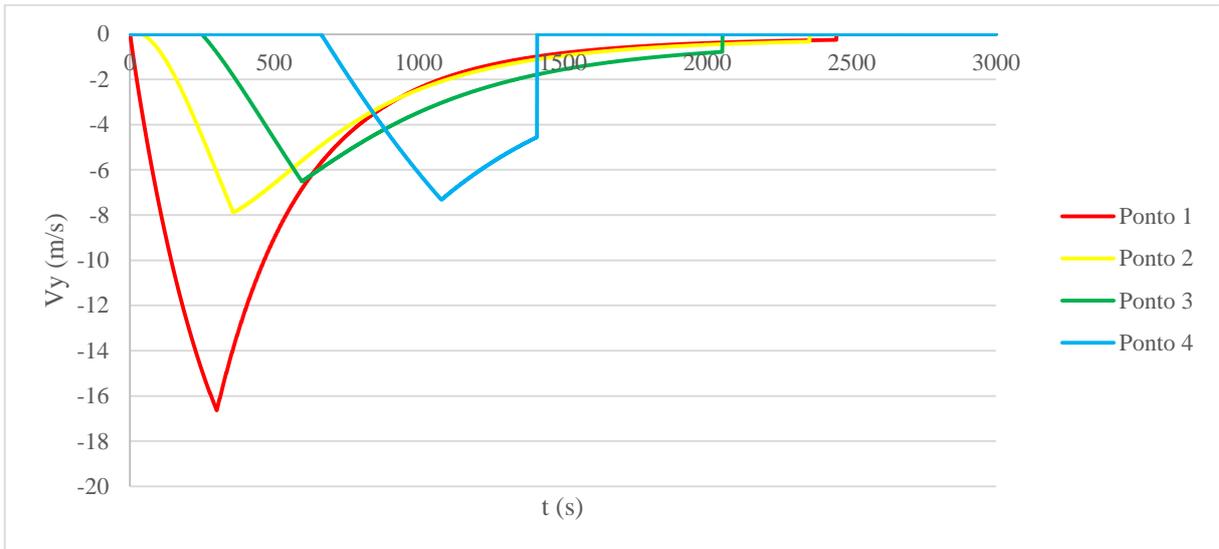


Figura 67: velocidade na direção y dos pontos 1 a 5.

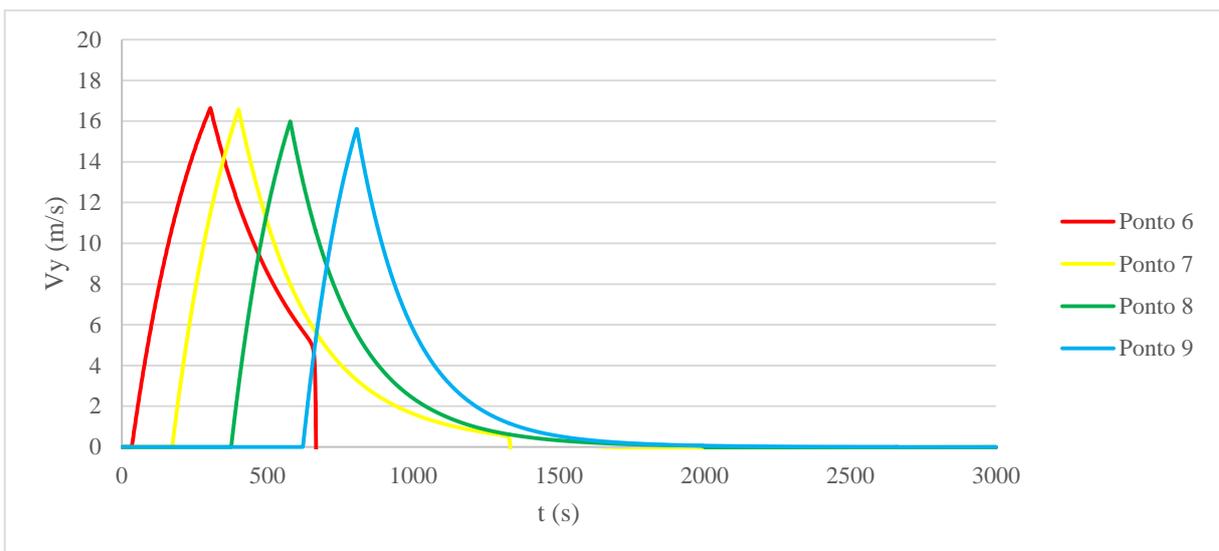


Figura 68: velocidade na direção y dos pontos 6 a 9.

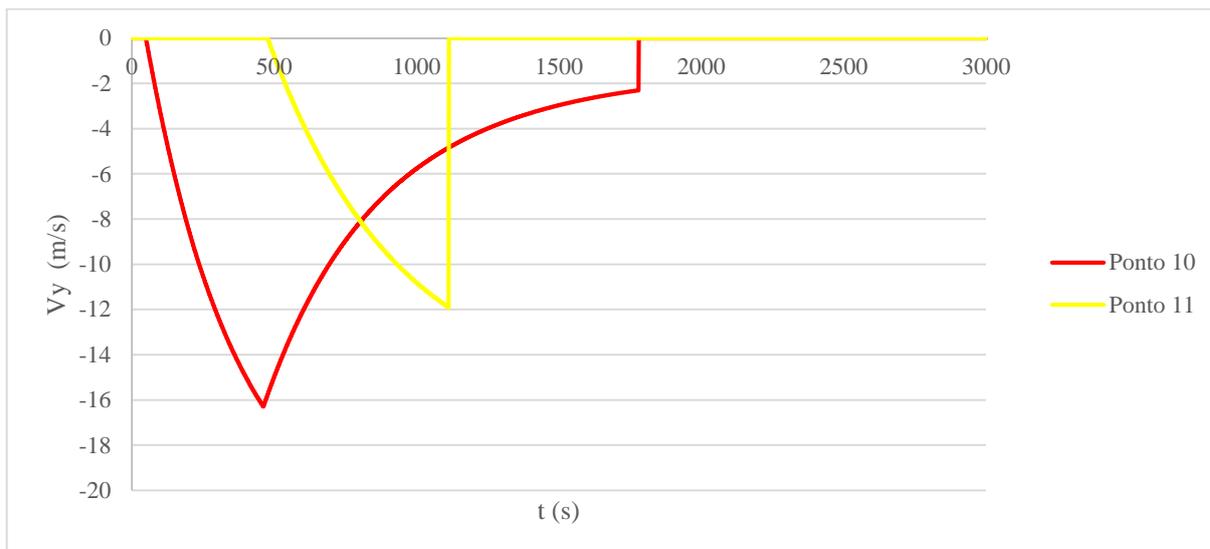


Figura 69: velocidade na direção y dos pontos 10 a 13.

## 7.5 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO DE UMA SÉRIE DE VELOCIDADES ANUAIS MÁXIMAS

Para determinar a distribuição de probabilidade da velocidade do vento, foram simulados 20 eventos TS por ano, por 50 anos, conforme roteiro apresentado no item 7.2. O ponto de interesse no qual a velocidade do vento era monitorada, se localizava no centro da região simulada, a 10 m de altura do solo. Sugere-se que a função de distribuição de probabilidade da velocidade máxima anual é melhor ajustada por uma distribuição de extremos do tipo I (Gumbel), conforme mostrado por Santos (1989) e, neste trabalho, indicado através do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, que apresentou a estatística máxima D igual a 0,05.

A simulação realizada encontrou, para a distribuição de probabilidade proposta, parâmetros de forma 3,70 m/s e de posição 25,07 m/s conforme ilustrado na figura 70.

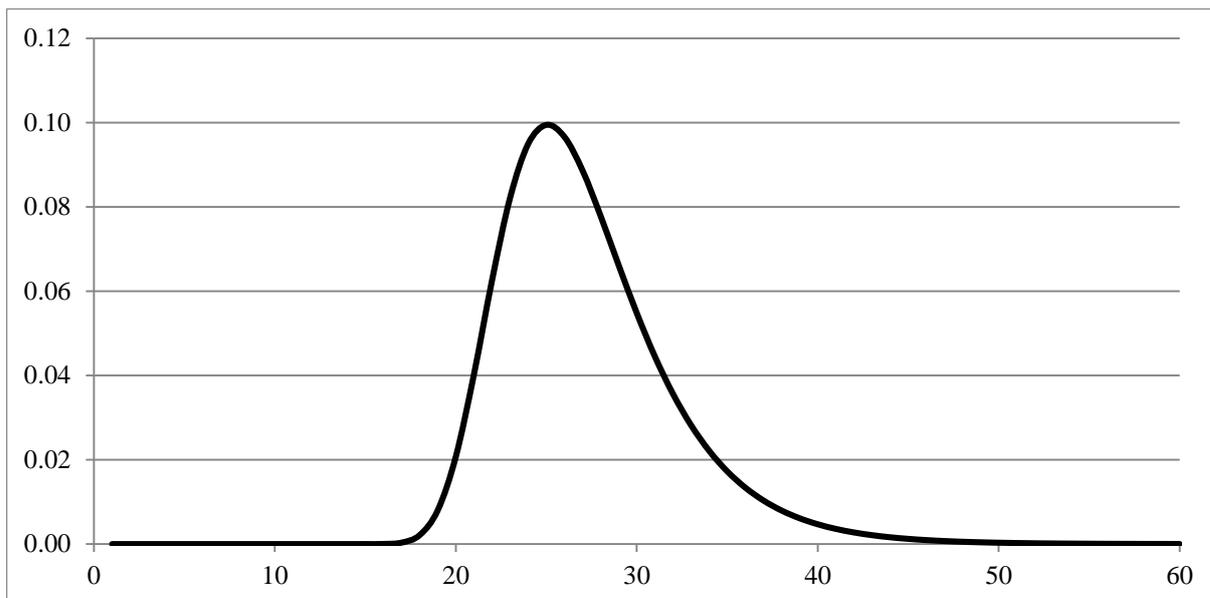


Figura 70: distribuição de probabilidade da série de velocidades anuais máximas simulada.

## 7.6 VALIDAÇÃO DO MODELO

Parte-se da premissa deste trabalho que, ao adaptar o modelo proposto anteriormente, os resultados obtidos devem ser compatíveis aos observados por Santos (1989). Na figura 71 é possível comparar a simulação com os valores observados. Adicionalmente, é possível inserir na comparação, trabalhos que utilizam o mesmo modelo, como Ponte Jr. (2005) e Ponte Jr. e Riera (2010), como pode ser observado na figura 72. Entende-se que os valores simulados são compatíveis com os resultados anteriores e o modelo proposto por este trabalho pode ser adotado.

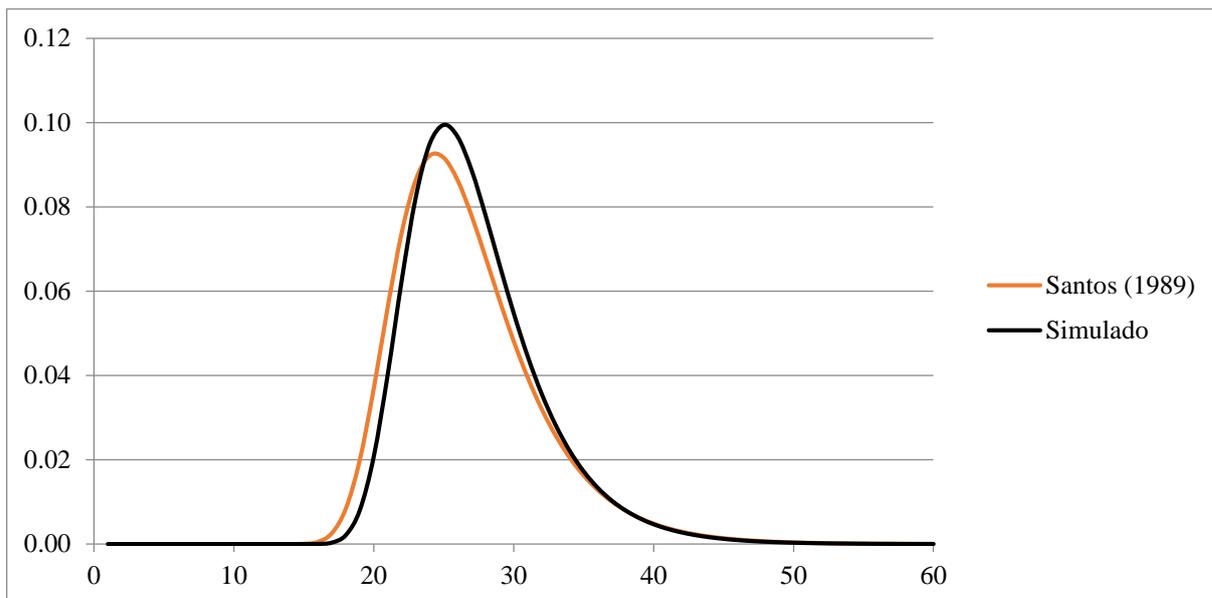


Figura 71: comparação entre resultados observados por Santos (1989) e a distribuição simulada.

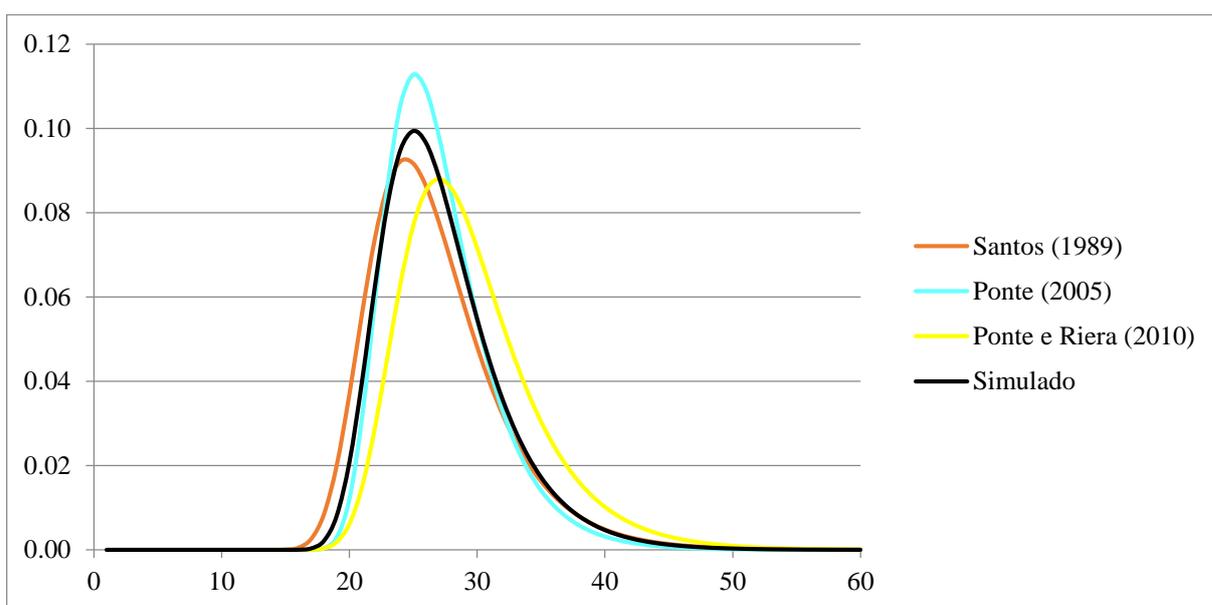


Figura 72: comparação entre resultados observados por Santos (1989), trabalhos anteriores e a distribuição simulada.

## 7.7 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO DE UMA TS COMBINADA COM VENTO DE FUNDO APLICADA A UM CABO

Para verificar as trações geradas em cabos por uma tormenta descendente, o vão representado na figura 73 foi modelado. Foram definidos cinco pontos de interesse para monitoramento das velocidades e das forças. A tabela 6 apresenta as coordenadas destes pontos.

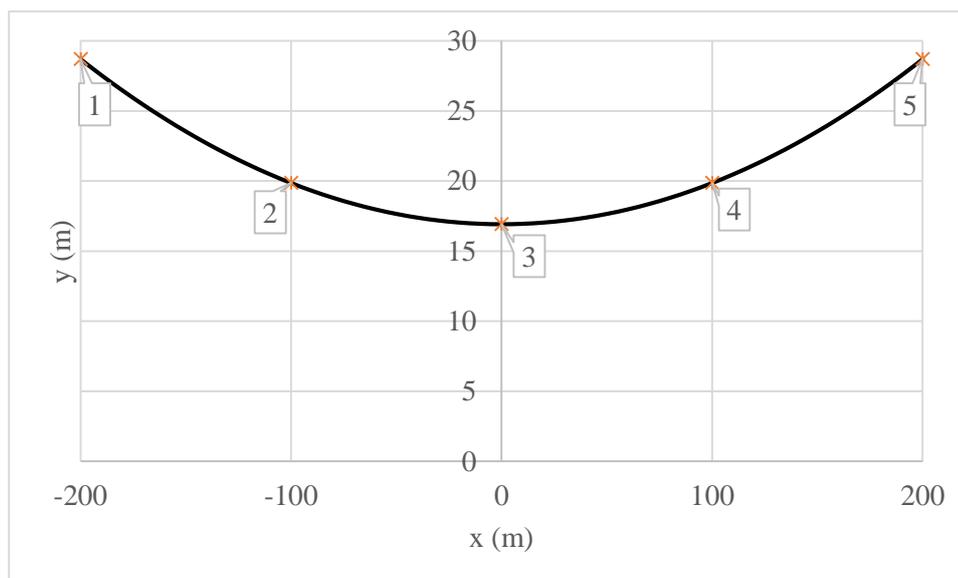


Figura 73: representação do cabo analisado, com os pontos de interesse destacados.

Tabela 6: coordenadas dos pontos de interesse.

Ponto	x (m)	y (m)	z (m)
1	-200	0	28,7
2	-100	0	19,9
3	0	0	16,99
4	100	0	19,9
5	200	0	28,7

O cabo utilizado neste vão foi o *Rail*, cujas propriedades estão apresentadas abaixo:

- a) tração de ruptura: 115630 N;
- b) peso unitário: 15,737 N/m;
- c) área transversal: 517,38 mm<sup>2</sup>;
- d) diâmetro: 29,61 mm.

A catenária representada na figura 73 foi calculada considerando a tração do cabo igual a 20% da tração de ruptura, com a aplicação do peso próprio

.Os parâmetros da TS e do vento de fundo, considerados no exemplo (representados na figura 74), estão descritos abaixo:

- coordenadas  $x_0$  do ponto de origem da TS: -3000 m;
- coordenadas  $y_0$  do ponto de origem da TS: -7000 m;
- altura da bigorna  $H_c$ : 11000 m;
- diferença de pressão  $\Delta p_0$ : 100 Pa;
- duração característica da tormenta T: 300s;
- raio do escoamento descendente na base da nuvem  $R_0$ : 700 m;
- velocidade do vento de traslado  $V_0$ : 8 m/s;
- a direção do vento de traslado  $\gamma$ :  $65^\circ$ .

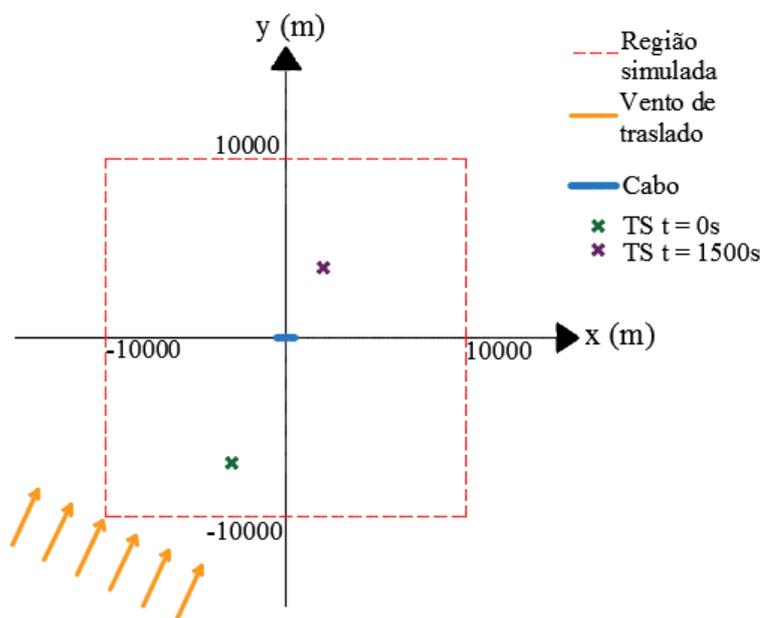


Figura 74: esquema do domínio da simulação.

Utilizando a metodologia descrita anteriormente, as velocidades geradas pelo evento nos pontos de interesse ao longo do tempo estão representadas entre as figuras 75 e 78. As forças calculadas ao longo do tempo estão representadas entre as figuras 79 e 82.

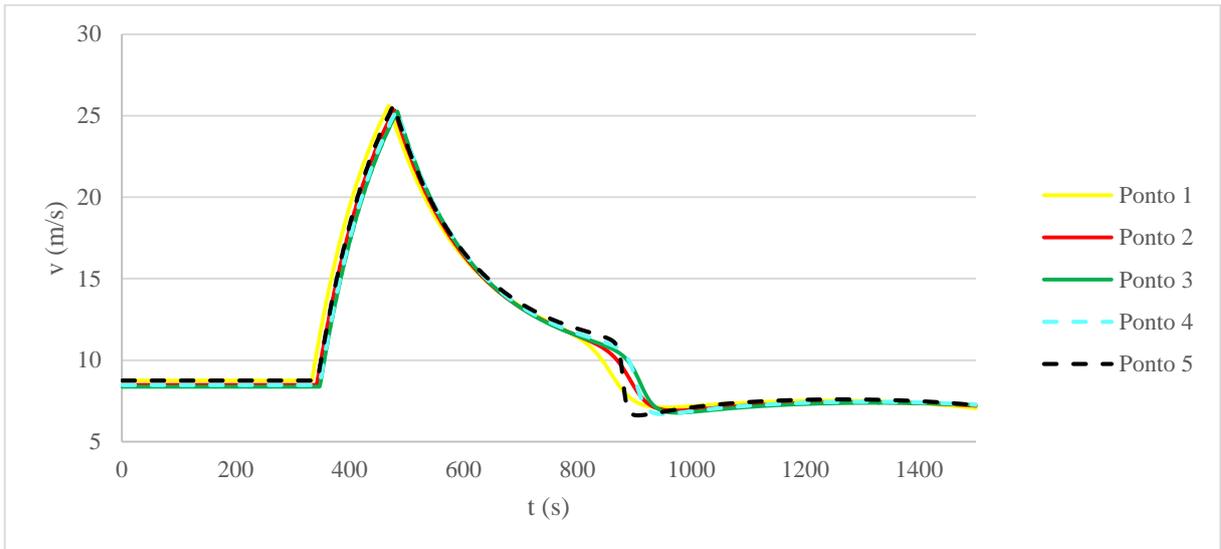
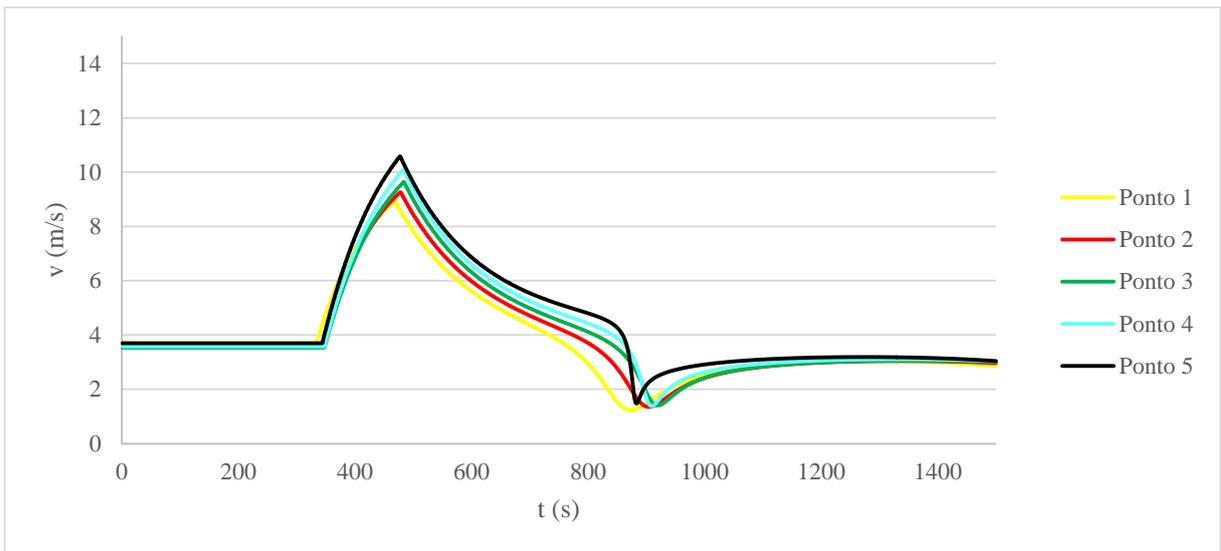


Figura 75: velocidade radial dos pontos de interesse.

Figura 76: velocidade na direção  $x$  dos pontos de interesse.

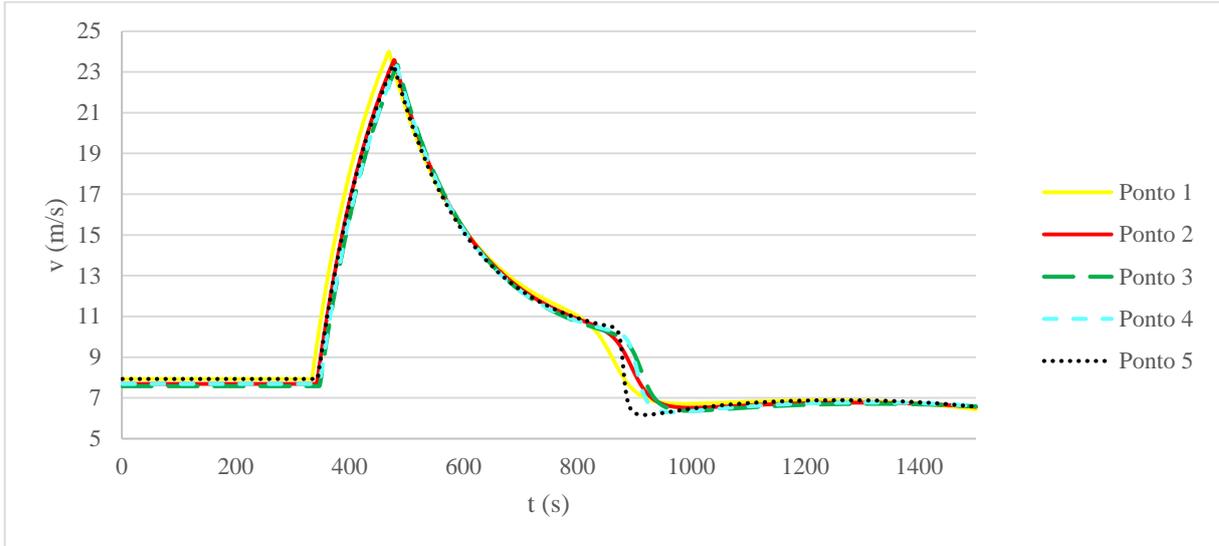


Figura 77: velocidade na direção y dos pontos de interesse.

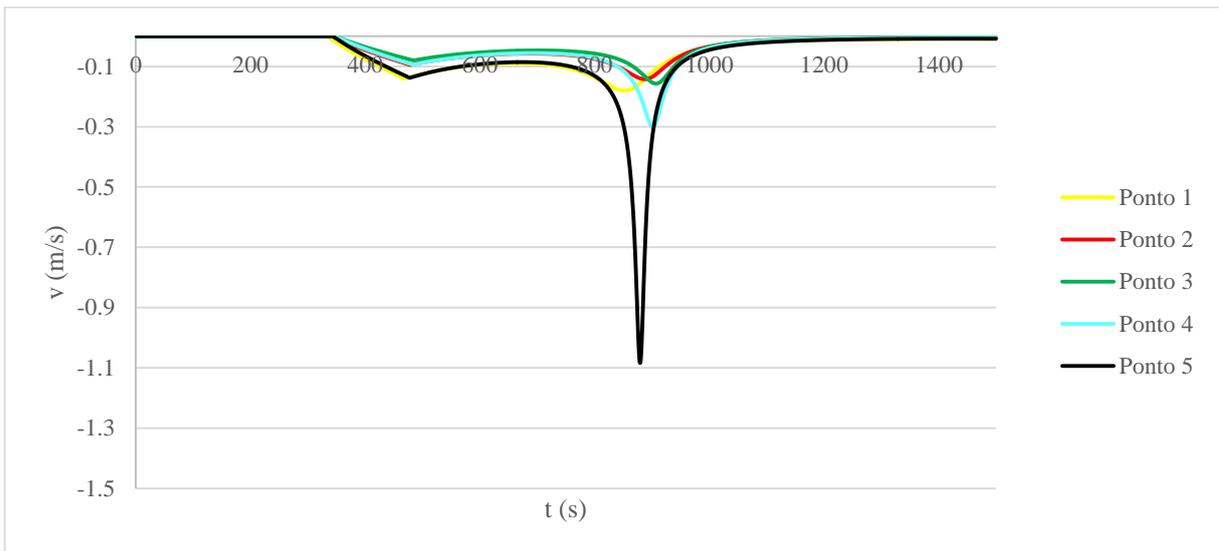


Figura 78: velocidade axial dos pontos de interesse.

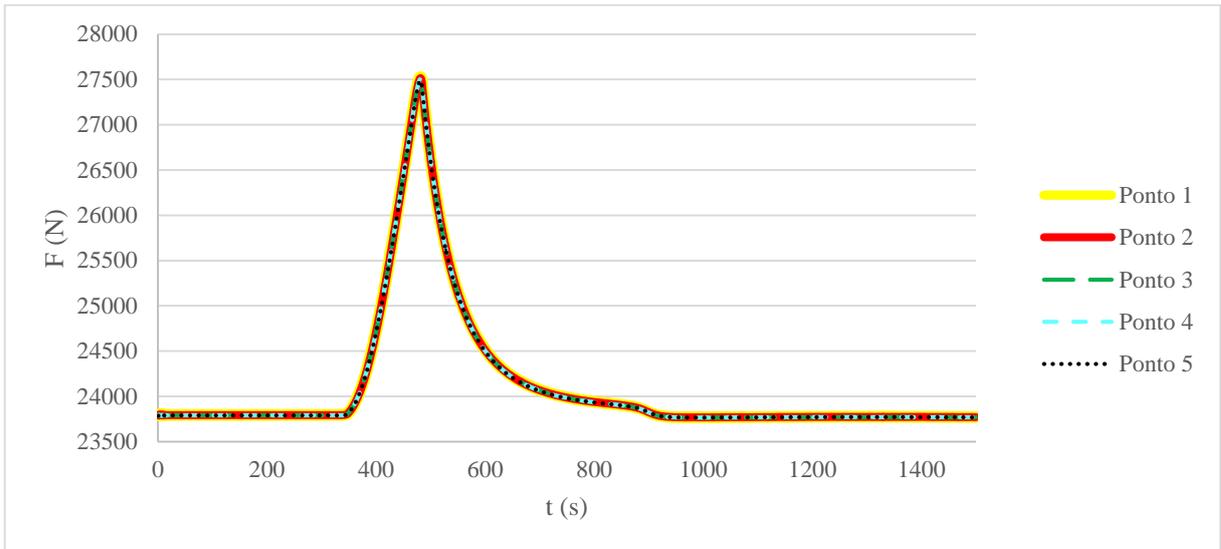


Figura 79: força na direção x dos pontos de interesse.

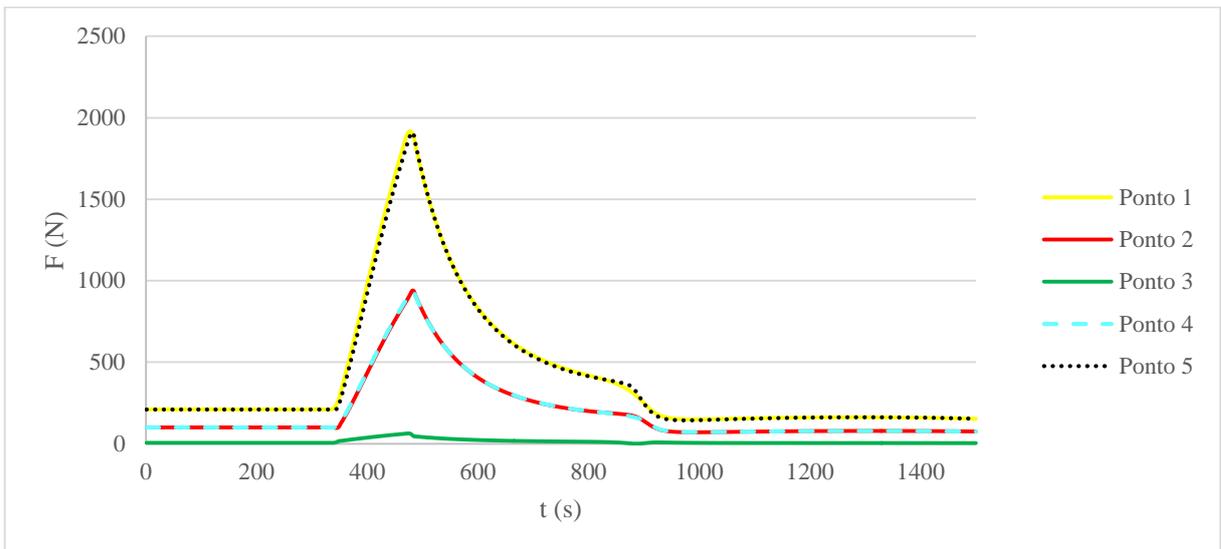


Figura 80: força na direção y dos pontos de interesse.

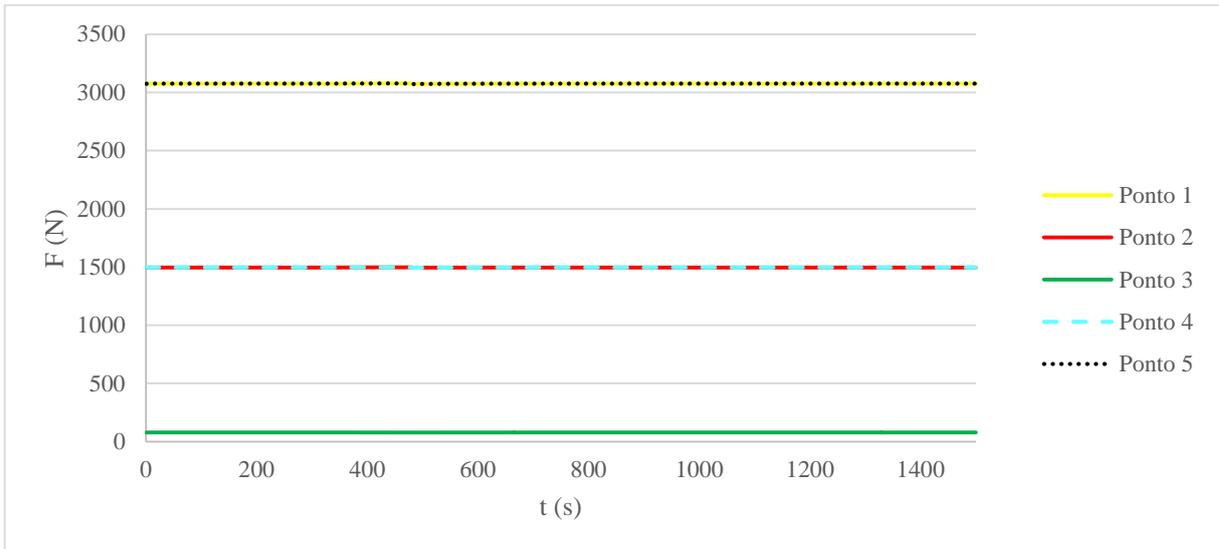


Figura 81: força na direção z dos pontos de interesse.

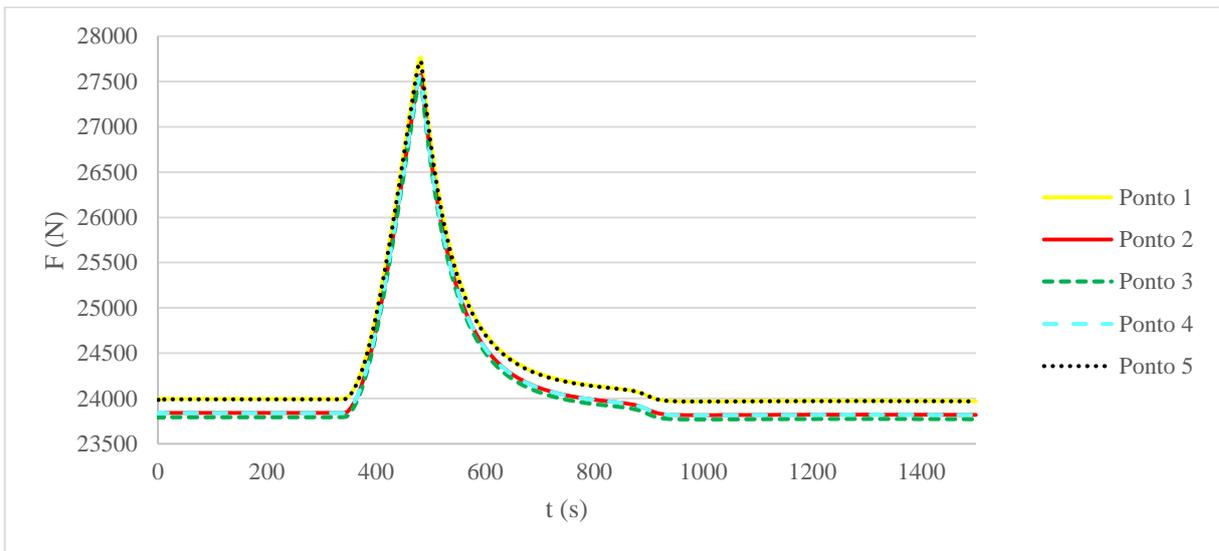


Figura 82: força resultante dos pontos de interesse.

## 8 RESULTADOS

Visando analisar a diferença na tração resultante máxima nos pontos de fixação das estruturas em diferentes combinações de TS e vento de traslado, realizou-se as simulações descritas abaixo.

### 8.1 SITUAÇÕES SIMULADAS

Conforme a metodologia descrita no capítulo 7, foram definidos os seguintes parâmetros (adotados pela grande probabilidade de ocorrência), fixos para todas as simulações:

- a)  $T = 300$  s;
- b)  $R_0 = 700$  m.

Após, foram definidas as combinações de velocidade do vento de traslado e velocidade tangencial da linha de corrente, ambas referentes a altura  $z = 10$  m acima do nível do solo. Para definir a velocidade da linha de corrente da TS, os parâmetros  $H_c$  e  $\Delta p_0$  foram fixados. Os valores adotados estão descritos na tabela 7.

Tabela 7: parâmetros e velocidades a 10 m do solo.

$H_c$ (m)	$\Delta p_0$ (Pa)	$V_t$ (m/s)	$V_o$ (m/s)
-	-	0	25
8500	40	10	15
9600	80	15	10
11200	120	20	5
12800	160	25	0

As combinações de velocidade de vento descritas acima, foram aplicadas em três casos de trajeto da TS, descritos na tabela 8 e ilustrados nas figuras 83, 84 e 85.

Tabela 8: coordenadas iniciais da TS e direção do vento de fundo para os três casos.

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

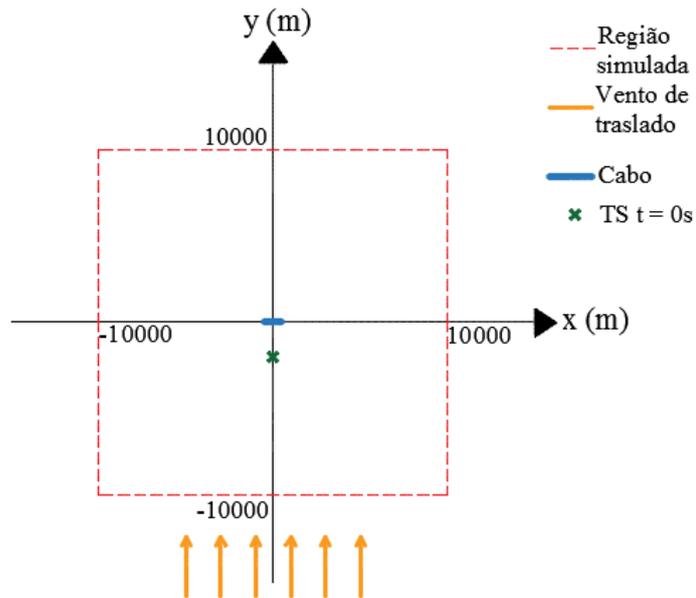


Figura 83: esquema do domínio do caso 1.

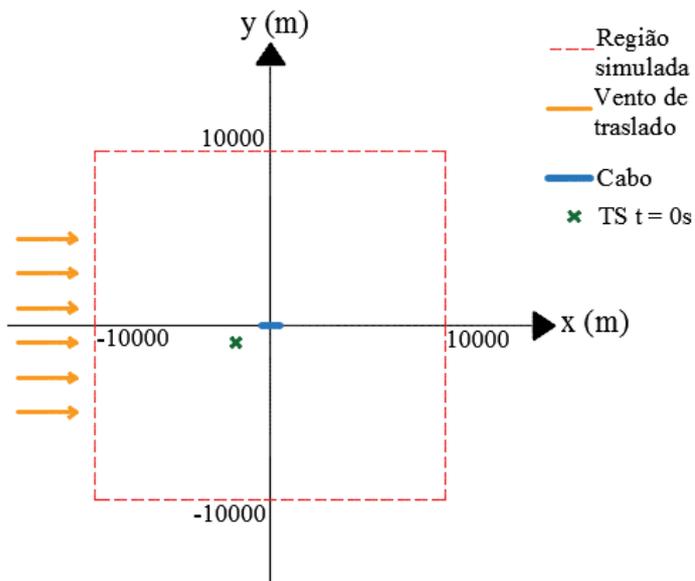


Figura 84: esquema do domínio do caso 2.

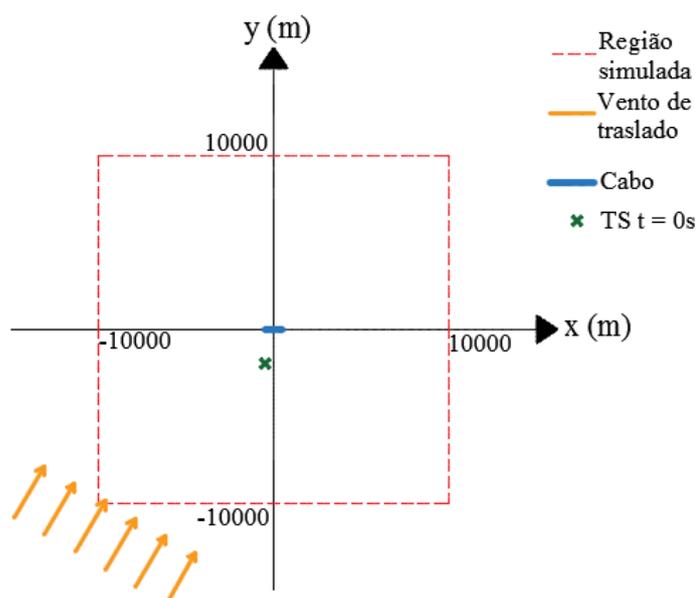


Figura 85: esquema do domínio do caso 3.

Para todos os casos, foram considerados, vãos de 300 m a 800 m, que mantivessem uma distância cabo-solo no centro do vão de 15 m na condição do cabo com 20% da tração de ruptura após a aplicação do peso próprio. O cabo utilizado para as simulações foi o cabo *Rail*, que tem suas propriedades descritas no item 7.7. Para cada vão adotado, foi calculado o coeficiente de redução  $G_L$  (aplicado no vento de fundo) através da equação 20. Os valores adotados estão descritos na tabela 9.

Tabela 9: coordenadas iniciais da TS e direção do vento de fundo para os três casos.

Vão (m)	$G_L$	Altura de fixação do cabo (m)
300	0,9761	22,7
400	0,9459	28,7
500	0,9153	36,4
600	0,8867	45,8
700	0,8625	56,9
800	0,8451	69,8

## 8.2 RESULTADOS

Os resultados obtidos para as simulações realizadas para os casos 1, 2 e 3 estão apresentados nas tabelas 10, 11 e 12 e figuras 86, 87 e 88, respectivamente.

Tabela 10: resultados da tração (N) para o caso 1.

$\frac{\text{Vão (m)}}{V_o + V_t \text{ (m/s)}}$	25+0	15+10	10+15	5+20	0+25
300	29579	25831	25644	26108	27472
400	29397	25509	25335	25847	27322
500	29267	25386	25230	25773	27308
600	29200	25367	25230	25796	27330
700	29213	25421	25297	25880	27482
800	29338	25539	25421	26010	27634

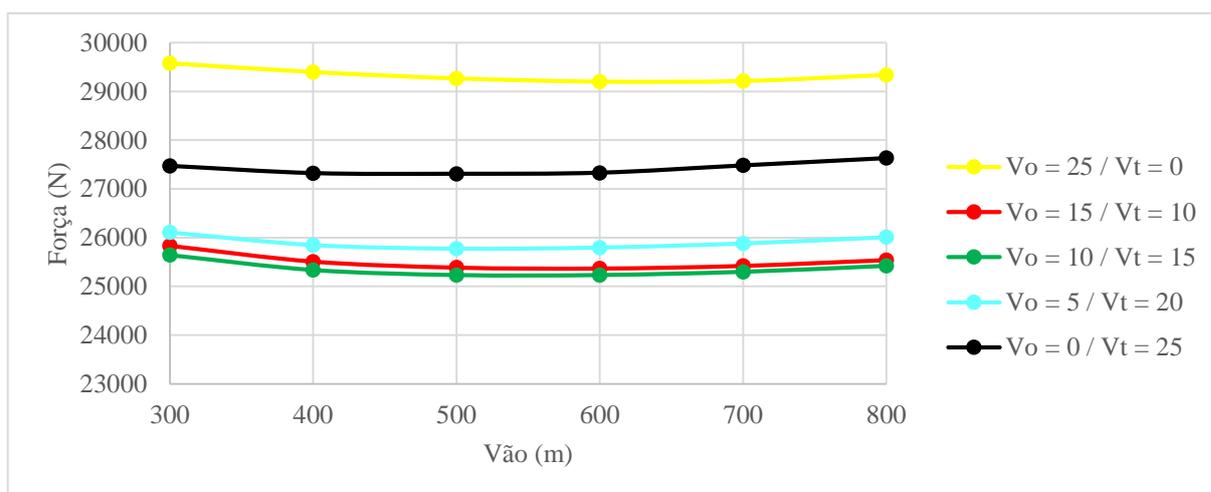


Figura 86: resultados da tração (N) para o caso 1.

Tabela 11: resultados da tração (N) para o caso 2.

$\frac{\text{Vão (m)}}{V_o + V_t \text{ (m/s)}}$	25+0	15+10	10+15	5+20	0+25
300	24382	24474	24920	25865	24495
400	24072	24128	24589	25587	24167
500	24031	24035	24490	25505	24097
600	24128	24068	24508	25521	24157
700	24319	24179	24597	25600	24298
800	24577	24348	24739	25726	24500

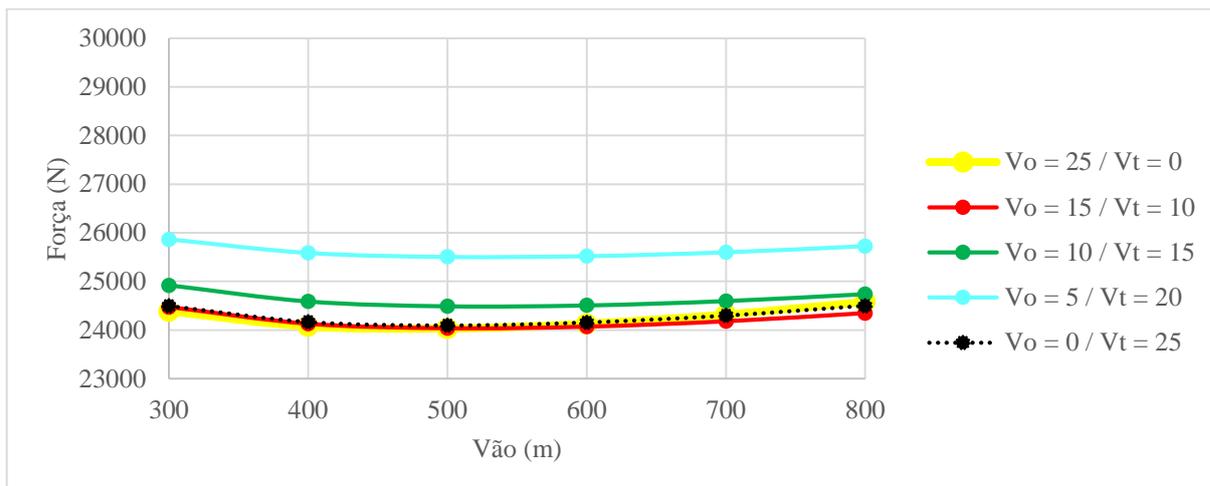


Figura 87: resultados da tração (N) para o caso 2.

Tabela 12: resultados da tração (N) para o caso 3.

Vão (m)	25+0	15+10	10+15	5+20	0+25
$\frac{V_o + V_t}{\text{(m/s)}}$					
300	27481	25362	25436	26042	27145
400	27218	25029	25120	25774	26973
500	27097	24913	25016	25695	26952
600	27071	24909	25019	25712	27012
700	27129	24978	25091	25792	27127
800	27282	25107	25216	25918	27284

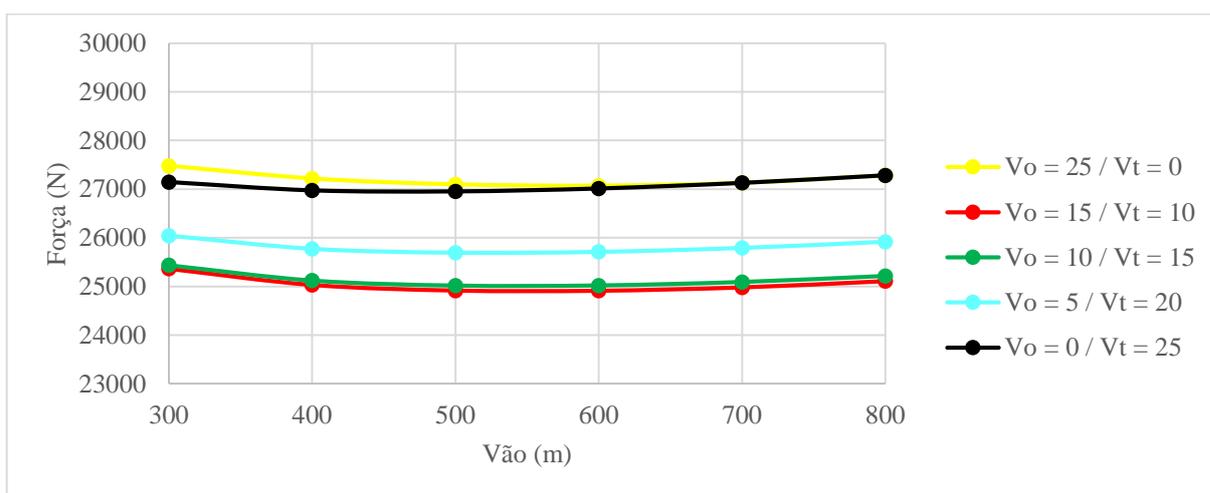


Figura 88: resultados da tração (N) para o caso 3.

### 8.3 ANÁLISE DAS FORÇAS HORIZONTAIS

Utilizando as simulações realizadas para o caso 1, as forças nos pontos de fixação do cabo na direção y, no instante de tração máxima, foram determinadas. Adicionalmente, foi determinada a velocidade média na direção y agindo neste instante para cada vão, na simulação na qual apenas o vento sinótico atua.

A partir da equação 18 é possível definir a equação 67 para a força no cabo na direção y, a partir das diretrizes da IEC 60826 (2003). A força que é transmitida dos cabos à torre é correspondente à metade do vão entre torres, portanto o comprimento do vão foi dividido por dois. Com estes dados foi definida uma equação para determinar um coeficiente de redução de pressão do vento (equação 68) e de velocidade (equação 69).

$$F_y = 0,613 \cdot \bar{V}_y^2 \cdot G_L' \cdot d \cdot \frac{L}{2} \quad (\text{equação 67})$$

$$G_L' = \frac{2 \cdot F_y}{0,613 \cdot \bar{V}_y^2 \cdot d \cdot L} \quad (\text{equação 68})$$

$$CRV = \sqrt{G_L'} \quad (\text{equação 69})$$

Onde:

$G_L'$  = coeficiente de redução da pressão de vento calculado;

$F_y$  = força transmitida à estrutura;

$\bar{V}_y$  = velocidade média na direção y;

d = diâmetro do cabo;

L = vão analisado;

CRV = coeficiente de redução da velocidade de vento calculado.

Os valores encontrados estão apresentados nas tabelas 13, 14 e 15 e nas figuras 89 e 90.

Tabela 13: valores do coeficiente  $G_L$  e da velocidade média para os vãos analisados.

Vão (m)	$G_L$	$\bar{V}_y$
300	0.9761	26.40
400	0.9459	26.61
500	0.9153	26.85
600	0.8867	27.09
700	0.8625	27.34
800	0.8451	27.60

Tabela 14: valores dos coeficientes calculados.

$V_o + V_t$ (m/s)	15+10			10+15		
Vão (m)	$F_y$	$G_L'$	CRV	$F_y$	$G_L'$	CRV
300	905.4	0.4772	0.6908	843.1	0.4443	0.6666
400	1193.0	0.4642	0.6813	1118.4	0.4352	0.6597
500	1475.6	0.4512	0.6717	1386.3	0.4239	0.6511
600	1752.4	0.4384	0.6621	1653.9	0.4137	0.6432
700	2028.6	0.4271	0.6535	1922.4	0.4047	0.6362
800	2320.0	0.4195	0.6477	2198.1	0.3975	0.6305

Tabela 15: valores dos coeficientes calculados.

$V_o + V_t$ (m/s)	5+20			0+25		
Vão (m)	$F_y$	$G_L'$	CRV	$F_y$	$G_L'$	CRV
300	985.1	0.5192	0.7205	1334.3	0.7033	0.8386
400	1310.8	0.5100	0.7142	1778.8	0.6921	0.8319
500	1635.3	0.5000	0.7071	2223.0	0.6798	0.8245
600	1958.2	0.4899	0.6999	2666.8	0.6671	0.8168
700	2281.0	0.4802	0.6930	3110.4	0.6548	0.8092
800	2600.9	0.4703	0.6858	3553.4	0.6426	0.8016

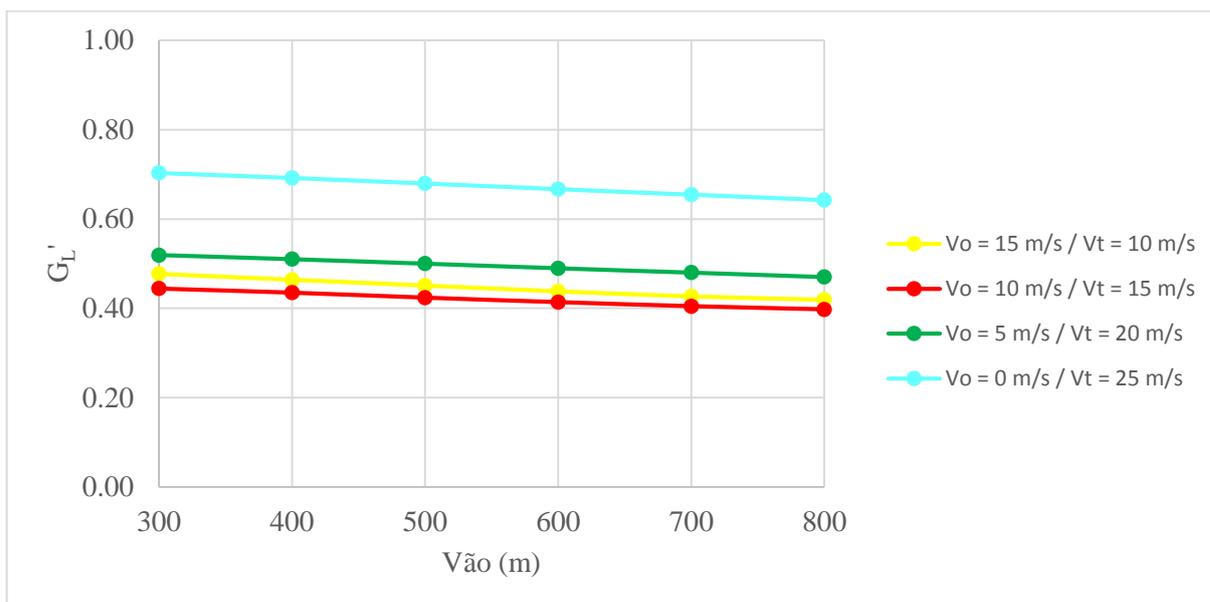


Figura 89: valores calculados para o coeficiente de redução de pressão de vento.

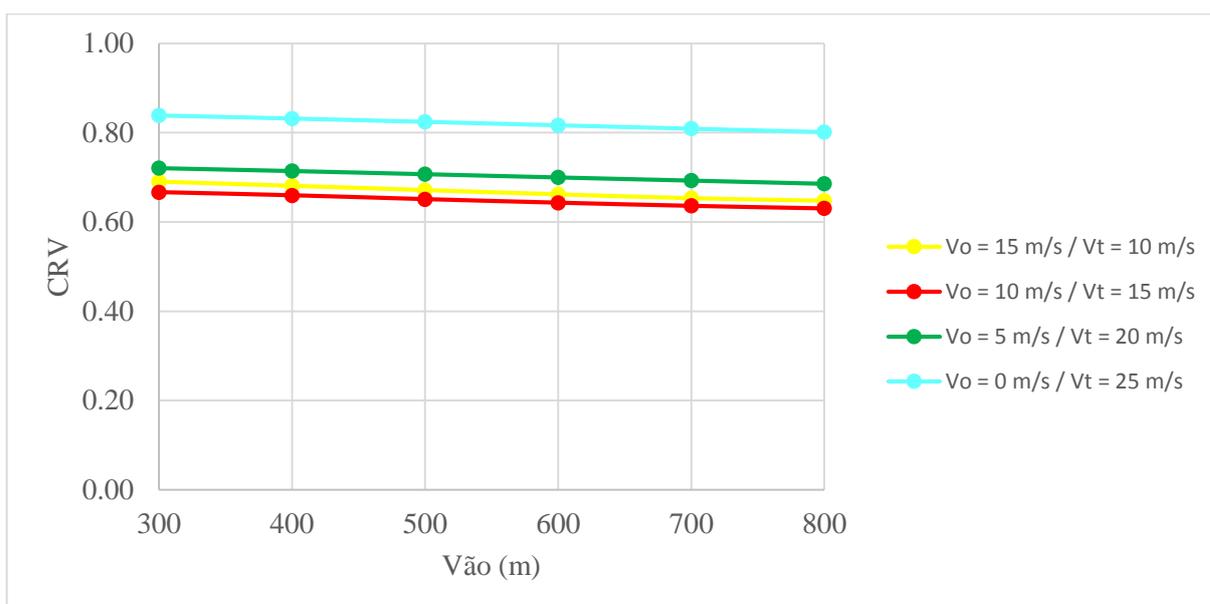


Figura 90: valores calculados para o coeficiente de redução de velocidade de vento.

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho era a análise das forças resultantes em cabos suspensos submetidos a carregamentos oriundos da combinação de ventos sinóticos e convectivos. Partindo do modelo apresentado por Ponte Jr. (2005) e Ponte Jr. e Riera (2010), foram propostas alterações e compatibilizações para que fosse possível aplica-lo ao problema proposto. O modelo inicial é baseado na equação de Bernoulli para o cálculo da velocidade tangencial das linhas de corrente da TS. Nesta velocidade, posteriormente, é aplicada uma função empírica que introduz a variação da velocidade com o tempo. Foi inserida, neste modelo, a limitação da área de ação da tormenta e da limitação vertical do fluxo do vento. Foi considerado o desenvolvimento de uma camada limite para o escoamento de eventos TS, resultando em uma representação mais fiel do campo de velocidades gerado pelos eventos. Adicionalmente, foi considerado o conceito de velocidade efetiva, que considera que os efeitos da TS chegam em pontos diferentes do espaço em instantes de tempo diferentes.

Com o modelo adaptado para o problema deste trabalho, foi possível analisar o efeito de TS isoladas e de TS combinadas com um vento de traslado em estruturas de grande extensão horizontal, como são os cabos de linhas de transmissão. Através da aplicação do método de Monte Carlo, foi possível, também, realizar uma análise probabilística da velocidade do vento, conforme realizado em trabalhos anteriores. Adaptar uma rotina do LDEC para o cálculo da tração nos cabos viabilizou a análise da variação das forças geradas nos cabos ao longo dos eventos analisados. Com estas simulações, chegou-se nas conclusões expostas a seguir.

### 9.1 CONCLUSÕES

Analisando os resultados apresentados no item 7.3, considera-se que as alterações propostas ocasionaram uma representação mais próxima dos perfis verticais de velocidades consolidados em outros modelos ao limitar verticalmente o escoamento e ao definir o desenvolvimento da camada limite. Entende-se que ainda é possível aprimorar o modelo considerando que, ao longo da área de ação, a velocidade tangencial máxima não é constante.

Ao analisar a distribuição gerada na simulação da série de velocidades máximas ao longo de 50 anos e comparar a curva obtida com os dados observados por Santos (1989) e com as curvas obtidas em trabalhos anteriores, concluiu-se que o modelo apresentado apresenta um bom ajuste

com todas as curvas comparadas. Esta observação é válida ao considerar que os dados observados são suficientemente representativos para validar o modelo, conforme citado nos pressupostos do trabalho.

No item 7.7, ao realizar a simulação considerando um cabo, é possível visualizar que a presença de uma TS gera uma curva distinta da variação da velocidade do vento para cada ponto. A importância da consideração da velocidade efetiva pode ser observada neste exemplo, no qual é perceptível que o valor máximo das velocidades ocorre em instantes distintos para cada ponto considerado. Ao considerar estas diferenças no cálculo das forças devido ao vento que agem nos cabos, o valor máximo da pressão de vento não é aplicado simultaneamente em todos os pontos, o que representa uma situação mais próxima da real.

Considera-se que os resultados obtidos e apresentados no capítulo 8 estão de acordo com o esperado, fornecendo um modelo para a análise de diferentes casos de composição de ventos. A hipótese analisada de que a velocidade do vento a 10 m de altura do solo é igual a 25 m/s foi uma sugestão para comparação. Uma análise com outras hipóteses na distribuição das velocidades pode ser realizada, considerando que a maior diferença nas velocidades de ventos sinóticos e convectivos se encontra próximo ao solo.

Deve-se ressaltar que as análises realizadas contemplam apenas os efeitos dos casos mais desfavoráveis em relação à velocidade de vento. Foi analisado o caso de eventos extremos, sem uma abordagem probabilística da frequência da ocorrência dos eventos e de suas combinações no local da linha.

Apesar de que, nos casos analisados, a simulação que gerou carregamentos mais severos foi o caso de um evento sinótico atingir a LT normal ao eixo dos cabos o fato do campo de velocidades gerado por um evento convectivo ser axissimétrico sugere que sua presença pode aumentar a frequência de carregamentos intermediários. Estes carregamentos podem não comprometer estruturalmente a LT, mas podem causar desligamentos.

## 9.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros têm-se:

- a) um refinamento do modelo pode ser realizado, considerando variação da velocidade tangencial da linha de corrente com a distância ao centro da tormenta;
- b) análise de outros casos de combinação de eventos, além dos abordados neste trabalho;
- c) um tratamento probabilístico da análise das forças resultantes dos cabos;
- d) novas análises, dos mesmos casos abordados neste trabalho, com uma diferente hipótese de normalização da velocidade de combinação dos eventos;
- e) com base no modelo aqui apresentado, elaborar sugestões de consideração de ventos do tipo TS em linhas de transmissão mais aprimoradas que a atual, feitas através de hipóteses de carga específicas.

## REFERÊNCIAS

- AHRENS, C. D. **Meteorology today**: an introduction to weather, climate and the environment. 9. ed. Belmont: Brooks/Cole, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5422**: Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Rio de Janeiro, 1985.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5419**: Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2005.
- BARRY, R. G. CHORLEY, R. J. **Atmosphere, weather and climate**. 8. ed. Londres: Routledge, 2003.
- BLESSMANN, J. **O vento na engenharia estrutural**. Porto Alegre: Ed. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.
- BROOKS, H. E. LEE, J. W. CRAVEN, J. P. **The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data**, Atmospheric Research, Elsevier, 67-68, 73-94, 2003.
- CAMARGO, O. A. **Atlas eólico do Rio Grande do Sul**, Secretaria de Energia, Minas e Comunicações. Porto Alegre, 2002.
- CARACENA, F. HOLLE, R. L. DOSWEELL III, C. A. **Microbursts: a handbook for visual identification**, NOAA, National Severe Storm Lab. Norman, 2000.
- CHAY, M. T. ALBERMANI, F. WILSON, R. **Numerical and analytical simulation of downbursts wind loads**, Engineering Structures, Elsevier, 28, 240-254, 2006.
- CHAY, M. T. ALBERMANI, F. HAWES, H. **Wind loads on transmission lines structures in simulated downbursts**, First World Congress on Asset Management. Gold Coast, Australia. 2006.
- CIGRÉ. **Report on current practices regarding frequencies and magnitude of high intensity winds** (CIGRÉ Technical Brochure No. 256), Paris, 2004.
- \_\_\_\_\_. **How overhead lines respond to localized high intensity winds** (CIGRÉ Technical Brochure No. 350), Paris, 2008.
- FOX, R. W. McDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.
- FUJITA, T. T. **The downburst: microburst and macroburst**, University of Chicago, 1985.
- \_\_\_\_\_. **Downbursts: meteorological features and wind fields characteristics**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 36, p. 75-86, 1990.

HJELMFELT, M. R. **The microbursts of 22 June 1982 in JAWS**, Journal of the Atmospheric Sciences, American Meteorological Society, 44, 1646-1665, 1987.

\_\_\_\_\_. **Structure and life cycle of microburst outflows observed in Colorado**, Journal of Applied Meteorology, American Meteorological Society, 27, 900-927, 1988.

HOLMES, J. D. OLIVER, S. E. **An empirical model of a downburst**, Engineering Structures, Elsevier, 22, 1167-1172, 2000.

HOLMES, J.D. **Recent developments in the specification of wind loads on transmission lines**. Journal of Wind & Engineering, V. 5, p. 8-18, 2008.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, **IEC 60826/2003**: Design criteria of overhead transmission lines. [S. 1.], 2003.

KAMINSKI JR., J. **Incertezas de modelo na análise de torres metálicas treliçadas de linhas de transmissão**. 2007. 361 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

KIESSLING, F. NEFZGER, P. NOLASCO, J. F. KAINZ, U. **Overhead power lines: planning, design, construction**. Berlin: Springer, 2003.

LABEGALINI, P. R. LABEGALINI, J. A. FUCHS, R. D. ALMEIDA, M. T.. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. 2. ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher LTDA., 1992.

LOMBARDO, F. T. SMITH, D. A. SCHROEDER, J. L. MEHTA, K. C. **Thunderstorm characteristics of importance to wind engineering**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 125, 121-132, 2014.

FADEL MIGUEL, L.F RIERA, J.D **Loads induced on tall structures by thunderstorm winds in temperate latitudes**. International Conference on Structural Safety and Reliability. Nova York, EUA, 2013.

OLIVER, S.E. MORIARTY, W.W. HOLMES, J. D. **Risk model for design of transmission line systems against thunderstorm downburst winds**. Engineering Structures, 22(9), 1173-1179, 2000.

OSEGUERA, R. M. BOWLES, R. L. **A simple, analytic 3-dimensional downburst model based on boundary layer stagnation flow**, NASA technical memorandum 100632. Julho, 1988.

PONTE JR, J., **Modelagem e Simulação do Campo de Velocidades do Vento em Tormentas Elétricas**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia). Promec, Universidade Federal do Rio Grande do Sul., Porto Alegre, RS, Brasil.

PONTE JR, J. RIERA, J. D. **Simulation of extreme wind series caused by thunderstorms in temperate latitudes**, Structural Safety, Elsevier, 32, 231-237, 2010.

RIERA, J. D. and ROCHA, M. M. **Load definition for wind design and reliability assessments; extreme wind climate**, Wind Effects on Buildings and Structures, (J. D. Riera & A. G. Davenport, Editors), A. A. Balkema, Rotterdam, 1998.

SANTOS, M., **Regionalização das velocidades extremas e temperaturas do vento no Centro-Sul do Brasil**. 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SAVORY, E. PARKE, G. A. R. ZEINODDINI, M. TOY, N. DISNEY, P. **Modelling of tornado and microburst-induced wind loading and failure of a lattice transmission tower**. Engineering Structures, 23(4), 365-375, 2001.

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, 42(1), 71-89, 2005.

VICROY, D. D. **A simple, analytical, axisymmetric microburst model for downdraft estimation**, NASA technical memorandum 104053, 1991.

\_\_\_\_\_. **Assessment of microburst models for downdraft estimation**, Journal of Aircraft, Aerospace Research Central, 29, 1043-1048, 1992

WHITE, J. **Mecânica dos fluidos**. 4.ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2002.

WILSON, J. W. ROBERTS, R. D. KESSINGER, C. MCCARTHY, J. **Microburst wind structure and evaluation of doppler radar for airport wind shear detection**, Journal of Climate and Applied Meteorology, American Meteorological Society, 23, 898-915, 1984.

WOOD, G.S. KWOK, K.C.S MOTTERAM, N.A. FLETCHER, D.F. **Physical and numerical modelling of thunderstorm downbursts**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89, 535-552, 2001.

ZHU, S. ETKIN, B. **Model of the wind field in a downburst**, Journal of Aircraft., 22(7), 595-601, July 1985.

## APÊNDICE 1

```

%programa de simulação de uma TS baseado na rotina
% Criado por Ponte(2005) e adaptado por Miguel (2013) e Gheno (2014)
%coleta de dados de velocidade em pontos de interesse

clear
clc

%diferencial de distancia para ser utilizado na determinação das
%velocidades
dx=.0001;

% definição de quais tormentas serão combinadas com eps
% nts total de tormentas
% cjt conjectura sobre eps
cjt=0.02;
nts=an*nt;
ps=rand(1,nts);
for ii=1:nts
    if ps(ii)<=cjt
        ps(ii)=1;
    else
        ps(ii)=0;
    end
end

%coordenadas dos pontos de interesse
xc=[0];
yc=[0];
zc=[10];

% gera altura do solo a base da nuvem ( H )
% alterado para distribuição normal, conforme Ponte e Riera (2010)
aa=rand(1,1);
H=icdf('Normal',aa,11000,500);
% gera bases para definição de coordenadas
aa= rand(1,1);
bb= rand(1,1);
% gera coordenada do ponto de origem da TS
xo=aa*20000-10000;
yo=bb*20000-10000;
% gera diferença de pressão (Gumbel)
aa=rand(1,1);
% parâmetro de forma BETA e TETA para diferença de pressão
TETA= 50;
BETA = 100;
dp=(-1*log((-1*log(aa))) *TETA+BETA);

% gera Duração característica ( T ) ( Gumbel)
T=0;
while T<=1
    aa=rand(1,1);
    % parâmetros ALFA e GAMA
    GAMA = 300;
    ALFA = 150;
    T=ALFA*(-1*log(-1*log(aa)))+GAMA;
end

```

```

%Calculo diametro base da nuvem
aa=rand(1,1);
if aa<(4/17)
    D0 = (2720000*aa)^.5 + 600;
else
    D0 = 4000 - (8840000*(1-aa))^0.5;
end

R0=D0/2;

%Calculo rmax
hbase=100;
rmax=(R0^2*H/hbase)^.5;

% Cálculo da velocidade do vento de translado
% (Weibull) vento fundo
% (Gumbel) EPS
aa = rand(1,1);
if ps(cont)== 0
    vo=3*((-1*log(1-aa))^(1/2.5));
else
    vo=3.0 *(-1*log(-1*log(aa)))+21.5;
end

% gera direção do vento de fundo
gm=rand(1,1)*360;
gama=gm*pi/180;

for p=1:length(zc)
    % gera velocidade ( v )
    %h6 define altura do ponto de referência
    h6=zc(p);
    %% EXPRESSÃO DA VELOCIDADE TANGENCIAL
    beta=0.000095;
    massair=1.23;
    v=((2*dp)/(H*massair*beta)).^0.5.*(exp(beta*H)-exp(beta*h6)).^0.5);

    % cálculo das coordenadas do centro das tormentas ts após o tempo t
    k1=fix(T);
    k2=5*k1;
    k =[1:1:k2];
    %zz calculo da correção do perfil
    zz=(h6/10)^0.085;
    % calculo do translado
    xt=xo+vo*zz*k*cos(gama);
    yt=yo+vo*zz*k*sin(gama);
    % xr=x(j) - xt; yr=y(j)- yt;
    xr=xc(p)-xt;
    yr=yc(p)-yt;
    rr=(xr.^2+ yr.^2).^0.5;

    % determinação do vetor velocidade com flutuações
    for kk=1:k2
        dt=0;
        hcl=1;

        if rr(kk)>(R0+dx)

```

```

        Vef = R0^2/(2*hbase) * (log(rr(kk)^2-R0^2)-log((R0+dx)^2-
R0^2))/(rr(kk)-(R0+dx));
        dt = round((rr(kk)-(R0+dx))/Vef);
        Re=v*(rr(jj)-(R0+dx))/(1.46*10^-5);
        hcl=(0.382*(rr(jj)-(R0+dx)))/Re^.2;
    end
    if kk<=dt
        vT(kk) = 0;
    else
        if (kk-dt)<=T
            if hcl>h6
                vT(kk)=(h6/hcl)^0.085*1.58*v*(1-exp(-(kk-dt)/T));
            else
                vT(kk)=1.58*v*(1-exp(-(kk-dt)/T));
            end
        else
            if hcl>h6
                vT(kk)=(h6/hcl)^0.085*v*(exp(-(kk-dt)-T)/T);
            else
                vT(kk)=v*(exp(-(kk-dt)-T)/T);
            end
        end
    end
end
end

vt1=vT;

% calcula média móvel sobre tres segundos
for jota=1:k2
    if jota >=3
        jota1=jota-1;
        jota2=jota-2;
        vt(jota)=(vt1(jota)+vt1(jota1)+vt1(jota2))/3;
    else
        vt(jota)=vt1(jota);
    end
end

% Limita ação TS
for kk=1:k2
    zmax(kk)=0.1*H*R0^1.2/(rr(kk))^1.2;
    if rr(kk)>R0
        if zmax(kk)<h6
            vt(kk)=0;
        elseif rr(kk)>3*rmax
            vt(kk)=0;
        end
    end
end

%Cálculo das componentes de velocidade
va = - vt.*1.2.*((h6^2)* rr.^2.4)./((1.44.*(h6^2)* rr.^2.4 +
rr.^4.4)).^0.5;
vr = vt.* ((rr.^4.4)./ (1.44.*(h6^2)* rr.^2.4 + rr.^4.4)).^0.5;
vx = vr.* xr./ rr;
vy = vr.* yr./ rr;
vz = va;

```

```
%Cálculo das componentes de velocidade TS + traslado  
wy = vy+ vo*zz*sin(gama);  
wx = vx+ vo*zz*cos(gama);  
wr=( wy.^2+ wx.^2).^0.5;  
wz=( vz.^2).^0.5;  
wt=(wx.^2+ wy.^2+ wz.^2).^0.5;  
end
```

## APÊNDICE 2

```

% programa de simulação
% Criado por Ponte(2005) e adaptado por Miguel (2013) e Gheno (2014)

clc
clear

% Definir número de tormentas elétricas ( nt )na região de Porto Alegre
nt=20;
% Definir número de anos ( AN ) a ser analisado
an=50;

%diferencial de distancia a ser utilizado nos cálculos
dx = .1;

% definição de quais tormentas serão combinadas com eps
% nts total de tormentas
% cjt conjectura sobre eps
cjt=0.02;
nts=an*nt;
ps=rand(1,nts);
for ii=1:nts
    if ps(ii)<=cjt
        ps(ii)=1;
    else
        ps(ii)=0;
    end
end

cont=0;
for ii=1:an
    for jj=1:nt
        cont=cont+1;
        % gera altura do solo a base da nuvem ( H )
        % alterado para distribuição normal, conforme Ponte e Riera (2010)
        aa=rand(1,1);
        H=icdf('Normal',aa,11000,500);
        % gera bases para definição de coordenadas
        aa= rand(1,1);
        bb= rand(1,1);
        % gera coordenada do ponto de origem da TS
        xo=aa*20000-10000;
        yo=bb*20000-10000;
        % gera diferença de pressão (Gumbel)
        aa=rand(1,1);
        % parâmetro de forma BETA e TETA para diferença de pressão
        TETA= 50;
        BETA = 100;
        dp=(-1*log((-1*log(aa))) *TETA+BETA);

        % gera velocidade ( v )
        % h6 define altura do ponto de referência
        h6=10;
        %velocidade calculada conforme Gheno (2014);
        beta=0.000095;
        massair=1.225;
    end
end

```

```

v=((2*dp)/(H*massair*beta).^0.5).*(exp(beta*H)-
exp(beta*h6)).^0.5);

% gera Duração característica ( T ) ( Gumbel)
T=0;
while T<=1
    aa=rand(1,1);
    % parâmetros ALFA e GAMA
    GAMA = 300;
    ALFA = 150;
    T=ALFA*(-1*log(-1*log(aa)))+GAMA;
end

%Calculo diametro base da nuvem
aa=rand(1,1);
if aa<(4/17)
    D0 = (2720000*aa)^.5 + 600;
else
    D0 = 4000 - (8840000*(1-aa))^0.5;
end

R0=D0/2;

%Calculo rmax
hbase=100;
rmax=(R0^2*H/hbase)^.5;

% Cálculo da velocidade do vento de translado
% (Weibull) vento fundo
% (Gumbel) EPS
aa = rand(1,1);
if ps(cont)== 0
    vo=3*((-1*log(1-aa))^(1/2.5));
else
    vo=3.0 * (-1*log(-1*log(aa)))+21.5;
end

% gera direção do vento de fundo
gm=rand(1,1)*360;
gama=gm*pi/180;

% ***** Tormentas ts *****
% número de tormentas nt
% diferença de pressão dp
% vetor velocidade tangencial a dez metros v(i)
% coordenadas de origem das tormentas ts x0(i) y0(i)
% vetor duração da TS k(i)
% ***** Vento de translado *****
% vetor tipo de vento ps ( i )
% vetor direção vento de translado gama (i)
% vetor velocidade de vento de translado vo (i)

k1=fix(T);
k2=5*k1;
k =[1:1:k2];

%zz calculo da correção do perfil

```

```

zz=(h6/10)^0.085;
% calculo do translado
xt=xo+vo*zz*k*cos(gama);
yt=yo+vo*zz*k*sin(gama);
xr=0-xt;
yr=0-yt;
rr=(xr.^2+ yr.^2).^0.5;

% modulação da velocidade tangencial em função do tempo
for kk=1:k2
    dt=0;
    hcl=1;

    if rr(kk)>(R0+dx)
        Vef = R0^2/(2*hbase) * (log(rr(kk)^2-R0^2)-log((R0+dx)^2-
R0^2))/(rr(kk)-(R0+dx));
        dt = round((rr(kk)-(R0+dx))/Vef);
        Re=v*(rr(jj)-(R0+dx))/(1.46*10^-5);
        hcl=(0.382*(rr(jj)-(R0+dx)))/Re^1.2;
    end
    if kk<=dt
        vT(kk) = 0;
    else
        if (kk-dt)<=T
            if hcl>h6
                vT(kk)=(h6/hcl)^0.085*1.58*v*(1-exp(-(kk-dt)/T));
            else
                vT(kk)=1.58*v*(1-exp(-(kk-dt)/T));
            end
        else
            if hcl>h6
                vT(kk)=(h6/hcl)^0.085*v*(exp(-(kk-dt)-T)/T);
            else
                vT(kk)=v*(exp(-(kk-dt)-T)/T);
            end
        end
    end
end
end

vt1=vT;

% calcula média móvel sobre tres segundos
for jota=1:k2
    if jota >=3
        jota1=jota-1;
        jota2=jota-2;
        vt(jota)=(vt1(jota)+vt1(jota1)+vt1(jota2))/3;
    else
        vt(jota)=vt1(jota);
    end
end

% Limita ação TS
for kk=1:k2
    zmax(kk)=0.1*H*R0^1.2/(rr(kk))^1.2;
    if rr(kk)>R0
        if zmax(kk)<h6
            vt(kk)=0;
        end
    end
end

```

```

elseif rr(kk)>3*rmax
    vt(kk)=0;
end
end
end

%Cálculo das componentes de velocidade
va = - vt.*1.2.*((h6^2)* rr.^2.4)./((1.44.*(h6^2)* rr.^2.4 +
rr.^4.4)).^0.5;
vr = vt.* ((rr.^4.4)./ (1.44.*(h6^2)* rr.^2.4 + rr.^4.4)).^0.5;
vx = vr.* xr./ rr;
vy = vr.* yr./ rr;
vz = va;

%Cálculo das componentes de velocidade TS + traslado
wy = vy+ vo*zz*sin(gama);
wx = vx+ vo*zz*cos(gama);
wr=( wy.^2+ wx.^2).^0.5;
wz=( vz.^2).^0.5;
wt=(wx.^2+ wy.^2+ wz.^2).^0.5;

%Armazenamento valores máximos do evento
format bank
Q= max(wr);
S= max(wt);
W= max(wz);
A(jj)=Q;
B(jj)=S;
C(jj)=W;

%zerar variáveis
k =0;
xt=0;
yt=0;
xr=0;
yr=0;
rr=0;
k1=0;
k2=0;
vT=0;
Vt= 0;
vt=0;
va = 0;
vr = 0;
vx = 0;
vy = 0;
vz = 0;
wy = 0;
wx = 0;
wr=0;
wz=0;
wt=0;
end

%Armazenamento valores máximos do ano
VH(ii)=max(A);
VT(ii)=max(B);

```

```

    VV(ii)=max(C);
end
VHM=reshape(VH,10,an/10);
VVM=reshape(VV,10,an/10);
VVT=reshape(VT,10,an/10);
% construção do histograma velocidade máxima horizontal
VH1=reshape(VH,1,an);
media=mean(VH1);
desvio=std(VH1);
N=size(VH1,2);
k0=fix((N)^0.5);
A1=min(VH1);
AN=max(VH1);
CC=linspace(A1,AN,k0+1);
for bb=1:k0
    s=bb+1;
    h=0;
    CC1(bb)=(CC(s)+CC(bb))/2;
    for jj=1:N
        if VH1(jj)<=CC(s)
            h=h+1;
            VH1(jj)=10000000;
        else
            vv=0;
        end
    end
    end
    bb;
    s;
    HH(bb)=h;
end
% Dados finais
reshape(VH,10,an/10);
minimo = A1;
maximo=AN;
%teste kolmogorov smirnov
FE=[1:1:an]./an;
alf0=desvio/1.282
gam0=media-0.577*alf0
FT1=sort(VH);
FT=2.7178 .^(-1*2.718.^(-1*((FT1-gam0)./alf0)));
DT=((FE-FT).^2).^0.5);
DT1=max(DT);
bar(CC1,HH);
reshape(VH,10,an/10);
reshape(VT,10,an/10);
reshape(VV,10,an/10);

```

### APÊNDICE 3

```

%programa de simulação de uma TS baseado na rotina
% Criado por Ponte(2005) e adaptado por Miguel (2013) e Gheno (2014)
%coleta de dados de velocidade ao longo de um cabo
%inserido cálculo tração (14/07/2014)

clear
clc

%diferencial de distancia para ser utilizado na determinação das
%velocidades
dx=.0001;

%diferenciais para a integração numérica
dtint=10^-3;
passos=1/dtint;

%coeficiente de superamortecimento
CA=.5;

%aceleração da gravidade
g=9.81;

% definição de quais tormentas serão combinadas com eps
% nts total de tormentas
% cjt conjectura sobre eps
cjt=0.02;
nts=an*nt;
ps=rand(1,nts);
for ii=1:nts
    if ps(ii)<=cjt
        ps(ii)=1;
    else
        ps(ii)=0;
    end
end

catenaria = dlmread('catenaria.dat', ',');
propriedades = dlmread('propriedades.dat', ',');

%coordenadas do cabo
nno=(catenaria(:,1))';
xc=(catenaria(:,4))';
yc=(catenaria(:,2))';
zc=(catenaria(:,3))';

nnos = length(xc);
nbarras = nnos-1;

%propriedades
nbarra=(propriedades(:,1))';
ni=(propriedades(:,2))';
nf=(propriedades(:,3))';
area=(propriedades(1,5))';
punit=(propriedades(1,6))';
diam=(propriedades(1,4))';

```

```

ET=(propriedades(1,7))'; %módulo elasticidade tração
TC=(propriedades(1,8))'; %carga crítica tração

%comprimento de cada elemento
massa(nno)=0;
Linflx(nno)=0;
Linfly(nno)=0;
Linflz(nno)=0;

%cálculo da massa e da projeção em cada plano de cada elemento
for nn=1:(nnos-1)
    A=ni(nn);
    B=nf(nn);

    L0(nn) = ((xc(A)-xc(B))^2+(yc(A)-yc(B))^2+(zc(A)-zc(B))^2)^.5;

    massa(A) = massa(A)+punit*L0(nn)/(2*g);
    massa(B) = massa(B)+punit*L0(nn)/(2*g);

    Linflx(A) = Linflx(A) + ((yc(A)-yc(B))^2+(zc(A)-zc(B))^2)^.5/2;
    Linflx(B) = Linflx(B) + ((yc(A)-yc(B))^2+(zc(A)-zc(B))^2)^.5/2;

    Linfly(A) = Linfly(A) + ((xc(A)-xc(B))^2+(zc(A)-zc(B))^2)^.5/2;
    Linfly(B) = Linfly(B) + ((xc(A)-xc(B))^2+(zc(A)-zc(B))^2)^.5/2;

    Linflz(A) = Linflz(A) + ((xc(A)-xc(B))^2+(yc(A)-yc(B))^2)^.5/2;
    Linflz(B) = Linflz(B) + ((xc(A)-xc(B))^2+(yc(A)-yc(B))^2)^.5/2;
end

%rigidez axial
EAC = 0;
EAT = ET*area;

% gera altura do solo a base da nuvem ( H )
% alterado para distribuição normal, conforme Ponte e Riera (2010)
aa=rand(1,1);
H=icdf('Normal',aa,11000,500);
% gera bases para definição de coordenadas
aa= rand(1,1);
bb= rand(1,1);
% gera coordenada do ponto de origem da TS
xo=aa*20000-10000;
yo=bb*20000-10000;
% gera diferença de pressão (Gumbel)
aa=rand(1,1);
% parâmetro de forma BETA e TETA para diferença de pressão
TETA= 50;
BETA = 100;
dp=(-1*log((-1*log(aa))))*TETA+BETA;

% gera Duração característica ( T ) ( Gumbel)
T=0;
while T<=1
    aa=rand(1,1);
    % parâmetros ALFA e GAMA
    GAMA = 300;
    ALFA = 150;
    T=ALFA*(-1*log(-1*log(aa)))+GAMA;
end

```

```

%Calculo diametro base da nuvem
aa=rand(1,1);
if aa<(4/17)
    D0 = (2720000*aa)^.5 + 600;
else
    D0 = 4000 - (8840000*(1-aa))^0.5;
end

R0=D0/2;

%Calculo rmax
hbase=100;
rmax=(R0^2*H/hbase)^.5;

% Cálculo da velocidade do vento de translado
% (Weibull) vento fundo
% (Gumbel) EPS
aa = rand(1,1);
if ps(cont)== 0
    vo=3*((-1*log(1-aa))^(1/2.5));
else
    vo=3.0 *(-1*log(-1*log(aa)))+21.5;
end

% gera direção do vento de fundo
gm=rand(1,1)*360;
gama=gm*pi/180;

for p=1:nnos
    % gera velocidade ( v )
    %h6 define altura do ponto de referência
    h6=zc(p);
    %% EXPRESSÃO DA VELOCIDADE TANGENCIAL
    beta=0.000095;
    massair=1.23;
    v=((2*dp)/(H*massair*beta)).^0.5.*(exp(beta*H)-exp(beta*h6)).^0.5);

    % cálculo das coordenadas do centro das tormentas ts após o tempo t
    k1=fix(T);
    k2=5*k1;
    k =[1:1:k2];
    %zz calculo da correção do perfil
    zz=(h6/10)^0.085;
    % calculo do translado
    xt=xo+vo*zz*k*cos(gama);
    yt=yo+vo*zz*k*sin(gama);
    % xr=x(j) - xt; yr=y(j)- yt;
    xr=xc(p)-xt;
    yr=yc(p)-yt;
    rr=(xr.^2+ yr.^2).^0.5;

    % determinação do vetor velocidade com flutuações
    for kk=1:k2
        dt=0;
        hcl=1;

        if rr(kk)>(R0+dx)

```

```

        Vef = R0^2/(2*hbase) * (log(rr(kk)^2-R0^2)-log((R0+dx)^2-
R0^2))/(rr(kk)-(R0+dx));
        dt = round((rr(kk)-(R0+dx))/Vef);
        Re=v*(rr(jj)-(R0+dx))/(1.46*10^-5);
        hcl=(0.382*(rr(jj)-(R0+dx)))/Re^.2;
    end
    if kk<=dt
        vT(kk) = 0;
    else
        if (kk-dt)<=T
            if hcl>h6
                vT(kk)=(h6/hcl)^0.085*1.58*v*(1-exp(-(kk-dt)/T));
            else
                vT(kk)=1.58*v*(1-exp(-(kk-dt)/T));
            end
        else
            if hcl>h6
                vT(kk)=(h6/hcl)^0.085*v*(exp(-(kk-dt)-T)/T);
            else
                vT(kk)=v*(exp(-(kk-dt)-T)/T);
            end
        end
    end
end
end

vt1=vT;

% calcula média móvel sobre tres segundos
for jota=1:k2
    if jota >=3
        jota1=jota-1;
        jota2=jota-2;
        vt(jota)=(vt1(jota)+vt1(jota1)+vt1(jota2))/3;
    else
        vt(jota)=vt1(jota);
    end
end

% Limita ação TS
for kk=1:k2
    zmax(kk)=0.1*H*R0^1.2/(rr(kk))^1.2;
    if rr(kk)>R0
        if zmax(kk)<h6
            vt(kk)=0;
        elseif rr(kk)>3*rmax
            vt(kk)=0;
        end
    end
end

%Cálculo das componentes de velocidade
va = - vt.*1.2.*((h6^2)* rr.^2.4)./((1.44.*(h6^2)* rr.^2.4 +
rr.^4.4)).^0.5;
vr = vt.* ((rr.^4.4)./ (1.44.*(h6^2)* rr.^2.4 + rr.^4.4)).^0.5;
vx = vr.* xr./ rr;
vy = vr.* yr./ rr;
vz = va;

```

```

%Cálculo das componentes de velocidade TS + traslado
wy = vy+ vo*zz*sin(gama);
wx = vx+ vo*zz*cos(gama);
wr=( wy.^2+ wx.^2).^0.5;
wz=( vz.^2).^0.5;
wt=(wx.^2+ wy.^2+ wz.^2).^0.5;

%Cálculo das forças
Fxt =
0.613.*(vx.*vx+GL.*vo.*zz.*cos(gama).*vo.*zz.*cos(gama)).*Linflx(p).*diam;
Fyt =
0.613.*(vy.*vy+GL.*vo.*zz.*sin(gama).*vo.*zz.*sin(gama)).*Linfly(p).*diam;
Fzt = -0.613.*wz.*wz.*Linflz(p).*diam-g*massa(p)*ones(1,k2);

end

%% ROTINA DE CÁLCULO DAS TRAÇÕES

%valores iniciais
DP0=[xc;yc;zc];
DP1=DP0;
DP2=DP0;
DP3=DP0;

FNO=zeros(3,nnos);

TP=5; %tempo para aplicação do carregamento inicial

NP=5*TP/(dtint*passos); %análise no carregamento inicial

NI=k2/(dtint*passos);

%para o carregamento inicial, é realizada a análise por 5*TP segundos, esta
%análise será desprezada e servirá para fornecer os valores iniciais para a
%análise posterior, com o carregamento variável (baseada em rotina do LDEC)
TT=0;
tt=0;

for ii=1:NP;

    TT=TT+1;
    tt=TT;

    for nn=1:passos

        tt=tt+dtint;

        if tt>=TP
            CP=1;
        else
            CP=tt/TP;
        end

        FNO(1,:)=exp_Fxt(1,:);
        FNO(2,:)=exp_Fyt(1,:);
        FNO(3,:)=exp_Fzt(1,:);
    end
end

```

```

for jj=1:nbarras
    A=ni(jj);
    B=nf(jj);

    AB=DP2(:,B)-DP2(:,A);

    L(jj)=norm(AB);

    if (L(jj)-L0(jj))<=0
        F(jj)=EAC*(L(jj)-L0(jj))/L0(jj);
    else
        F(jj)=EAT*(L(jj)-L0(jj))/L0(jj);
    end

    FNO(:,A)=FNO(:,A)+F(jj).*AB./L(jj);
    FNO(:,B)=FNO(:,B)-F(jj).*AB./L(jj);

end

for kk=1:nnos

    C1=1+CA*dtint/2;
    C2=1-CA*dtint/2;
    C3=dtint*dtint/massa(kk);

    if kk==1
        DP3(:,kk)=DP2(:,kk);
    elseif kk==nnos
        DP3(:,kk)=DP2(:,kk);
    else
        DP3(:,kk)=(C3.*FNO(:,kk)+2.*DP2(:,kk)-C2*DP1(:,kk))./C1;
    end

end

DP1=DP2;
DP2=DP3;
end

end

%cálculo da força nos elementos ao longo do tempo (baseada em rotina do
LDEC)
TT=0;
for ii=1:NI;

    TT=TT+1;

    for nn=1:passos

        FNO(1,:)=exp_Fxt(TT,:);
        FNO(2,:)=exp_Fyt(TT,:);
        FNO(3,:)=exp_Fzt(TT,:);

        for jj=1:nbarras
            A=ni(jj);

```

```

B=nf (jj) ;

AB=DP2 (:, B) -DP2 (:, A) ;

L (jj)=norm (AB) ;

if (L (jj) -L0 (jj)) <=0
    F (jj)=EAC* (L (jj) -L0 (jj)) /L0 (jj) ;
else
    F (jj)=EAT* (L (jj) -L0 (jj)) /L0 (jj) ;
end

FNO (:, A)=FNO (:, A) +F (jj) .*AB ./L (jj) ;
FNO (:, B)=FNO (:, B) -F (jj) .*AB ./L (jj) ;

if nn==passos
    Fxf (TT, jj)=F (jj) .*abs (AB (1) ./L (jj)) ;
    Fyf (TT, jj)=F (jj) .*abs (AB (2) ./L (jj)) ;
    Fzf (TT, jj)=F (jj) .*abs (AB (3) ./L (jj)) ;
    FR (TT, jj)=(Fxf (TT, jj) .^2+Fyf (TT, jj) .^2+Fzf (TT, jj) .^2) .^ .5 ;
end
end
for kk=1:nnos

    C1=1+CA*dtint/2;
    C2=1-CA*dtint/2;
    C3=dtint*dtint/massa (kk) ;

    if kk==1
        DP3 (:, kk)=DP2 (:, kk) ;
    elseif kk==nnos
        DP3 (:, kk)=DP2 (:, kk) ;
    else
        DP3 (:, kk)=(C3 .*FNO (:, kk) +2 .*DP2 (:, kk) -C2*DP1 (:, kk)) ./C1 ;
    end
end
DP1=DP2 ;
DP2=DP3 ;
end
end

```