

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

Hermes Carvalho

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE VENTO EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

Belo Horizonte
2015

C331a Carvalho, Hermes.
Avaliação dos efeitos de vento em linhas de transmissão [manuscrito]
/ Hermes Carvalho. – 2015.
xvii, 146 f, enc.: il.

Orientador: Gilson Queiroz.

Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Anexos: f.131-146.

Bibliografia: f. 125-130.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Linhas elétricas - Postes e torres - Teses. 3. Ventos - Velocidade - Medição - Teses. Sistemas de energia elétrica - Teses. I. Queiroz, Gilson. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624(043)

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

**"AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE VENTO EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO"**

Hermes Carvalho

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

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Gilson Queiroz
DEES - UFMG - (Orientador)

Prof. Dr. Fernando Amorim de Paula
DEES - UFMG

Prof. Dr. Max de Castro Magalhães
DEES - UFMG

Prof. Dr. Ricardo Azoubel da Mota Silveira
UFOP

Prof. Dr. Acir Mércio Loredo-Souza
UFRGS

Belo Horizonte, 19 de fevereiro de 2015

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a orientação do professor Gílson Queiroz, com quem tive a oportunidade de conviver e aprender muito, admirando sempre seu entusiasmo, dedicação e determinação. Mais do que orientador, você é um grande amigo, uma referência de personalidade e de profissional, a quem também devo todo o sucesso deste trabalho.

Ao Professor Ramón Molina Valle, amigo de grande jornada, que apoiou com entusiasmo e incentivou o desenvolvimento da pesquisa desde o início do projeto.

À minha mãe Stela, grande exemplo de dedicação, esforço e força de vontade nas suas pesquisas e estudos.

Ao meu pai Hermes Gentil, pelo exemplo de luta, persistência e conquistas.

Ao meu irmão Thiago, pela amizade e carinho.

Aos diretores da RMG Engenharia, Carlos Luís, Gomide, Klemens e Jürn, pela confiança em mim depositada e colaboração durante todo o período de desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos Juliano Lanza e Rodrigo Molina, pelas intermináveis conversas sobre as questões relacionadas à engenharia.

Aos colegas da CEMIG, Carlos Alexandre, Márcio Eli e Dênio Alves, que acreditaram no projeto fornecendo o apoio necessário ao desenvolvimento do programa experimental.

À ANEEL/CEMIG pelo apoio financeiro ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento, fundamental para o desenvolvimento do programa experimental.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da UFMG, principalmente à Inês, que tanto contribuíram para o meu desenvolvimento.

RESUMO

Em torres de linhas de transmissão, o principal carregamento a ser considerado na análise estrutural é produzido pelo vento, que atua de forma dinâmica no sistema (torres, cabos e cadeias de isoladores). Tendo em vista que muitos acidentes envolvendo torres desse tipo ocorrem, ainda que a velocidade de vento utilizada no projeto não seja atingida, é possível que o colapso seja causado pelos efeitos dinâmicos ou por algum equívoco na estimativa do efeito do vento. Com essa motivação, este trabalho tem como objetivo avaliar as solicitações de torres de linhas de transmissão devidas ao efeito do vento no sistema estrutural. O comportamento estático do conjunto estrutural já foi avaliado, em uma dissertação de mestrado, por meio de um modelo tridimensional compreendendo torres, cabos e cadeias de isoladores, com a atuação de cargas de vento estáticas equivalentes e consideração das não linearidades geométricas presentes. Para o comportamento dinâmico, neste trabalho é avaliado um modelo espacial de um cabo isolado, considerando as não linearidades geométricas e o amortecimento aerodinâmico, de grande influência nos casos em que a estrutura assume velocidades próximas às do vento. O carregamento de vento é modelado através de um processo aleatório a partir das suas propriedades estatísticas. Para utilização em trabalhos futuros, foi desenvolvido um programa experimental de coleta de dados, instalado em uma torre de suspensão em operação de uma linha de transmissão de 138 kV, de propriedade das Centrais Elétricas de Minas Gerais (CEMIG). Nessa torre, foi instalado um anemômetro tridimensional, responsável pela medição dos valores e direções das velocidades do vento. Simultaneamente, foram medidos valores de deformações nos principais elementos da torre, por meio de extensômetros ópticos, utilizando a tecnologia de Redes de Bragg. Esses extensômetros apresentam imunidade aos fortes valores de campo eletromagnético devido às correntes elétricas. O ângulo de balanço da cadeia pode ser avaliado através de uma câmera de alta resolução e um acelerômetro tridimensional, ambos instalados junto aos isoladores. Com a instrumentação utilizada, torna-se possível criar uma base de dados correlacionando velocidades do vento e respostas do conjunto estrutural (cabos, cadeias de isoladores e torre de transmissão).

Palavras Chave: Linhas de transmissão; Forças dinâmicas de vento; Análise dinâmica e não linear de cabos; Análise experimental.

ABSTRACT

In transmission lines, the main load to be considered in the structural analyses is produced by wind, which acts dynamically in the system (towers, cables and insulator strings). Considering that several accidents involving towers of this type occurred, although the wind speed used in the project has not been reached, the collapse might have been caused by dynamic actions or some mistake in the wind effect estimate. Bearing such motivation in mind, this study aims to evaluate the tower transmission requests due to wind effect on the structural system. The static behavior of the structural assembly has already been evaluated, in master's dissertation, evaluated using a three-dimensional model comprising tower, cables and insulator chains, with the performance of equivalent static wind loads and consideration of geometric non-linear effects. For the dynamic behavior, a space model of an isolated cable is evaluated, considering the geometric non-linear effects and the aerodynamic damping, with a huge influence in cases in which the structure assumes speed next to the wind speed. The wind loading is modeled as a random process from statistical properties. For future applications, an experimental data collection program was developed and installed in a suspension tower in operation of 138 kV transmission line, owned by the Energetic Company of Minas Gerais (CEMIG). In this tower a three-dimensional anemometer responsible for measuring values and direction of wind speeds was installed. Simultaneously measured deformation values of the main elements of the tower can be evaluated by means of optical extensometers, using Fiber Bragg Grating technology. These extensometers feature immunity to stronger electromagnetic field values due to electric currents. The chain balance angle can be evaluated through a high-resolution camera and a three-dimensional accelerometer, both located along the insulators. With the instrumentation used it becomes possible to create a database associating the wind speeds with answers from the structural assembly (cables, chains of insulators and transmission tower).

Key Words: Transmission Lines; Dynamic wind action; Dynamic and non-linear analysis of cables; Experimental analyses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Torre metálica treliçada acidentada na cidade de Porto Alegre (KLEIN, 2004).	4
Figura 2.1 – Fotografia de satélite do trecho da linha em estudo (Fonte: http://www.maps.google.com).	8
Figura 2.2 – Esquema do trecho da linha de transmissão analisado (sem escala).....	9
Figura 3.1 – Exemplos de cargas aplicadas sobre a estrutura deformada sem (A) e com (B) a mudança da direção da força.	12
Figura 3.2 – Amplitude de oscilação das vibrações eólicas (SNEGOVSKI, 2004).....	21
Figura 3.3 – Desprendimento dos “vórtices de Von Kármán” (SNEGOVSKI, 2004).....	21
Figura 3.4 – Assimetria do condutor e amplitude de oscilação do condutor (IRVINE, 2006).	22
Figura 3.5 – Movimentos induzidos por esteiras em feixes de condutores (COOPER E WATTS, 1976).....	24
Figura 3.6 – Princípio básico de funcionamento das Redes de Bragg.	34
Figura 3.7 – Esquema do deslocamento espectral de uma Rede de Bragg submetida a tração ou compressão.	35
Figura 4.1 – Localização das estações meteorológicas de monitoramento (Fonte: http://www.earth.google.com).	40
Figura 4.2 – Arquitetura do sistema de monitoramento de balanço (NASCIMENTO <i>et al.</i> , 2010).	42
Figura 4.3 – Estrutura auxiliar para suporte da câmera fotográfica.	43
Figura 4.4 – Montagem em laboratório: (a) câmera digital; (b) sensor de umidade e temperatura; (c) sensor de radiação solar; (d) sensor de velocidade de vento; (e) sensor do ângulo de balanço junto à cadeia de isoladores; (f) <i>datalogger</i> elétrico e bateria (NASCIMENTO <i>et al.</i> , 2010).....	44
Figura 4.5 – Fixação do sistema na torre: (A) sensor do ângulo de balanço; (B) câmera digital; (C) painel solar; (D) caixa com <i>datalogger</i> , bateria e modem; (E) sensores de radiação solar, temperatura, velocidade de vento 3D e pressão atmosférica.....	44
Figura 4.6 – Localização dos sensores ópticos nos elementos da torre.....	46
Figura 4.7 – Posicionamento dos sensores de deformação na seção transversal da cantoneira.	46

Figura 4.8 – Plataforma inercial <i>Spark Fun Eletronics</i> : (a) circuito transmissor com sensores e (b) circuito receptor.....	47
Figura 4.9 – Plataforma inercial e grandezas medidas.....	48
Figura 4.10 – Cálculo da componente horizontal da força resultante proveniente dos cabos.....	49
Figura 4.11 – Sensor de deformação óptico soldado a uma superfície metálica.....	50
Figura 4.12 – Caixa de proteção e fixação dos componentes do sistema de aquisição de dados..	52
Figura 4.13 – Fixação da plataforma inercial na cadeia de isoladores.....	53
Figura 4.14 – Montagem finalizada em laboratório das quatro estações meteorológicas e do sistema de medição de ângulo com a câmera de registro digital.....	53
Figura 4.15 – Plataformas <i>Crossbow</i> e <i>Sparkfun</i> alinhadas para calibração.....	54
Figura 4.16 – Erro relativo obtido para a aceleração (MOLINA <i>et al.</i> , 2014).....	55
Figura 4.17 – Erro relativo obtido para a velocidade angular (MOLINA <i>et al.</i> , 2014).....	55
Figura 4.18 – Acelerações calculadas para cadeia de isoladores nas três direções (MOLINA <i>et al.</i> , 2014).....	56
Figura 4.19 – Velocidades angulares calculadas para a cadeia de isoladores (MOLINA <i>et al.</i> , 2014).....	57
Figura 4.20 – Protótipo em cantoneira para validação dos sensores ópticos.....	58
Figura 4.21 – Localização dos sensores de deformação no protótipo.....	59
Figura 4.22 – “ <i>Datalogger</i> ” óptico FS2200.....	60
Figura 4.23 – Protótipo submetido a cargas de compressão.....	61
Figura 4.24 – Célula de carga utilizada nos ensaios.....	62
Figura 4.25 – Deformações dos sensores ópticos e elétricos obtidas no ensaio 2.....	63
Figura 4.26 – Estação climatológica instalada em Rio das Pedras.....	65
Figura 4.27 – Estação climatológica instalada na subestação de Ouro Preto 2.....	65
Figura 4.28 – Detalhe da estação climatológica instalada na Subestação de Ouro Preto 2.....	66
Figura 4.29 – Preparação dos equipamentos em solo.....	67
Figura 4.30 – Elevação dos equipamentos através de cordas e fixação destes na torre.....	67
Figura 4.31 – Instalação do sistema de monitoramento do ângulo de balanço (sensor de balanço e câmera).....	68
Figura 4.32 – Localização da estação climatológica, painel solar e da caixa metálica contendo os componentes eletrônicos.....	68

Figura 4.33 – Torre 50 com a instalação dos equipamentos da 1ª etapa concluída.....	69
Figura 4.34 – Alimentação do sistema óptico de deformações e temperatura.	70
Figura 4.35 – Sensor de deformação soldado à estrutura da torre.....	71
Figura 4.36 – Sensor de temperatura soldado à estrutura da torre.	71
Figura 4.37 – Sensor de deformações danificado devido a dificuldades de soldagem.	73
Figura 4.38 – Velocidades do vento com média em 3 segundos e média horária.....	74
Figura 4.39 – Histogramas das velocidades do vento com média horária e média em 3 segundos.	75
Figura 4.40 – Valores de deformação e temperatura coletados, a cada segundo, com influência da temperatura nas deformações.	75
Figura 4.41 – Valores de deformação e temperatura coletados, a cada segundo, com influência de temperatura e cargas de vento nas deformações.....	76
Figura 5.1 – Histórico de velocidade do vento (OLIVEIRA, 2006).	79
Figura 5.2 – Isopletas da norma brasileira ABNT NBR 6123 (1988).....	80
Figura 5.3 – Espectros de potência da componente longitudinal da turbulência (OLIVEIRA, 2006).....	86
Figura 5.4 – Esquema de distribuição longitudinal das funções temporais (OLIVEIRA, 2006)..	88
Figura 5.5 – Função de correlação cruzada (para $\tau = 0$) para diferentes larguras de faixa (SANTOS, 2008).....	89
Figura 5.6 – Função de autocorrelação (SANTOS, 2008, modificado).	90
Figura 5.7 – Forma da parábola.....	91
Figura 5.8 – Sistema de coordenadas utilizado.	98
Figura 5.9 – Evolução temporal do deslocamento U_y do nó central do cabo [m] para a rajada de 20m/s.	99
Figura 5.10 – Evolução temporal da velocidade V_y do nó central do cabo [m/s] para a rajada de 20m/s.	100
Figura 5.11 – Evolução temporal da reação de apoio F_x [kN] para a rajada de 20m/s.....	100
Figura 5.12 – Evolução temporal da reação de apoio F_y [kN] para a rajada de 20m/s.....	100
Figura 5.13 – Evolução temporal da reação de apoio vertical (F_z) [kN] para a rajada de 20m/s.	101

Figura 5.14 – Evolução temporal da velocidade V_y do nó central do cabo [m/s] para a rajada de 32m/s.	102
Figura 5.15 – Evolução temporal do deslocamento U_y do nó central do cabo [m] para a rajada de 32m/s.	103
Figura 5.16 – Evolução temporal da velocidade V_y do nó central do cabo [m/s] para a rajada de 32m/s.	104
Figura 5.17 – Evolução temporal da reação de apoio F_x [kN] para a rajada de 32m/s.	104
Figura 5.18 – Evolução temporal da reação de apoio F_y [kN] para a rajada de 32m/s.	104
Figura 5.19 – Evolução temporal da reação de apoio vertical (F_z) [kN] para a rajada de 32m/s.	105
Figura 5.20 – Velocidades V_y e V_z com a consideração entre o fluido e a estrutura para a rajada de 32m/s.	106
Figura 5.21 – Evolução temporal do deslocamento U_y do nó central do cabo [m] para a rajada de 50m/s.	107
Figura 5.22 – Evolução temporal da velocidade V_y do nó central do cabo [m/s] para a rajada de 50m/s.	108
Figura 5.23 – Evolução temporal da reação de apoio F_x [kN] para a rajada de 50m/s.	108
Figura 5.24 – Evolução temporal da reação de apoio F_y [kN] para a rajada de 50m/s.	109
Figura 5.25 – Evolução temporal da reação de apoio vertical (F_z) [kN] para a rajada de 50m/s.	109
Figura 6.1 – Evolução temporal da tração no cabo sem interação entre fluido e estrutura obtida neste estudo [kN].	112
Figura 6.2 – Comparação da evolução temporal do deslocamento U_y do nó central do cabo [m].	113
Figura 6.3 – Comparação da evolução temporal da velocidade V_y do nó central do cabo [m/s].	113
Figura 6.4 – Comparação da evolução temporal da reação de apoio F_x [kN].	114
Figura 6.5 – Comparação da evolução temporal da reação de apoio F_y [kN].	114
Figura 6.6 – Comparação da evolução temporal da reação de apoio vertical (F_z) [kN].	115
Figura 6.7 – Evolução temporal da reação de apoio F_y [kN].	117

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 3.1 – Comparação entre os tipos de movimento cíclicos de condutores (LOREDO-SOUZA, 1996)	26
Tabela 4.1 – Coordenadas de latitude e longitude das estações de monitoramento.....	40
Tabela 4.2 – Variação dos comprimentos de onda após soldagem no protótipo.....	60
Tabela 4.3 – Deformações medidas no protótipo com sensores ópticos e elétricos.....	63
Tabela 5.1 – Características do vão de 400 metros em estudo.....	97
Tabela 6.1 – Características do vão estudado por Oliveira (2006).....	111
Tabela 6.2 – Comparação dos resultados obtidos com os resultados de Oliveira (2006).	112
Tabela 6.3 – Características do modelo em escala real ensaiado por Loredo-Souza (1996).	116
Tabela 6.4 – Comparação dos resultados obtidos para a reação F_y entre a metodologia proposta neste trabalho e a de Loredo-Souza (1996).	117

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas

$\{u\}$ – o vetor deslocamento

$\{x\}$ – o vetor deslocamentos na posição deformada – Coordenadas Eurlianas

$\{X\}$ – o vetor deslocamentos na posição de referência – Coordenadas Lagrangianas

$[F]$ – o tensor gradiente de deformações

$[I]$ – matriz identidade

J – determinante do gradiente de deformação, definido como Jacobiano

V – volume final

V_0 – volume inicial

\bar{E} – tensor de Green-Lagrange

\bar{e} – tensor de Almansi

$[K]$ – matriz de rigidez do sistema estrutural

$[M]$ – matriz de massa do sistema estrutural

$[M]$ – matriz de massa do sistema estrutural

$[C]$ – matriz de amortecimento do sistema estrutural

$[K]$ – matriz de rigidez do sistema estrutural

$\{\ddot{u}\}$ – vetor de acelerações nodais

$\{\dot{u}\}$ – vetor de velocidades nodais

$\{u\}$ – vetor de deslocamentos nodais

$\{F\}$ – vetor de forças externas

C_D – coeficiente de arrasto

ρ_a – densidade do ar

d – diâmetro do cabo

m – massa por unidade de comprimento do cabo

V – velocidade do vento

f_j – j-ésima frequência natural do cabo em Hz

\bar{F} – força média do vento

\bar{V} – velocidade média do vento

l – comprimento do cabo

n_{ef} – índice de refração

T – temperatura

ΔT – variação de temperatura

CTE_{est} – coeficiente de expansão térmica do material no qual o sensor é fixado

TCS – coeficiente de sensibilidade térmica transversal do conjunto, composto pelo material estrutural e pela fibra óptica

$V(t)$ – velocidade longitudinal do vento em função do tempo

\bar{V} – componente média da velocidade longitudinal do vento

$v(t)$ – componente flutuante da velocidade longitudinal do vento

T – tempo ao final dos registros avaliados

$\overline{V^2}$ – valor quadrado médio

$C^v(\tau)$ – autocorrelação

τ – intervalo de tempo arbitrário

$S^v(f)$ – função de densidade espectral

f – frequência em Hz

$C^{v_1, v_2}(\tau)$ – função de correlação cruzada

$S^{v_1, v_2}(f)$ – função de densidade espectral cruzada

$Co h^{v_1, v_2}(f)$ – função coerência

x_1 – coordenadas horizontal do ponto 1

x_2 – coordenadas horizontal do ponto 2

z_1 – coordenadas vertical do ponto 1

z_2 – coordenadas vertical do ponto 2

C_{1x} – coeficiente de decaimento na direção horizontal transversal ao vento

C_{1z} – coeficiente de decaimento na direção vertical

u_* – velocidade de fricção ou tangencial, em m/s

z – altura em relação ao solo do ponto em estudo, em m

\bar{V}_z – velocidade média na altura z , em m/s

\bar{V}_{10} – velocidade média de projeto a 10 metros de altura, com média em 10 minutos

p – coeficiente exponencial relativo à rugosidade do terreno

k – constante de Kármán, aproximadamente igual a 0,4

z_0 – medida de rugosidade do terreno

N – número de intervalos Δf de frequências considerado no espectro

f_i – frequência em Hz

t – tempo em segundos

Δf – incremento de frequência em Hz

θ_i – ângulo de fase aleatório, compreendido entre 0 e 2π

x – abscissa do ponto P

y_c – ordenada do ponto P

L – vão entre apoios, em metros

f – flecha da catenária, em metros

p – peso por unidade de comprimento, em kgf/m

T – força de tração do cabo, em kgf

n – contador para o cálculo da n -ésima frequência natural

q_{vento} – pressão dinâmica do vento

V_R – velocidade relativa entre o vento e o cabo

V_{cabo} – velocidade do cabo

V_0 – velocidade de rajada, calculada sobre um intervalo de tempo igual a 3 segundos

S_1 – fator topográfico associado ao relevo, conforme a norma ABNT NBR 6123

S_3 – fator estatístico associado à probabilidade de ruína, conforme a norma ABNT NBR 6123

ΔL – largura da faixa

Δt – intervalo de tempo

U_y – deslocamento na direção t

V_x – velocidade na direção x

V_y – velocidade na direção y

V_z – velocidade na direção z

F_x – reação de apoio na direção x

F_y – reação de apoio na direção y

F_z – reação de apoio na direção z

Letras Gregas

ω_i – i-ésima frequência natural de vibração

φ_i – vetor que exprime o i-ésimo modo de vibração do sistema

ζ_{aj} – amortecimento aerodinâmico do j-ésimo modo

ρ_a – densidade do ar

λ_B – comprimento de onda de referência da Rede de Bragg refletido na fibra óptica

Λ – espaçamento da rede

$\Delta\lambda_B$ – variação do comprimento de onda refletido na fibra óptica

ε – deformação

$\Delta\varepsilon$ – variação total de deformação

ρ_e – coeficiente de variação do índice de refração devido à tensão axial, $\rho_e \approx -0,22$

α – coeficiente de expansão térmica da fibra, $\alpha \approx 0,55 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$

ζ – coeficiente de variação do índice de refração devido à temperatura, $\zeta \approx 6,7 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$

$\Delta\varepsilon_{load}$ – variação de deformação devida à tensão longitudinal na estrutura

σ_V^2 – variância

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

APDL - *ANSYS Parametric Design Language*

CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais

CESP - Companhia Energética de São Paulo

CLA - Camada Limite Atmosférica

EDS - *Every Day Stress*

EPRI - Electric Power Research Institute

IEC - *International Electrotechnical Commission*

IMU - *Inertial Measurement Unit*

LAEES - Laboratório de Análise Experimental de Estruturas

LT's - Linhas de Transmissão

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS E QUADROS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiii
SUMÁRIO.....	xiv
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Aspectos gerais do comportamento de estruturas de linhas de transmissão.....	1
1.2 Breve histórico de acidentes relacionados ao vento	3
1.3 Contribuição científica do trabalho desenvolvido	5
1.4 Organização da tese	5
2 MOTIVAÇÃO, OBJETIVO E METODOLOGIA.....	7
2.1 Motivação	7
2.2 Objetivo	7
2.3 Metodologia.....	8
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1 Análise estática do conjunto estrutural formado por torre, cabos e isoladores.....	11
3.1.1 Formulação matemática da análise não linear de estruturas com grandes gradientes de deslocamentos	11
3.1.2 Breve histórico de análises realizadas	15

3.1.3	Breve descrição da metodologia desenvolvida.....	17
3.2	Análise dinâmica do cabo isolado	17
3.2.1	Formulação matemática para a obtenção das frequências e modos de vibração.....	17
3.2.2	Formulação matemática para a análise dinâmica	18
3.2.3	Aspectos gerais do vento	19
3.2.4	Caracterização do movimento de cabos suspensos sujeitos à ação do vento	20
3.2.4.1	Vibração eólica ou vibração por despreendimento de vórtices.....	20
3.2.4.2	Galope dos condutores	22
3.2.4.3	Oscilações induzidas pela esteira	23
3.2.4.4	Comparação dos movimentos de cabos apresentados nos itens anteriores	25
3.2.4.5	Movimentos causados pela turbulência atmosférica	27
3.2.5	Aerodinâmica de cabos.....	27
3.2.6	Breve histórico de análises realizadas	29
3.3	Monitoramento de estruturas de linhas de transmissão	31
3.3.1	Generalidades sobre o uso de sensores no monitoramento de LT's.....	31
3.3.2	Histórico de monitoramentos de LT's.....	32
3.3.3	Sensores de fibra óptica.....	34
3.3.4	Histórico de monitoramento de LT's com sensores ópticos	38
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	39
4.1	Descrição geral	39
4.2	Arquitetura do sistema de monitoramento – torre 50	41
4.3	Sensores	47
4.3.1	Desenvolvimento do Sensor de Balanço (Molina <i>et al.</i> , (2014))	47
4.3.2	Sensores ópticos de deformação e temperatura.....	49
4.4	Testes realizados em laboratório.....	50

4.4.1	Sistemas de monitoramento meteorológico e de balanço da cadeia.....	50
4.4.1.1	Montagem de laboratório.....	50
4.4.1.2	Calibração e validação da plataforma inercial.....	54
4.4.2	Sistema óptico de monitoramento de temperatura e deformações	57
4.5	Instalação dos sistemas em campo.....	64
4.5.1	Sistemas de monitoramento de dados climatológicos	64
4.5.2	Sistema de monitoramento de dados climatológicos, balanço das cadeias e deformações estruturais	66
4.6	Dificuldades encontradas	72
4.7	Situação atual do sistema de monitoramento.....	73
4.8	Resultados experimentais	74
5	DESENVOLVIMENTO TEÓRICO-NUMÉRICO.....	77
5.1	Análise estática com não linearidade geométrica	77
5.2	Modelagem da turbulência atmosférica.....	78
5.2.1	Considerações gerais	78
5.2.2	Características estatísticas da velocidade do vento	80
5.2.3	Espectro da componente longitudinal da turbulência.....	85
5.2.4	Simulação, no tempo, da componente flutuante da velocidade do vento.....	87
5.2.5	Definição das funções temporais correlacionadas no espaço.....	88
5.3	Definição da geometria e da tensão inicial do cabo submetido ao peso próprio	90
5.4	Determinação de modos de vibração e frequências naturais do cabo.....	92
5.5	Análise dinâmica do cabo	93
5.6	Problemas de convergência	96
5.7	Estudos de caso	97
5.7.1	Geometria do vão em estudo, propriedades do cabo e carregamento aerodinâmico.....	97

5.7.2	Análise para a velocidade de rajada de 20 m/s	98
5.7.3	Análise para a velocidade de rajada de 32 m/s	101
5.7.4	Análise para a velocidade de rajada de 50 m/s	106
6	COMPARAÇÕES COM OUTROS RESULTADOS – VALIDAÇÃO DO PROCEDIMENTO PROPOSTO	110
6.1	Comparação com resultados obtidos por Oliveira (2006)	110
6.2	Comparação com resultados obtidos utilizando o amortecimento aerodinâmico proposto por Davenport (1988)	112
6.3	Comparação com resultados obtidos por Loredou-Souza (1996).....	115
7	CONCLUSÕES	118
7.1	Programa experimental desenvolvido para linhas de transmissão.....	118
7.2	Análise estática não linear do conjunto estrutural completo	120
7.3	Análise dinâmica de um cabo isolado.....	121
7.4	Objetivos alcançados	123
7.4.1	Objetivo principal	123
7.4.2	Objetivos específicos.....	123
7.5	Sugestões para trabalhos futuros.....	124
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
9	BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR.....	129
10	APÊNDICE	131
10.1	Rotina para o cálculo do cabo submetido ao peso próprio.....	131
10.2	Rotina para o cálculo dos modos e frequências naturais de cabos.....	133
10.3	Rotina para a análise dinâmica do cabo	137
10.4	Rotina para a geração das funções temporais do vento.....	142

1

INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos gerais do comportamento de estruturas de linhas de transmissão

A utilização de torres metálicas treliçadas ganhou força, após a Segunda Guerra Mundial, com a construção de um grande número de torres de rádio na América do Norte. Basicamente, essas torres foram construídas em estruturas de aço treliçadas autoportantes ou estaiadas. Suas grandes vantagens, em comparação com outros tipos de torres, estavam na velocidade de execução da obra e na menor mobilização de pessoal, material e equipamentos durante a montagem.

Com o desenvolvimento industrial e o crescimento populacional em todo o mundo, houve grande ampliação das Linhas de Transmissão (LT's) de energia elétrica implicando, conseqüentemente, a intensa utilização de torres metálicas treliçadas.

No Brasil, a crescente demanda de energia elétrica e a riqueza de recursos hídricos do território indicaram a necessidade da instalação de redes de distribuição de energia baseadas em linhas aéreas de transmissão (LT's) compostas de torres treliçadas. Junto com o crescimento da demanda, tem-se observado um aumento do número de acidentes nesse tipo de estrutura, muitos destes relacionados à incidência de ventos fortes. Por serem estruturas esbeltas e de baixo peso, o vento representa o principal agente dentre as ações consideradas no projeto das LT's. Dentro desse contexto, é de grande importância uma adequada avaliação dos efeitos do vento nessas estruturas.

São severas para a população as consequências dos danos causados às LT's por ventos fortes. Além da falta de fornecimento abrupto de energia elétrica, todos os custos de reparação ou substituição das linhas e estruturas danificadas diretamente ou indiretamente pelo vento, os custos da energia adquirida de outras fontes produtoras para a substituição da energia temporariamente perdida e os custos do uso de uma rede elétrica externa emergencial para reestabelecimento do fornecimento são repassados pelas fornecedoras ao consumidor.

Atualmente, no Brasil, existem duas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que apresentam diretrizes para a estimativa de forças devidas ao vento:

- a) ABNT NBR 5422 (1985) – Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica
Fixa as condições necessárias para o projeto completo de LT's de energia elétrica, fornecendo procedimentos específicos para o cálculo das cargas de vento que atuam em estruturas treliçadas, cadeias de isoladores e cabos condutores (ABNT, 1985);
- b) ABNT NBR 6123 (1988) – Forças Devidas ao Vento em Edificações
Fixa as condições exigíveis na consideração das forças estáticas e dinâmicas do vento para dimensionamento de edificações. Sendo assim, fornece diretrizes para determinar as cargas de vento, dentro de um contexto mais geral, com possibilidade de emprego em casos mais específicos, como em estruturas treliçadas e cabos (ABNT, 1988).

A ABNT NBR 5422 (1985) considera somente cargas de vento estáticas equivalentes, admitindo que tais cargas não produzam forças de inércia significativas no sistema. Com essa simplificação, a movimentação dos condutores é ignorada, levando-se em consideração somente as trações estáticas. No entanto, um número significativo de acidentes ainda têm ocorrido para velocidades de vento inferiores às máximas recomendadas nas normas de projeto e, na maioria das vezes, sem apresentar ruptura dos cabos elétricos, que são derrubados em virtude da queda das torres. Esse padrão de comportamento indica que esses sistemas estruturais podem ser susceptíveis aos efeitos dinâmicos da turbulência atmosférica.

As evidências experimentais referentes às ações e respostas de LT's submetidas ao vento são escassas. Essa escassez de dados experimentais é devida ao alto custo da instrumentação em escala real e monitoramento de estruturas de transmissão elétrica, como também as dificuldades

técnicas para registrar, armazenar e transmitir os dados a uma estação base. Ainda existe a grave restrição de uso de equipamentos eletrônicos nas proximidades de condutores de alta voltagem, devido à interferência eletromagnética, o que encarece ainda mais a instrumentação.

1.2 Breve histórico de acidentes relacionados ao vento

Acidentes devidos ao vento envolvendo LT's vêm acontecendo desde o início da utilização dessas estruturas até os dias atuais.

Estudos realizados por Monk (1980) constataram que a ruína de trinta e seis torres de um sistema de transmissão da Nova Zelândia, no período de 1963 a 1973, ocorreu devido a tempestades associadas a altas velocidades de vento.

Blessmann (2001) apresentou artigos no jornal Folha de São Paulo nos quais foram relatados vinte acidentes na Companhia Energética de São Paulo (CESP), com queda ou inclinação acentuada de estruturas de LT's de 69 a 460 kV, ocorridos entre novembro de 1970 e junho de 1983. No total, foram atingidas cento e quarenta e três estruturas, em vinte ocorrências de ventos fortes. Nesse mesmo trabalho, foi relatado o colapso da torre da Rádio Farroupilha de Porto Alegre – RS, com 190 metros de altura, devido à ocorrência de ventos fortes no ano de 1970.

No dia 2 de novembro de 1997, a ação de ventos de 130 km/h provocou a queda de dez torres do sistema de transmissão de Itaipu (LT Foz do Iguaçu-Itaiporã, de 750 kV), levando ao racionamento de energia nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do País (RIPPEL, 2005).

Loredou-Souza (1996) relatou a queda de várias torres de transmissão, em abril de 1996, devido à incidência de ventos extremos em Ontário, Canadá.

Em maio de 2002, foi relatado um forte temporal no Estado do Mato Grosso do Sul, responsável pelo colapso de três torres operadas pela ELETROSUL, ocasionando corte do fornecimento de energia elétrica. Em outubro daquele ano, um forte vendaval danificou cinco torres da LT que interligam as cidades de Cianorte e Campo Mourão na região noroeste do Estado do Paraná (RIPPEL, 2005).

Klein (2004) relatou o colapso de uma torre de rádio na cidade de Porto Alegre – RS, no ano de 2000, devido a uma tempestade com altas rajadas de vento. Segundo a autora, o projeto não considerou as recomendações da norma ABNT NBR 6123. A Figura 1.1 apresenta a foto da torre após o colapso.



Figura 1.1 – Torre metálica treliçada acidentada na cidade de Porto Alegre (KLEIN, 2004).

Rodrigues (2004) analisou duas estruturas acidentadas, uma torre autoportante tipo Delta e uma torre em V estaiada e apontou, como causa básica dos respectivos colapsos, as forças de inércia do conjunto formado pelos isoladores e cabos oriundas de efeitos dinâmicos do vento.

1.3 Contribuição científica do trabalho desenvolvido

Sendo o vento o principal agente dentre as ações consideradas no projeto das LT's é importante avaliar com bastante critério esse carregamento. Em linhas aéreas com grandes vãos, o elemento estrutural mais afetado pelo vento são os cabos que, por sua vez, aplicam forças no topo das estruturas suporte, forças essas responsáveis por gerar as solicitações preponderantes nessas estruturas.

Sendo assim, será estudado a fundo neste trabalho o movimento de cabos submetidos ao vento, com a consideração do amortecimento aerodinâmico. Tal amortecimento é de extrema importância em estruturas que desenvolvem elevadas velocidades quando excitadas pelo vento. Para o amortecimento aerodinâmico é proposta uma formulação inédita, aplicável a qualquer tipo de estrutura, baseada no cálculo das pressões dinâmicas a partir da velocidade relativa entre o vento e a estrutura. Os resultados obtidos através da formulação proposta são comparados com os resultados obtidos através de formulações propostas por outros autores e por resultados experimentais.

Em paralelo foi desenvolvido um programa experimental de monitoramento de linhas de transmissão, inédito no Brasil. Podem ser monitoradas ações e respostas estruturais, possibilitando, no futuro, a obtenção de bancos de dados para validação de modelos teórico-numéricos. Os resultados obtidos com os equipamentos instalados, até o momento, são apresentados neste trabalho, porém, por serem oriundos de pequenos intervalos de tempo e impossibilitarem tratamento estatístico, não serão confrontados com resultados das análises teórico-numéricas.

1.4 Organização da tese

Este trabalho é organizado em oito capítulos sendo estes:

O capítulo 1 é uma introdução, onde são apresentados os aspectos relevantes para os estudos de linhas de transmissão aéreas submetidas ao vento. São listados alguns acidentes envolvendo linhas de transmissão submetidas a elevadas velocidades de vento ocorridos no Brasil e as principais contribuições deste trabalho para a pesquisa.

O capítulo 2 apresenta a motivação, os objetivos e as metodologias empregadas neste trabalho.

O capítulo 3 apresenta a revisão bibliográfica acerca do tema do trabalho. São apresentados os conceitos básicos de análise estática de estruturas com grandes gradientes de deslocamento, análise dinâmica de cabos, movimentos e aerodinâmica de cabos e monitoramento de estruturas de linhas de transmissão.

O capítulo 4 apresenta o programa experimental desenvolvido para captar ações e respostas estruturais devidas ao vento em linhas aéreas de transmissão.

O capítulo 5 apresenta o desenvolvimento teórico–numérico para o procedimento de análise dinâmica proposto neste trabalho. Todas as formulações utilizadas para a geração das cargas aleatórias de vento, consideração do amortecimento aerodinâmico, desenvolvimento do modelo numérico e dificuldades de convergência são apresentadas nesse capítulo. Resultados de um vão real com 400 metros de comprimento, considerando diferentes velocidades de vento e a solução com e sem a consideração do amortecimento aerodinâmico, são avaliados.

O capítulo 6 apresenta a comparação de resultados obtidos com o procedimento proposto e resultados apresentados por outros autores.

O capítulo 7 apresenta as principais conclusões obtidas no trabalho.

Os capítulos 8 e 9 apresentam as referências bibliográficas e o capítulo 10 apresenta as rotinas computacionais desenvolvidas.

2

MOTIVAÇÃO, OBJETIVO E METODOLOGIA

2.1 Motivação

Uma vez que se observam inúmeros acidentes em LT's associados à incidência de ventos, considera-se necessário fazer uma análise dos procedimentos atuais utilizados para a estimativa do carregamento proveniente do vento, principalmente nos cabos. Análises lineares estáticas equivalentes são empregadas nos cabos conforme as prescrições normativas aplicáveis, porém é necessário avaliar as consequências dessa simplificação no cálculo dos esforços nas estruturas suporte.

2.2 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho consiste em avaliar os procedimentos usuais utilizados na determinação das solicitações de torres de transmissão, devidas ao efeito do vento, principalmente nos cabos. Para atingir esse objetivo principal, os seguintes objetivos específicos devem ser definidos:

- a) avaliar a distribuição espacial e temporal do vento;
- b) avaliar o comportamento estático do sistema estrutural composto pela torre e cabos, considerando as não linearidades geométricas;
- c) avaliar o comportamento dinâmico dos cabos, considerando o amortecimento aerodinâmico;
- d) comparar os resultados teóricos obtidos com resultados de outros autores que apresentaram estudos acerca do tema;

- e) Elaborar um programa experimental de monitoramento de LT's capaz de produzir uma base de dados suficiente para a validação das análises numérico-teóricas.

2.3 Metodologia

Para a avaliação dos esforços advindos do vento, será estudada uma linha de transmissão de propriedade da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), fase/fase, com potência de 138 kV, denominada LT Taquaril – Alegria. A torre na qual o estudo se concentra é do tipo suspensão, com 28 metros de altura.

A Figura 2.1 apresenta uma fotografia de satélite do trecho da linha LT Taquaril – Alegria em estudo, localizado no município de Rio Acima – MG, indicando a posição da torre em estudo (Torre 50) e das adjacentes (Torre 49 e Torre 51).

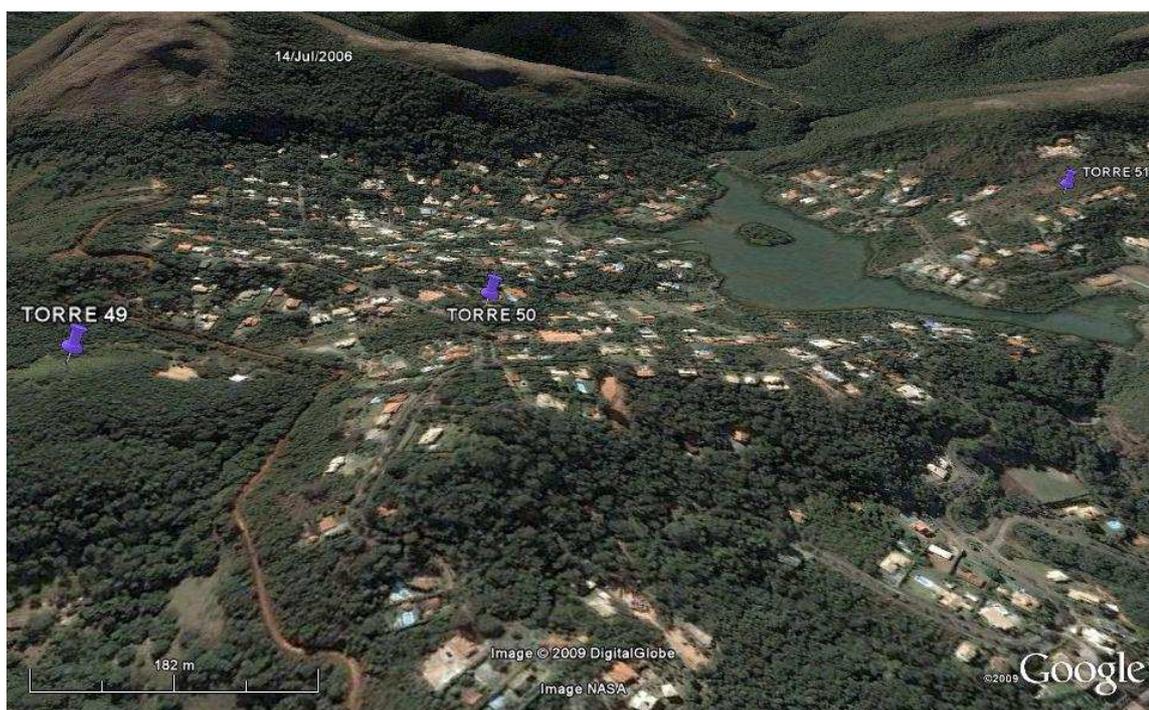


Figura 2.1 – Fotografia de satélite do trecho da linha em estudo (Fonte: <http://www.maps.google.com>).

A Figura 2.2 apresenta um esquema com as principais dimensões do trecho da linha de transmissão, indicando a torre 50 (no centro), os vãos dos cabos e as torres adjacentes (torre 49 à esquerda e torre 51 à direita).

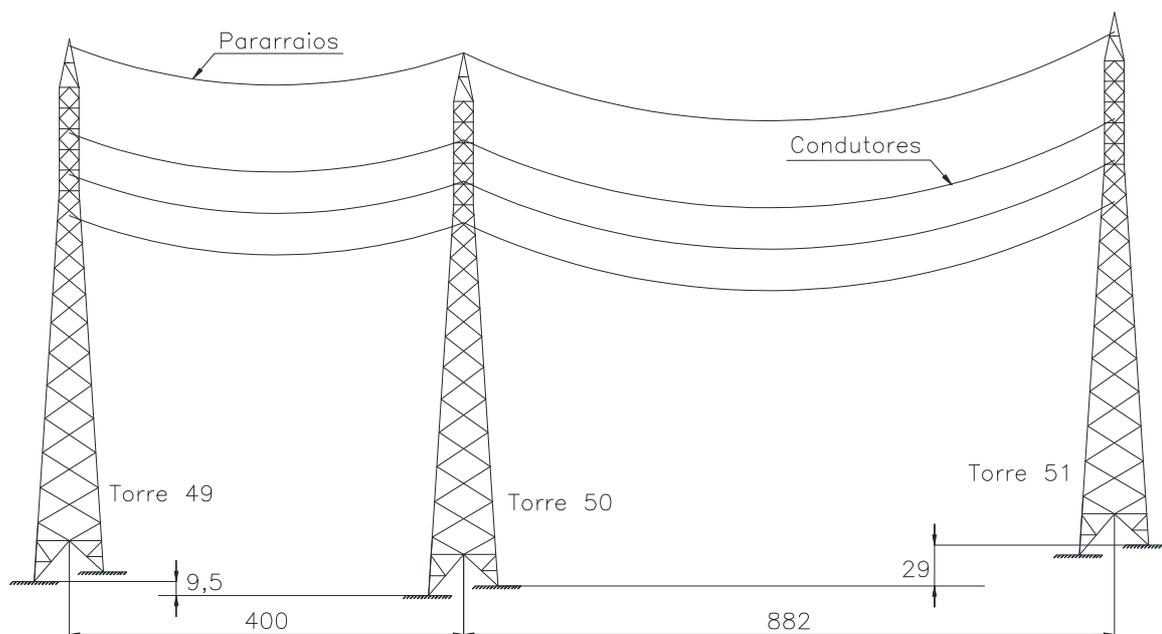


Figura 2.2 – Esquema do trecho da linha de transmissão analisado (sem escala).

As avaliações numérico/teóricas estáticas do conjunto estrutural são realizadas por meio de um modelo em elementos finitos, via ANSYS® v.11 (2007), contemplando a torre 50, as cadeias de isoladores e os cabos. Já para a realização das avaliações dinâmicas, considerando que a torre exerce pouca influência sobre o movimento dos cabos, é utilizado um modelo do cabo isolado, considerando a interação fluido-estrutura através da composição das velocidades do vento e do cabo (amortecimento aerodinâmico). O procedimento proposto para a análise dinâmica dos cabos é geral e pode ser estendido ao sistema completo (torres, cabos e cadeias de isoladores).

O projeto experimental, para utilizações futuras, consiste basicamente no monitoramento do balanço das cadeias de isoladores, da velocidade do vento e das deformações nos principais elementos da estrutura da torre para as ocorrências de vento na região. Neste trabalho, como será detalhado à frente, só foi possível concluir as instalações e registrar algumas medições em ocasiões diferentes. Fica, entretanto, disponível, para continuidade futura, essa instrumentação

importantíssima em um sistema real. Os dados obtidos permitirão a validação das análises teóricas uma vez que incluem as informações referentes às ações na LT e as respectivas respostas estruturais em tempo real.

As ações provenientes dos cabos serão registradas por meio de um sistema de medição, que capta o ângulo de balanço das cadeias de isoladores, constituído por uma câmera de registro de imagens, girômetro e um acelerômetro tridimensional. Os valores e direções da velocidade de vento serão registrados através de um anemômetro ultrassônico tridimensional, instalado na torre a 10 metros de altura em relação ao solo. Na macro região do sistema estudado, há mais três anemômetros em pontos distintos.

As respostas estruturais serão captadas através de sensores de deformação ópticos instalados nos principais elementos estruturais da torre. Os efeitos de temperatura nos elementos metálicos serão compensados através de sensores de temperatura, também ópticos, conectados em série com os sensores de deformação.

Por meio desse laboratório de campo, poderão ser gerados dados, ao longo de períodos prolongados de tempo, com registros de comportamento do sistema em diversas situações de condições atmosféricas.

3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos relativos às características básicas do vento, junto a um histórico das várias pesquisas realizadas sobre LT's submetidas a ações de vento.

Será apresentado também um resumo das formulações matemáticas necessárias para o desenvolvimento das análises estáticas não lineares do sistema estrutural completo e das análises dinâmicas do cabo isolado.

Quanto à parte experimental, serão apresentadas as pesquisas mais recentes de monitoramento de LT's e o embasamento teórico do funcionamento de sensores empregados no programa experimental.

3.1 Análise estática do conjunto estrutural formado por torre, cabos e isoladores

3.1.1 Formulação matemática da análise não linear de estruturas com grandes gradientes de deslocamentos

As rotações e as deformações de uma estrutura decorrem dos gradientes de deslocamentos. Quando os gradientes de deslocamentos adquirem valores elevados, a mudança de geometria correspondente não pode mais ser desprezada na análise. O equilíbrio tem que ser feito na posição deformada, levando a uma análise geometricamente não linear. Cumpre ressaltar que, em estruturas usuais, as deformações são normalmente pequenas, mas as rotações podem não ser desprezáveis (como no caso de cabos).

Caso as cargas sejam aplicadas gradualmente (incrementos de cargas), principalmente em estruturas com grande deslocabilidade, é importante que o incremento posterior leve em consideração as coordenadas do corpo deformado calculadas na iteração anterior. Além da modificação da posição das cargas, a direção das mesmas também pode variar ao longo do processo, como acontece no caso das cargas seguidoras. A Figura 3.1 (A) apresenta uma carga aplicada em uma viga deformada sem mudança de direção (direção sempre vertical) e a Fig. 3.1 (B) um corpo com carga seguidora, carga esta que mudou sua direção devido ao novo posicionamento da estrutura deformada (direção sempre normal à superfície).

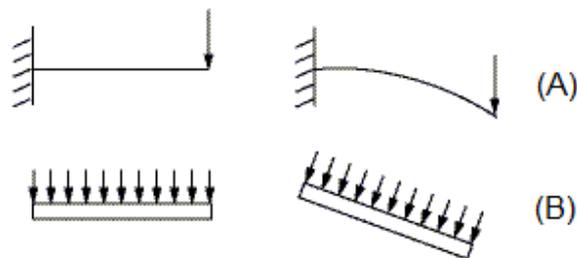


Figura 3.1 – Exemplos de cargas aplicadas sobre a estrutura deformada sem (A) e com (B) a mudança da direção da força.

Uma das formulações que permite analisar estruturas sujeitas a grandes gradientes de deslocamentos é a formulação Lagrangiana (AJIT e SERVA, 1991). Admite-se que as partes de um corpo ocupem posições $\{X\}$ no espaço, na configuração de referência (indeformada), definidas pelas coordenadas Lagrangianas, e posições $\{x\}$ na configuração deformada, definidas pelas coordenadas Eulerianas. Então, o vetor deslocamento $\{u\}$ pode ser definido como:

$$\{u\} = \{x\} - \{X\} \quad (3.1)$$

Onde:

$\{u\}$ é o vetor deslocamento;

$\{x\}$ é o vetor deslocamentos na posição deformada – Coordenadas Eulerianas;

$\{X\}$ é o vetor deslocamentos na posição de referência – Coordenadas Lagrangianas.

Diferenciando as coordenadas Eulerianas em relação às coordenadas Lagrangianas, obtém-se o tensor gradiente de deformações, conforme:

$$[F] = \frac{\partial \{x\}}{\partial \{X\}} \quad (3.2)$$

Esse tensor pode ser escrito em termos do vetor deslocamento, conforme (BATHE, 2006):

$$[F] = [I] + \frac{\partial \{u\}}{\partial \{X\}} \quad (3.3)$$

Onde:

$[I]$ é a matriz identidade.

As informações contidas no tensor gradiente de deformação incluem mudança de volume, rotação de corpo rígido e mudança de forma das partículas do corpo deformado. O determinante do gradiente de deformação (Jacobiano) representa a mudança de volume em um determinado ponto do corpo, conforme mostrado a seguir:

$$J = \det [F] = \frac{\partial V}{\partial V_0} \quad (3.4)$$

Onde:

V é o volume final.

V_0 é o volume inicial.

O tensor $\frac{\partial \{u\}}{\partial \{X\}}$ (Eq. (3.3)) é denominado tensor gradiente de deslocamentos e poderia ser

definido também em função das coordenadas Eulerianas $\{x\}$, isto é, $\frac{\partial \{u\}}{\partial \{x\}}$.

Há dois procedimentos para a análise não linear nessa formulação, a saber: Formulação Lagrangiana Total e Formulação Lagrangiana Atualizada.

No primeiro procedimento, o tensor de deformações utilizado é o tensor de Green-Lagrange, definido pela Eq. (3.5):

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial \{u\}}{\partial \{X\}} \right) + \left(\frac{\partial \{u\}}{\partial \{X\}} \right)^T + \left(\frac{\partial \{u\}}{\partial \{X\}} \right)^T \times \left(\frac{\partial \{u\}}{\partial \{X\}} \right) \right) \quad (3.5)$$

O tensor de tensões conjugado energeticamente com esse tensor de deformações é o segundo tensor de Piola, cuja definição pode ser encontrada em AJIT (1991). O tensor de Piola não tem uma interpretação física e, após a solução do problema, deve ser determinado o tensor de tensões de Cauchy, referido à geometria final.

No segundo procedimento, o tensor de deformações utilizado é o tensor de Almansi, que utiliza gradientes de deslocamento referidos às coordenadas finais $\{x\}$, ou seja:

$$\bar{e} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial \{u\}}{\partial \{x\}} \right) + \left(\frac{\partial \{u\}}{\partial \{x\}} \right)^T - \left(\frac{\partial \{u\}}{\partial \{x\}} \right)^T \times \left(\frac{\partial \{u\}}{\partial \{x\}} \right) \right) \quad (3.6)$$

Como o segundo procedimento é atualizado a cada iteração, o tensor de tensões utilizado é o tensor de Cauchy determinado com base nas geometrias atualizadas a cada iteração.

O pacote computacional ANSYS[®] v.11 (2007), usado no presente trabalho, classifica as não linearidades geométricas em:

Large Strain: assume que as deformações não são infinitesimais (i.e. são finitas). Mudanças de espessura, área, etc. são consideradas nos cálculos. Grandes rotações também são consideradas.

Large Rotation: assume que as rotações podem ser grandes, embora não se tenham grandes deformações. As deformações são calculadas utilizando expressões linearizadas.

Na solução de todos os casos de problemas não lineares, o programa adotado emprega o método de “Newton-Raphson”. As cargas são aplicadas incrementalmente em passos de carga (*load steps*) e o processo é iterativo. Para cada iteração, verifica-se se o critério de convergência estabelecido foi atendido. Uma vez obtida a convergência no processo, passa-se então para o passo de carga seguinte, até o valor final da carga.

3.1.2 Breve histórico de análises realizadas

Diversos modelos numéricos já foram desenvolvidos para a análise de torres treliçadas submetidas a diversos esforços como vento, terremotos, neve e ruptura de cabos. Muitos desses trabalhos enfatizam as análises estática e dinâmica com grandes gradientes de deslocamentos. El-ghazaly e Al-khaiat (1995) discutiram vários aspectos da não linearidade geométrica e aplicaram o método da energia para a análise de torres. Um modelo de torre bidimensional foi investigado e avaliou-se o efeito da análise não linear na carga última resultante da ação do vento. Uma torre de 600 metros de altura foi analisada utilizando os pacotes computacionais de elementos finitos ANSYS® e STAAD-III®. Os efeitos da ruptura acidental dos estais e da variação da temperatura foram avaliados nos modelos numéricos.

Wahba *et al.* (1998) discutiram dois modelos diferentes de elementos finitos usados na análise de torres estaiadas para antenas. No primeiro modelo, elementos tridimensionais de treliça são usados na modelagem do mastro da torre treliçada e elementos não lineares de cabo foram usados para os estais. Já no segundo modelo, mais simples, porém extensamente utilizado, a torre é modelada como uma viga equivalente com base elástica não linear. Os modelos computacionais foram avaliados utilizando seis torres existentes sujeitas a uma variedade de combinações de carregamento que envolvem o peso próprio e as cargas de vento e neve. Os autores concluíram que, para modelagem em elementos finitos dos mastros de torres estaiadas, o modelo tridimensional com elementos de treliça não mostra nenhuma vantagem adicional sobre o modelo de viga equivalente (modelo reduzido), que reduziu extremamente o número de elementos e graus de liberdade. Para a análise da estrutura, o modelo de viga com base elástica não linear forneceu uma solução razoável para as solicitações, mesmo sob condições de carregamento último.

Lee e McClure (2007) desenvolveram um modelo numérico para a análise do comportamento da estrutura de aço de uma torre treliçada. Os autores apresentaram a análise elastoplástica com grandes gradientes de deslocamentos de uma torre treliçada, usando o método dos elementos finitos, e fizeram comparações com resultados experimentais em escala real. Utilizaram elementos finitos de viga tridimensional de seção “L”, contemplando as não linearidades geométrica e de material. Concluíram que, apesar das imperfeições desconhecidas não modeladas

nas análises numéricas, uma boa correlação foi observada entre as soluções numéricas e o modelo experimental.

Oliveira *et al.* (2007) propuseram diferentes modelos para a análise estrutural de torres metálicas estaiadas, considerando todas as forças e momentos internos na estrutura, utilizando elementos finitos tridimensionais de viga e de treliça. As comparações foram realizadas para três configurações de torres metálicas de telecomunicação estaiadas existentes (50m, 70m e 90m de altura). Foram realizados cálculos estáticos e dinâmicos, seguidos por uma análise de flambagem linearizada, para avaliar a influência das diferentes modelagens no comportamento da estabilidade da torre. Os autores concluíram que uma análise utilizando somente elementos finitos de treliça não é adequada para a análise do problema, uma vez que esse modelo acarreta a necessidade de um grande número de acoplamentos nodais para impedir a ocorrência de mecanismos estruturais. A utilização do elemento finito de viga apresenta diversas vantagens, mas a sua adoção leva a conexões rígidas, o que faz com que as cargas de flambagem tenham valores mais elevados. Com relação à análise dinâmica, não se observou muita influência da modelagem e os autores recomendam a utilização de uma terceira estratégia, considerando as diagonais representadas por elementos de treliça e as colunas por elementos de viga.

Blessmann (2001), em estudos referentes a acidentes causados pelo vento e suas prováveis causas, confrontou as prescrições normativas da ABNT NBR 6123 (1988) com as prescrições da ABNT NBR 5422 (1985). Segundo ele, a ABNT NBR 6123 (1988) considera uma probabilidade de ruína pequena em relação à ABNT NBR 5422 (1985), por isso são obtidas, com a primeira, cargas devidas ao vento mais elevadas. Essa última baseia-se em normas européias que permitem uma probabilidade de ruína bem maior em zonas não povoadas. Devido à existência de uma malha de distribuição de energia mais densa, qualquer ruína parcial do sistema seria facilmente suprida pelas demais linhas. As cargas inferiores associadas à ABNT NBR 5422 (1985) explica, para o autor, a queda de linhas de transmissão em São Paulo, no Rio Grande do Sul e na Argentina. Nesse mesmo trabalho, Blessmann analisa a queda de sessenta e cinco torres localizadas em São Paulo, de propriedade da CESP, que, segundo ele, vieram à ruína devido à ocorrência de ventos entre 147 km/h e 155 km/h. Esses valores encontram-se dentro dos limites especificados para a região de São Paulo pela ABNT NBR 6123 (1988) e fora dos limites

determinados com base na ABNT NBR 5422 (1985). O autor afirma que não ocorreram acidentes com torres projetadas de acordo com as prescrições da norma ABNT NBR 6123 (1988).

Assim, percebe-se que existem vários estudos sobre os tipos de modelagem e de análise que devem ser empregados nas estruturas de linhas de transmissão, buscando aumentar a segurança dessas estruturas e, ao mesmo tempo, otimizar o projeto das mesmas.

3.1.3 Breve descrição da metodologia desenvolvida

Em Carvalho (2010), foi desenvolvido um modelo completo tridimensional, em elementos de treliça, contemplando as torres, cadeias de isoladores e cabos, para a avaliação dos efeitos da não linearidade geométrica no sistema estrutural. Os resultados obtidos através do modelo completo foram comparados com os de um modelo simplificado contendo somente a estrutura da torre, em conformidade com as prescrições da norma de referência ABNT NBR 5422 (1985). Foi observada a importância da consideração das não-linearidades no sistema estrutural, principalmente na avaliação de carregamentos assimétricos, como por exemplo, o vento atuando em somente um dos vãos de cabos.

Paralelamente, foram avaliadas as normas que apresentam diretrizes para o cálculo dos esforços devidos ao vento, a norma ABNT NBR 6123 (1988) e a norma ABNT NBR 5422 (1985). Dos resultados observam-se valores mais elevados para as forças de vento calculadas conforme a NBR 6123 (1988), quando comparados com os valores da NBR 5422 (1985).

3.2 Análise dinâmica do cabo isolado

3.2.1 Formulação matemática para a obtenção das frequências e modos de vibração

As frequências de vibração (autovalores) e os modos de vibração (autovetores) podem ser obtidos por meio da equação (JAMES, 1989):

$$([K] - \omega_i^2[M])\{\varphi_i\} = 0 \quad (3.7)$$

Onde:

$[K]$ é a matriz de rigidez do sistema estrutural;

ω_i é a i -ésima frequência natural de vibração;

$[M]$ é a matriz de massa do sistema estrutural;
 φ_i é o vetor que exprime o i -ésimo modo de vibração do sistema.

3.2.2 Formulação matemática para a análise dinâmica

A análise dinâmica linear de um sistema estrutural pode ser realizada a partir do processo de superposição modal, sendo a resposta descrita em função das formas modais. Para a composição da resposta, é possível utilizar uma parcela reduzida dos modos de vibração o que, sem dúvida, reduz o custo computacional associado à análise. No entanto, para sistemas cujas propriedades geométricas não podem ser consideradas constantes no decorrer da análise, não é válida a análise dinâmica pelo método da superposição modal.

O comportamento do sistema estrutural constituído pelas torres de transmissão, cadeias de isoladores e cabos pode ser classificado como altamente não linear e, portanto, não pode ser analisado pelo método da superposição modal. É necessária, então, a integração, passo a passo, das equações de movimento apresentada a seguir (JAMES, 1989):

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (3.8)$$

Onde:

$[M]$ é a matriz de massa do sistema estrutural;

$[C]$ é a matriz de amortecimento do sistema estrutural;

$[K]$ é a matriz de rigidez do sistema estrutural;

$\{\ddot{u}\}$ é o vetor de acelerações nodais;

$\{\dot{u}\}$ é o vetor de velocidades nodais;

$\{u\}$ é o vetor de deslocamentos nodais;

$\{F\}$ é o vetor de forças externas.

A integração numérica das equações de movimento pode ser realizada a partir de algoritmos de solução clássicos, como apresentado, por exemplo, por Clough (1975).

3.2.3 Aspectos gerais do vento

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

Conforme exposto por Blessmann (1983), pode-se considerar o vento como uma componente média sobreposta a uma componente flutuante. A velocidade média do vento é avaliada a partir de dados climatológicos existentes e é geralmente estimada a partir de um intervalo de integração entre 10 minutos e 1 hora. Esse intervalo de tempo é suficiente para apresentar valores médios estáveis. Para fins de análise dinâmica, a norma ABNT NBR 6123 (1988) sugere o intervalo de integração de 10 minutos na determinação da velocidade média a ser superposta às flutuações de velocidade consideradas como um processo aleatório estacionário. Para cálculos estáticos, utilizam-se valores de pico de velocidade de vento associados a médias locais calculadas em intervalos de tempo de 3 a 3600 segundos, dependendo das dimensões da construção. Já a norma ABNT NBR 5422 (1985) sugere, para cálculos estáticos, valores de velocidade de vento obtidos com os períodos de integração de 2 e 30 segundos para as estruturas suportes e os cabos, respectivamente.

Denomina-se altura gradiente a altura medida a partir da superfície da Terra na qual a velocidade do vento atinge a velocidade gradiente, definida como a velocidade tangente às isóbaras curvas. Essa altura situa-se, em geral, entre 250 e 600 metros. Entretanto, há indícios de que, em certas situações, essa altura pode chegar a valores bem superiores (BLESSMANN, 1995).

Abaixo da altura gradiente situa-se a camada limite atmosférica, na qual a velocidade do vento é modificada por diversas causas. Nessa região, as características do vento dependem principalmente da topografia do terreno, da forma, dimensões e distribuição dos obstáculos naturais e artificiais (rugosidade artificial) e da variação vertical da temperatura. Todos esses fatores originam turbulência, que se dissemina por toda a camada limite atmosférica.

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

atmosférica e, conseqüentemente, maior a altura gradiente. A altura gradiente é maior em uma cidade do que em campo aberto, por exemplo.

3.2.4 Caracterização do movimento de cabos suspensos sujeitos à ação do vento

A ação do vento sobre as linhas de transmissão provoca oscilações dos condutores caracterizadas por movimentos complexos. A energia associada ao processo pode ser dissipada por atrito interno, atrito entre os fios, transferida para os grampos de fixação, amortecedores, espaçadores, elementos de suspensão ou suportes, transferida para cabos adjacentes, no caso de feixes, ou retornar para o vento. A taxa de dissipação de energia indica se o movimento do condutor será suprimido, sustentado ou acelerado.

Conforme Sachs (1978), as forças que o vento exerce nos cabos são:

- a) forças de elevada frequência e baixa amplitude, com excitação devida a vórtices (vibração eólica ou vibração por desprendimento de vórtices);
- b) forças de baixa frequência e alta amplitude causadas por instabilidades do arrasto e da sustentação do cabo (excitação por galope);
- c) oscilações verticais/horizontais/torsionais acopladas em conjuntos de cabos (oscilações induzidas pela esteira);
- d) forças de arrasto estáticas e, em certos tipos de cabos, forças de sustentação. Tanto o arrasto quanto os coeficientes de sustentação variam com o número de Reynolds;
- e) forças de rajada aleatória, dando origem a oscilações com amplitudes randômicas (vibração devido à turbulência atmosférica).

Os movimentos são caracterizados por diferentes mecanismos de transferência de energia, diferentes movimentos, frequências, amplitudes e efeitos sobre os condutores. Uma descrição breve de cada movimento é feita a seguir.

3.2.4.1 Vibração eólica ou vibração por desprendimento de vórtices

A vibração eólica é ocasionada pelo desprendimento alternado de vórtices nas partes superior e inferior do condutor, sendo a sua frequência função da lei de *Strouhal*, conforme exposto por Oliveira (1996). Os vórtices ocorrem em grandes vãos na presença de ventos com baixa

velocidade média, entre 2 e 7 m/s. Esse tipo de vibração apresenta baixa amplitude, cerca de uma vez o diâmetro do condutor, e frequência muito elevada, conforme mostrado na Figura 3.2.

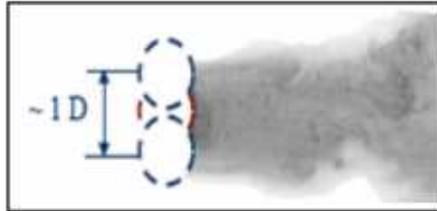


Figura 3.2 – Amplitude de oscilação das vibrações eólicas (SNEGOVSKI, 2004).

A formação dos vórtices causa o surgimento de forças de sucção após o ponto de separação da camada limite formada junto à superfície do cabo. Os chamados “vórtices de *Von Kármán*” originam forças periódicas, transversais em relação à direção do vento médio. Considerando-se as componentes, as forças alternadas na direção do vento médio ocorrem na frequência do desprendimento individual dos vórtices, enquanto que as forças alternadas na direção transversal ao vento ocorrem com frequência de duas vezes a frequência do desprendimento de vórtices. A Figura 3.3 mostra o desprendimento cadenciado dos “vórtices de *Von Kármán*”.

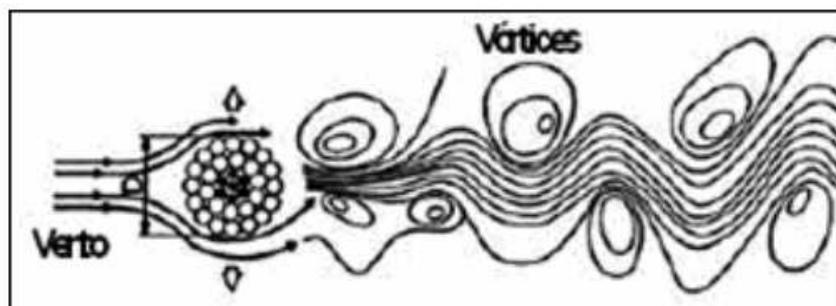


Figura 3.3 – Desprendimento dos “vórtices de *Von Kármán*” (SNEGOVSKI, 2004).

O dano mais comum ocasionado pelas vibrações eólicas é o rompimento, por fadiga, dos fios individuais que compõem os condutores. A fadiga é causada pelos esforços dinâmicos resultantes do dobramento alternado dos fios nas regiões de fixação, local onde o cabo está sujeito a efeitos de flexão.

Segundo Rodrigues (2004), acessórios especiais como amortecedores do tipo massa mola podem ser utilizados para a atenuação das amplitudes dos movimentos e, conseqüentemente, na prevenção das falhas por fadiga.

3.2.4.2 Galope dos condutores

Estruturas leves e flexíveis, com pequeno amortecimento, podem apresentar oscilações causadas pelo fenômeno de instabilidade aerodinâmica denominado galope. São oscilações de frequência muito baixa (0,1 a 1 Hz) e alta amplitude no plano vertical. Ventos moderadamente fortes e estáveis atuando sobre uma superfície assimétrica do condutor (normalmente com deposição de gelo) são a principal causa desse tipo de vibração, como representado na Figura 3.4. Nessas condições, uma rotação do condutor em resposta ao vento pode causar variação na sustentação aerodinâmica e iniciar a oscilação do condutor na direção vertical.

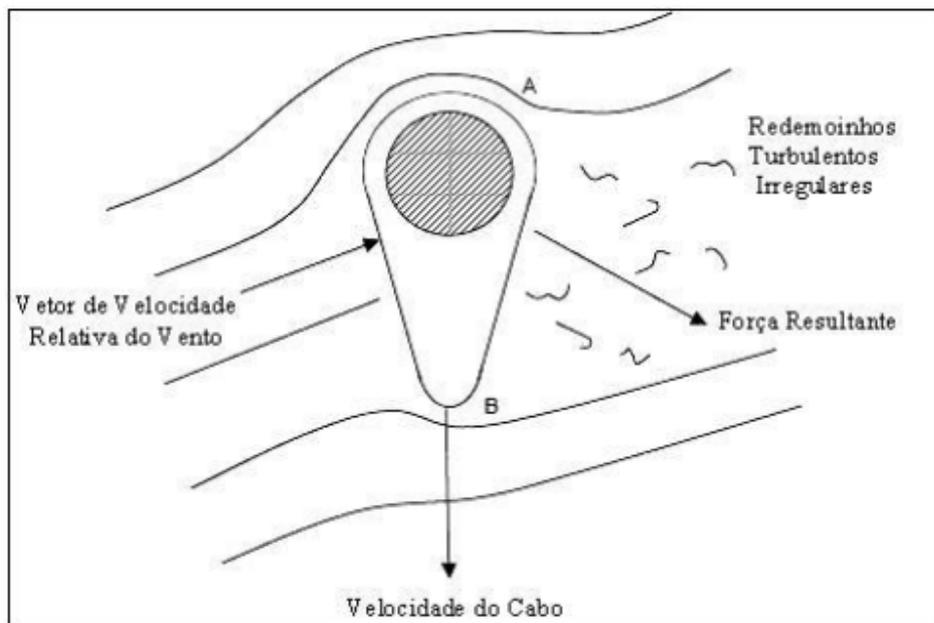


Figura 3.4 – Assimetria do condutor e amplitude de oscilação do condutor (IRVINE, 2006).

A amplitude de oscilação na direção transversal à velocidade média do vento aumenta com a velocidade do mesmo, implicando a mudança contínua do ângulo de incidência do vento em relação ao corpo oscilante. Se for desenvolvida uma força na direção e no sentido do movimento do corpo, a energia será retirada do escoamento e a oscilação será mantida. A energia transmitida

ao condutor pelo vento é muito maior que no caso da vibração eólica, com amplitudes semelhantes às flechas dos condutores.

Pesquisas recentes indicam que condutores que apresentam galope, particularmente quando há configuração de feixe de cabos, não envolvem somente movimentos verticais, mas também significativos movimentos horizontais e de torção dos condutores. A composição desses movimentos é denominada drapejamento (*flutter*). Simpson e Lawson (1968) *apud* Klein (2004) foram os primeiros a demonstrar que, no caso de um feixe de dois condutores, sob certas condições, pode ocorrer instabilidade envolvendo grandes movimentos verticais, horizontais e de torção. O acoplamento entre esses movimentos surge quando as frequências naturais em relação aos eixos vertical e horizontal do cabo são múltiplas uma da outra ou próximas disso. A velocidade crítica do vento ou velocidade de disparo, na qual surgem subitamente as instabilidades, está relacionada ao ângulo de incidência do vento, à frequência natural e ao amortecimento estrutural do cabo.

Segundo Verma (2002), o galope é o tipo de vibração mais perigoso para os condutores, podendo levar à ruptura do mesmo por fadiga, danificando também amortecedores, grampos de fixação e outros dispositivos. Os métodos de proteção baseiam-se em mecanismos de prevenção, como a remoção dos depósitos de gelo, interferência nos mecanismos que desencadeiam o galope ou a adoção de configurações mais robustas.

3.2.4.3 Oscilações induzidas pela esteira

Oscilações induzidas pela esteira são características de linhas constituídas por feixes de condutores submetidos a ventos fortes e moderados, com velocidades médias mais elevadas, entre 4 a 18 m/s. A esteira produzida pelo condutor localizado a barlavento pode provocar forças variáveis e complexas no condutor localizado a sotavento. O condutor a sotavento pode adquirir um movimento oscilatório caracterizado por uma órbita elíptica irregular e de amplitudes elevadas, levando até mesmo ao contato entre os condutores.

As oscilações produzidas pela turbulência da esteira podem ocasionar quatro tipos de movimentos, sendo três deles capazes de afetar o vão inteiro, denominados modos de corpo

rígido (itens B, C e D da Figura 3.5). O quarto movimento é capaz de mobilizar somente parte do vão (item A da Figura 3.5).

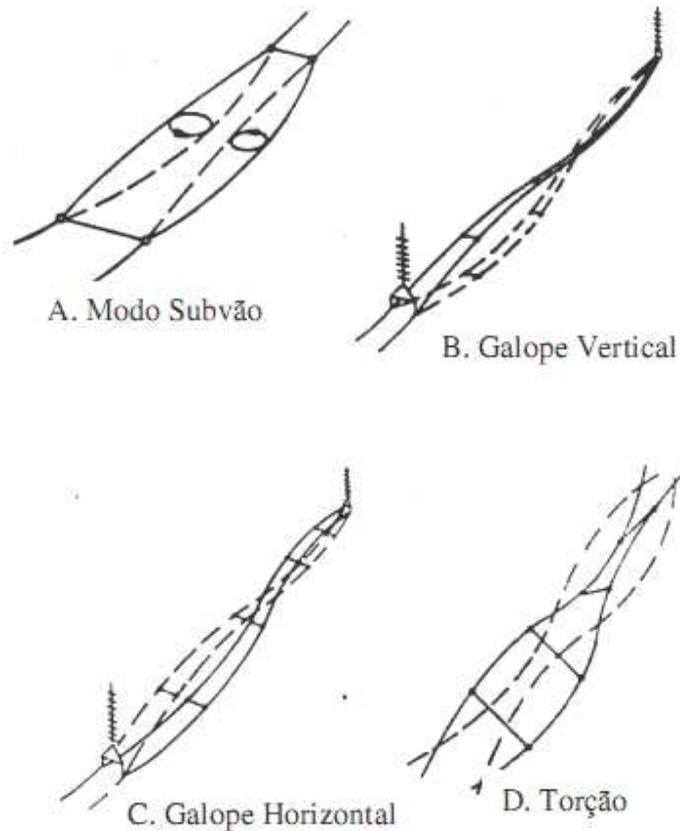


Figura 3.5 – Movimentos induzidos por esteiras em feixes de condutores (COOPER E WATTS, 1976).

Nos três modos de corpo rígido ocorre a presença de translação (horizontal e vertical) e rotação, simultaneamente. O deslocamento vertical ou horizontal está sempre acoplado com a rotação, enquanto que na torção aparece somente a componente de deslocamento vertical.

O modo de subvão é característico do condutor a sotavento, uma vez que este apresenta tendência de movimento independente dos demais condutores. As trajetórias dos condutores são elípticas e as fases dos condutores localizados a barlavento e a sotavento são opostas. Movimentos em subvãos adjacentes são geralmente sincronizados, com possibilidade de estar ou não em fase. Os movimentos mais observados são os de feixes compostos por dois condutores, com amplitudes

semelhantes, com o primeiro modo de subvão ocorrendo entre 1 e 4 Hz. Não necessariamente os condutores devem apresentar a mesma amplitude de movimentos, sendo comum observar um par com amplitude bem superior ao outro.

Mesmo com muitos estudos sobre esses fenômenos, aproximações contendo teorias quase estáticas são utilizadas na verificação da estabilidade, principalmente para o cabo localizado a sotavento, devido ao alto nível de complexidade.

3.2.4.4 Comparação dos movimentos de cabos apresentados nos itens anteriores

A Tabela 3.1 apresenta um resumo da comparação entre as características apresentadas por cada um dos três tipos de movimentos cíclicos de condutores induzidos pelo vento, conforme a *Electric Power Research Institute (EPRI, 1979)*.

Observa-se que todos os movimentos ocorrem para velocidades baixas de vento, isto é, até 18 m/s. Dos três movimentos apresentados, somente o galope dos condutores pode levar a danos nas estruturas suportes, necessitando sempre da presença de uma assimetria da seção do condutor. Os demais movimentos podem acarretar danos a elementos isolados auxiliares tais como acessórios de suspensão, espaçadores, amortecedores e cabos condutores e pararraios.

Dos movimentos descritos anteriormente, a primeira categoria, vibração eólica, vem sendo amplamente estudada devido aos problemas de fadiga dos condutores, não tendo efeitos relevantes na estrutura das torres. Uma vez que não apresenta efeitos relevantes nas estruturas suportes dos cabos (torres), não será avaliada neste trabalho. A segunda categoria, o galope, é decorrente de ventos de alta intensidade, combinados com assimetria do condutor, causada na maioria dos casos pela deposição de gelo. Como no Brasil não existem muitas regiões com precipitação de neve, esse fenômeno não será estudado neste trabalho. O terceiro fenômeno, oscilações induzidas por vórtices, tem sua existência condicionada à presença de feixes de condutores, o que não ocorre na estrutura em análise, e também não será abordado. Portanto, embora não menos importantes, os três tipos de movimentos cíclicos apresentados não serão abordados neste trabalho, onde somente os movimentos devidos à turbulência atmosférica serão estudados. O foco deste trabalho são os esforços que os cabos aplicam na torre, e não a avaliação da integridade do cabo em si.

Tabela 3.1 – Comparação entre os tipos de movimento cíclicos de condutores (LOREDO-SOUZA, 1996)

	Vibração Eólica	Galope do Condutor	Oscilações induzidas pela esteira
Tipo de linha de transmissão afetada	Todas	Todas	Todas
Faixa de frequência (Hz)	3 a 150	0,08 a 3	0,15 a 10
Faixa de amplitude (tomando o diâmetro (d) do condutor como referência)	0,01 a 1	5 a 300	Modo de corpo rígido 0,5 a 0,8 Modo de subvão 0,5 a 20
Condições de tempo favoráveis aos movimentos do condutor			
Característica do vento	Laminar	Laminar	Laminar
Velocidade do vento (m/s)	1 a 7	7 a 18	4 a 18
Superfície do condutor	Desencapada/Congelada uniformemente	Congelada assimetricamente	Desencapada/seca
Condições de projeto que afetam o movimento do condutor			
	Tensão da linha, auto-amortecimento do condutor, uso de amortecedores e protetores (barras)	A relação entre as frequências naturais verticais e as frequências naturais torsionais, razão de decaimento e as condições de contorno	Separação e arranjo do subcondutor, inclinação do feixe e distância entre os espaçadores
Danos			
Tempo estimado para o desenvolvimento de falhas	3 meses a 20 anos	1 a 48 horas	4 a 18 horas
Causa direta do dano	Fadiga do metal devido ao carregamento cíclico	Cargas dinâmicas altas	Colisão dos condutores e desgaste físico acelerado
Componentes de linha mais afetados pelos danos	Condutores e para-raios	Condutor, ferragens, isoladores e estruturas	Acessórios de suspensão, espaçadores, amortecedores e fios do condutor

3.2.4.5 Movimentos causados pela turbulência atmosférica

Pode-se dividir a excitação do vento em duas parcelas, sendo uma média (comportamento estático) e a outra flutuante (comportamento dinâmico). As flutuações do escoamento de ar são quase que integralmente causadas por agitação mecânica do ar, formando um grande número de turbilhões. Os turbilhões originam as rajadas de vento, que ocorrem em uma sequência aleatória de frequências e intensidades. Conforme Blessmann (1995), além desses turbilhões de origem mecânica, podem aparecer outros causados por transformações termodinâmicas, como movimentos circulatorios que podem atingir dezenas ou centenas de quilômetros.

Na engenharia estrutural, considera-se o vento como uma superposição de turbilhões de dimensões bem diversas, desde os maiores, da ordem de grandeza da altura da camada limite atmosférica, até os menores, da ordem de grandeza do milímetro. Além da solicitação estática do vento, que depende da sua velocidade média, aparecem solicitações dinâmicas, que dependem da energia cinética contida nas flutuações e de como essa energia se distribui pelas diversas frequências.

Todo esse espectro de frequências presente no vento excita dinamicamente os cabos de linhas de transmissão que, por sua vez, respondem com movimentos pendulares de grandes amplitudes de deslocamento e múltiplas frequências.

3.2.5 Aerodinâmica de cabos

Conforme Loredou-Souza (1996), o movimento de cabos é dominado pelo amortecimento aerodinâmico, sendo que o amortecimento mecânico ($\zeta_s \approx 0,0005$) não é tão expressivo, especialmente para ventos elevados. Já para o movimento da torre, ambas as fontes de amortecimento são de igual importância. O amortecimento aerodinâmico é definido como uma força retardadora derivada do movimento relativo entre a estrutura e o ar. É função linear da velocidade do vento V e, no caso de uma estrutura prismática, tal como um cabo, em escoamento uniforme e movimento na direção do vento (arrasto), há uma expressão para o amortecimento aerodinâmico proposta por Davenport (1988) e Vickery (1992), conforme apresentado a seguir:

$$\zeta_{aj} = \left(\frac{C_D}{4\pi}\right) \left(\frac{\rho_a d^2}{m}\right) \left(\frac{V}{f_j d}\right) \quad (3.9)$$

Onde:

ζ_{aj} é o amortecimento aerodinâmico do j -ésimo modo;

C_D é o coeficiente de arrasto;

ρ_a é a densidade do ar;

d é o diâmetro do cabo;

m é a massa por unidade de comprimento do cabo;

V é a velocidade do vento;

f_j é a j -ésima frequência natural do cabo em Hz.

O amortecimento é apresentado como uma fração do crítico, para o modo j . Como cabos de linhas de transmissão geralmente possuem baixos valores de massa por unidade de comprimento ($m \leq 2\text{kg/m}$), o amortecimento aerodinâmico pode chegar a 60% do crítico para valores extremos de velocidade do vento. O papel do amortecimento aerodinâmico na resposta à ação do vento de cabos tracionados é amplamente discutido por Davenport (1988). Posteriormente, Loredou-Souza (1996) considerou o amortecimento modal proposto por Davenport em estimativas teóricas para comparação com resultados obtidos através de ensaios de cabos de linhas de transmissão em túnel de vento.

A formulação anteriormente descrita simplifica drasticamente o cálculo da interação entre o fluido e a estrutura no caso de movimento de cabos submetidos ao vento. Entretanto, propõe-se, neste trabalho, a utilização de um procedimento mais genérico, que pode ser aplicado a qualquer tipo de estrutura.

O coeficiente de arrasto pode ser definido como:

$$C_D = \frac{\bar{F}}{(1/2)\rho_a \bar{V}^2 d l} \quad (3.10)$$

Onde:

\bar{F} é a força média do vento;

ρ_a é a densidade do ar;

\bar{V} é a velocidade média do vento;

d é o diâmetro do cabo;

l é o comprimento do cabo.

3.2.6 Breve histórico de análises realizadas

Davenport (1979) relacionou o fator de rajada com o carregamento do vento em linhas de transmissão. Foram utilizados métodos estatísticos que contemplavam a correlação espacial, o espectro de energia do escoamento e a resposta dinâmica do sistema de linhas de transmissão. Esse estudo teve como foco o carregamento transversal, mas foi avaliada também a influência da variação do coeficiente de arrasto C_D .

Cappellari (2005) avaliou a resposta dinâmica de feixes de condutores expostos ao vento. Foram avaliados campos de velocidades do vento para as tormentas extratropicais, para tornados e a condição das duas situações superpostas. O amortecimento aerodinâmico foi considerado conforme os modelos matemáticos específicos para cabos, propostos por Simpson (1971) e Jones (1992) *apud* Cappellari (2005). A metodologia numérica desenvolvida foi aplicada a um estudo de caso real no qual existiam medições de velocidade de vento e reações nas estruturas de suporte por um período de dois meses, validando experimentalmente o modelo proposto. Ao final das análises, foi proposto um procedimento para avaliar a confiabilidade de condutores em feixes, baseado no cálculo da função densidade de probabilidade de variáveis pertinentes ou, alternativamente, a confiabilidade de um vão de linha genérico, para uma determinada função de falha, através de simulação numérica.

Rodrigues (2004) apresentou um modelo tridimensional em elementos finitos capaz de simular, estática e dinamicamente, um trecho de uma linha de transmissão submetido à turbulência atmosférica. Com os cabos modelados em elementos de pórtico com baixa rigidez à flexão, foi possível reproduzir os grandes deslocamentos angulares das cadeias de isoladores e cabos elétricos provocados pela ação do vento. Esses grandes movimentos pendulares dos cabos, devido à grande massa envolvida, afetam consideravelmente os esforços na estrutura suporte.

Com o mesmo modelo numérico, Rodrigues *et al.* (2003) alertaram para a necessidade de revisão dos procedimentos de projeto de LT's, no que diz respeito à consideração dos efeitos de inércia

dos cabos sob a excitação dinâmica do vento. Foram verificadas duas estruturas e concluiu-se que a estabilidade desses sistemas estruturais só pode ser garantida para velocidades máximas de vento da ordem de 25 a 30 m/s e que a estabilidade de estruturas dimensionadas para velocidades superiores, com o limite de 50 m/s, só pode ser garantida através da utilização de atenuadores dinâmicos sincronizados.

Oliveira (2006) desenvolveu um modelo semelhante também para avaliar os efeitos dinâmicos devidos ao vento e concluiu que a parcela dinâmica da resposta das estruturas é determinante no seu comportamento. O autor discordou das elevadas inclinações das cadeias dos isoladores obtidas por Rodrigues (2004), que superaram os 90° (configuração praticamente horizontal da cadeia de isoladores). O autor concluiu também que, através da análise das funções de densidade espectral das respostas, a maior parcela da energia é transmitida ao sistema a partir das excitações de frequências inferiores a 1Hz.

Santos (2008) também seguiu a mesma linha de pesquisa, desenvolvendo um modelo tridimensional para um feixe de cabos separados por espaçadores-amortecedores. De maneira análoga, concluiu que as análises não lineares e dinâmicas ocasionaram incrementos nos esforços máximos na torre, quando comparados com a análise estática linear.

Rodrigues (2004), Oliveira (2006) e Santos (2008) apresentaram trabalhos muito importantes para o estado da arte atual relativo ao comportamento dinâmico de cabos de LT's submetidos ao vento. Entretanto, um passo adicional deve ser dado com relação a esses trabalhos. Esse passo é a consideração da interação entre fluido e estrutura (amortecimento aerodinâmico). Nesse caso, as pressões aerodinâmicas serão influenciadas pelo movimento do sistema estrutural.

Loredou-Souza (1996) realizou avaliações experimentais em modelos reduzidos de linhas de transmissão em túnel de vento. Junto ao trabalho experimental, foi desenvolvida uma comparação entre metodologias teóricas atuais, sendo uma baseada no método do fator de rajada de Davenport e a outra baseada no método estatístico usando linhas de influência. No trabalho experimental desenvolvido em túnel de vento foi necessário utilizar modelos bastante reduzidos, devido às limitações de tamanho do túnel de vento.

3.3 Monitoramento de estruturas de linhas de transmissão

3.3.1 Generalidades sobre o uso de sensores no monitoramento de LT's

Instrumentos de medição para uso em LT's devem ser projetados para enfrentar condições especiais de operação. Dificuldades de acesso ao local de instalação, exposição a intempéries, risco de vandalismo, elevados campos elétricos e magnéticos, e limitações de alimentação elétrica são algumas dificuldades do monitoramento. No caso do monitoramento de grandezas dinâmicas, onde é necessária uma frequência maior de aquisição de dados, também a autonomia, confiabilidade e capacidade de armazenamento do sistema de medição devem ser cuidadosamente observadas.

A obtenção de medições em linhas de transmissão com o uso de transdutores convencionais apresenta, pelos motivos anteriormente citados, grandes dificuldades, principalmente por sofrerem interferências causadas pelos campos elétricos e magnéticos gerados pelos condutores energizados.

O avanço na tecnologia optoeletrônica e a gradativa redução no preço dos componentes ópticos têm viabilizado a produção de sensores de fibra óptica como uma alternativa ao uso dos transdutores tradicionais. Sensores em fibra óptica apresentam inúmeras vantagens técnicas, tais como imunidade a campos elétricos e magnéticos, baixo consumo de energia, baixa perda na transmissão do sinal e possibilidade de multiplexação, ou seja, utilização de vários sensores na mesma fibra (CULSHAW e DAKIN, 1989).

Para que a fibra óptica possa ser usada como sensor, é necessário que uma das seguintes características da propagação da luz seja alterada e correlacionada com um parâmetro físico ou químico externo a ser controlado:

- a) intensidade;
- b) fase;
- c) frequência / comprimento de onda / cor;
- d) polarização;
- e) tempo de percurso;

f) interferência modal.

Existem várias técnicas para implementar tais correlações, porém, neste trabalho, serão apresentados somente os exemplos aplicáveis à medição do comprimento de onda.

3.3.2 Histórico de monitoramentos de LT's

Kempner e Laursen (1981) avaliaram, em um modelo real, o comportamento dinâmico de uma torre metálica de um sistema de transmissão submetida a forças de vento. O resumo dos resultados indicou uma diferença de 15% nos esforços axiais dos elementos medidos em campo, em relação aos calculados numericamente por meio de análise dinâmica. A resposta dinâmica da estrutura devida ao vento mostrou-se quase estática para os tipos de vento observados.

Krishnasamy (1981) também realizou testes em modelos em escala real. Seus estudos indicaram que a utilização das especificações normativas americanas daquela época resultava em estruturas mais resistentes que o necessário. Ele defendeu, em seu trabalho, que uma avaliação mais criteriosa do espectro de ocorrência da carga de vento nas estruturas de torres de transmissão, combinada com métodos mais avançados de projeto que contemplassem variações estatísticas de carga e resistência, levariam à otimização dessas estruturas. Já se observa, na atualidade, a tendência de incorporação dos conceitos de confiabilidade nas normas de projeto de linhas de transmissão, como na norma europeia *International Electrotechnical Commission* (IEC) 60826 (IEC, 2003).

Katoh *et al.* (1995) estudaram, em um modelo real, as vibrações induzidas pelo vento em torres de linhas de transmissão para velocidades inferiores a 25m/s. O terreno no qual a estrutura se localizava apresentava muitos picos e vales, caracterizando uma região montanhosa. A conclusão desse trabalho indicou que a direção preferencial do vento exerce uma forte influência sobre as características do escoamento (escoamento particular). As características das vibrações do sistema estrutural são mais influenciadas pela ação do vento nos cabos condutores. O amortecimento aerodinâmico foi determinado, mostrando sua grande parcela de contribuição no amortecimento total.

Clark *et al.* (2006) estudaram, em um modelo real de torre de transmissão, o comportamento estrutural após o rompimento de um cabo do sistema. Para tanto, as torres da linha foram

instrumentadas com células de carga nos cabos, acelerômetros no topo das torres e extensômetros nas colunas. Foram realizadas baterias de testes simulando o rompimento dos cabos condutores (diferentes elevações nas torres) e do para-raios, resultando na proposta de uma recomendação, conforme os resultados experimentais obtidos, capaz de determinar as cargas de arrancamento das fundações devido a essas ações.

Silva e Carvalho (2009) ensaiaram um protótipo em escala real, na África do Sul, tendo como objetivo principal a medição das frequências de vibração nas direções longitudinal e transversal à linha, avaliando a influência dos condutores nesses parâmetros. Nesse trabalho, foi constatado que as frequências fundamentais variavam com a inclusão dos cabos nos ensaios e que o amortecimento era maior para a torre com os cabos do que no modelo isolado, principalmente para vibrações na direção transversal à linha.

Légeron e Gani (2009) realizaram um estudo experimental do comportamento temporal e espacial do vento em Quebec, no Canadá. Um conjunto de cinco anemômetros posicionados em linha em diferentes alturas foi responsável pelo monitoramento contínuo em quatro anos. Os resultados obtidos foram suficientes para embasar importantes aspectos da modelagem da velocidade do vento.

Chisholm (2010) monitorou a variação da tensão e das flechas nos condutores devida aos efeitos de temperatura para vãos simples e vãos múltiplos. Para a determinação das flechas, foram utilizados sensores do tipo sonar posicionados no solo e direcionados para o vértice da catenária dos cabos.

Percebe-se assim um grande esforço dos pesquisadores para a avaliação correta das solicitações presentes nas estruturas que compõem as linhas de transmissão. Somente o conhecimento adequado das ações e das respectivas respostas da estrutura à atuação das mesmas poderá levar a um projeto de LT's com controle da confiabilidade. Observa-se que as pesquisas experimentais de campo foram realizadas por diversos pesquisadores, mas ainda são insuficientes para a consolidação das metodologias de cálculo de LT's.

3.3.3 Sensores de fibra óptica

Os sensores de fibra óptica podem ser classificados como intrínsecos ou extrínsecos, conforme a técnica para obtenção da medição.

Os sensores intrínsecos são aqueles nos quais a fibra é também o elemento sensor, isto é, a luz não deixa a fibra ao ser alterada pelo fenômeno medido. Os sensores extrínsecos ou híbridos são aqueles nos quais a fibra atua principalmente como meio de transmissão de sinal. A alteração da luz, entretanto, ocorre fora da fibra, em outro material sensível ao fenômeno sob observação, sendo a luz novamente coletada para a mesma ou outra fibra.

Os sensores mais difundidos na área de instrumentação são os baseados nas Redes de Bragg e classificados como intrínsecos. Redes de Bragg em fibras ópticas são modulações locais, longitudinais e periódicas do índice de refração do núcleo da fibra. O princípio de operação é mostrado na Figura 3.6.

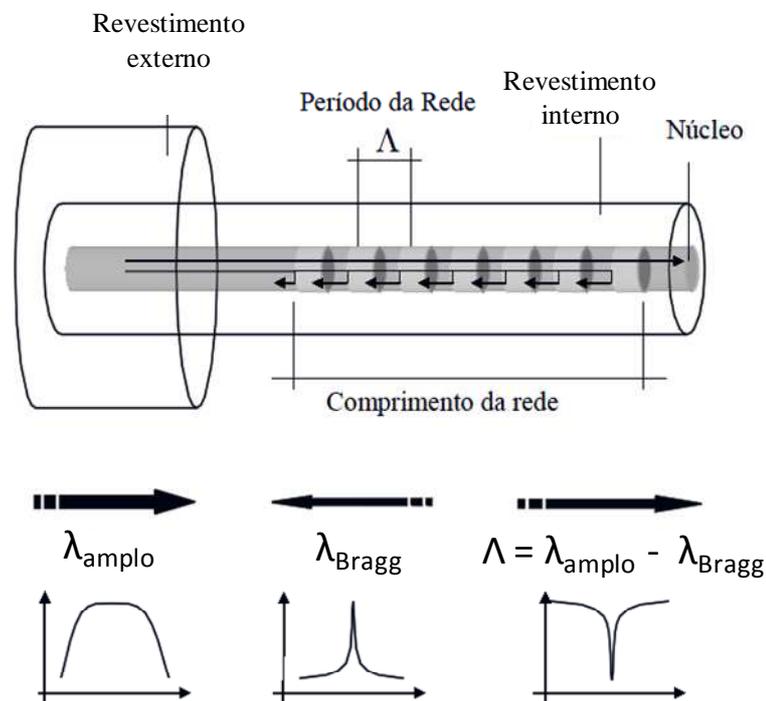


Figura 3.6 – Princípio básico de funcionamento das Redes de Bragg.

Um pequeno aumento do índice de refração nessas regiões induz uma pequena reflexão da luz que se propaga na fibra. Quando as regiões moduladas estão espaçadas a intervalos regulares, ocorrerão reflexões com interferência construtiva para um determinado comprimento de onda, enquanto os demais seguirão sem perdas significativas. Assim, ao se iluminar uma Rede de Bragg com um feixe de luz de largo espectro, apenas um comprimento de onda retornará pelo núcleo da fibra, semelhantemente a um filtro.

A Figura 3.7 mostra o exemplo de uma Rede de Bragg atuando como sensor de deformação. Observa-se a variação do comprimento de onda refletido quando a Rede de Bragg está submetida a esforços de tração ou compressão:

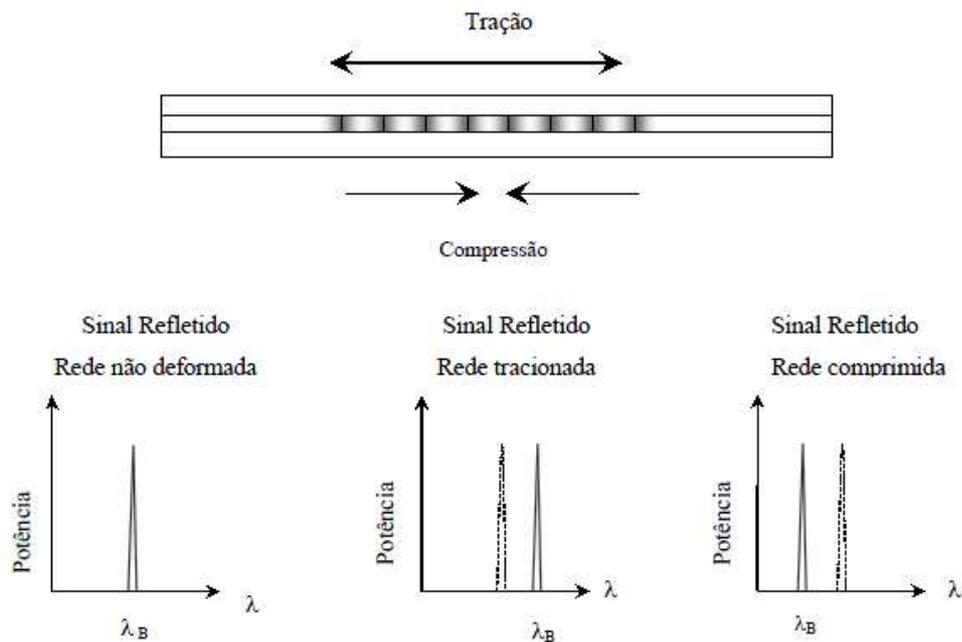


Figura 3.7 – Esquema do deslocamento espectral de uma Rede de Bragg submetida a tração ou compressão.

No caso de tração, uma variação positiva do comprimento de onda será obtida como consequência do aumento da periodicidade espacial da Rede de Bragg. Já para uma Rede de Bragg submetida à compressão, a variação do comprimento de onda será negativa devido a uma diminuição no período espacial da rede.

O comprimento de onda refletido, também chamado de comprimento de onda de Bragg, é pela expressão:

$$\lambda_B = 2n_{ef}\Lambda \quad (3.11)$$

Onde:

λ_B é o comprimento de onda de referência da Rede de Bragg refletido na fibra óptica;

n_{ef} é o índice de refração;

Λ é o espaçamento da rede.

Variações de temperatura e deformações mecânicas aplicadas à Rede provocam pequenas modificações em seu espaçamento, bem como nos valores do seu índice de refração, alterando assim o comprimento de onda refletido. Através de correlações matemáticas, pode-se relacionar a variação do comprimento de onda refletido com as grandezas de temperatura e deformação. Assim, a variação do comprimento de uma onda genérica pode ser expressa como:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(1 + \frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial \varepsilon}\right) \Delta\varepsilon + \left(\frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right) \Delta T \quad (3.12)$$

Onde:

$\Delta\lambda_B$ é a variação do comprimento de onda refletido na fibra óptica;

ε é deformação;

$\Delta\varepsilon$ é a variação total de deformação;

T é a temperatura;

ΔT é a variação de temperatura.

O primeiro termo do segundo membro da Eq. (3.12) representa o efeito da deformação da fibra óptica referente ao espaçamento da Rede e ao efeito fotoelástico em seu índice de refração, podendo ser expresso de modo simplificado conforme:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 + \rho_e)\Delta\varepsilon \quad (3.13)$$

Onde:

ρ_e é o coeficiente de variação do índice de refração devido à tensão axial, $\rho_e \approx -0,22$.

Essa equação contempla somente as variações correspondentes à estrutura.

O último termo da Eq. (3.12) representa a variação do comprimento de onda de Bragg devido à variação de temperatura da própria fibra, e pode ser reescrito conforme:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \zeta)\Delta T \quad (3.14)$$

Onde:

α é o coeficiente de expansão térmica da fibra, $\alpha \approx 0,55 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$;

ζ é o coeficiente de variação do índice de refração devido à temperatura, $\zeta \approx 6,7 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

Essa equação contempla somente as variações correspondentes à fibra óptica.

Das equações anteriores, é possível verificar que o comprimento de onda refletido aumenta quando a fibra se alonga ou se aquece, e diminui quando a fibra se contrai ou se resfria.

Com a fibra solidarizada à estrutura, pode-se considerar o coeficiente de expansão térmica da fibra, α , igual a zero. Assim, a variação total do comprimento de onda refletido pode ser expressa por:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 + \rho_e)\Delta\varepsilon + \zeta\Delta T \quad (3.15)$$

A variação de deformação total, por sua vez, é função da variação de temperatura do material e da tensão axial, podendo ser decomposta nessas duas parcelas. Sendo assim, pode-se reescrever a Eq. (3.15) como:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 + \rho_e)\Delta\varepsilon_{load} + (1 + \rho_e)CTE_{est}\Delta T + \zeta\Delta T \quad (3.16)$$

Onde:

$\Delta\varepsilon_{load}$ é a variação de deformação devida a tensão longitudinal na estrutura;

CTE_{est} é o coeficiente de expansão térmica do material no qual o sensor é fixado.

Isolando a deformação axial devida ao carregamento, que é a medida de interesse, pode-se reescrever a Eq. (3.16) e definir uma nova variável, como mostrado a seguir:

$$\Delta\varepsilon_{load} = \left(\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} - (1 + \rho_e)CTE_{est}\Delta T - \zeta\Delta T \right) \frac{1}{(1 + \rho_e)} \quad (3.17)$$

$$\Delta\varepsilon_{load} = \frac{\Delta\lambda_B}{(1 + \rho_e)\lambda_B} - TCS \cdot \Delta T \quad (3.18)$$

Em que TCS é o coeficiente de sensibilidade térmica transversal do conjunto, composto pelo material estrutural e pela fibra óptica, ou seja:

$$TCS = TCS_{fibra} + TCS_{aço} = 8,59 \mu\varepsilon/^\circ\text{C} + 12 \mu\varepsilon/^\circ\text{C} = 20,59 \mu\varepsilon/^\circ\text{C} \quad (3.19)$$

3.3.4 Histórico de monitoramento de LT's com sensores ópticos

O primeiro trabalho desenvolvido utilizando o sistema óptico de medição em LT's foi realizado por Ogawa *et al.* (1997). Os autores utilizaram um sistema baseado em Redes de Bragg para medição da carga mecânica de cabos de uma linha de transmissão. As Redes foram fixadas às peças metálicas localizadas no ponto de fixação da cadeia de isoladores na torre. A variação da força normal devida à variação de temperatura ou cargas de vento foi detectada pela Rede, tendo um funcionamento semelhante a uma célula de carga.

Bjerkan (2004) desenvolveu vários projetos utilizando Redes de Bragg em linhas de transmissão para medição de vibração em cabos. As medições de deformação no cabo foram realizadas em pontos distantes dos grampos, onde os efeitos de flexão podem ser desprezados e o cabo tratado como uma corda tracionada livre.

4

PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 Descrição geral

O programa experimental desenvolvido neste trabalho foi elaborado dentro de um projeto de pesquisa e extensão (P&D) abrangendo a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a CEMIG/Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Esse projeto, intitulado P&D D-233 – “Desenvolvimento e otimização de modelos de camada limite atmosférica para aplicação em projeto de linhas aéreas”, tem como objetivo possibilitar um conhecimento maior das condições climatológicas de microrregiões, com base no estudo da Camada Limite Atmosférica (CLA), aplicado a linhas de transmissão.

A região de Acuruí foi escolhida como campo de pesquisa por reunir condições ótimas para o desenvolvimento proposto. A estrutura experimental desenvolvida no campo de Acuruí será utilizada para montagem de um banco de dados experimentais, suficiente para embasar a validação de modelos de CLA, projetos de torres de transmissão, projetos de turbinas eólicas, ampacidade de linhas de transmissão, entre outras aplicações.

Nesse programa, serão mapeadas as condições climatológicas, ao longo de uma linha de transmissão, em quatro pontos distintos. Em um ponto de relevo irregular, com a presença de morros e taludes, dentro de um condomínio residencial, foi escolhida uma estrutura de suspensão (torre 50) na qual as respostas estruturais devidas às excitações do vento serão monitoradas. A Figura 4.1 apresenta a localização das estações de monitoramento e a Tabela 4.1, as coordenadas de latitude e longitude das estações.



Figura 4.1 – Localização das estações meteorológicas de monitoramento (Fonte: <http://www.earth.google.com>).

Tabela 4.1 – Coordenadas de latitude e longitude das estações de monitoramento.

ID	Latitude	Longitude	Referência
Estação 1	20°17'45,49"S	43°45'30,71"O	SE Ouro Preto 2
Estação 2	20°04'34,44"S	43°46'57,78"O	Torre 50
Estação 3	20°23'42,45"S	43°30'35,31"O	SE Ouro Preto 1
Estação 4	20°12'54,55"S	43°44'4,02"O	SE Rio de Pedras

Em todas as estações serão monitoradas as condições climatológicas tais como: temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica absoluta, radiação solar, velocidade e direção do vento. Na estação localizada na torre 50, além dessas grandezas, serão monitoradas as deformações, a temperatura dos elementos metálicos da torre e o ângulo de balanço das cadeias de isoladores. A instalação dos sensores de temperatura e de deformação dos elementos da torre foi feita durante o trabalho de doutorado. As outras instalações foram realizadas em anos anteriores, inclusive durante o período de mestrado do autor deste trabalho (CARVALHO, 2010).

As principais ações avaliadas neste trabalho são as advindas do vento, principalmente sobre os cabos do sistema. Devido ao fato do comportamento dos cabos sujeitos ao vento ser complexo e as cargas provenientes serem preponderantes sobre o sistema estrutural, é de extrema importância o monitoramento desse componente. Para isso, será utilizado um sistema para a medição do balanço das cadeias de isoladores, constituído por uma câmera de registro de imagem e um sensor de balanço tridimensional. As ações serão complementadas com o registro das velocidades de vento por um anemômetro ultrassônico 3D instalado na torre a 10 metros de altura em relação ao solo.

O sistema ora proposto, com o objetivo de avaliar o carregamento advindo do vento, é capaz inclusive de captar o seu comportamento dinâmico. O acelerômetro do sensor de balanço tem uma taxa de aquisição de 10 Hz, os anemômetros podem obter velocidades médias horárias do vento e de rajada em três segundos e os sensores de deformação têm taxa de 1 Hz.

Uma descrição detalhada do sistema de monitoramento será apresentada no item subsequente.

4.2 Arquitetura do sistema de monitoramento – torre 50

Para obtenção das informações experimentais, foi utilizada a tecnologia de monitoramento em tempo real, conforme propõem Nascimento *et al.* (2010), adaptada para medição do balanço das cadeias de isoladores e outras grandezas. O sistema de monitoramento é composto, basicamente, dos seguintes subsistemas:

- a) conjunto de alimentação (painéis solares e baterias);
- b) sensores elétricos (umidade, temperatura, radiação solar, velocidade do vento, ângulo de balanço);
- c) *datalogger* elétrico;
- d) sistema de comunicação;
- e) elementos de fixação;
- f) sensores ópticos (deformação e temperatura da estrutura);
- g) *datalogger* óptico (OSA - OPTICAL SPECTRUM ANALYZER);
- h) câmera digital.

Os subsistemas dos itens a) a e) estão presentes em todas as estações de monitoramento. No sistema presente na torre 50, mais completo, existem todos os componentes supracitados.

Basicamente, serão monitoradas, da estrutura da torre 50, as informações referentes às ações do vento e as respectivas respostas estruturais. As ações serão obtidas através do anemômetro e do sistema de medição que capta o ângulo de balanço das cadeias de isoladores, constituído de um sistema de aquisição e comunicação de dados, uma plataforma inercial, sensores climatológicos, câmera de registro de imagem e do sistema de alimentação. O diagrama simplificado da Figura 4.2 apresenta o sensor de balanço integrado com os demais componentes desse sistema elétrico.

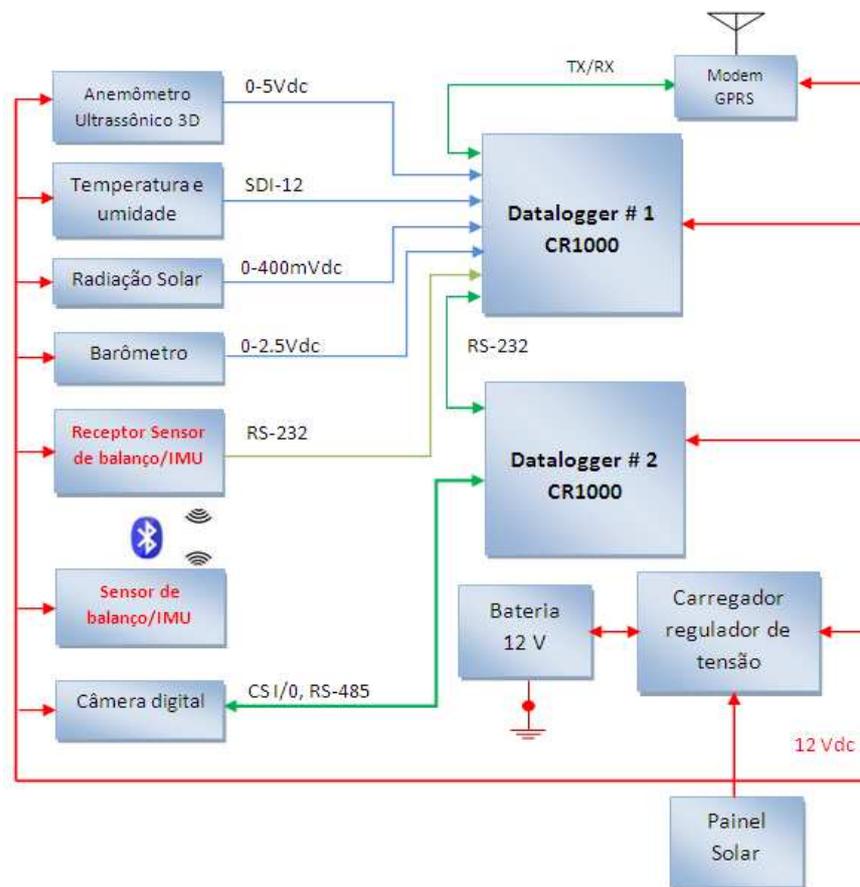


Figura 4.2 – Arquitetura do sistema de monitoramento de balanço (NASCIMENTO *et al.*, 2010).

O sistema de aquisição de dados da câmera digital, da plataforma inercial e dos componentes de transmissão do sistema de medição do ângulo se localizam em uma caixa metálica para a proteção contra intempéries. A plataforma inercial é fixada na cadeia de isoladores. Para fixação

da câmera, foi elaborada uma estrutura auxiliar de forma a afastá-la das mísulas da torre no sentido longitudinal à linha, possibilitando a captação do movimento transversal das cadeias de isoladores, conforme a Figura 4.3. Para alimentação do sistema, foi empregado um conjunto de baterias, painéis solares e um regulador de carga.



Figura 4.3 – Estrutura auxiliar para suporte da câmera fotográfica.

A montagem do conjunto de sensores para teste em laboratório é apresentada na Figura 4.4. O arranjo de fixação dos sensores e demais equipamentos na estrutura metálica da torre está ilustrado na Figura 4.5.

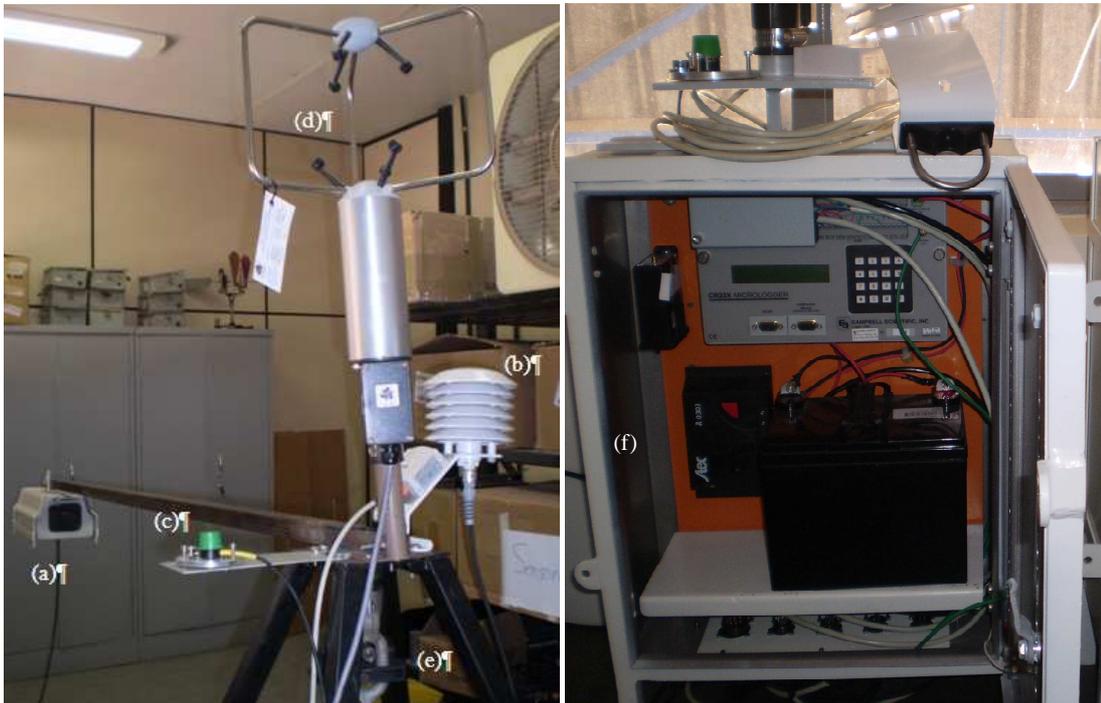


Figura 4.4 – Montagem em laboratório: (a) câmera digital; (b) sensor de umidade e temperatura; (c) sensor de radiação solar; (d) sensor de velocidade de vento; (e) sensor do ângulo de balanço junto à cadeia de isoladores; (f) *datalogger* elétrico e bateria (NASCIMENTO *et al.*, 2010).

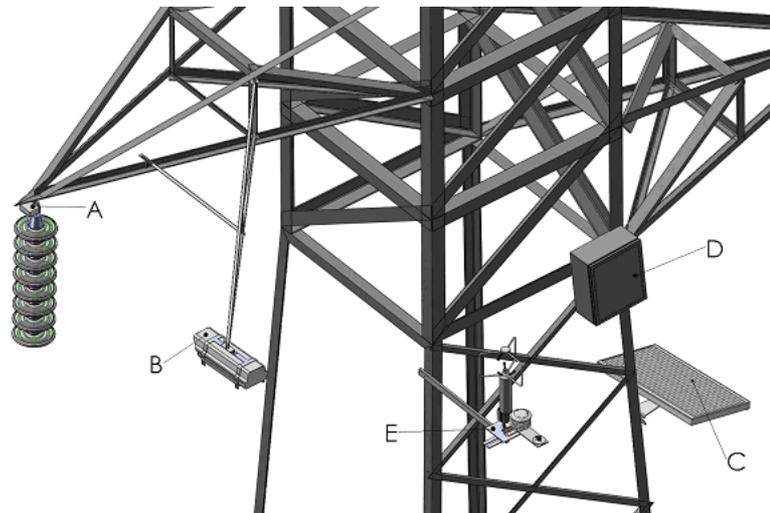


Figura 4.5 – Fixação do sistema na torre: (A) sensor do ângulo de balanço; (B) câmera digital; (C) painel solar; (D) caixa com *datalogger*, bateria e modem; (E) sensores de radiação solar, temperatura, velocidade de vento 3D e pressão atmosférica.

O sistema ora proposto inicia suas aquisições a partir de um “gatilho” (*trigger*), tomando como referência um determinado valor de velocidade de vento ou um determinado valor de ângulo de balanço. Em paralelo, um pulso lógico do sistema de aquisição de sinais dispara a câmera, iniciando uma sequência de fotos a cada 30 segundos. A aquisição remota de dados do sistema de medição e registro do ângulo de balanço instalados em campo é realizada por meio de um modem GPRS. O acesso pode ser realizado através de qualquer computador equipado com um modem.

As respostas estruturais da torre serão captadas através de sensores de deformação instalados nos principais elementos estruturais da torre, na frequência de 1 Hz. Como o sensor de deformação com princípio de funcionamento elétrico é muito sensível à influência dos campos eletromagnéticos externos, ocasionados pelas elevadas correntes dos cabos elétricos, são utilizados extensômetros com princípios de funcionamento ópticos, com Redes de Bragg, imunes à interferência elétrica.

Sendo a estrutura da torre composta por cantoneiras de abas iguais, foram utilizados um ou dois sensores de deformação em cada elemento estrutural objeto de análise. Os efeitos locais nas abas das cantoneiras foram avaliados em laboratório e são desprezíveis. A Figura 4.6 apresenta os elementos instrumentados da torre, bem como as respectivas disposições na estrutura como um todo.

A influência da flexão nas cantoneiras da estrutura será eliminada tomando-se a média de dois sensores de deformação, sendo posicionado um sensor em cada aba da cantoneira, sobre o eixo “Y-Y”, conforme apresentado na Figura 4.7. Assim, é possível obter a força normal no centro de gravidade da cantoneira.

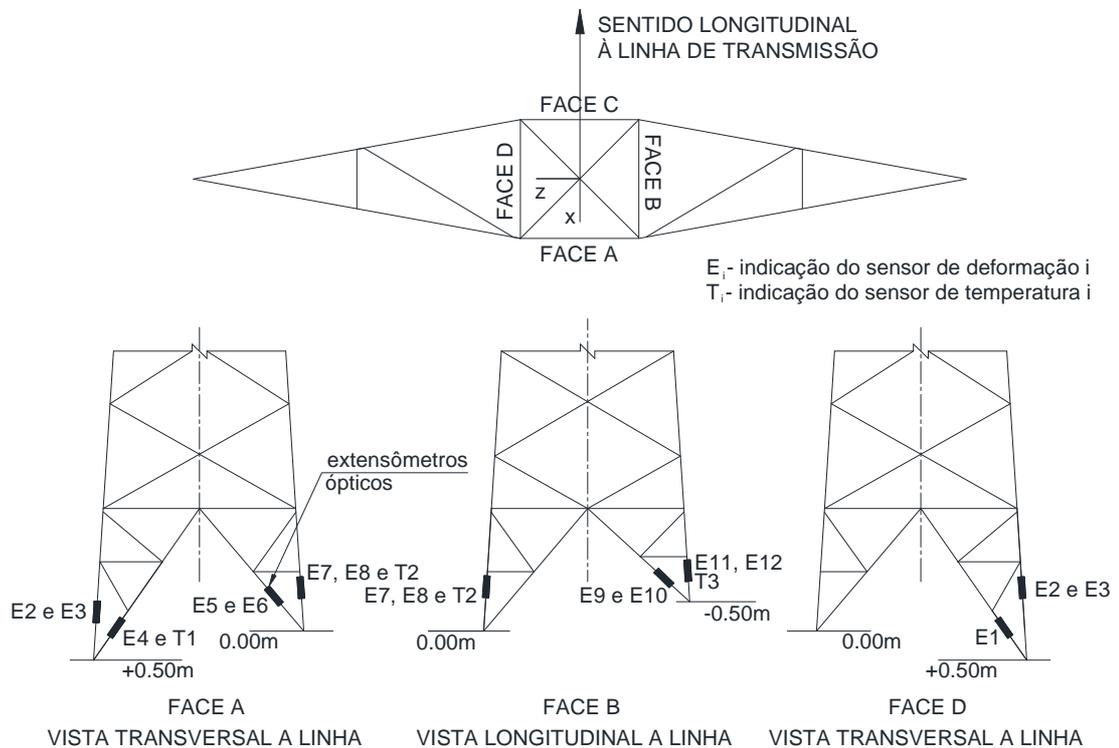


Figura 4.6 – Localização dos sensores ópticos nos elementos da torre.

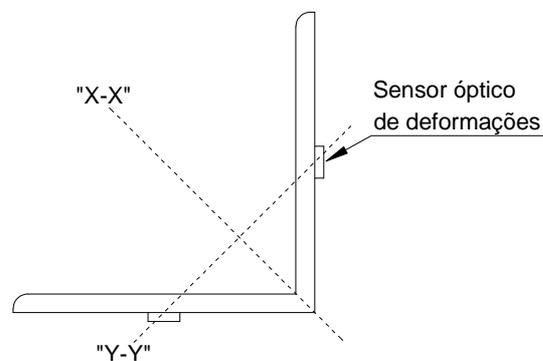


Figura 4.7 – Posicionamento dos sensores de deformação na seção transversal da cantoneira.

Devido à alta sensibilidade dos extensômetros ópticos à variação de temperatura, foi instalado um sensor de temperatura, também óptico, junto a cada conjunto de extensômetros. Os valores de deformação medidos, nesse caso deformações totais, poderão ser decompostos em duas parcelas, sendo uma a deformação correspondente à variação de temperatura (aço e fibra óptica) e a outra, de maior relevância para o trabalho, correspondente à variação do carregamento, conforme já mostrado na Eq. (3.18).

4.3 Sensores

4.3.1 Desenvolvimento do Sensor de Balanço (Molina *et al.*, (2014))

O sistema de medição de ângulo é composto basicamente por uma plataforma inercial denominada *Inertial Measurement Unit* (IMU). Através da combinação de sensores tridimensionais (acelerômetros, girômetros e magnetômetros), o IMU possibilita determinar o estado inercial de qualquer sistema ao qual esteja acoplado. Plataformas inerciais são normalmente utilizadas em sistemas de navegação de aeronaves, satélites, automóveis, etc.

No protótipo do sensor de balanço, foi utilizado o IMU *Spark Fun Eletronics*, modelo IMU 6-DOFv3, que utiliza três circuitos integrados CI-IDG-300, contendo dois giroscópios vibratórios independentes. O IMU é composto por dois circuitos eletrônicos que se comunicam via sinal RF (Bluetooth). O primeiro deles, mostrado na Figura 4.8a, contém os sensores (acelerômetro, girômetro e magnetômetro) e um transmissor RF. A segunda unidade, mostrada na Figura 4.8b, é o circuito receptor, o qual é ligado a um datalogger, via interface serial, para efetuar a aquisição dos dados. Os dados da plataforma inercial são valores provenientes de um conversor AD de 10 bits e oito canais de dados para medições dos dados de aceleração (x, y, z), taxa de giro (x, y, z) e dados do magnetômetro (x, y). A frequência de amostragem do IMU foi fixada em 10 Hz, suficiente para evitar *aliasing* (resultados imprecisos devido à baixa frequência de aquisição de dados) na medição do balanço de uma cadeia de isoladores.

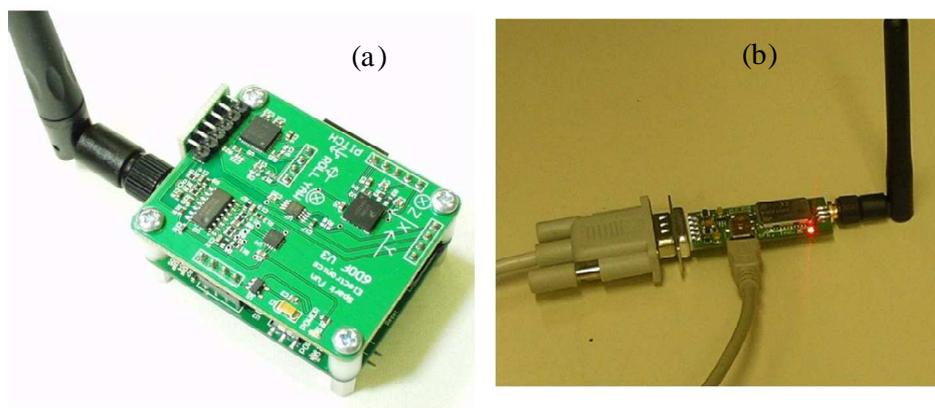


Figura 4.8 – Plataforma inercial *Spark Fun Eletronics*: (a) circuito transmissor com sensores e (b) circuito receptor.

A Figura 4.9 mostra os ângulos φ , θ e ψ em relação aos eixos de coordenadas da plataforma inercial, a qual fica acoplada à cadeia de isoladores, denominados, respectivamente, Pitch, Roll e Yaw. Para a obtenção dos ângulos de inclinação da cadeia de isoladores, para a qual se assume comportamento de corpo rígido, é necessário conhecer apenas os ângulos φ e θ , pois constituem os graus de liberdade da cadeia. O ângulo de balanço θ é medido no plano ortogonal ao eixo do condutor; o ângulo φ tem valor diferente de zero quando há um deslocamento longitudinal da cadeia, situação correspondente a rompimento do cabo condutor ou desbalanceamento de tensões horizontais dos cabos adjacentes.

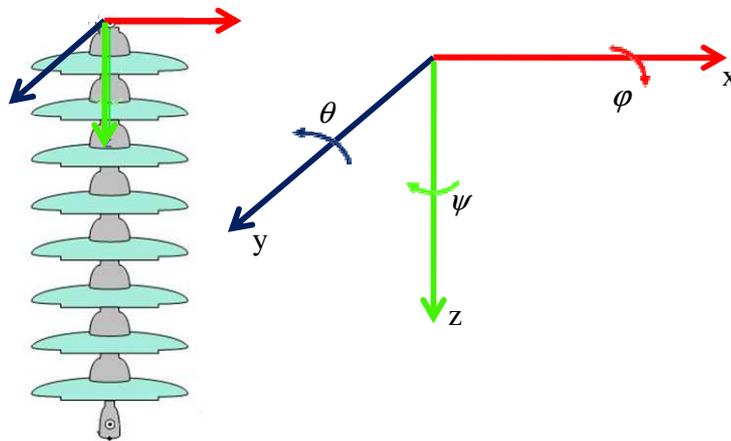


Figura 4.9 – Plataforma inercial e grandezas medidas.

Os ângulos φ e θ podem ser obtidos conforme formulação matemática descrita em detalhes em Molina *et al.* (2014).

O sistema de medição de ângulo pode ser utilizado, para fins estruturais, de duas formas:

- a) supondo que a reação vertical dos cabos presos à cadeia de isoladores varie pouco com o tempo (ver capítulo 5, item 5.7.3), é possível determinar as componentes horizontais da força resultante proveniente dos cabos, uma vez que essa força resultante tem a direção do eixo da cadeia (ver Figura 4.10).

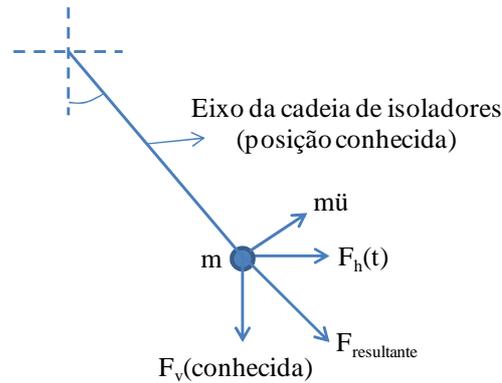


Figura 4.10 – Cálculo da componente horizontal da força resultante proveniente dos cabos.

- b) o registro da posição da cadeia de isoladores servirá também para validar o processo teórico-numérico proposto neste trabalho, desde que a velocidade do vento seja adquirida em sincronia com as outras medições. Para isso, é necessário que o modelo teórico-numérico inclua a cadeia de isoladores e os dois vãos de cabos adjacentes.

Como já comentado anteriormente, a montagem do sensor de balanço foi feita antes do desenvolvimento do presente trabalho. Observa-se que a inclusão de uma célula de carga capaz de medir a força axial na cadeia de isoladores, no projeto experimental desenvolvido neste trabalho, seria extremamente útil para a determinação das forças que os cabos aplicam na estrutura suporte.

4.3.2 Sensores ópticos de deformação e temperatura

Para as medições de deformação na estrutura da torre, foram utilizados sensores ópticos soldáveis, modelo FS6200, da marca FiberSensing. Os sensores de temperatura, também ópticos, foram da mesma marca, porém, modelo FS6300. Esses sensores apresentam variada gama de utilização, podendo ser utilizados em estruturas, plantas nucleares, plantas *off-shore*, etc.

A Figura 4.11 apresenta um sensor óptico de deformação soldado a uma superfície metálica.

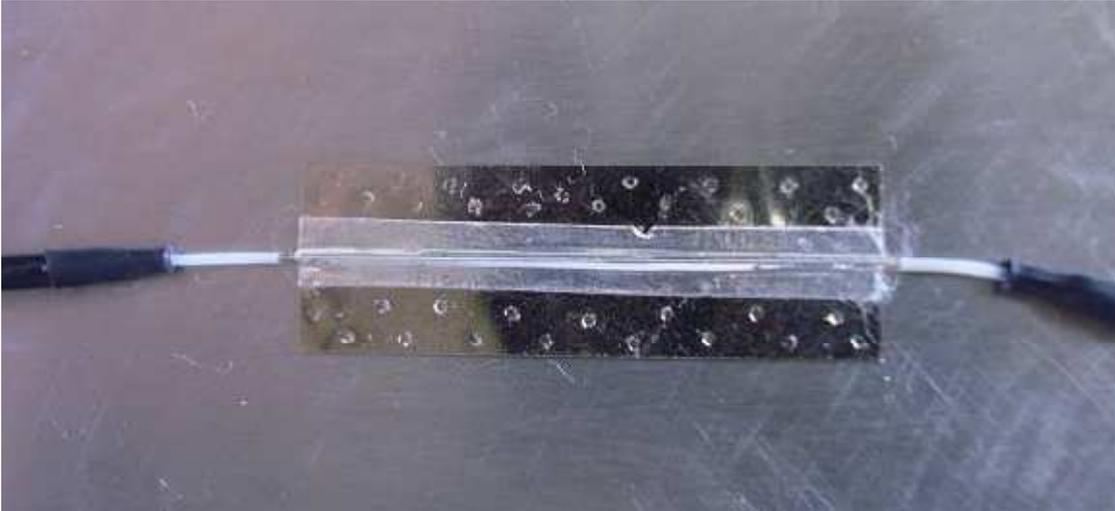


Figura 4.11 – Sensor de deformação óptico soldado a uma superfície metálica.

Para noções de escala da Figura 4.11, esclarece-se que a placa do sensor tem 45 milímetros de comprimento, 15 milímetros de largura e 0,3 milímetros de espessura. Devido à grande sensibilidade da fibra que compõe o sensor a variações de temperatura, a fixação deve ser realizada através de pontos de solda capacitiva, com a menor geração de calor possível durante o processo de soldagem (diâmetro do eletrodo inferior a 1mm). A deposição de calor na fibra óptica ocasiona alteração na Rede de Bragg, provocando a mudança do comprimento de onda refletido, determinado no processo de fabricação do sensor de fibra óptica. Como o processo de calibração é complexo e realizado somente em laboratório, alterações expressivas no comprimento de onda de referência comprometem as medições de deformação captadas pelo sensor, podendo comprometer seu funcionamento.

4.4 Testes realizados em laboratório

4.4.1 Sistemas de monitoramento meteorológico e de balanço da cadeia

4.4.1.1 Montagem de laboratório

Foram montadas e testadas em laboratório as quatro estações climatológicas de medição e registro em tempo real da temperatura, umidade relativa, pressão absoluta, radiação solar e velocidade e direção do vento. Também foi montado e testado o sistema desenvolvido de medição do ângulo de balanço de cadeias de isoladores. Além da instalação e dos testes de

funcionamento, foi também elaborado o projeto de instalação desses equipamentos em campo, de forma a otimizar essa operação.

Os equipamentos foram montados e testados no laboratório de Eletrônica do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG com o objetivo de calibrar cada componente e verificar o seu funcionamento junto ao sistema de aquisição de dados. Na montagem desses equipamentos em laboratório, foram também desenvolvidas características necessárias para o seu funcionamento, tais como robustez, segurança, facilidade de manutenção, baixo custo, funcionalidade e proteção contra possíveis depredações.

Visando proporcionar todas essas características, a parte de aquisição de dados das estações climáticas foi colocada em uma caixa metálica cujas laterais são munidas de chapa de aço e borracha para proteção de chuva e depredações, como apresentado na Figura 4.12. Essas caixas de aço foram fechadas com dois cadeados e parafusos contra roubos. Essas caixas contêm o *datalogger*, o modem de transmissão, a bateria e demais componentes de transmissão e aquisição de dados. Os sistemas de medição de temperatura, pressão, umidade, radiação e velocidade e direção de vento foram montados em uma plataforma fixada na extremidade de um braço metálico, de forma a posicionar os sistemas afastados da estrutura da torre, a uma altura de 10 m do solo. Esse braço metálico, além de possibilitar o afastamento da estrutura da torre, possibilita também a proteção contra uma possível depredação, dificultando o acesso de pessoas.



Figura 4.12 – Caixa de proteção e fixação dos componentes do sistema de aquisição de dados.

O sistema de medição do ângulo de balanço das cadeias de isoladores é constituído do sistema de aquisição de dados, da plataforma inercial e da câmara de registro de imagens em tempo real. O sistema de aquisição de dados da câmara e da plataforma inercial, e os demais componentes de transmissão do sistema de medição do ângulo de balanço foram montados também em uma caixa metálica. A plataforma inercial foi fixada na própria cadeia de isoladores para acompanhar as oscilações da cadeia, como apresentado na Figura 4.13. Para a câmara, existe uma estrutura de fixação, para afastá-la da estrutura da torre e posicioná-la longitudinalmente em relação aos cabos condutores.



Figura 4.13 – Fixação da plataforma inercial na cadeia de isoladores.

A Figura 4.14 apresenta o sistema após a finalização da montagem e em fase final de testes, identificando às quatro estações climatológicas e o sistema de medição de ângulo de balanço.



Figura 4.14 – Montagem finalizada em laboratório das quatro estações meteorológicas e do sistema de medição de ângulo com a câmera de registro digital.

4.4.1.2 Calibração e validação da plataforma inercial

A calibração da plataforma inercial para a medição do ângulo de balanço da cadeia de isoladores foi realizada comparando resultados das medições com os resultados da plataforma inercial de calibração *Crossbow*. Para realizar a calibração, é necessário que as duas plataformas em estudo (*Crossbow* e *Sparkfun*) estejam acopladas fisicamente uma à outra, com os sensores de aceleração alinhados em relação aos eixos x, y e z, conforme apresentado na Figura 4.15.

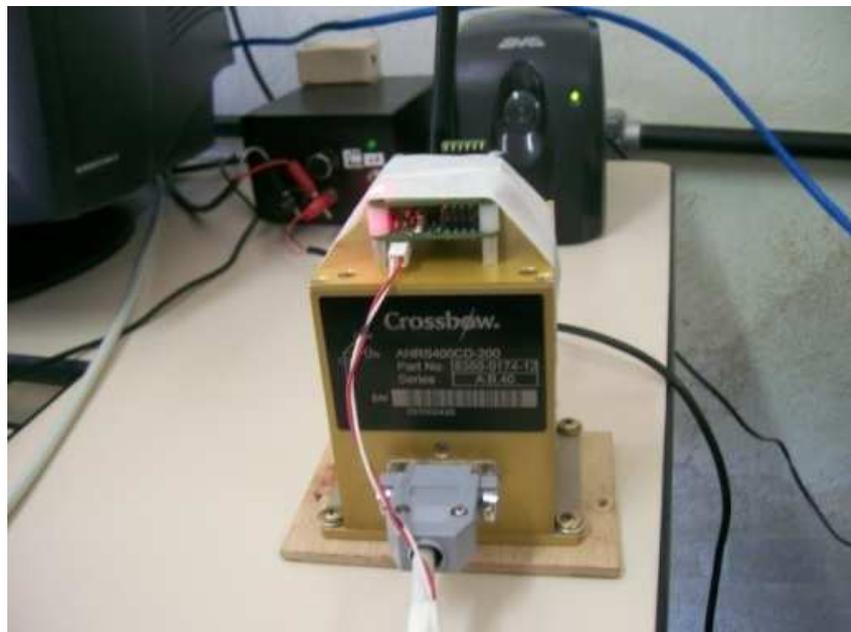


Figura 4.15 – Plataformas *Crossbow* e *Sparkfun* alinhadas para calibração.

A sensibilidade dos acelerômetros da *Sparkfun* foi ajustada para $\pm 2g$ ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$). Isso significa que os acelerômetros serão capazes de medir valores de aceleração numa faixa de $\pm 2g$. Outras faixas de aceleração são possíveis, entretanto.

Nas Figura 4.16 e Figura 4.17, apresentam-se os dados das plataformas para o eixo x e o erro relativo da medição. A linha azul representa os dados da plataforma *Crossbow* e a linha vermelha representa os dados da plataforma *Sparkfun*. As figuras mostram que o erro relativo máximo da plataforma inercial *Sparkfun*, tanto para a aceleração como para a velocidade angular, fica em torno de 6%, podendo-se considerar um erro relativo médio em torno de 3%.

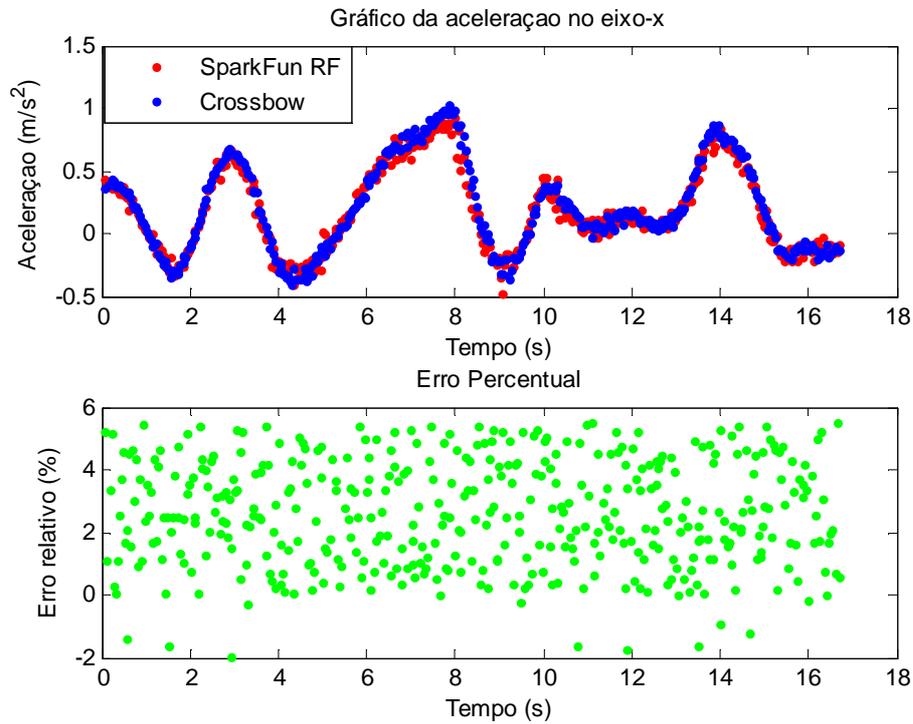


Figura 4.16 – Erro relativo obtido para a aceleração (MOLINA *et al.*, 2014).

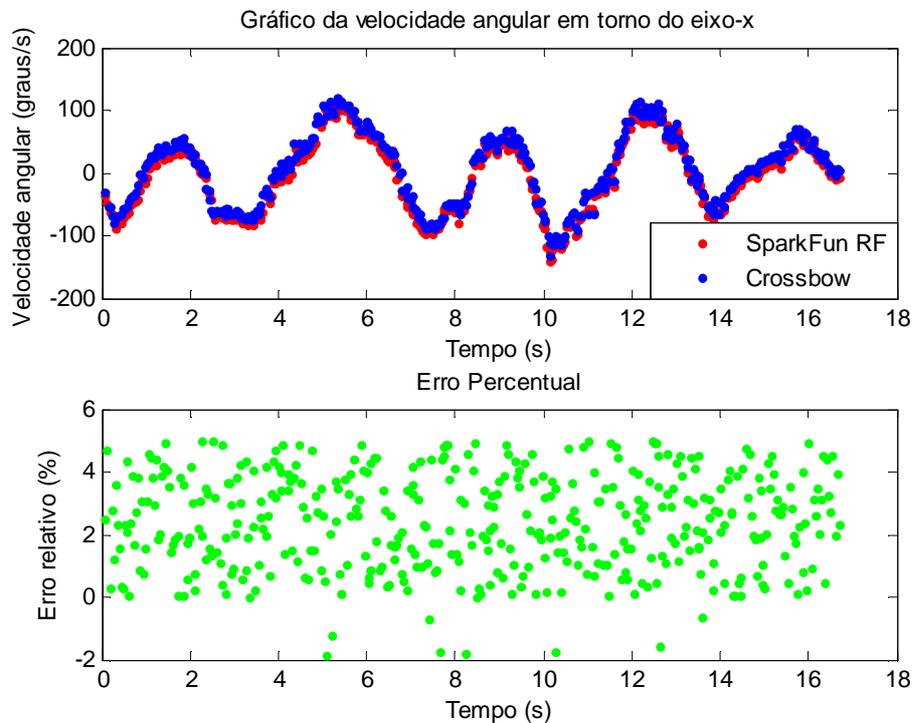


Figura 4.17 – Erro relativo obtido para a velocidade angular (MOLINA *et al.*, 2014).

As calibrações da plataforma inercial para medição do ângulo apresentaram resultados satisfatórios, com margem de erros aceitáveis para as acelerações em x, y e z e velocidades angulares em torno de x, y e z, garantindo boa qualidade das medições do ângulo de balanço em campo.

As Figuras 4.18, 4.19 e 4.20, a seguir, apresentam respostas de acelerações e velocidades angulares, respectivamente, da cadeia, obtidas após a calibração em laboratório. Um impulso foi fornecido à cadeia durante a aquisição de sinais por um curto período de tempo.

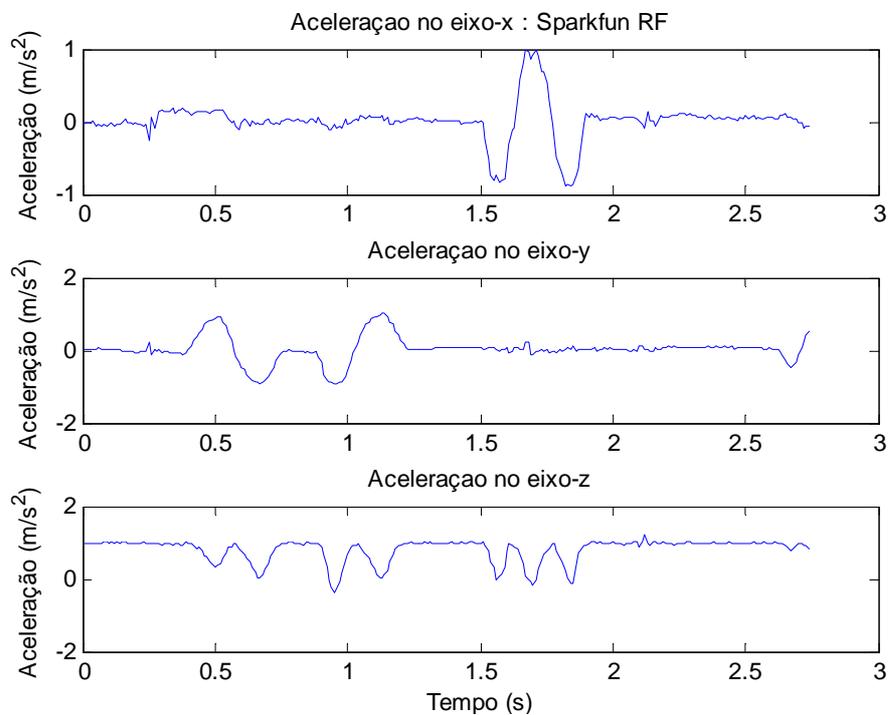


Figura 4.18 – Acelerações calculadas para cadeia de isoladores nas três direções (MOLINA *et al.*, 2014).

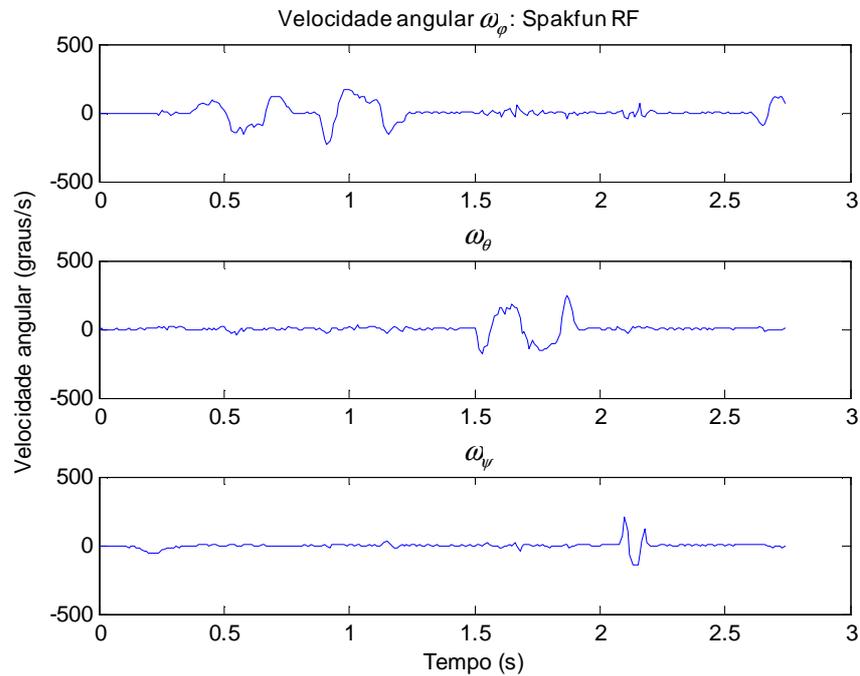


Figura 4.19 – Velocidades angulares calculadas para a cadeia de isoladores (MOLINA *et al.*, 2014).

4.4.2 Sistema óptico de monitoramento de temperatura e deformações

Para a avaliação dos sensores ópticos, foi criado um protótipo composto por uma cantoneira de abas iguais (2 1/2" x 3/16") e duas chapas de extremidade quadradas (100mm x 100mm x 12,5mm), em aço ASTM A36, soldadas entre si com solda de filete de 6 mm em todo o contorno, conforme Figura 4.20.



Figura 4.20 – Protótipo em cantoneira para validação dos sensores ópticos.

No protótipo, foram instalados quatro sensores de deformação e um sensor de temperatura, todos ópticos. Os sensores foram soldados através de solda ponto capacitiva. Além dos sensores ópticos, foram instalados no protótipo mais dois sensores elétricos alinhados com os sensores ópticos. A localização dos sensores de deformação é mostrada na Figura 4.21.

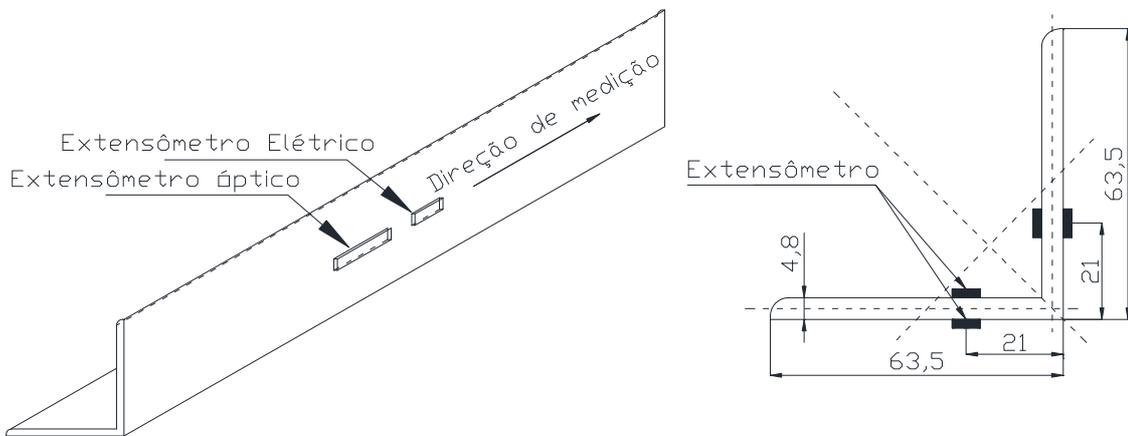


Figura 4.21 – Localização dos sensores de deformação no protótipo.

O comportamento do protótipo próximo à chapa de extremidade é complexo, pois a aplicação de cargas de compressão normais à chapa introduz momentos fletores secundários ao corpo do protótipo. Tais momentos são ocasionados pela diferença de rigidez do apoio da chapa devido à assimetria do apoio proporcionado pela cantoneira e, principalmente, pela perpendicularidade e planicidade dessa chapa soldada à cantoneira.

Os sensores, conforme mostrado na figura anterior, não foram posicionados sobre a linha neutra da cantoneira, estando assim capazes de captar os efeitos de flexão da cantoneira.

As soldas ponto capacitivas foram executadas com uma máquina japonesa chamada “*Spor Welder W-50R*”, de fabricação da *Tokyo Sokki Kenkyujo*. É importante salientar que essa máquina não foi encontrada no mercado nacional para compra ou aluguel, sendo uma única unidade localizada no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) e disponibilizada para a pesquisa. O que torna essa máquina diferenciada em relação às usuais é o processo de armazenamento e descarga de energia utilizando capacitores, ao invés de indutores, como usualmente utilizado. Os capacitores permitem a essa máquina pulsos muito rápidos, da ordem de 5 msec. Para o desenvolvimento de uma máquina indutiva com esse tempo de pulso, seria necessário um temporizador muito preciso para cortar a corrente com esse intervalo de tempo. Um aumento de tempo do pulso indica maior calor transmitido à fibra, o que compromete a calibração original de laboratório devido ao deslocamento do comprimento de onda de referência da Rede de Bragg (λ_B).

As mudanças dos comprimentos de onda dos cinco sensores soldados ao protótipo foram avaliadas e são mostradas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Variação dos comprimentos de onda após soldagem no protótipo.

Sensores	λ_B de calibração [nm]	λ_B após a soldagem [nm]	Diferença [nm]
Sensor de deformação 1	1.529,270	1.529,211	0,059
Sensor de deformação 2	1.542,597	1.541,995	0,602
Sensor de deformação 3	1.548,352	1.548,044	0,308
Sensor de deformação 4	1.555,248	1.555,092	0,156
Sensor de Temperatura	1.562,153	1.561,968	0,185

Como se pode observar, mesmo com um tempo muito pequeno de pulso, ocorreram mudanças do comprimento de onda de referência, λ_B . Entretanto, a diferença encontrada não compromete os resultados desde que o novo comprimento de referência, obtido após a soldagem, seja utilizado no cálculo das deformações.

Para a aquisição de dados dos sensores ópticos, foi utilizado um “Datalogger” óptico (“OSA - OPTICAL SPECTRUM ANALYZER”), fabricado pela “FiberSensing”, modelo FS2200. As fibras ópticas foram ligadas em série utilizando somente um canal do “Datalogger”. A Figura 4.22 apresenta uma foto do equipamento.



Figura 4.22 – “Datalogger” óptico FS2200.

A carga de compressão foi aplicada ao protótipo por meio de uma máquina de tração/compressão universal da EMIC com capacidade de 300 kN. A carga foi aplicada gradualmente, com intervalos de 5 a 10 kN. A Figura 4.23 apresenta uma foto da montagem desenvolvida no laboratório.



Figura 4.23 – Protótipo submetido a cargas de compressão.

A carga de compressão é aplicada através do deslocamento da travessa superior do equipamento. A entrada da carga é realizada através de um cabeçote articulado. Abaixo do protótipo, foi inserida uma célula de carga de fabricação da TRANSTEC, com capacidade de 100 kN, para a aquisição dos valores de força normal aplicados. A Figura 4.24 apresenta uma foto da célula de carga.

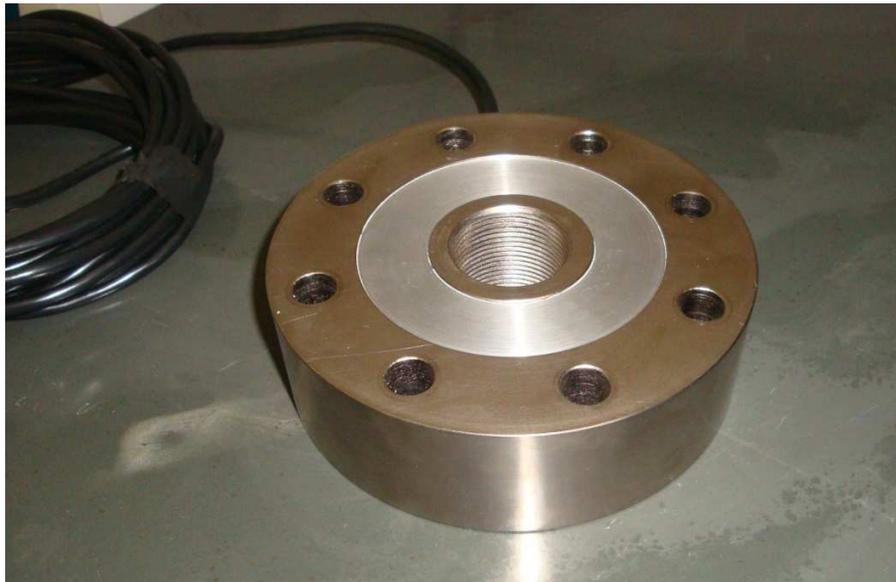


Figura 4.24 – Célula de carga utilizada nos ensaios.

Foram realizados quatro ensaios no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES) da UFMG, todos com a peça comprimida. Foram obtidas as evoluções temporais das deformações com o acréscimo da carga vertical. As curvas obtidas nos quatro ensaios são semelhantes. Sendo assim, apresentam-se abaixo somente as curvas obtidas no ensaio 2. Os sensores elétricos 1 e 2 foram instalados no mesmo alinhamento dos sensores ópticos 1 e 2, respectivamente.

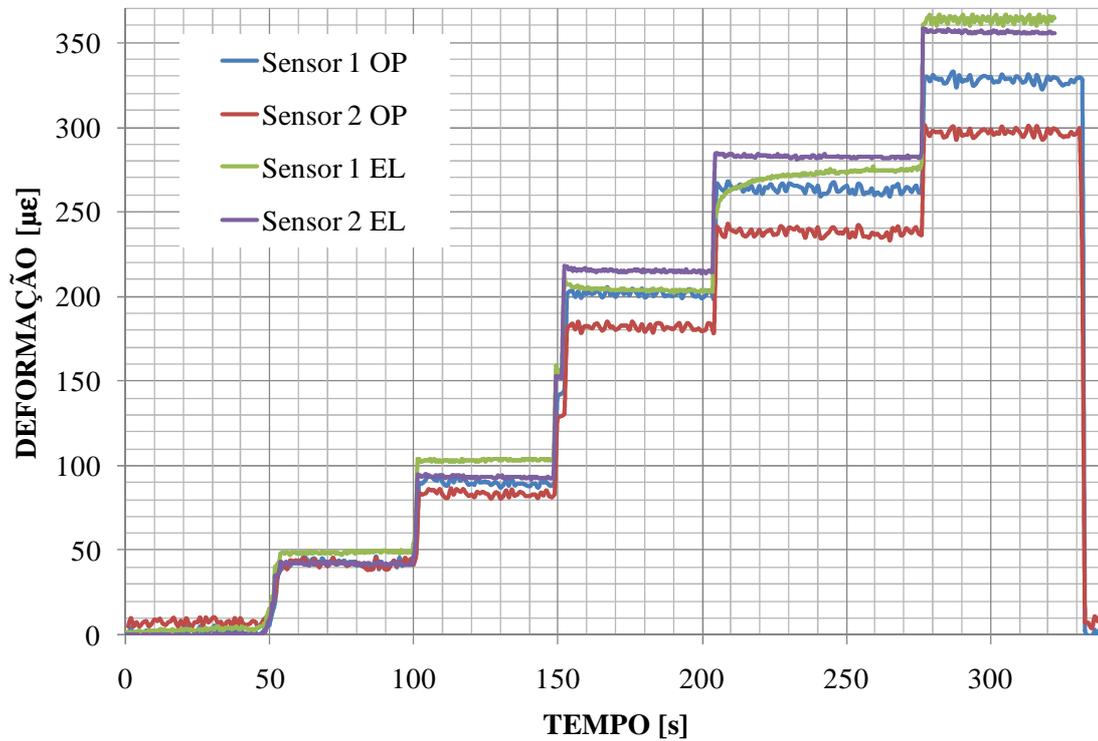


Figura 4.25 – Deformações dos sensores ópticos e elétricos obtidas no ensaio 2.

A Tabela 4.3 apresenta os dois últimos valores das forças normais aplicadas ao protótipo, com as respectivas deformações, para os quatro ensaios realizados:

Tabela 4.3 – Deformações medidas no protótipo com sensores ópticos e elétricos.

Ensaio	Carga Axial [N]	Sensor 1 OP [μϵ]	Sensor 1 EL [μϵ]	Diferença [%]	Sensor 2 OP [μϵ]	Sensor 2 EL [μϵ]	Diferença [%]
Ensaio 1	31270	214,09	208,00	-2,93	159,92	172,10	7,08
	49680	347,18	425,00	18,31	281,67	311,80	9,66
Ensaio 2	35580	270,22	268,18	-0,76	237,70	282,40	15,83
	44970	336,81	364,23	7,53	296,92	356,20	16,64
Ensaio 3	35450	251,75	231,00	-8,98	200,16	213,10	6,07
	45520	317,78	397,90	20,14	256,90	277,50	7,42
Ensaio 4	26920	179,52	177,60	-1,08	128,45	130,40	1,49
	35450	300,24	351,70	14,63	236,79	255,50	7,32

Nota: As abreviações OP e EL significam ópticos e elétricos, respectivamente.

Observando os valores de deformação medidos nos quatro ensaios, pode-se concluir que houve grande influência da excentricidade da entrada da carga sobre o protótipo. A excentricidade ocasionou o aparecimento de momentos fletores na cantoneira. Isso reforça a necessidade do posicionamento dos sensores de deformação na interseção do eixo “Y-Y”, apresentado em linha tracejada na Figura 4.21, com a face externa da aba da cantoneira.

Pode-se observar também que os sensores ópticos apresentaram, na maioria dos ensaios, valores inferiores aos sensores elétricos. Uma das possíveis explicações é de que os momentos devido à excentricidade resultam em tração na linha dos sensores, reduzindo assim os valores de deformação. Como os sensores ópticos estão posicionados no centro do protótipo e os sensores elétricos posicionados abaixo destes, e o efeito da curvatura da peça produz um momento fletor máximo no centro da peça, tem-se uma redução maior de deformação nos sensores ópticos.

O extensômetro elétrico 1 apresentou saltos muito desproporcionais nos últimos valores de carga dos ensaios 1, 3 e 4, sendo portanto esses valores desconsiderados (valores em vermelho). Nas cargas anteriores a essas e no ensaio 2, a maior diferença entre os dois tipos de sensores foi de 16%, sendo essa diferença considerada aceitável, face às considerações anteriores sobre a excentricidade.

4.5 Instalação dos sistemas em campo

4.5.1 Sistemas de monitoramento de dados climatológicos

Três estações climatológicas completas foram instaladas para monitoramento do vento e das condições locais a 10 m de altura. Com esse objetivo, torres de 10 m de altura foram instaladas na usina de Rio das Pedras e na Subestação de Ouro Preto 2 da CEMIG. Nesses dois casos, as estações não foram instaladas em torres de transmissão para evitar a interferência elétrica na aquisição de dados. A terceira estação climatológica foi instalada em uma torre de transmissão de 30 metros de altura, localizada na Subestação de Ouro Preto 1. Nesse caso, a instalação da estação também foi realizada a 10 metros da altura do solo. A Figura 4.26 e a Figura 4.27 apresentam a instalação das torres auxiliares na usina de Rio das Pedras e na Subestação de Ouro Preto 2, respectivamente. A Figura 4.28 mostra um detalhe da instalação.



Figura 4.26 – Estação climatológica instalada em Rio das Pedras.



Figura 4.27 – Estação climatológica instalada na subestação de Ouro Preto 2.



Figura 4.28 – Detalhe da estação climatológica instalada na Subestação de Ouro Preto 2.

4.5.2 Sistema de monitoramento de dados climatológicos, balanço das cadeias e deformações estruturais

A torre de transmissão 50, da linha de transmissão Taquaril-Santa Bárbara, foi utilizada para a instalação do sistema de medição climatológico, monitoramento do ângulo de balanço de cadeias de isoladores e deformações da torre. A instalação foi realizada em duas etapas, sendo que na primeira foram instalados os sistemas de monitoramento climatológico e do ângulo de balanço e, na segunda etapa, os sensores ópticos.

A estação climatológica foi instalada a 10m de altura. O registro de imagem digital é programado para funcionar apenas em situações em que a velocidade de vento ou o ângulo de balanço atingem valores mais elevados, através de um gatilho (“*trigger*”), disparado quando os valores aqusitados pelo anemômetro ou pelo sensor de balanço superam os valores de interesse pré-programados. As figuras apresentadas a seguir mostram as operações de montagem dos equipamentos da primeira etapa de instalação na torre 50.



Figura 4.29 – Preparação dos equipamentos em solo.

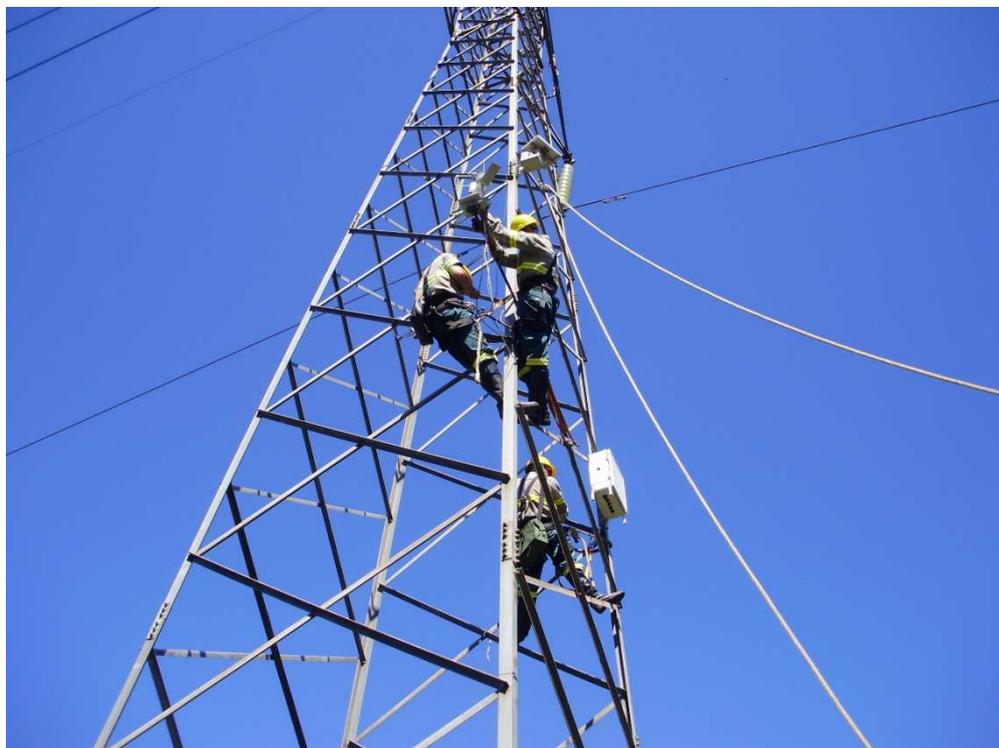


Figura 4.30 – Elevação dos equipamentos através de cordas e fixação destes na torre.



Figura 4.31 – Instalação do sistema de monitoramento do ângulo de balanço (sensor de balanço e câmera).

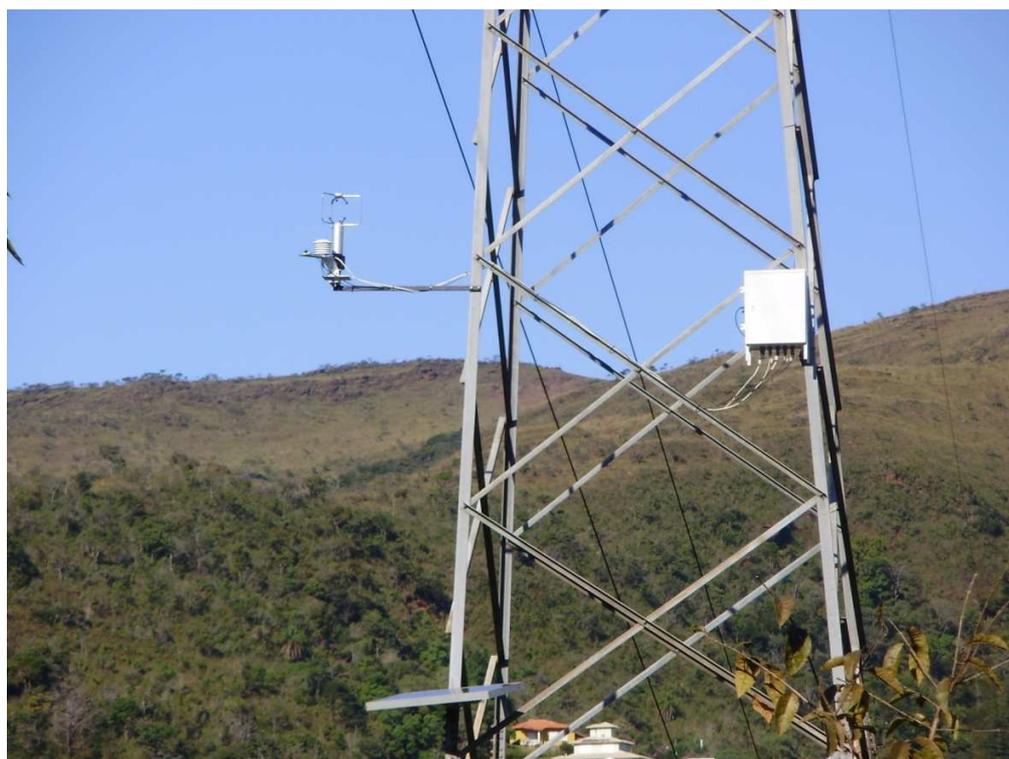


Figura 4.32 – Localização da estação climatológica, painel solar e da caixa metálica contendo os componentes eletrônicos.



Figura 4.33 – Torre 50 com a instalação dos equipamentos da 1ª etapa concluída.

Para a segunda etapa, que compreende a instalação do sistema óptico de medição de deformações e temperatura, devido ao fato dos componentes terem um consumo muito superior de energia, foi necessária a instalação de um sistema de alimentação com maior capacidade de armazenamento. O sistema de alimentação usado é composto por dois painéis solares, um inversor de frequência e um conjunto de oito baterias, como mostrado na Figura 4.34.



Figura 4.34 – Alimentação do sistema óptico de deformações e temperatura.

Os sensores ópticos foram soldados aos elementos estruturais escolhidos, com o auxílio de um gabarito para o posicionamento sobre o eixo principal que intercepta as duas abas da cantoneira.

A Figura 4.35 apresenta um sensor óptico de deformação e a Figura 4.36 um sensor óptico de temperatura após a soldagem na estrutura da torre (ver também Figura 4.6).



Figura 4.35 – Sensor de deformação soldado à estrutura da torre.



Figura 4.36 – Sensor de temperatura soldado à estrutura da torre.

4.6 Dificuldades encontradas

Durante a fase de instalação e testes das estações de medição em campo, algumas dificuldades foram encontradas, tendo sido algumas superadas e outras não.

A primeira delas, ainda durante a instalação, foi quanto à disponibilidade da fonte de energia a ser utilizada na alimentação dos equipamentos necessários para a instalação. Por medida de segurança, a CEMIG não possui qualquer ponto de energia na faixa de segurança da linha de transmissão. Sendo assim, foi necessário utilizar o próprio sistema de alimentação dos sistemas de monitoramento, com algumas modificações.

A segunda dificuldade encontrada, talvez a maior, foi devida a problemas de segurança. Como as torres de linhas de transmissão de alta tensão são consideradas como áreas de risco, nenhuma das atividades *in loco* pôde ser desenvolvida sem o devido acompanhamento da equipe da CEMIG. Isso limitou a realização das atividades e condicionou a evolução do programa experimental à disponibilidade da CEMIG.

A terceira dificuldade foi quanto à utilização do sistema de monitoramento do ângulo de balanço. Mesmo compondo o sistema com sensores de última tecnologia (sensores também utilizados na indústria de armamento aéreo – mísseis), durante a primeira tentativa de utilização com a rede energizada, o sistema se danificou. Não foi possível identificar as causas do acontecimento, mas acredita-se que os elevados valores de campo eletromagnético próximos aos condutores tenham sido responsáveis pelo fato. Os sensores foram então reparados e estão aguardando a disponibilidade da parada da linha pela CEMIG para nova instalação. Como o sistema da câmera é inicializado com dados do sensor de balanço, ele também está inutilizado. Acelerômetros ópticos foram avaliados junto a fabricantes internacionais como, por exemplo, a *Micronoptics* e a própria *FiberSensing*. Entretanto, não existem recursos disponibilizados pela CEMIG para a aquisição de novos equipamentos.

A quarta dificuldade foi quanto à instalação dos sensores ópticos. Na instalação dos sensores no protótipo, em laboratório, não houve problemas para a execução da solda. Porém, *in loco*, a máquina de solda teve dificuldades de realizar a solda ponto entre os sensores e as cantoneiras. Com isso, pontos excessivos de solda tiveram que ser realizados, avariando alguns sensores

ópticos, conforme apresentado na Figura 4.37. Não se sabe ao certo as causas do acontecimento, mas acredita-se que a galvanização do material das cantoneiras e uma fonte pouco estável de alimentação utilizada (baterias e inversor de frequência) tenham sido responsáveis pelo fato.



Figura 4.37 – Sensor de deformações danificado devido a dificuldades de soldagem.

4.7 Situação atual do sistema de monitoramento

Após a instalação de todos os equipamentos que compõem os sistemas de monitoramento, o programa experimental já se encontra concluído, a menos de alguns ajustes e sincronização entre sistemas.

As quatro estações meteorológicas já se encontram instaladas e realizando a coleta e armazenamento dos dados, como será ilustrado no item seguinte. Todos os sensores já foram devidamente instalados e a conexão via GPRS já foi confirmada.

O sistema de monitoramento do ângulo de balanço aguarda a parada da linha para a substituição do sensor danificado. Com a substituição, o sistema retornará à operação normalmente. O sistema

de monitoramento de deformações e temperatura dos elementos estruturais da torre 50 já se encontra instalado e coletando informações, como será ilustrado a seguir. A única etapa pendente para a finalização do projeto experimental é a sincronização de todos os sistemas presentes na torre 50, que aguarda a substituição do sensor de balanço para sua conclusão. Na atualidade, a estação climatológica e o sistema de monitoramento de deformações operam em separado. Após a sincronização, os três sistemas de monitoramento passarão a operar em conjunto, com a mesma base de tempo. Dessa forma, todos os dados sincronizados que se planejava obter neste trabalho ficarão para trabalhos futuros, mesmo porque a formação de um banco de dados, por si só, demanda o tempo total de uma pesquisa a nível de doutorado.

4.8 Resultados experimentais

Além dos resultados obtidos em laboratório, apresentados no item 4.4, foram feitas algumas medições isoladas em campo, como descrito a seguir.

Durante dois meses foram coletados valores de velocidade de vento na estação climatológica localizada na torre 50. Foram obtidos valores com média em 3 segundos (valores de rajada) e com média horária. A Figura 4.38 apresenta os valores obtidos.

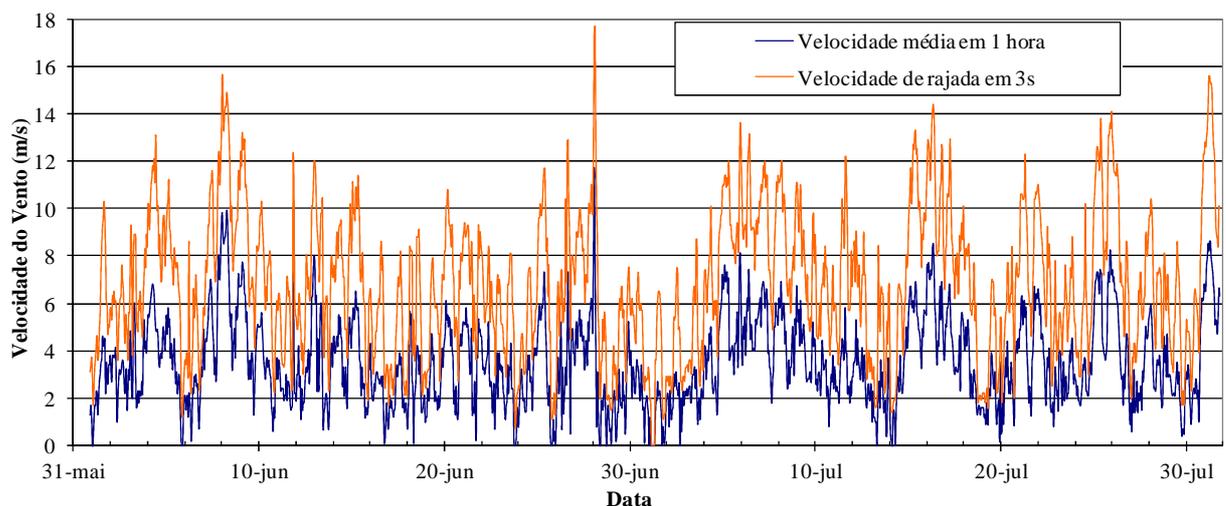


Figura 4.38 – Velocidades do vento com média em 3 segundos e média horária.

A Figura 4.39 apresenta os histogramas das velocidades adquiridas durante os dois meses de medição.

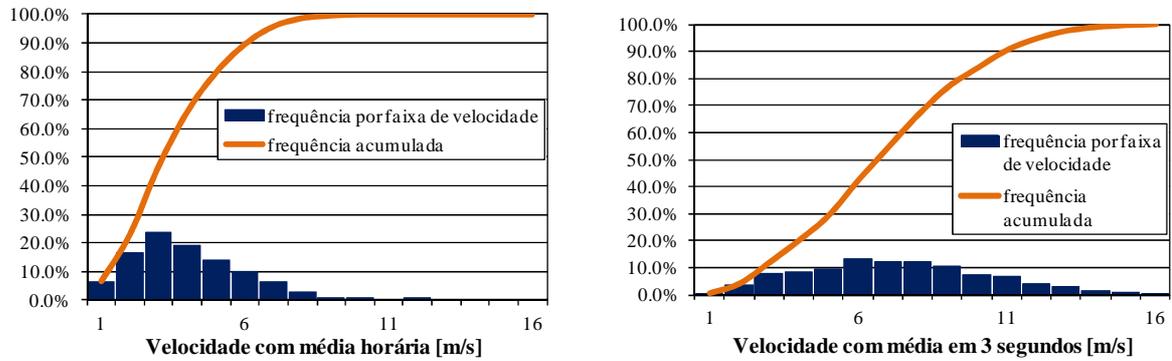


Figura 4.39 – Histogramas das velocidades do vento com média horária e média em 3 segundos.

A Figura 4.40 apresenta valores de deformação e temperatura coletados nos sensores ópticos, com influência somente da temperatura nas deformações, ou seja, praticamente sem a incidência de vento no sistema estrutural. A variação das deformações observadas nos sensores 2 e 3 está relacionada à variação de temperatura do sensor 1 e das deformações dos sensores 5 e 6, ao sensor de temperatura 4.

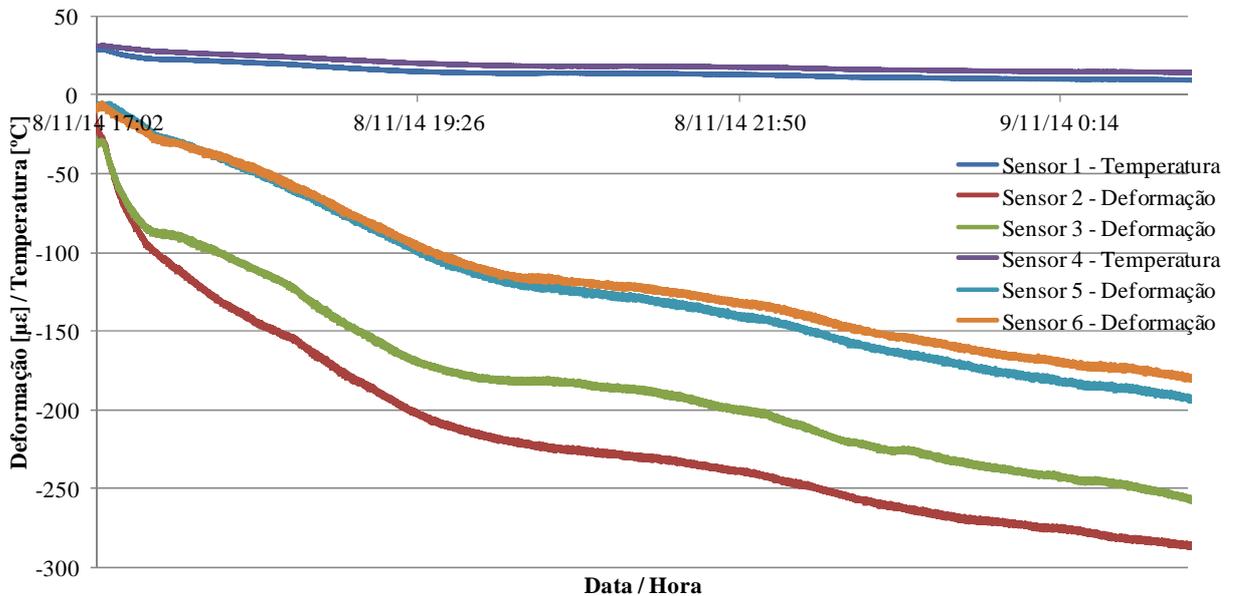


Figura 4.40 – Valores de deformação e temperatura coletados, a cada segundo, com influência da temperatura nas deformações.

A Figura 4.41 apresenta valores de deformação e temperatura coletados nos sensores ópticos, com influência da temperatura e das cargas de vento nas deformações.

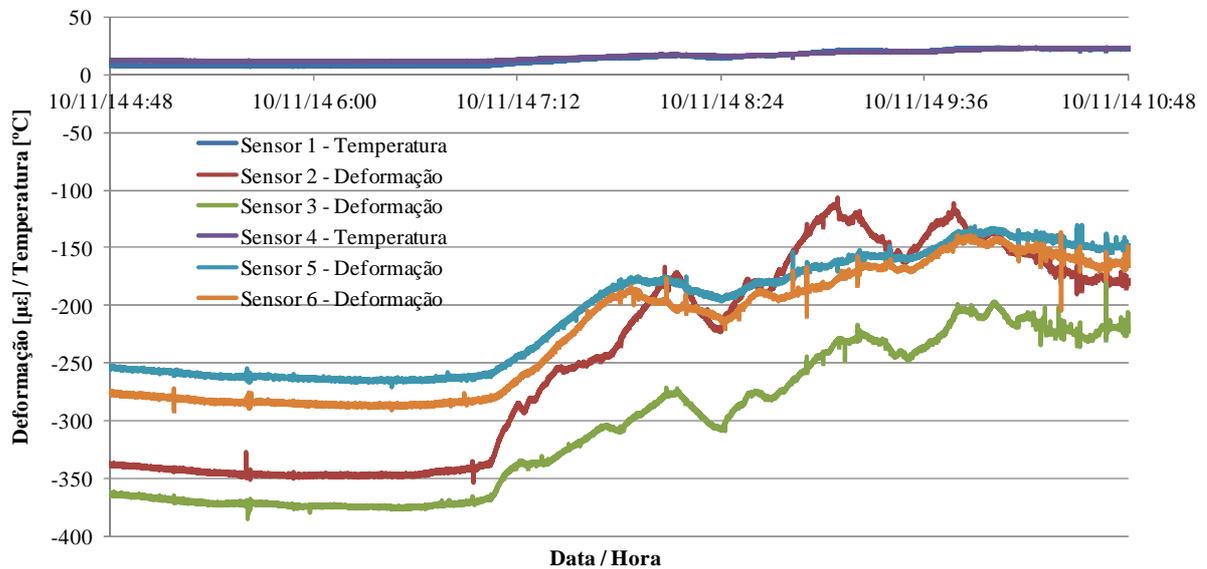


Figura 4.41 – Valores de deformação e temperatura coletados, a cada segundo, com influência de temperatura e cargas de vento nas deformações.

As oscilações com alta frequência e comportamentos distintos para cada sensor de deformação, observadas nas medições acima, evidenciam a presença de cargas de vento no sistema no intervalo de coleta dos dados.

Os dados coletados com o programa experimental desenvolvido podem ser utilizados em validações de análises teórico-numéricas de trabalhos futuros, uma vez que estão sendo monitoradas as ações e as respostas da estruturas. Podem-se validar procedimentos de cálculo de forças de vento, velocidades de vento na região, modelagens empregadas no sistema estrutural, comportamento dinâmico das cadeias de isoladores, entre outros.

5

DESENVOLVIMENTO TEÓRICO-NUMÉRICO

5.1 Análise estática com não linearidade geométrica

Para a análise de todo o conjunto estrutural, foi desenvolvido um modelo completo no software ANSYS® v.11 (2007), contemplando a torre, os cabos nos vãos adjacentes à torre 50 e as cadeias de isoladores (CARVALHO, 2010). Todos os elementos do modelo foram do tipo elemento de treliça (*link 8 e link 10*), que possuem três graus de liberdade por nó (três translações). Nos elementos que representam os cabos (*link 10*), através da análise não linear, somente esforços de tração foram permitidos.

As cadeias de isoladores são verticais após o lançamento dos cabos condutores. Contudo, como existem vãos diferentes de cabos e, conseqüentemente, pesos totais diferentes, com a atuação do peso próprio dos cabos no modelo, o elemento que representa a cadeia de isoladores não resulta na posição vertical. Assim, esse elemento foi modelado inclinado, no sentido do menor vão dos cabos, para que, após a realização de cálculos iterativos, considerando a atuação incremental do peso próprio, ele se tornasse vertical.

A modelagem do para-raios foi feita com uma metodologia diferente da utilizada para os cabos condutores, uma vez que a ligação desse cabo com a torre é realizada através de um elemento fixo (grampo), e não de um elemento deslocável (cadeia de isoladores). No entanto, o grampo só é prensado após o lançamento dos cabos para-raios, implicando uma carga longitudinal resultante igual a zero. Para estabelecer a mesma tração em ambos os vãos do para-raios, é necessário realizar cálculos iterativos, considerando o aumento da flecha da catenária de um vão e, conseqüentemente, redução da flecha do outro vão.

Na ocasião, as cargas de vento foram aplicadas estaticamente, conforme prescrições das normas brasileiras ABNT NBR 5422 e ABNT NBR 6123. Para maiores detalhes ver Carvalho (2010).

5.2 Modelagem da turbulência atmosférica

5.2.1 Considerações gerais

Um dos carregamentos mais importantes a serem considerados em sistemas estruturais de LT's é o carregamento devido ao vento, que pode ser interpretado como uma função temporal aleatória. Essa interpretação sugere a utilização de modelos matemáticos capazes de representar a natureza não determinística do problema.

De maneira geral, a velocidade do vento pode ser expressa como uma função temporal com uma componente média e outra flutuante, como representado a seguir:

$$V(t) = \bar{V} + v(t) \quad (5.1)$$

Onde:

$V(t)$ é a velocidade longitudinal do vento em função do tempo;

\bar{V} é a componente média da velocidade longitudinal do vento;

$v(t)$ é a componente flutuante da velocidade longitudinal do vento.

A componente vertical da velocidade do vento não será considerada neste trabalho, devido ao fato de ser pouco expressiva diante da componente longitudinal.

Uma representação esquemática da variação da velocidade do vento ao longo do tempo é apresentada na Figura 5.1.

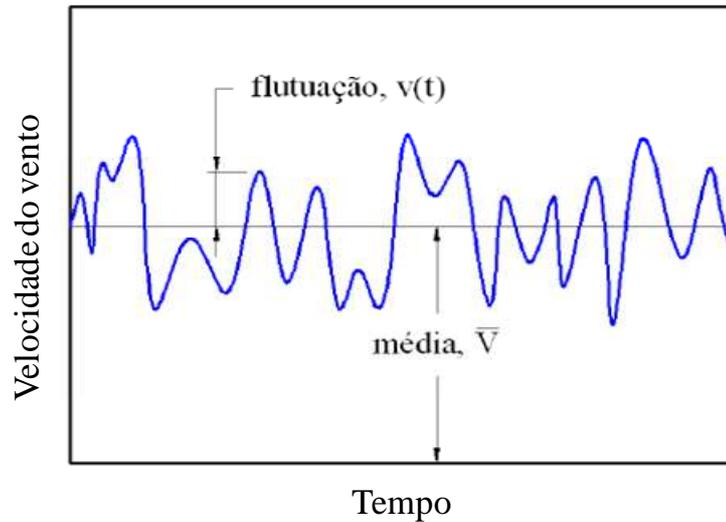


Figura 5.1 – Histórico de velocidade do vento (OLIVEIRA, 2006).

O valor da velocidade média do vento depende, fundamentalmente, dos dados meteorológicos coletados para uma região específica. Geralmente, é fornecido pelas estações de coleta com base em uma hora de observação. Correlações matemáticas e estatísticas possibilitam que a média horária seja extrapolada para qualquer base de tempo.

Na falta de dados de vento para uma dada região, a ABNT NBR 6123 (1988) apresenta isopletras que tornam possível determinar a velocidade média (m/s) em todo o território brasileiro. O gráfico das isopletras apresenta curvas de velocidade com média em 3 segundos (velocidade de rajada), medidas a 10m de altura e associadas a uma probabilidade anual de ocorrência de 2%, conforme mostrado na Figura 5.2.

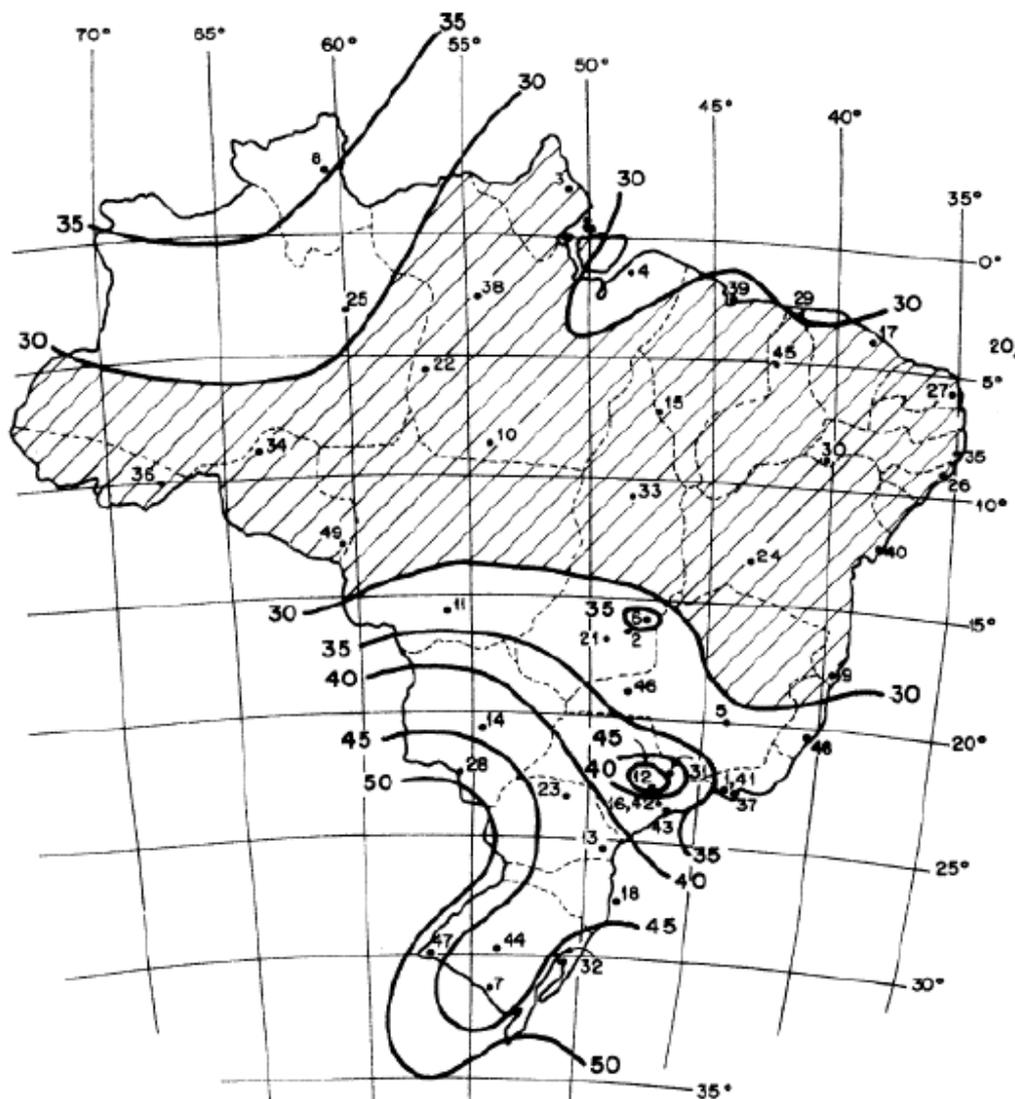


Figura 5.2 – Isoplethas da norma brasileira ABNT NBR 6123 (1988).

A parcela flutuante da velocidade do vento é determinada a partir de parâmetros estatísticos, tais como: distribuição de probabilidade, espectro de potência e funções de correlação cruzada.

5.2.2 Características estatísticas da velocidade do vento

A parcela flutuante da velocidade do vento varia de um modo aleatório, não sendo possível definir relações matemáticas explícitas para descrever seu comportamento. Sendo assim, o fenômeno deve ser analisado por meio da teoria da probabilidade e de médias estatísticas.

Classifica-se a parcela flutuante como um processo aleatório e estacionário, significando que seus parâmetros estatísticos (média, variância, autocorrelação, etc.), determinados sobre a totalidade dos registros, são invariantes para qualquer deslocamento da origem do tempo. Assume-se, ainda, que a parcela flutuante do vento constitui um processo ergótico, no qual os parâmetros estatísticos calculados sobre um conjunto de registros são iguais aos calculados sobre uma única amostra. Um processo ergótico é necessariamente estacionário (BLESSMANN, 2005).

Apresentam-se, nas equações a seguir, alguns parâmetros estatísticos importantes para a determinação da parcela flutuante da velocidade do vento. O valor médio ou média da função $V(t)$, para um processo ergótico, é dado por:

$$\bar{V} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt \quad (5.2)$$

Onde:

T é o tempo ao final dos registros avaliados.

O valor quadrado médio é o valor médio da função $V^2(t)$, ou seja:

$$\overline{V^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt \quad (5.3)$$

A raiz quadrada positiva do valor quadrado médio é definida como média quadrática ou valor rms (*root mean square*). A equação a seguir apresenta a variância, calculada a partir do histórico de velocidades do vento, isso é:

$$\sigma_V^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [V(t) - \bar{V}]^2 dt \quad (5.4)$$

A raiz quadrada positiva da variância é denominada desvio padrão. Desenvolvendo a Eq. (5.4) obtém-se:

$$\overline{V^2} = (\bar{V})^2 + \sigma_V^2 \quad (5.5)$$

Onde:

σ_V^2 é a variância.

Na modelagem das cargas dinâmicas do vento, é conveniente estudar o fenômeno físico em termos da parcela estática (independente do tempo) e da componente flutuante (variável ao longo do tempo). A parcela estática é descrita pelo valor médio do processo, enquanto a parcela flutuante é descrita estatisticamente.

Neste trabalho, a parcela estática é extraída da ABNT NBR 6123 e a componente flutuante é determinada conforme descrito a seguir (PFEIL, 1993).

Define-se autocorrelação como o valor médio do produto das flutuações da velocidade no tempo t e no tempo $t + \tau$, conforme descrito na Eq. (5.6).

$$C^v(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T v(t)v(t + \tau)dt \quad (5.6)$$

Onde:

τ é um intervalo de tempo arbitrário.

Considerando, conforme mencionando anteriormente, que o histórico de flutuações da velocidade do vento configura um processo aleatório ergótico, a autocorrelação independe do tempo e é função somente do intervalo de tempo τ . No caso particular de $\tau = 0$, a função de autocorrelação $C^v(0)$ iguala-se à média quadrática $\overline{v^2}$ e à variância σ_v^2 (uma vez que \bar{v} é igual a 0).

Enquanto a função de autocorrelação fornece informações sobre o processo no domínio do tempo, a função densidade espectral $S^v(f)$ (ou espectro de potência) fornece as mesmas informações no domínio da frequência, ou seja:

$$S^v(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} C^v(\tau)e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (5.7)$$

Onde:

f é a frequência em Hz.

De maneira análoga, é possível definir a função de autocorrelação a partir da função de densidade espectral, porque as duas funções são pares de transformadas de Fourier, transcreve-se assim:

$$C^v(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S^v(f) e^{i2\pi f\tau} df = \int_{-\infty}^{+\infty} S^v(f) \cos(2\pi f\tau) df \quad (5.8)$$

As dimensões do sistema estrutural formado por cabos e torres são grandes o bastante para tornar necessária a utilização de funções correlacionadas no espaço.

Tomando-se dois processos aleatórios, v_1 e v_2 , correspondentes a componentes flutuantes de velocidade do vento em pontos distintos, é possível estabelecer sua interdependência através da função de correlação cruzada definida por:

$$C^{v_1, v_2}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T v_1(t) v_2(t + \tau) dt \quad (5.9)$$

De maneira análoga à realizada anteriormente, a função de correlação cruzada também pode resultar em uma função densidade espectral cruzada, conforme equação abaixo:

$$S^{v_1, v_2}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} C^{v_1, v_2}(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (5.10)$$

Em geral, a função densidade espectral cruzada é uma função complexa, sendo expressa como:

$$S^{v_1, v_2} = S_c^{v_1, v_2} + iS_q^{v_1, v_2} \quad (5.11)$$

No caso de turbulência de fluxo homogêneo, o termo imaginário $iS_q^{v_1, v_2}$ pode ser desprezado, conforme Simiu e Scanlan (1986). Pode-se, então, definir a função coerência como sendo a correlação entre as parcelas flutuantes das duas velocidades v_1 e v_2 , ou seja:

$$Coh^{v_1, v_2}(f) = \frac{S^{v_1, v_2}(f)}{\sqrt{S^{v_1}(f) S^{v_2}(f)}} \quad (5.12)$$

Uma vez que a função densidade espectral é a mesma para ambas as flutuações, a equação anterior pode ser simplificada. Assim, escreve-se:

$$Coh^{v_1, v_2}(f) = \frac{S^{v_1, v_2}(f)}{S^v(f)} \quad (5.13)$$

A expressão clássica para a função de coerência, proposta por Davenport (1968) *apud* Simiu e Scanlan (1986), é apresentada a seguir:

$$Coh^{v_1, v_2}(f) = e^{-\hat{f}} \quad (5.14)$$

sendo a função \hat{f} expressa por:

$$\hat{f} = \frac{f[C_{1x}^2(x_1 - x_2) + C_{1z}^2(z_1 - z_2)]^{1/2}}{\bar{V}(10)} \quad (5.15)$$

Onde:

x_1 , x_2 , z_1 e z_2 são as coordenadas horizontais e verticais dos pontos 1 e 2;

C_{1x} e C_{1z} são os coeficientes de decaimento nas direções horizontal transversal ao vento e vertical;

\bar{V}_{10} é a velocidade média calculada em um intervalo de tempo igual a 10 minutos, a 10 metros de altura.

Ensaio em túnel de vento indicaram que os valores dos coeficientes de decaimento são função de vários fatores, dentre eles a velocidade média, a rugosidade do terreno e a altura acima da superfície. Simiu e Scanlan (1986) sugerem valores de $C_{1x} = 16$ e $C_{1z} = 10$ para a prática usual de projetos.

Igualando as Eqs. (5.13) e (5.14), pode-se reescrever:

$$S^{v_1, v_2}(f) = S^v(f)e^{-\hat{f}} \quad (5.16)$$

Como as funções densidade espectral cruzada e de correlação cruzada configuram um par de transformadas de Fourier, pode-se reescrever a Eq. (5.16) no domínio do tempo da seguinte forma:

$$C^{v_1, v_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S^v(f)e^{-\hat{f}} e^{i2\pi f\tau} df \quad (5.17)$$

Sendo os dois processos ($v_1(t)$ e $v_2(t)$) analisados no mesmo instante, ou seja $\tau = 0$, obtêm-se a correlação cruzada:

$$C_1 = C^{v_1, v_2}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S^v(f) e^{-f} df \quad (5.18)$$

5.2.3 Espectro da componente longitudinal da turbulência

É na componente longitudinal da turbulência que se concentra o interesse do engenheiro de estruturas. Diversos pesquisadores estudaram esse assunto exaustivamente chegando a diversas equações matemáticas com distintos graus de refinamento. A seguir, apresenta-se a formulação para o espectro da componente longitudinal da turbulência proposta por Kaimal, conforme Sachs (1978) *apud* Blessmann (1995), que foi utilizada neste trabalho:

$$\frac{f S^V(z, f)}{u_*^2} = \frac{200 x}{(1 + 50x)^{5/3}} ; x(z, f) = \frac{z f}{\bar{V}_z} \quad (5.19)$$

Onde:

f é a frequência em Hertz;

u_* é a velocidade de fricção ou tangencial, em m/s;

z é a altura em relação ao solo do ponto em estudo, em m;

\bar{V}_z é velocidade média na altura z , em m/s.

A velocidade média na altura z é dada por:

$$\bar{V}_z = \bar{V}_{10} (z/10)^p \quad (5.20)$$

Onde:

\bar{V}_{10} é a velocidade média de projeto a 10 metros de altura, com média em 10 minutos;

p é o coeficiente exponencial relativo à rugosidade do terreno.

Já velocidade de fricção pode ser descrita como:

$$u_* = \frac{k \bar{V}_z}{\ln(z/z_0)} \quad (5.21)$$

Onde:

k é a constante de Kármán, aproximadamente igual a 0,4;

z_0 é a medida de rugosidade do terreno.

Oliveira (2006) apresentou as curvas de espectros de potência do vento propostas por Davenport, Panowsky, Harris e Kaimal, para a altura de 10 metros e velocidade média do vento igual a 34,50 m/s. Essas curvas são ilustradas na Figura 5.3.

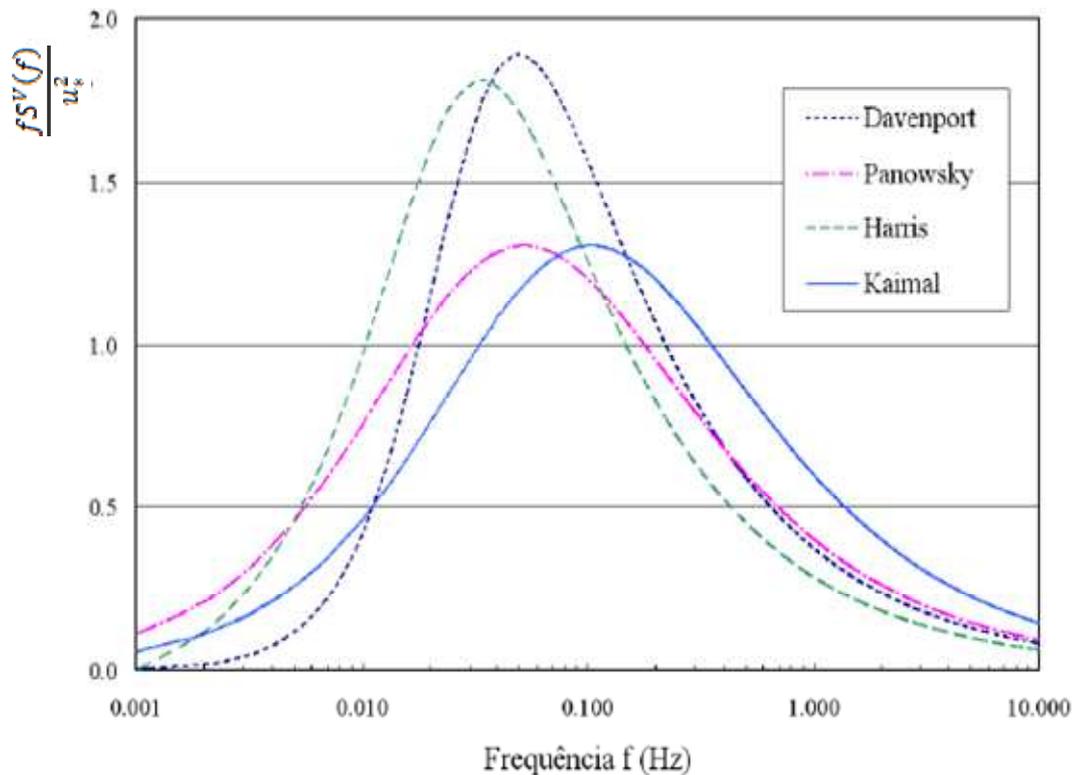


Figura 5.3 – Espectros de potência da componente longitudinal da turbulência (OLIVEIRA, 2006).

Segundo Menin (2002), os primeiros autores a medirem espectros de potência do vento não consideravam a dependência da altura z . Assim, várias das expressões propostas para o espectro são dependentes somente da frequência e da velocidade média do vento a 10 metros de altura em relação ao solo.

Na sequência, outros pesquisadores verificaram a relação dos espectros de potência do vento com a altura (z), o que fez com que expressões como as de Kaimal fossem propostas. Por se tratar de uma equação mais moderna, com maior aceitação no meio científico e utilizada em pesquisas semelhantes a esta, adota-se neste trabalho a expressão de Kaimal para a definição do espectro de potência de vento.

Os espectros das componentes lateral e vertical da turbulência não serão avaliados neste trabalho devido ao fato dessas componentes serem pouco expressivas diante da componente longitudinal.

5.2.4 Simulação, no tempo, da componente flutuante da velocidade do vento

Para a realização da análise dinâmica não determinística no domínio do tempo, é necessária a geração de funções temporais para a parcela flutuante da velocidade longitudinal do vento. O método mais utilizado para a geração de um sinal aleatório de média igual a zero, a partir de um dado espectro de energia, é o da série de Fourier. Nesse modelo, o processo $v(t)$ (evolução temporal da velocidade) é gerado por uma expressão do seguinte tipo (PFEIL, 1993):

$$v(t) = \sqrt{2} \sum_{i=1}^N \sqrt{S^v(f_i) \Delta f} \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (5.22)$$

Onde:

N é o número de intervalos Δf de frequências considerado no espectro;

f_i é a frequência em Hz;

t é o tempo em segundos;

Δf é o incremento de frequência em Hz;

θ_i é o ângulo de fase aleatório, compreendido entre 0 e 2π .

A determinação das funções temporais pode ser realizada conforme as etapas descritas a seguir:

- a) determinação da função S^v a partir da função densidade espectral proposta por Kaimal, apresentada anteriormente (Eq. (5.19));
- b) discretização da função S^v em “N” intervalos de frequência Δf , definindo-se a frequência f_i de cada intervalo;
- c) geração de um vetor com valores aleatórios para o ângulo de fase θ_i , entre 0 e 2π ;
- d) utilização da Eq. (5.22) para a geração da série temporal.

Ao proceder a divisão do espectro, deve-se ter a precaução de incluir nas frequências f_i as frequências naturais da estrutura de modo a não subestimar a resposta desta. O modelo ora adotado é bastante dispendioso computacionalmente pois, para cada instante de tempo, é considerada a divisão do espectro e realizado o somatório [solução da Eq. (5.22)].

5.2.5 Definição das funções temporais correlacionadas no espaço

É possível, diante das considerações e formulações matemáticas expostas nos itens anteriores, estabelecer um procedimento para a geração de séries temporais utilizando séries de Fourier. Para estruturas com grandes dimensões, faz-se necessária a geração de não somente uma série temporal, mas de várias, correlacionadas entre si no espaço. A Figura 5.4 apresenta uma divisão espacial de um trecho de uma LT, considerando as faixas de atuação de cada função aleatória $v_i(t)$:

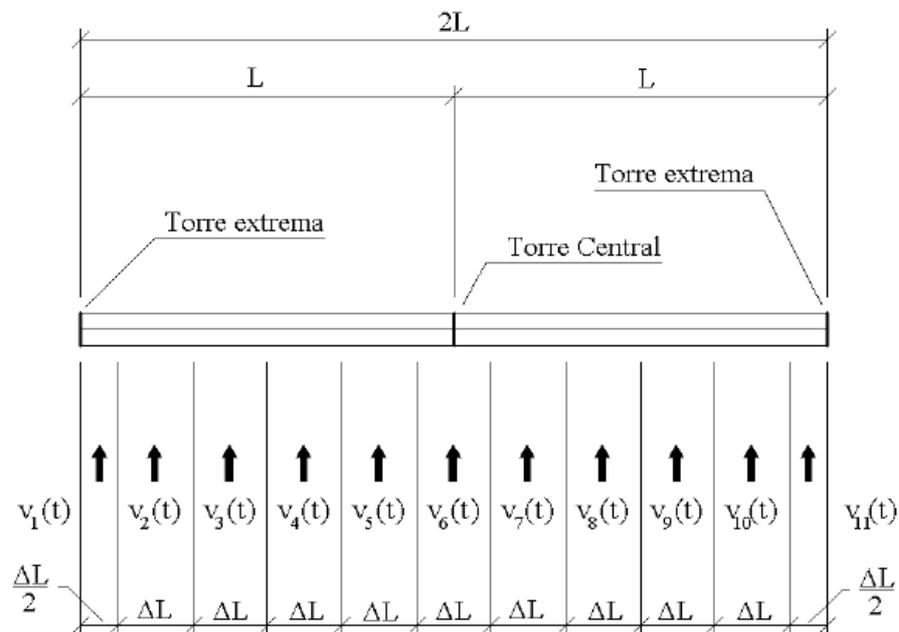


Figura 5.4 – Esquema de distribuição longitudinal das funções temporais (OLIVEIRA, 2006).

Calculando o valor da função de correlação cruzada $C_1 = C^{v_1, v_2}(0)$ [Eq. (5.18)] para diferentes larguras ($\Delta L = (x_1 - x_2)$ ou $(z_1 - z_2)$) de faixas de atuação, é possível construir um gráfico, como apresentado na Figura 5.5, que relaciona os coeficientes (C_l) assim obtidos com as larguras de faixa (ΔL).

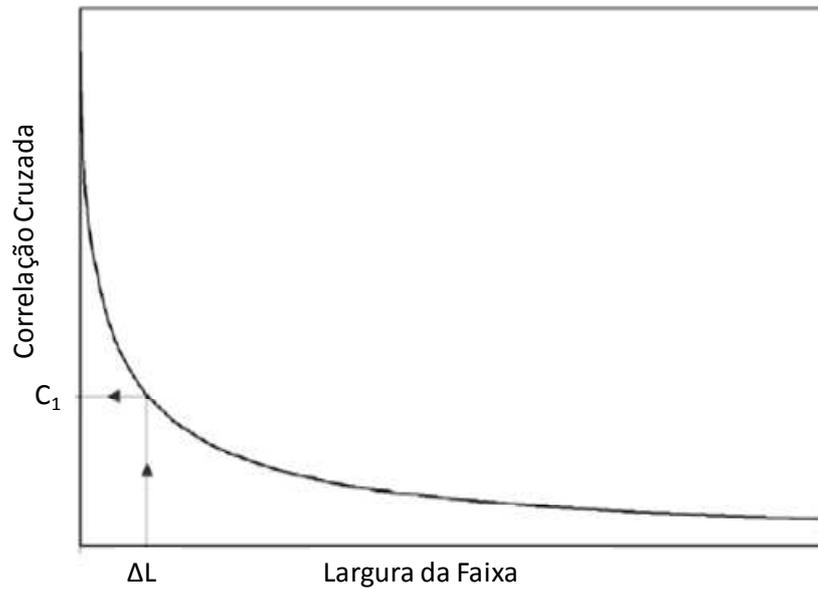


Figura 5.5 – Função de correlação cruzada (para $\tau = 0$) para diferentes larguras de faixa (SANTOS, 2008).

A Eq. (5.18) fornece o valor da correlação cruzada considerando τ nulo, o que significa que as funções temporais ($v_1(t)$ e $v_2(t)$) ocorrem em pontos distintos simultaneamente.

Conhecendo o valor da função de autocorrelação dos processos [Eq. (5.8)], é possível determinar o tempo τ_1 para o qual a autocorrelação se iguale à correlação cruzada calculada considerando τ nulo (valor de C_1 mostrado na Figura 5.5), conforme ilustrado na Figura 5.6. Assim, as funções temporais nos pontos 1 e 2, correlacionadas espacialmente, podem ser expressas através de séries temporais idênticas, defasadas entre si de um intervalo de tempo igual a τ_1 :

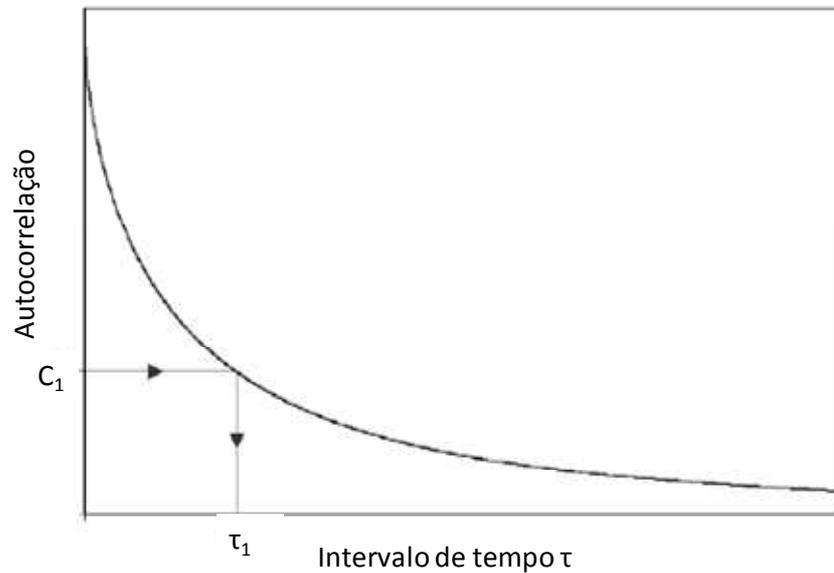


Figura 5.6 – Função de autocorrelação (SANTOS, 2008, modificado).

A seguir é apresentada uma breve descrição das etapas que devem ser seguidas para obtenção da correlação espacial entre séries temporais vizinhas.

- a) definição da largura da faixa ΔL das séries temporais;
- b) determinação do valor da correlação cruzada C_1 pela Eq. (5.18) e Figura 5.5;
- c) determinação do intervalo de tempo τ_1 pela Eq. (5.8) e Figura 5.6;
- d) geração das séries temporais conforme a Eq. (5.22), defasadas entre si de um intervalo de tempo igual a τ_1 .

5.3 Definição da geometria e da tensão inicial do cabo submetido ao peso próprio

Um cabo suspenso, como no caso de linhas aéreas de transmissão, apresenta a forma de uma catenária. No caso de suportes à mesma altura, essa catenária será simétrica em relação ao eixo central onde se localiza o vértice e onde se mede a flecha. A flecha depende do peso próprio do cabo, do comprimento do vão, da temperatura e da tração aplicada ao cabo quando este é fixado aos suportes.

Neste trabalho, a modelagem dos cabos foi realizada utilizando o elemento de treliça não linear (*link 10*) do programa comercial ANSYS® v.11 (2007), com a utilização do *keyoption 3* igual a 0, impondo assim aos elementos somente a possibilidade de esforços de tração.

Labegalini *et al.* (1992) avaliaram aproximações do cálculo de cabos considerando a forma de uma parábola e concluiu que os cálculos aproximados foram plenamente satisfatórios. Os coeficientes da parábola podem ser definidos a partir da equação (Figura 5.7):

$$y_c = ax^2 + bx + c \quad (5.23)$$

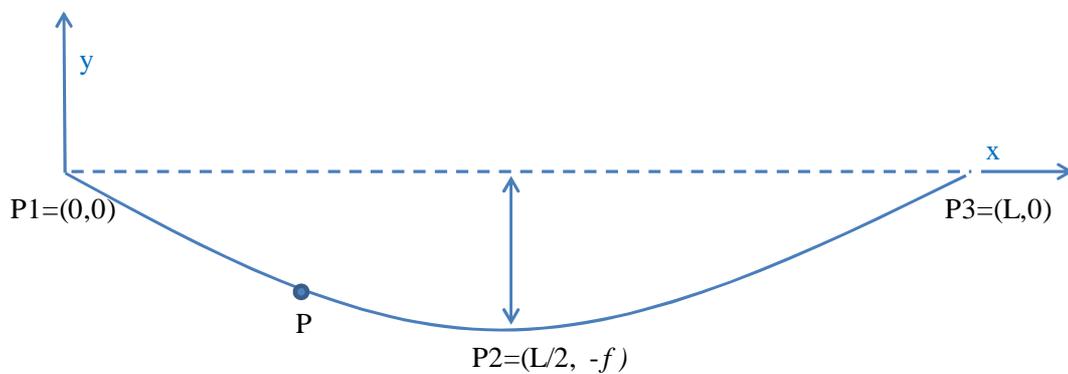


Figura 5.7 – Forma da parábola.

Onde:

x e y_c são as coordenadas de P no sistema da Figura 5.7;

a , b e c são as constantes da equação da parábola;

L é o vão entre apoios, em metros;

f é a flecha, em metros.

Aplicando os pontos P1, P2 e P3 à equação geral da catenária, é possível definir os coeficientes, determinando assim a equação da parábola a ser utilizada como proposta inicial de geometria na modelagem de cabos suspensos nivelados, ou seja:

$$y_c = \frac{4f}{L^2}x^2 - \frac{4f}{L}x \quad (5.24)$$

Conforme Labegalini *et al.* (1992), a flecha f pode ser obtida de acordo com:

$$f = \frac{p L^2}{8 T} \quad (5.25)$$

Onde:

p é o peso por unidade de comprimento, em kgf/m;

T é a força de tração do cabo, em kgf.

A partir da forma inicial de parábola, são realizados incrementos de carga até que o sistema se equilibre com todo o carregamento devido ao peso próprio. A formulação de grandes gradientes de deslocamentos (*large displacement*) e valores de deformação inicial para os elementos de treliça devem ser considerados no cálculo dos deslocamentos. Foram considerados apoios fixos em ambas as extremidades do cabo, por simplicidade. A inclusão de vãos de cabos adjacentes e de cadeias de isoladores, entretanto, seria bastante simples.

Toda programação da modelagem do cabo, desenvolvida na linguagem *ANSYS Parametric Design Language* (APDL), é apresentada no Apêndice (item 10) deste trabalho.

5.4 Determinação de modos de vibração e frequências naturais do cabo

Para a determinação de modos de vibração e frequências naturais do cabo, foi desenvolvida uma macro no *ANSYS®* v.11 (2007), considerando a atuação da tração devida ao peso próprio. Parte-se do procedimento descrito em detalhes no item anterior para a definição da forma geométrica do cabo devido ao peso próprio, incluindo o efeito da tração no cabo. Sobre o modelo desenvolvido, realizam-se duas observações:

- a) Para esse processamento, foi utilizado o elemento tridimensional *BEAM 189* com seis graus de liberdade, baseado na teoria de viga de Timoshenko com a inclusão das deformações devido ao cisalhamento, rigidez à flexão desprezível e engastado nas extremidades. Com o elemento de treliça, não foi possível determinar os modos e frequências devido a problemas de convergência.
- b) Os valores determinados para as frequências aumentam consideravelmente com a ação do vento porque a força de tração no cabo cresce, resultando em maior rigidez para o cabo.

Para efeito de comparação, no caso de um cabo reto de comprimento L sujeito a uma força de tração T , com massa por unidade de comprimento igual a m , a n -ésima frequência natural, em rad/s, é dada por (HARTOG, 1985):

$$\omega_n = \frac{n \pi}{L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (5.26)$$

A programação desenvolvida para o cálculo de modos e frequências dos cabos é apresentada também no Apêndice deste trabalho.

5.5 Análise dinâmica do cabo

A análise dinâmica completa do cabo envolve as seguintes etapas:

1ª Etapa: As forças gravitacionais são aplicadas gradualmente, sendo a configuração final dos cabos obtida a partir de uma análise não linear estática, conforme item 5.3 (os efeitos dinâmicos são desativados nessa etapa de carregamento no programa computacional utilizado);

2ª Etapa: As forças aerodinâmicas correspondentes à parcela média da velocidade do vento são aplicadas aos cabos como forças nodais. Devido a limitações do programa utilizado, a análise já tem que ser dinâmica nessa etapa, o que implica alguns cuidados. As cargas devem ser introduzidas lentamente, em pequenos incrementos, de forma que as velocidades assumidas pelo cabo, nessa etapa, não sejam expressivas e, portanto, não interfiram nos resultados da etapa seguinte de carregamento. Alguns resultados para diferentes aplicações dessa etapa de carregamento são apresentados no item 5.7.2.

3ª Etapa: As forças de vento, parcela média e parcela flutuante, são incluídas, como uma função arbitrária do tempo, para cada nó do cabo. É processada, então, a análise dinâmica em regime transiente.

As cargas de vento são sempre calculadas a cada instante de tempo, utilizando a velocidade relativa entre o vento e a estrutura. Dessa forma, considera-se automaticamente o amortecimento aerodinâmico e observa-se que este deverá se pronunciar mais para as estruturas que

apresentarem valores expressivos de velocidades, quando comparados aos valores das velocidades do vento. As equações a seguir apresentam a formulação básica para o cálculo das cargas de vento pela metodologia proposta:

$$q_{vento} = 0,613 \cdot V_R^2 \quad (5.27)$$

$$V_R = (V(t) - V_{cabo}) \quad (5.28)$$

$$V(t) = \bar{V}_z + v(t) \quad (5.29)$$

Onde:

q_{vento} é a pressão dinâmica do vento;

V_R é a velocidade relativa entre o vento e o cabo;

$V(t)$ é velocidade do vento;

V_{cabo} é velocidade do cabo;

$v(t)$ é a componente flutuante da velocidade longitudinal, apresentada em detalhes no item 5.1;

\bar{V}_z é a componente média da velocidade longitudinal de projeto, em 10 minutos, conforme Eq. (5.20).

Neste trabalho, são adotadas as prescrições da norma ABNT NBR 6123 (1988) que sugere a utilização da velocidade média calculada em um intervalo de tempo igual a 10 minutos, descrita pela seguinte equação:

$$\bar{V}_{10} = 0,69 V_0 S_1 S_3 \quad (5.30)$$

Onde:

V_0 é a velocidade de rajada, calculada sobre um intervalo de tempo igual a 3 segundos;

S_1 é o fator topográfico associado ao relevo, conforme a NBR 6123 (1988);

S_3 é o fator estatístico associado à probabilidade de ruína, conforme a NBR 6123 (1988).

Outros estudos, entre eles o de Nagao *et al.* (2003), avaliaram a correlação espacial para as pressões aerodinâmicas. Os estudos mostraram que as correlações para o processo “flutuação da velocidade longitudinal” não coincidem com as do processo “flutuação da pressão aerodinâmica”. Apesar disso, no presente trabalho, assume-se que as pressões atuantes nos cabos são funções diretas da velocidade, conforme modelo clássico de Davenport adotado na NBR

6123 (1988), não sendo consideradas funções de densidade espectral e correlação cruzada para a flutuação de pressões.

Do lado da segurança, foram desprezadas as velocidades verticais assumidas pelo cabo. Considerando velocidade nula do vento na vertical, conforme mencionado anteriormente, será mostrado que as forças associadas às velocidades verticais do cabo são muito pequenas em relação às forças horizontais (ver item 5.7.3).

A variação da velocidade do vento com a altura em relação ao solo, ao longo da catenária do cabo, é desprezada. Assume-se um valor constante de velocidade média correspondente a uma altura de referência, definida como a altura do centro de gravidade da catenária do cabo. Tal simplificação também se deve ao fato de que, sob ventos fortes, a deflexão dos cabos será grande, reduzindo consideravelmente a catenária vertical, sendo a geometria do cabo descrita praticamente por uma catenária horizontal. Obviamente, devem ser feitos os devidos ajustes no caso de cabos com grande desnível ou grandes flechas da catenária vertical, onde a variação da altura indicará variação nas velocidades do cabo.

O coeficiente de arrasto de um cilindro regular depende do número de Reynolds, da rugosidade superficial e da turbulência do vento. Aumentos de rugosidade superficial e de turbulência no escoamento têm efeitos similares sobre o arrasto, uma vez que aceleram a transição do escoamento sobre o cilindro. Neste trabalho, não serão consideradas variações no coeficiente de arrasto, sendo considerado o valor constante e igual a 1,1 para todos os cabos analisados, conforme as prescrições da NBR 6123 (1988).

Para aplicar o procedimento descrito, a solução dinâmica transiente tem que ser finalizada a cada incremento de tempo para possibilitar o armazenamento dos valores de velocidade e cálculo das novas cargas devidas ao vento, considerando a velocidade relativa. A finalização da solução deve ocorrer obrigatoriamente, pois, a aquisição dos valores das velocidades instantâneas do cabo só é possível através do módulo de pós-processamento do programa. Posteriormente, reinicia-se a solução do modelo na posição deformada e com todas as suas condições correntes preservadas (velocidades, acelerações, forças internas, etc.), aplicando as novas pressões aerodinâmicas.

O processo de parar a solução numérica e aplicar novo carregamento a cada passo de tempo torna a solução complexa e é sujeito a limitações. O número de paralisações permitidas pelo programa é limitado a mil. Na verdade, a cada suspensão da solução, é criado um arquivo de resultados e não se pode exceder mil arquivos. Assim, se o passo de tempo (“*timestep*”) for igual a 0,1 segundos, o tempo máximo de solução seria 100 segundos.

A programação proposta neste trabalho atende também à análise dinâmica sem interação entre o fluido e a estrutura. Nesse caso, basta anular o vetor de velocidades instantâneas do cabo a cada instante de tempo.

No Apêndice (item 10) pode ser encontrada a rotina desenvolvida para a análise dinâmica do cabo.

5.6 Problemas de convergência

O procedimento proposto é sujeito a problemas de instabilidade numérica devido aos fatores listados a seguir:

- a) a limitação de mil arquivos, já mencionada no item anterior, implica grandes valores do passo de tempo, caso se deseje um processamento em um período de tempo mais prolongado. A variação da parcela flutuante durante um passo de tempo pode ser considerável, exigindo procedimentos adicionais para evitar a instabilidade numérica (ver item 5.7.3);
- b) a introdução da pressão associada à velocidade média do vento, feita durante a análise dinâmica, pode conduzir a velocidades iniciais elevadas, o que também pode comprometer a estabilidade da solução (ver item 5.7.2).

5.7 Estudos de caso

5.7.1 Geometria do vão em estudo, propriedades do cabo e carregamento aerodinâmico

Na análise dinâmica, será avaliado um vão real de um cabo singular, adjacente à torre 50, com distância entre apoios igual a 400 metros. Por simplicidade, os apoios foram considerados nivelados. A Tabela 5.1 apresenta as características do vão em estudo.

Tabela 5.1 – Características do vão de 400 metros em estudo.

Propriedades	Cabo Condutor – Linnet 336,4 MCM
Diâmetro [mm]	18,3
Material	Alumínio com alma de aço
Módulo de Elasticidade [GPa]	75,9
Carga de Ruptura [kgf]	6393
Peso Linear [kgf/m]	0,688
Vão [m]	400
“Every Day Stress” (EDS)	18,5%
Flecha vertical [m]	11,55
Comprimento cabo [m]	401,01

A força de tração *Every Day Stress* (EDS), como critério de projeto, é definida como a tração final de trabalho dos cabos, após o seu lançamento, dada em relação ao valor da carga de ruptura (em porcentagem). Essa tração é imposta e medida durante a montagem do cabo.

O vão em estudo está localizado próximo à cidade de Belo Horizonte/MG, onde as isopletas de velocidade da NBR 6123 (1988) indicam uma velocidade de rajada V_0 igual a 32 m/s. Para a aplicação do procedimento proposto, foram utilizadas velocidades de rajadas iguais a 20, 32 e 50 m/s, a 10 metros de altura. Os fatores S_1 e S_3 foram tomados iguais a 1,0 e 1,1, respectivamente.

Para a construção das séries temporais do vento, a partir da formulação apresentada para a simulação da turbulência atmosférica, foram utilizadas as seguintes variáveis:

- altura em relação ao solo: $z = 22,8$ metros;
- comprimento de rugosidade: $z_0 = 0,07$ metros (grama alta, BLESSMANN, 1995);
- coeficiente exponencial: $p = 0,15$;

- largura da faixa: $\Delta L = 40$ metros.

Para a interpretação dos resultados, a Figura 5.8 apresenta o sistema de coordenadas utilizado. Cargas de vento são consideradas positivas quando atuam na direção positiva do eixo Y:

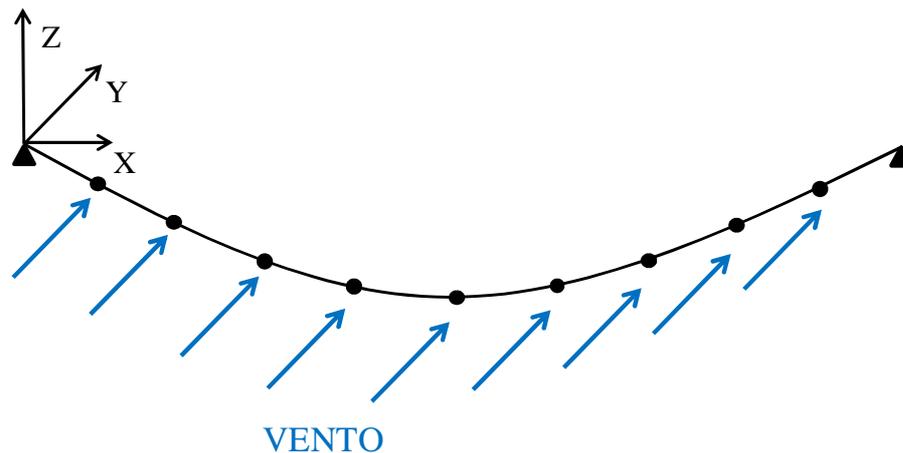


Figura 5.8 – Sistema de coordenadas utilizado.

5.7.2 Análise para a velocidade de rajada de 20 m/s

Como já mencionado, as cargas referentes à parcela média da velocidade de vento devem ser introduzidas lentamente. Na primeira simulação, esse carregamento foi inserido em trinta incrementos (no mínimo), em um período total (Δt) de 0,1 segundos, em forma de rampa. Os resultados apresentaram picos de velocidade e de reações de apoio no início e perturbações ao longo da simulação, levando em conta a interação entre o fluido e a estrutura. Os valores no início dessa simulação superaram os valores obtidos para a simulação sem interação, o que não deveria ocorrer.

Para contornar o problema observado, a carga referente à parcela média foi introduzida em um intervalo dez vezes superior, igual a 1 segundo, mantendo a quantidade de incrementos igual a 30 (no mínimo).

As figuras a seguir apresentam os deslocamentos e as velocidades no centro do cabo e as reações de apoio para os dois intervalos de introdução da pressão associada à parcela média. A curva da

solução sem interação foi incluída nos gráficos para a comparação da magnitude dos valores obtidos:

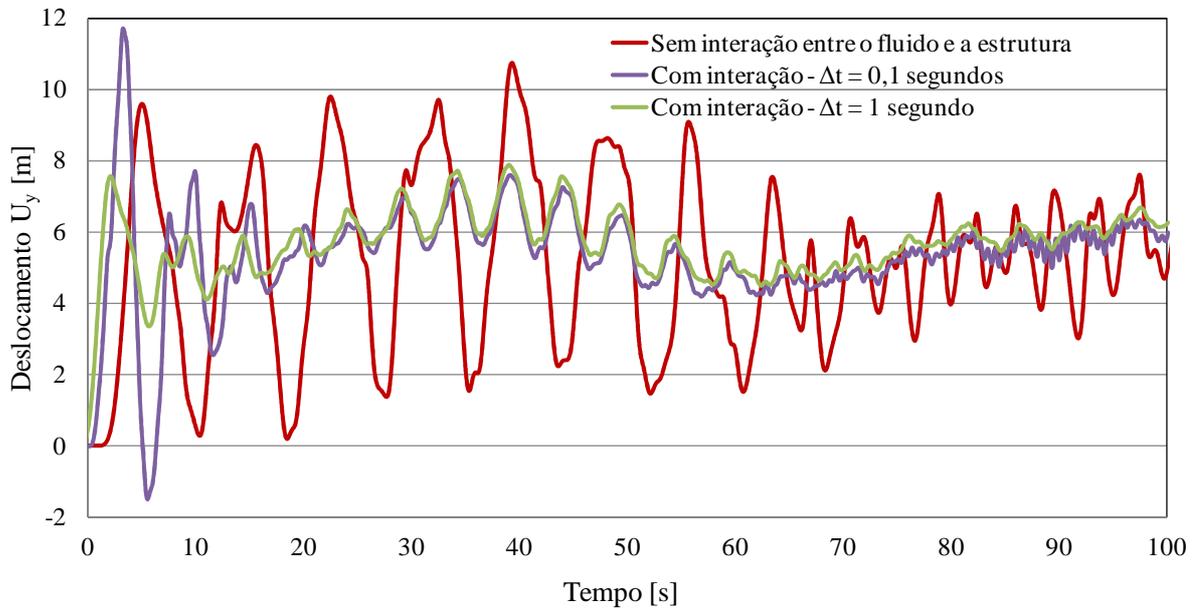


Figura 5.9 – Evolução temporal do deslocamento U_y do nó central do cabo [m] para a rajada de 20m/s.

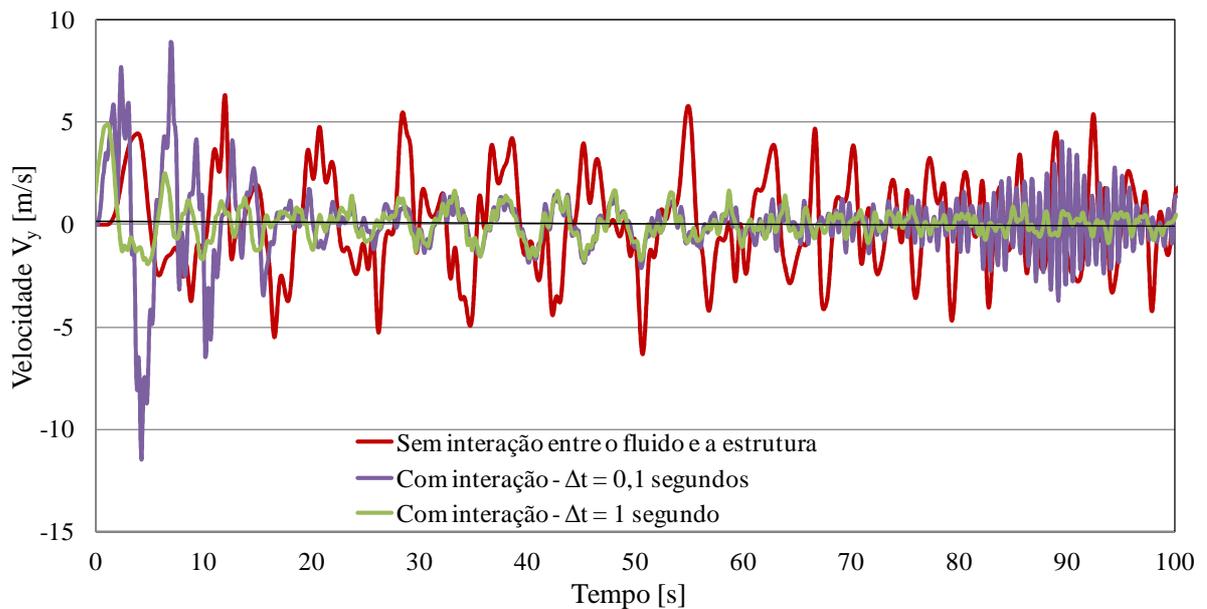


Figura 5.10 – Evolução temporal da velocidade V_y do nó central do cabo [m/s] para a rajada de 20m/s.

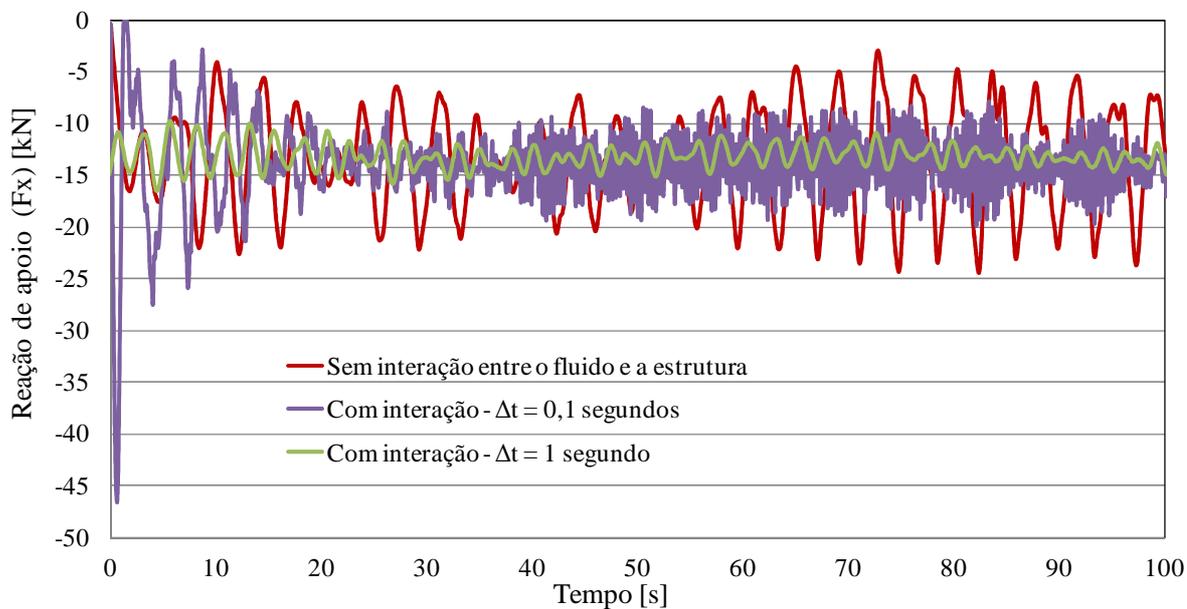


Figura 5.11 – Evolução temporal da reação de apoio F_x [kN] para a rajada de 20m/s.

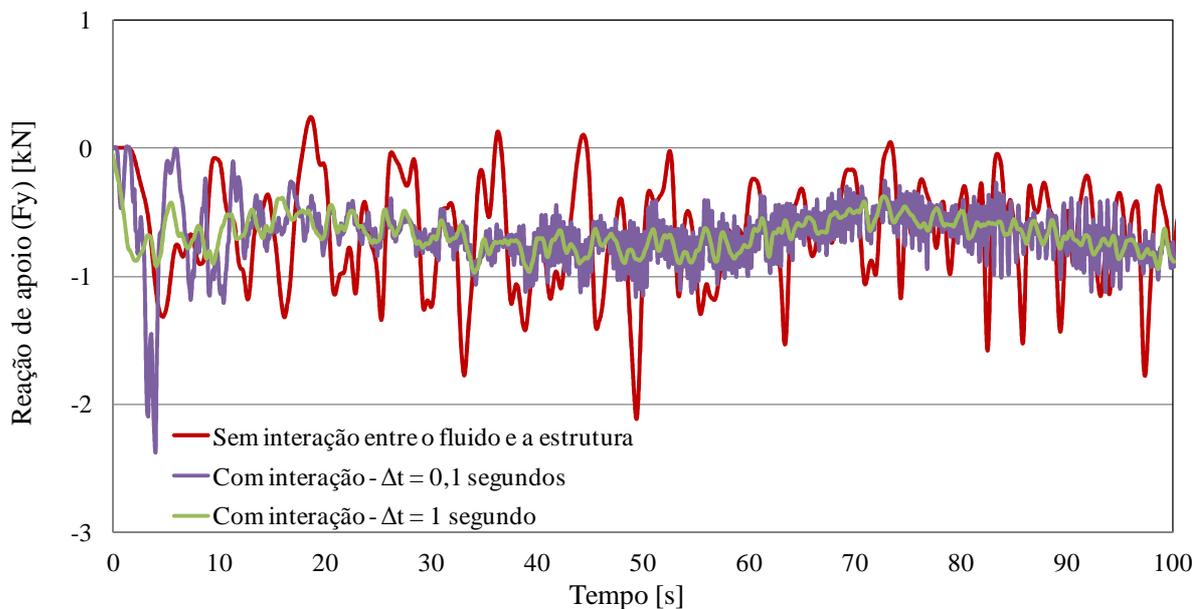


Figura 5.12 – Evolução temporal da reação de apoio F_y [kN] para a rajada de 20m/s.

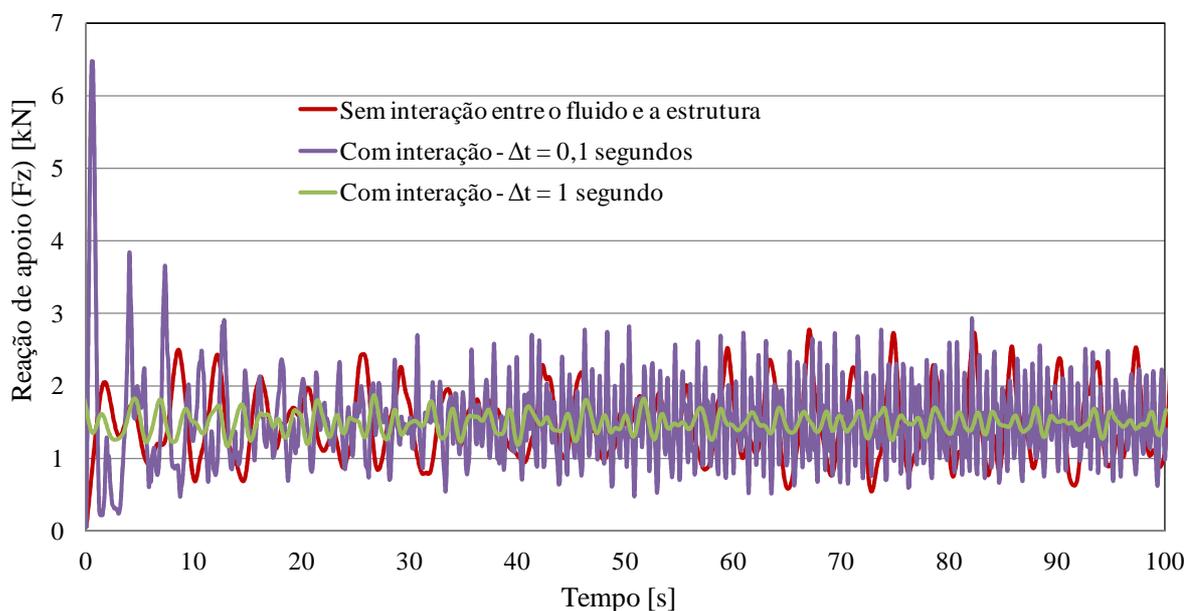


Figura 5.13 – Evolução temporal da reação de apoio vertical (F_z) [kN] para a rajada de 20m/s.

Em todas as figuras apresentadas, podem-se perceber os picos iniciais e as perturbações ao longo da solução, mencionados anteriormente, para $\Delta t = 0,1$ segundos. As perturbações ao longo da solução indicam a presença de instabilidade na solução, sugerindo assim uma introdução do carregamento (carregamento devido a parcela média do vento) mais suave no modelo estrutural, isto é, em um período maior de tempo.

5.7.3 Análise para a velocidade de rajada de 32 m/s

Para essa velocidade de rajada, observou-se, ao longo da simulação, o surgimento de perturbações e a dificuldade de convergência da solução. Inicialmente, foi utilizado, como na análise anterior, um “*timestep*” com valor de 0,1 segundos, ao longo de toda a solução, com no mínimo 30 incrementos de carregamento nesse intervalo. O mesmo intervalo de tempo foi utilizado para a geração das funções temporais, segundo o espectro de Kaimal. A introdução das cargas devidas à parcela média da velocidade foi realizada considerando um intervalo de tempo igual a 1 segundo, devido aos resultados observados no item anterior.

Analisando as funções aleatórias do vento geradas para a rajada de 32 m/s, foi detectada uma mudança abrupta dos valores da velocidade do vento entre os “*timesteps*” de 0,1 segundos. Foi

possível identificar variações da ordem de 5 m/s nesse intervalo. Tal variação abrupta, ocorrendo em vários nós da estrutura simultaneamente, gera uma grande dificuldade da convergência da solução.

Para contornar esse problema, foram utilizados dois diferentes incrementos de carga durante a solução, sendo um incremento de tempo para o cálculo das velocidades de vento segundo o espectro de Kaimal, igual a 1 segundo, e outro intervalo de tempo, dez vezes menor, para a solução do modelo. Os valores da velocidade do vento para a aplicação nos intervalos de solução do modelo foram interpolados linearmente entre os valores gerados aleatoriamente. A Figura 5.14 ilustra o problema mencionado e a solução final encontrada.

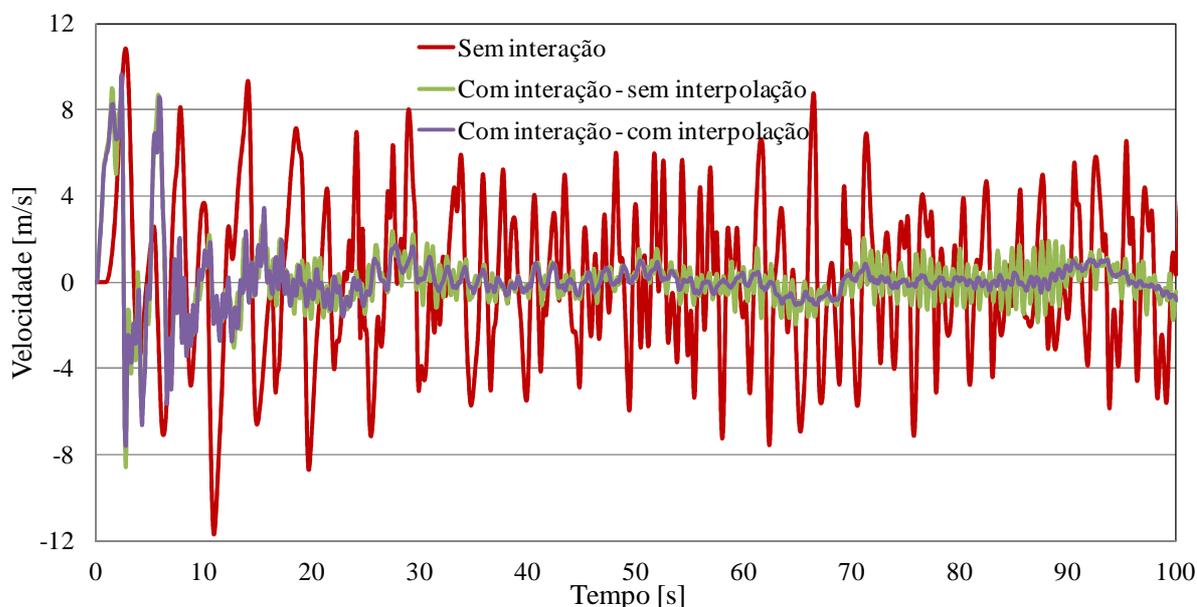


Figura 5.14 – Evolução temporal da velocidade V_y do nó central do cabo [m/s] para a rajada de 32m/s.

Observam-se resultados mais comportados para a solução considerando a interpolação entre os valores de velocidade do vento, obtidos através da geração aleatória de velocidades (solução com interação – com interpolação). Sendo assim, utilizando um tempo de introdução de cargas igual a 1 segundo, “*timesteps*” de 0,1 segundos e incremento de tempo para o cálculo das velocidades de vento igual a 1 segundo, obtêm-se os resultados finais, com e sem interação, para a velocidade de rajada igual a 32 m/s, correspondente à região em estudo. As figuras a seguir apresentam os

deslocamentos e as velocidades no centro do cabo e as reações de apoio, com e sem interação entre o fluido e a estrutura. Os valores iniciais foram desprezados devido ao fato de se localizarem no período transiente da solução.

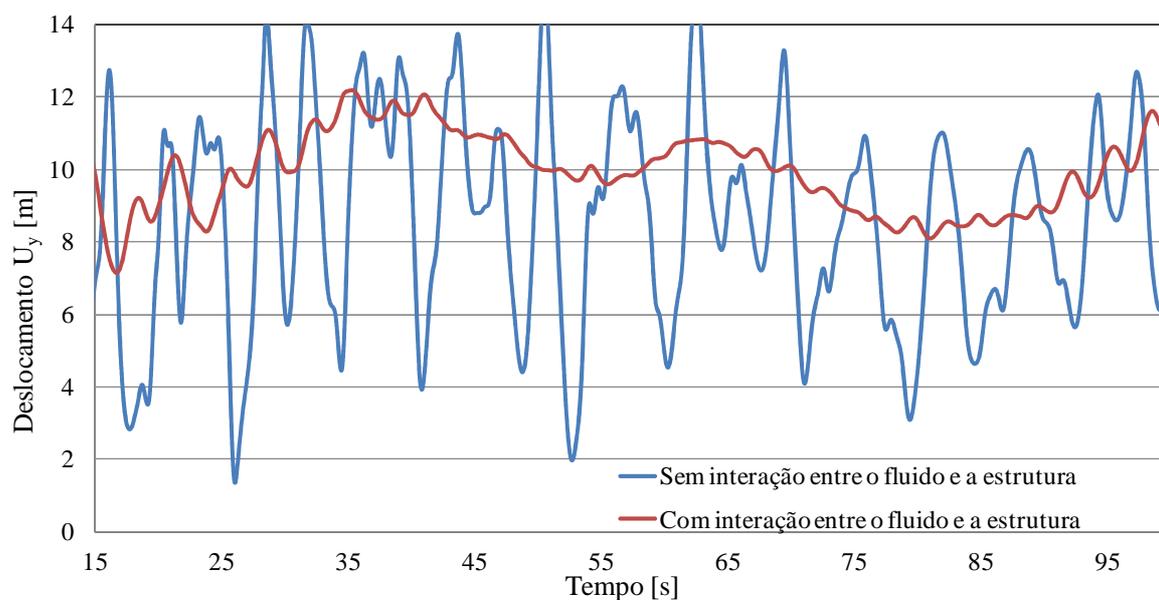


Figura 5.15 – Evolução temporal do deslocamento U_y do nó central do cabo [m] para a rajada de 32m/s.

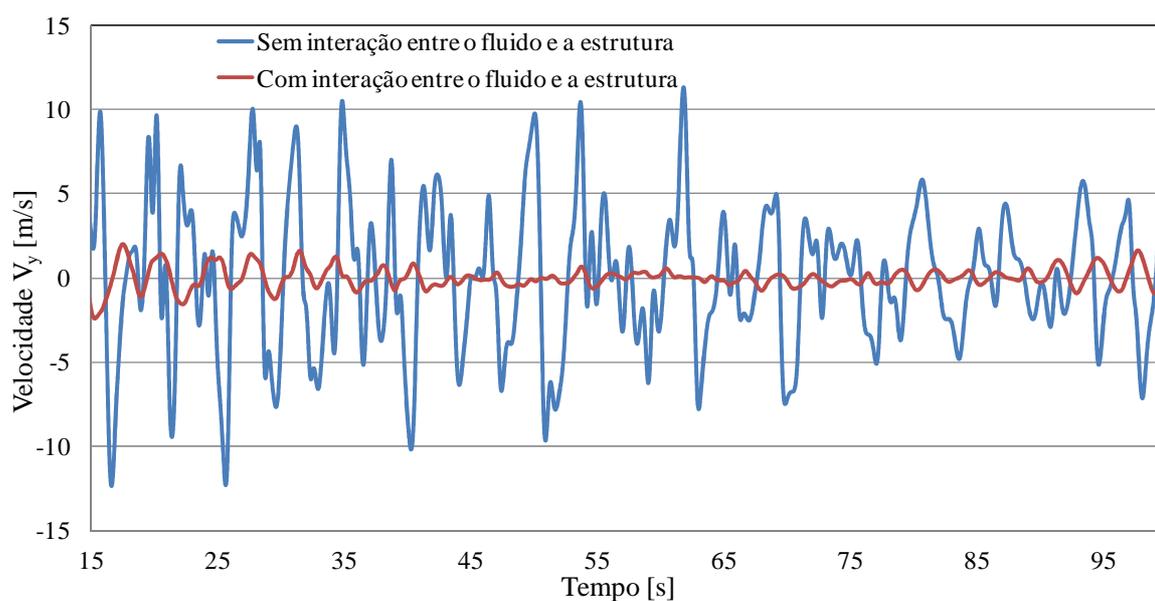


Figura 5.16 – Evolução temporal da velocidade V_y do nó central do cabo [m/s] para a rajada de 32m/s.

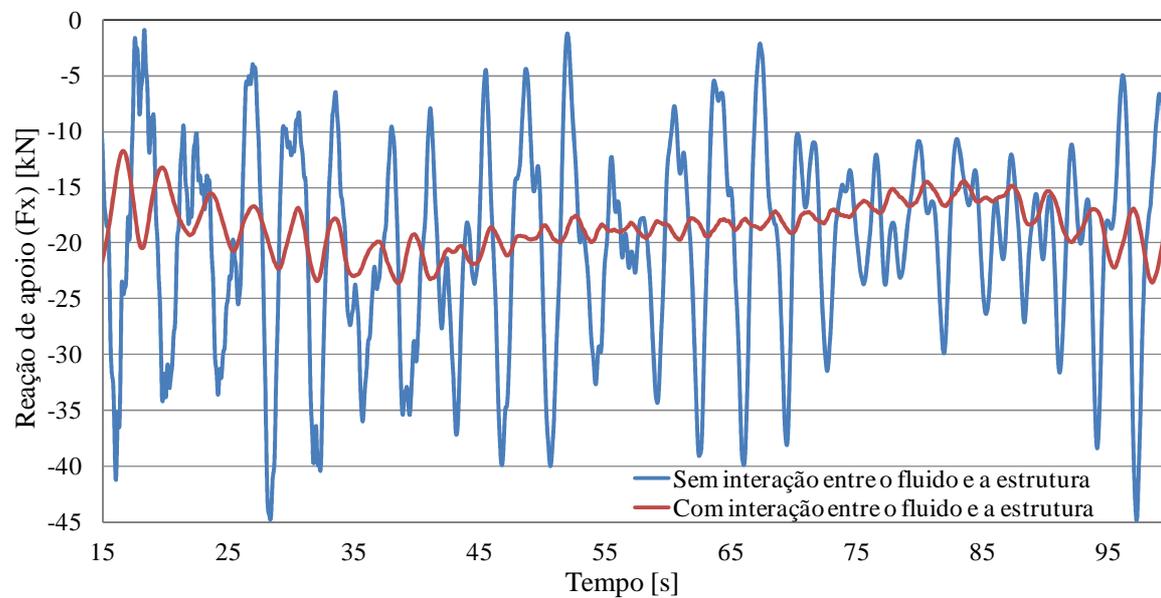


Figura 5.17 – Evolução temporal da reação de apoio F_x [kN] para a rajada de 32m/s.

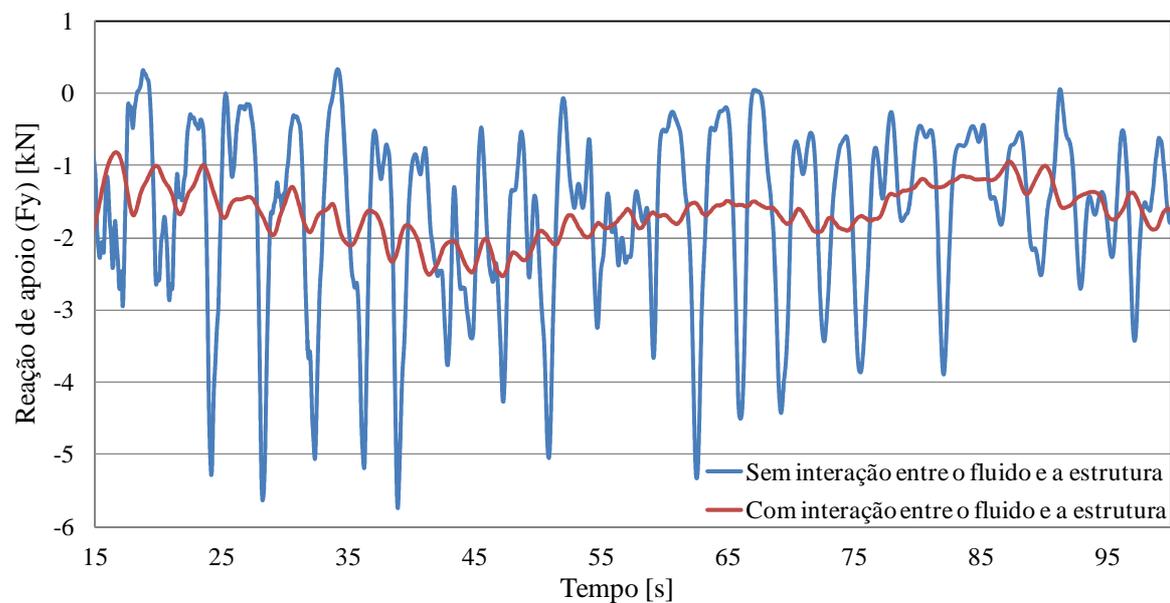


Figura 5.18 – Evolução temporal da reação de apoio F_y [kN] para a rajada de 32m/s.

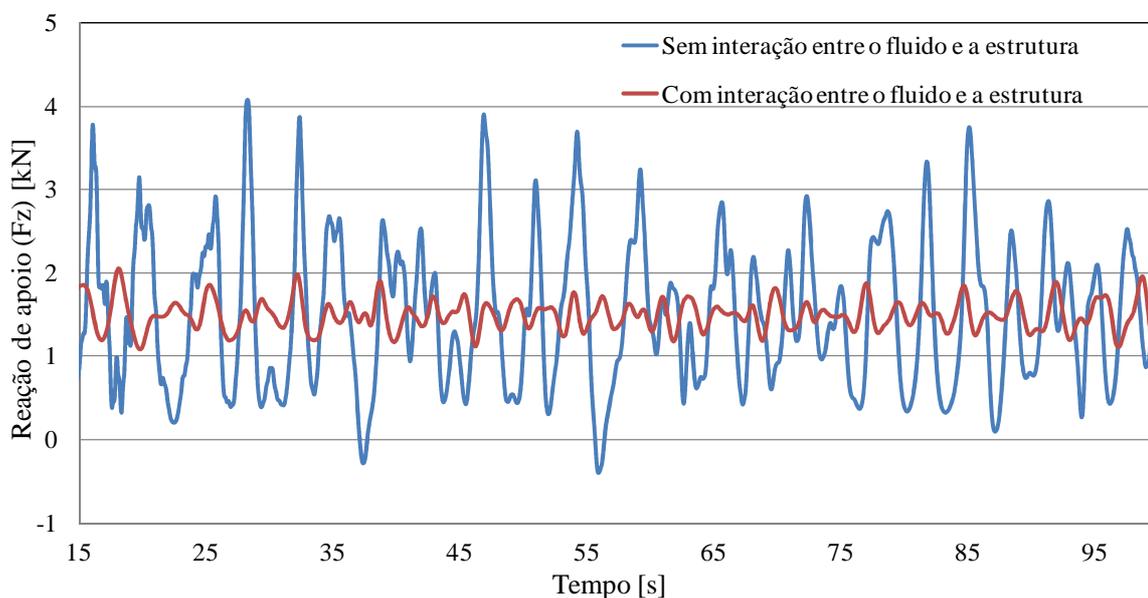


Figura 5.19 – Evolução temporal da reação de apoio vertical (F_z) [kN] para a rajada de 32m/s.

Percebe-se claramente a influência do amortecimento aerodinâmico implícito na formulação proposta. Salienta-se a drástica redução das velocidades assumidas pelo nó central do cabo e das reações de apoio.

A velocidade de rajada de 32 m/s corresponde a uma velocidade média, na altura de 22,8 metros, igual a:

$$\bar{V}_z = \bar{V}_{10}(z/10)^p = (0,69 \times 32 \times 1,0 \times 1,1) \times \left(\frac{22,8}{10}\right)^{0,15} = 27,5 \text{ m/s} \quad (5.31)$$

A parcela flutuante da velocidade, gerada aleatoriamente para esse caso, ficou entre $(14,78 - 27,5 = -12,72 \text{ m/s})$ e $(40,73 - 27,5 = 13,23 \text{ m/s})$. Assim, como a velocidade vertical do vento é considerada nula e a pressão é proporcional ao quadrado da velocidade relativa, a relação entre as pressões flutuantes vertical e horizontal devidas ao vento é da ordem de:

$$\left(\frac{2}{(2 + 13)}\right)^2 = 0,018 = 1,8\% \quad (5.32)$$

Esse resultado justifica a desconsideração das forças verticais devidas ao vento, uma vez que esse procedimento é do lado da segurança e pouco afeta o resultado.

Na Figura 5.20, apresentam-se as velocidades V_y e V_z (vertical) do nó central do cabo, considerando a interação entre o fluido e a estrutura. Observa-se que ambas assumem valores absolutos inferiores a 2 m/s. Novamente, os valores iniciais de velocidade foram desprezados, devido ao período transiente da solução.

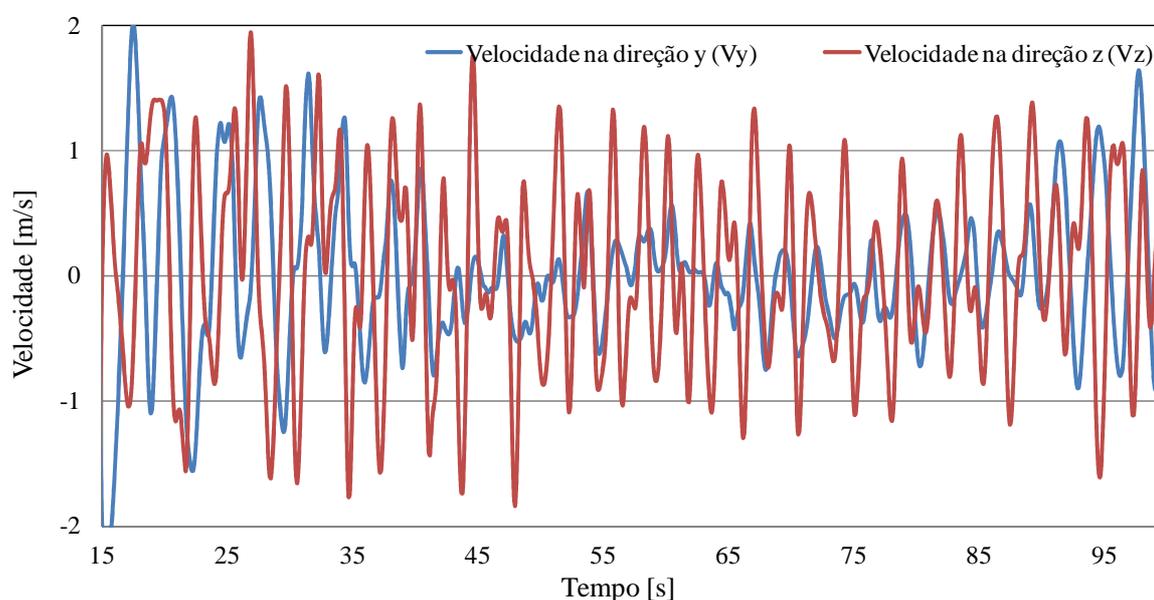


Figura 5.20 – Velocidades V_y e V_z com a consideração entre o fluido e a estrutura para a rajada de 32m/s.

5.7.4 Análise para a velocidade de rajada de 50 m/s

Velocidades médias de vento elevadas resultam em aumento das parcelas flutuantes da velocidade. Dependendo da grandeza dessas flutuações, as forças dinâmicas resultantes podem causar falha estrutural dos cabos ou solicitações muito elevadas da estrutura suporte. Para o caso em estudo, as reações de apoio obtidas para uma análise estática com a velocidade de rajada, mesmo para essa velocidade elevada, não seriam muito diferentes dos valores máximos obtidos para a análise dinâmica, exceto pelas reações verticais, que não são preponderantes no

dimensionamento dessas estruturas. As Figuras 5.21 a 5.25 apresentam os resultados da análise dinâmica, onde se observam os seguintes valores máximos das reações de apoio:

$$|F_x|_{max} = 55,51kN, |F_y|_{max} = 7,82kN \text{ e } |F_z|_{max} = 2,72kN$$

Para a análise estática não linear com a velocidade de rajada, os valores obtidos são:

$$|F_x| = 48,52kN, |F_y| = 7,34kN \text{ e } |F_z| = 1,35kN$$

Entretanto, para a estrutura suporte, geralmente é mais desfavorável aplicar as solicitações dinâmicas provenientes do cabo ao invés dos valores máximos aplicados estaticamente, conforme prática usual de projeto. A aplicação das solicitações dinâmicas deve excitar os diversos modos da estrutura, que poderá responder com amplitudes de deslocamentos maiores e, conseqüentemente, com esforços adicionais não contemplados na análise estática.

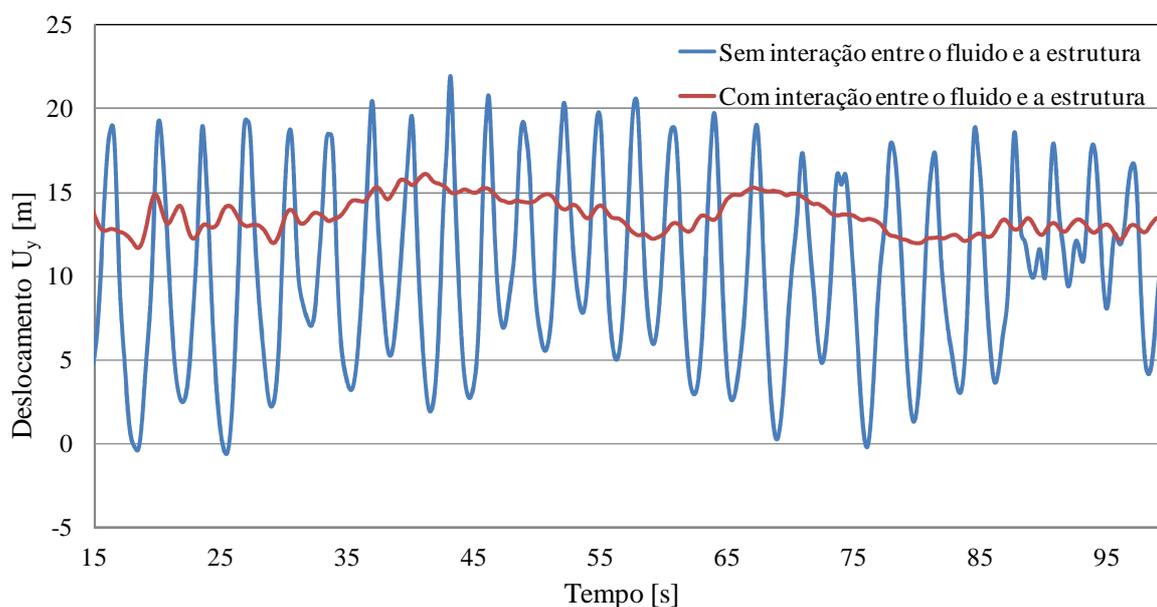


Figura 5.21 – Evolução temporal do deslocamento U_y do nó central do cabo [m] para a rajada de 50m/s.

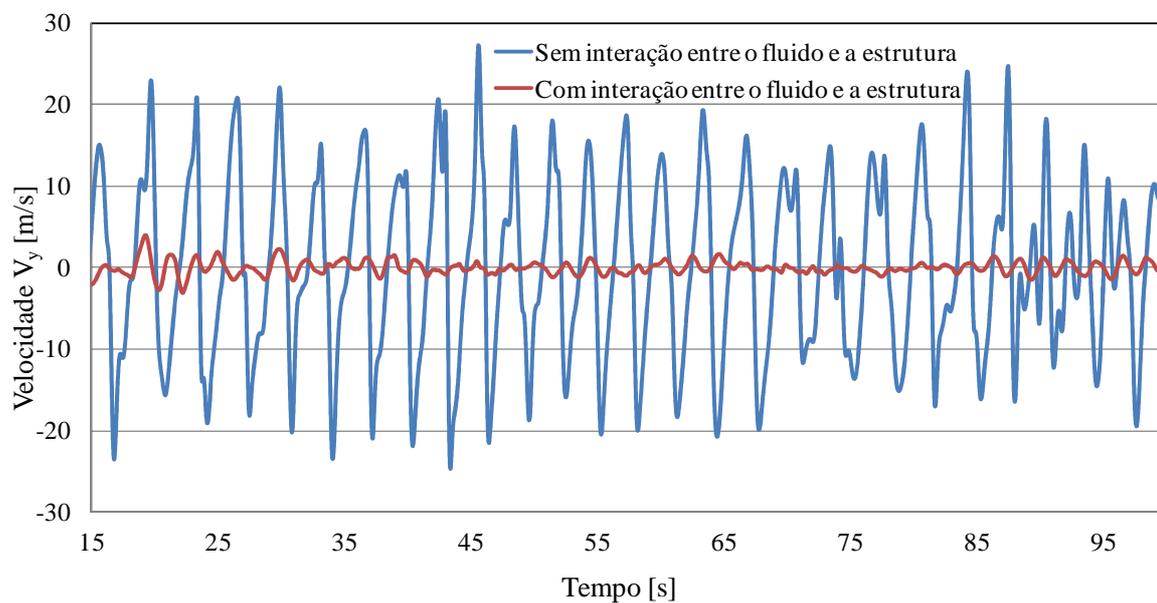


Figura 5.22 – Evolução temporal da velocidade V_y do nó central do cabo [m/s] para a rajada de 50m/s.

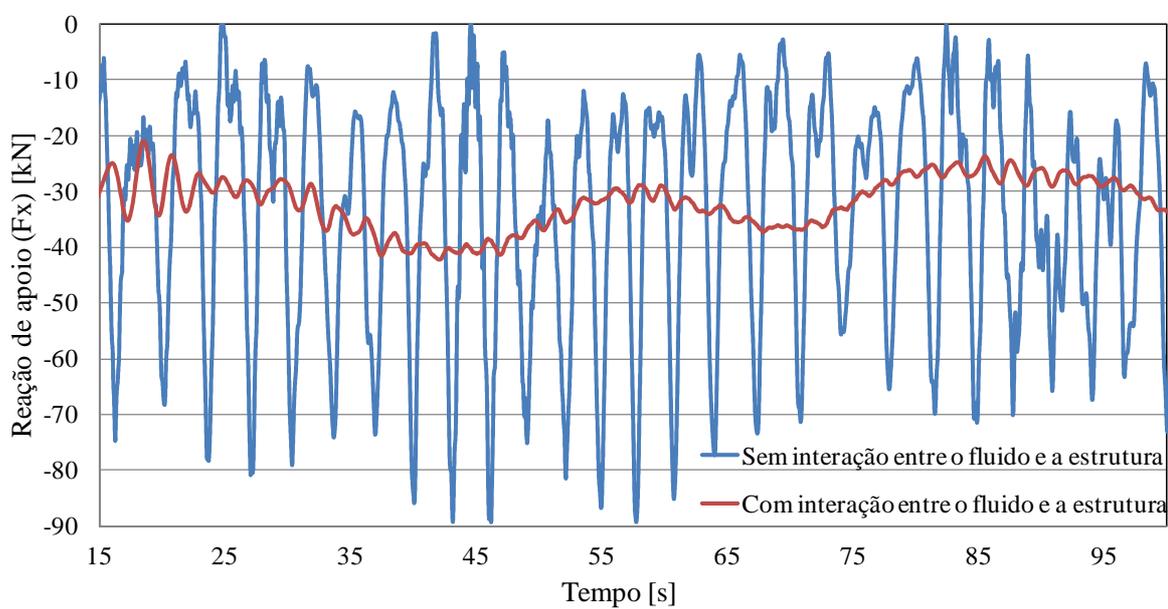


Figura 5.23 – Evolução temporal da reação de apoio F_x [kN] para a rajada de 50m/s.

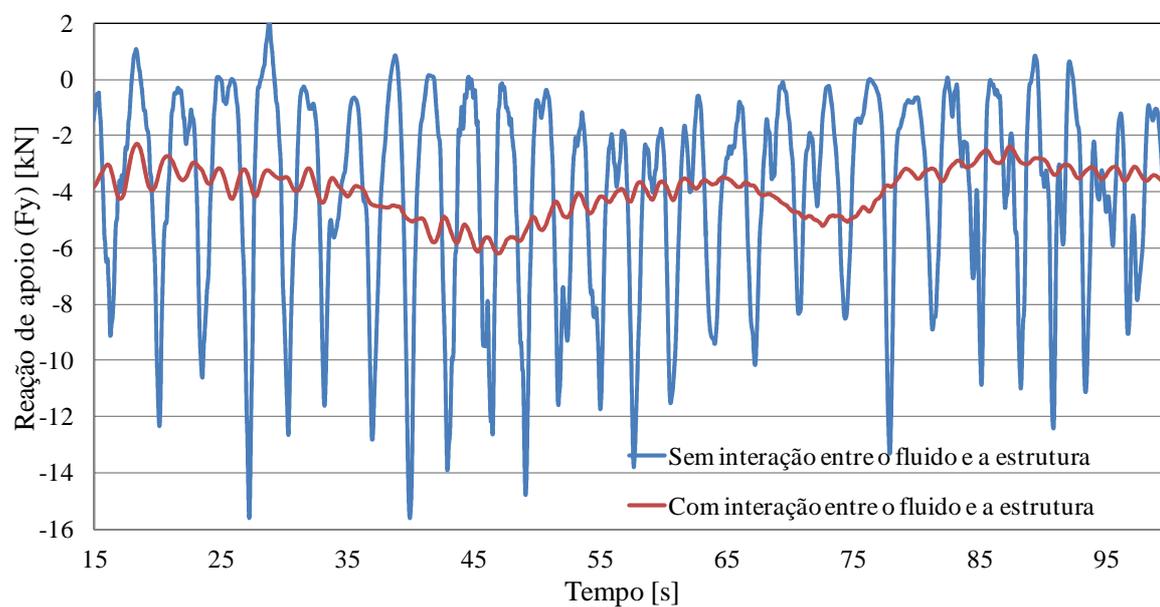


Figura 5.24 – Evolução temporal da reação de apoio F_y [kN] para a rajada de 50m/s.

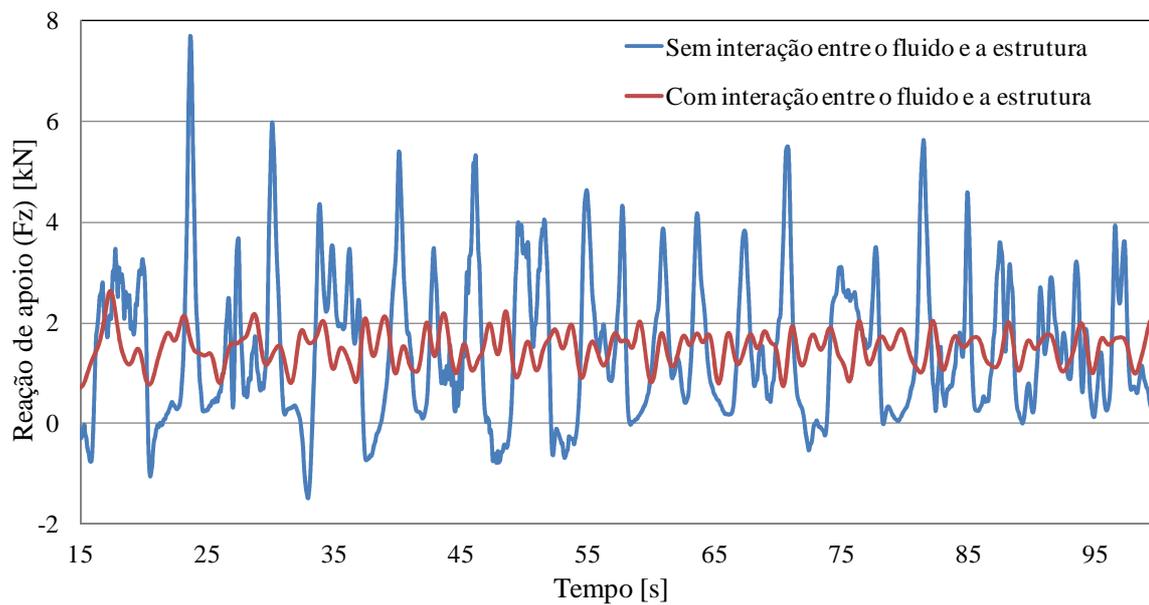


Figura 5.25 – Evolução temporal da reação de apoio vertical (F_z) [kN] para a rajada de 50m/s.

6

COMPARAÇÕES COM OUTROS RESULTADOS – VALIDAÇÃO DO PROCEDIMENTO PROPOSTO

6.1 Comparação com resultados obtidos por Oliveira (2006)

Oliveira (2006) realizou um estudo de caso de um cabo submetido a cargas de vento sem levar em conta a interação entre o fluido e a estrutura. Os parâmetros básicos utilizados por esse autor estão apresentados na Tabela 6.1.

Ele considerou ainda uma taxa de amortecimento uniforme, para cabos e estrutura suporte, igual a 2%. Para a construção das séries temporais do vento, a partir da formulação apresentada para a simulação da turbulência atmosférica, foram utilizadas as seguintes variáveis:

- velocidade com média em 10 minutos, a 10 metros de altura, $\bar{V}_{10} = 37,95m/s$.
- fatores S_1 e S_3 iguais a 1,0 e 1,1, respectivamente.
- altura em relação ao solo: $z = 28,15$ metros.
- comprimento de rugosidade: $z_0 = 0,07$ metros.
- coeficiente exponencial: $p = 0,15$.
- largura da faixa: $\Delta L = 45$ metros.

Tabela 6.1 – Características do vão estudado por Oliveira (2006).

Propriedades	Cabo Condutor – CAA 636MCM-26/7
Diâmetro [mm]	25,6
Material	Alumínio com alma de aço
Módulo de Elasticidade [GPa]	75,9
Carga de Ruptura [kgf]	11067
Peso Linear [kgf/km]	1303
Coefficiente de arrasto C_d	1,1
Vão [m]	450
Componente horizontal de tração estática [kgf]	3194
Flecha vertical [m]	10,58
Comprimento cabo [m]	450,65

No modelo desenvolvido por Oliveira (2006), foram incluídos dois vão adjacentes de cabos, a estrutura suporte e as cadeias de isoladores. Para a simulação da continuidade da linha, nas extremidades opostas à torre suporte, foram introduzidas molas com rigidez definida na direção longitudinal dos cabos.

Visando a comparação com os resultados obtidos por Oliveira (2006), o procedimento proposto neste trabalho foi aplicado a um cabo simples, conforme as características descritas na Tab. 6.1, desprezando a velocidade do cabo (sem interação) e com extremidades fixas. A evolução temporal da tração máxima no cabo obtida com a aplicação do procedimento desenvolvido sem a interação entre o fluido e a estrutura é mostrada na Fig. 6.1.

Observa-se que os resultados obtidos para a tração máxima, média e mínima no condutor devidos à maior rigidez do cabo são superiores aos de Oliveira (2006), conforme se mostra na Tabela 6.2. As diferenças entre os resultados obtidos são consideradas aceitáveis, face às diferenças entre os dois modelos estruturais.

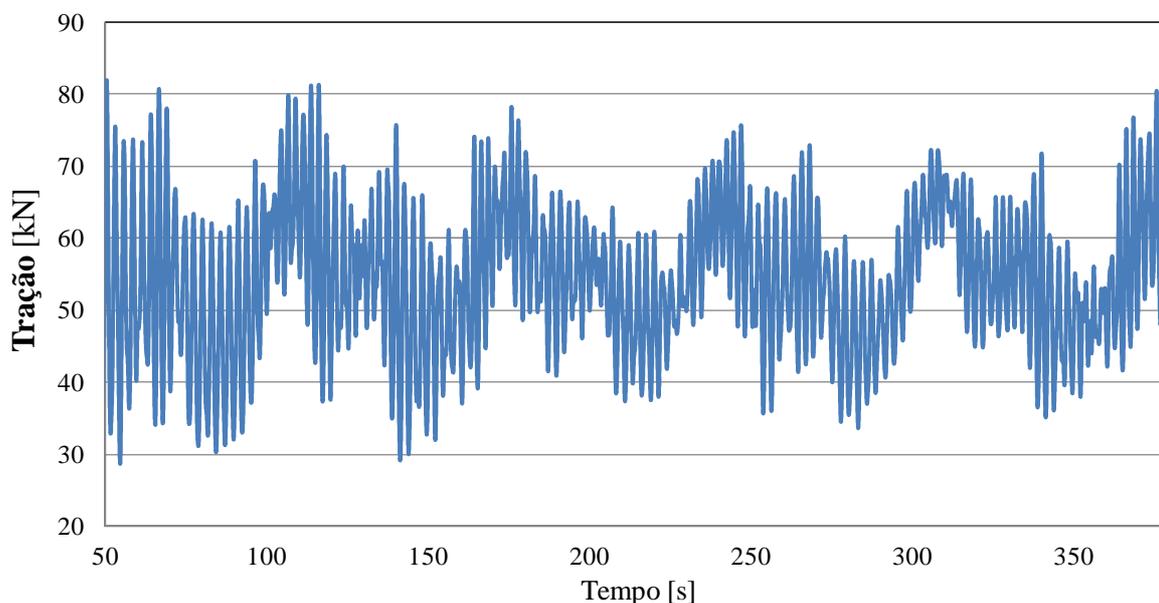


Figura 6.1 – Evolução temporal da tração no cabo sem interação entre fluido e estrutura obtida neste estudo [kN].

Tabela 6.2 – Comparação dos resultados obtidos com os resultados de Oliveira (2006).

Tração no condutor	Valores experimentais obtidos por Oliveira (2006)	Valores obtidos, neste estudo, sem a consideração entre o fluido e a estrutura
Mínima [kN]	23	30
Média [kN]	44	55
Máxima [kN]	80	80

6.2 Comparação com resultados obtidos utilizando o amortecimento aerodinâmico proposto por Davenport (1988)

Os resultados do procedimento proposto para o amortecimento aerodinâmico (consideração da interação entre o fluido e a estrutura através das velocidades relativas entre o vento e o cabo) podem ser comparados com os resultados obtidos por meio de uma simulação onde sejam desprezadas as velocidades do cabo e considerado o amortecimento aerodinâmico proposto por Davenport (1988) e Vickery (1992).

Para essa comparação, foi utilizado o cabo com as características descritas no item 5.7.1, com velocidade de rajada igual a 32 m/s. As figuras abaixo mostram comportamentos muito semelhantes, em todas as respostas, para os dois procedimentos comparados. Novamente os resultados presentes no período inicial transiente foram desprezados.

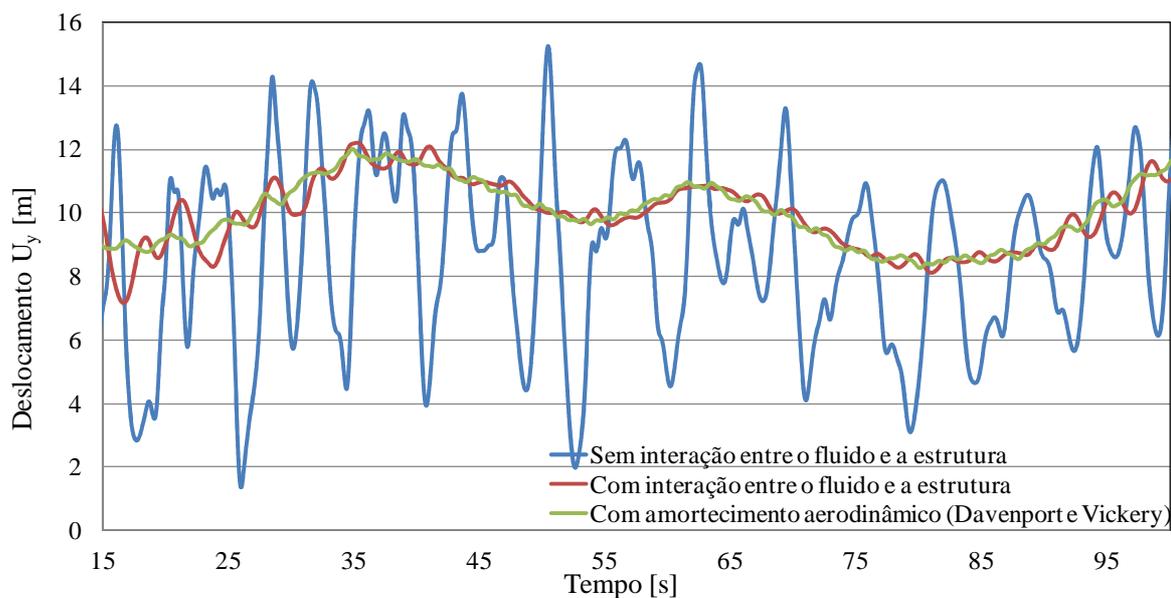


Figura 6.2 – Comparação da evolução temporal do deslocamento U_y do nó central do cabo [m].

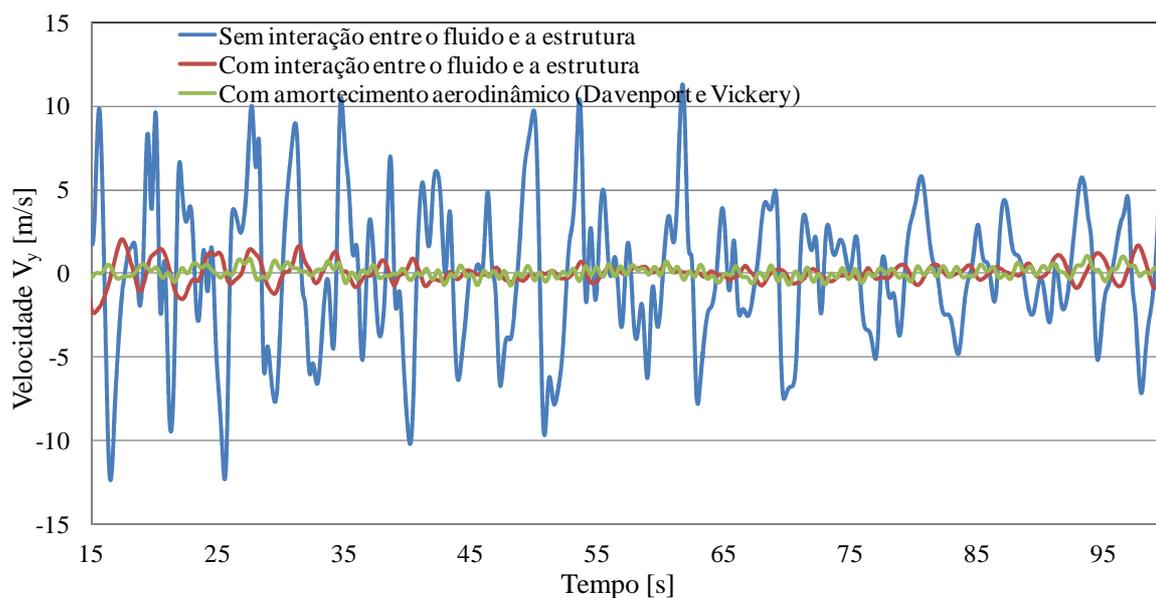


Figura 6.3 – Comparação da evolução temporal da velocidade V_y do nó central do cabo [m/s].

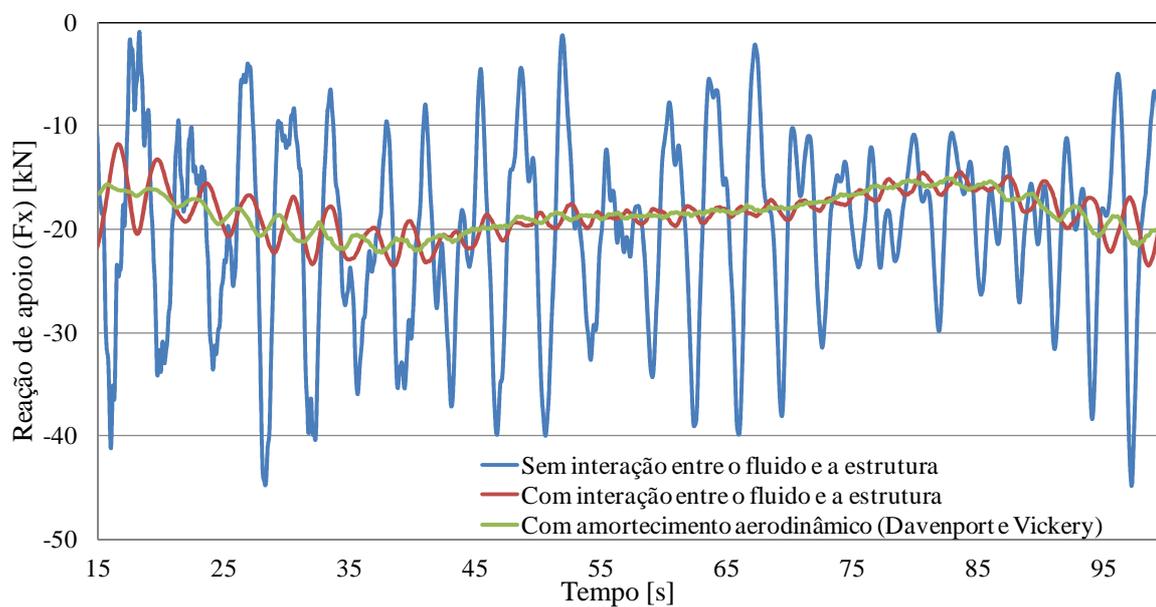


Figura 6.4 – Comparação da evolução temporal da reação de apoio F_x [kN].

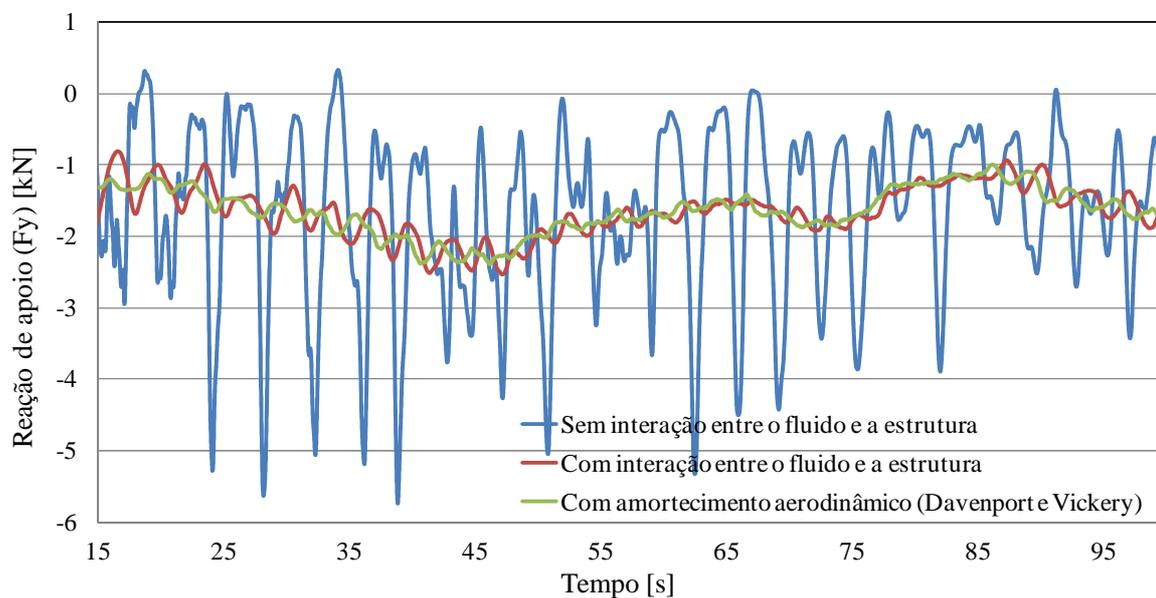


Figura 6.5 – Comparação da evolução temporal da reação de apoio F_y [kN].

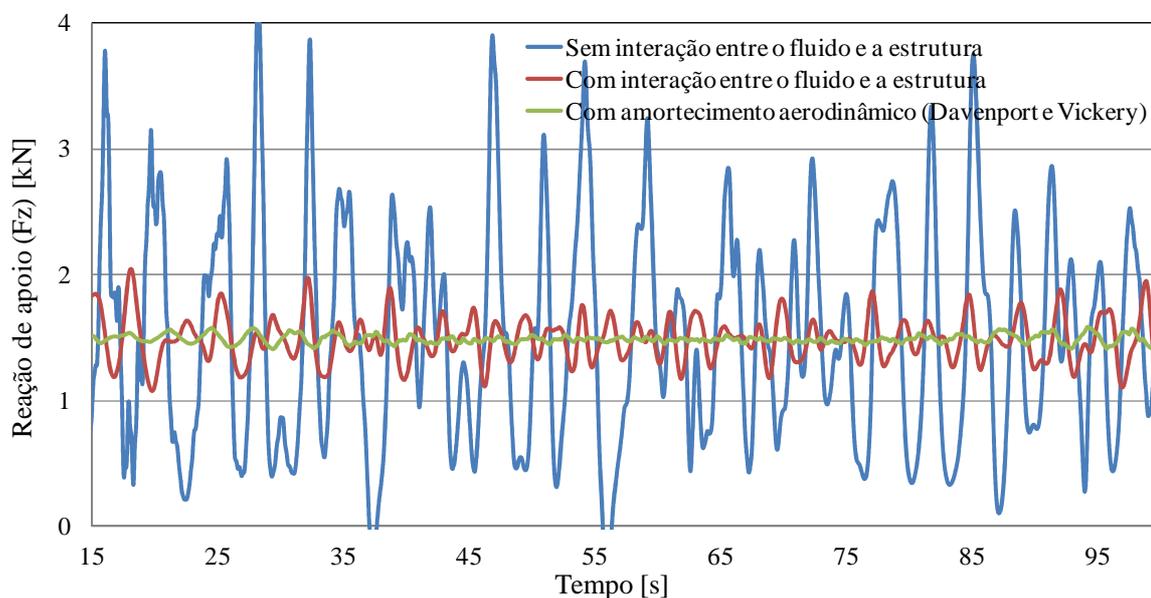


Figura 6.6 – Comparação da evolução temporal da reação de apoio vertical (F_z) [kN].

6.3 Comparação com resultados obtidos por Loredo-Souza (1996)

Loredo-Souza (1996) fez ensaios em túnel de vento de cabos sujeitos a valores elevados de velocidades do vento, considerando duas rugosidades diferentes e dois ângulos diferentes de ataque.

Foi feita a simulação pelo processo proposto para uma das situações ensaiadas, com vento ortogonal ao cabo e interação entre o fluido e a estrutura, considerando as características listadas para o modelo em escala real na Tab. 6.3.

Para a construção das séries temporais do vento, a partir da formulação apresentada para a simulação da turbulência atmosférica, foram utilizadas as seguintes variáveis:

- velocidade média na altura z , $\bar{V}_z = 45\text{m/s}$;
- altura em relação ao solo: $z = 27$ metros;
- comprimento de rugosidade: $z_0 = 0,025$ metros;
- coeficiente exponencial: $p = 0,15$;
- largura da faixa: $\Delta L = 15$ metros.

Tabela 6.3 – Características do modelo em escala real ensaiado por Loredou-Souza (1996).

Propriedades	Cabo considerado
Diâmetro [mm]	30
Material	Alumínio com alma de aço
Módulo de Elasticidade [GPa]	75,9 (estimado)
Peso Linear [kgf/m]	1,0
Coefficiente de arrasto C_d	1,0
Vão [m]	150
Flecha vertical [m]	7,5
Comprimento cabo [m]	151

Para a convergência da simulação, devido às elevadas velocidades do vento e às elevadas velocidades assumidas pelo cabo durante a 2ª etapa da análise dinâmica (item 5.5), as pressões aerodinâmicas referentes à parcela média do vento foram introduzidas em um intervalo de tempo igual a vinte segundos.

Os resultados obtidos para a reação F_y são mostrados na Figura 6.7, na qual os valores máximo e mínimo são 4,3 kN e 1,5 kN, respectivamente. A média desses dois valores é de 2,9 kN. As respostas no período transiente da análise não foram apresentadas e nem consideradas no cálculo dos valores mínimo e máximo. Na Tabela 6.4 são apresentadas as diferenças percentuais entre os resultados obtidos através do modelo proposto e os resultados experimentais. Tais diferenças são consideradas como perfeitamente aceitáveis.

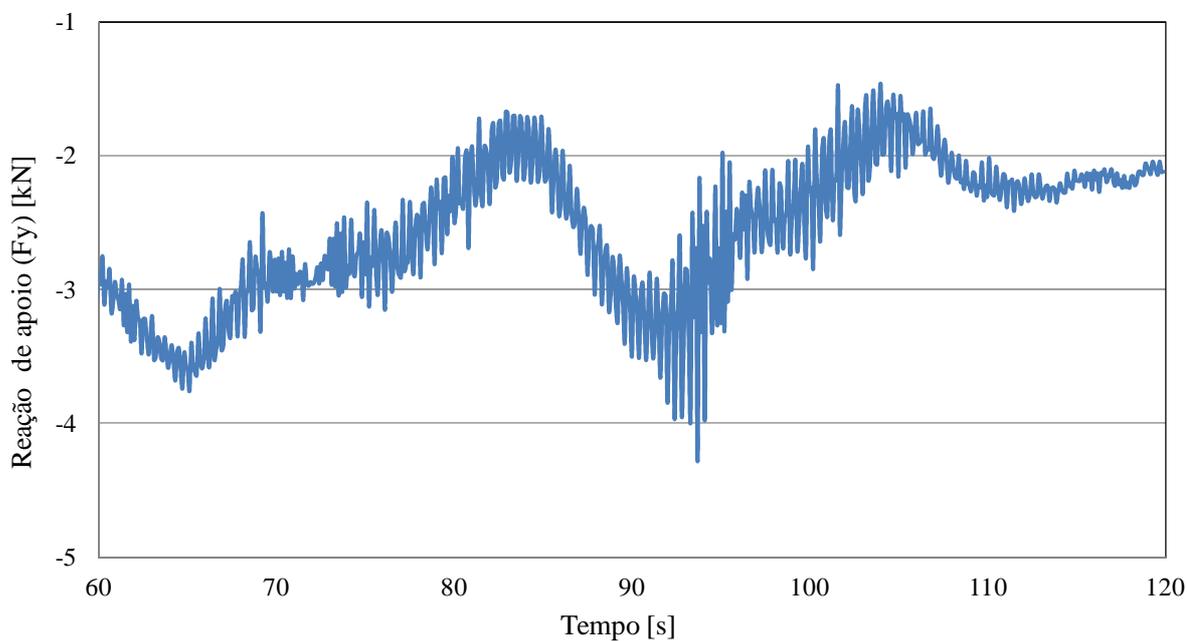


Figura 6.7 – Evolução temporal da reação de apoio F_y [kN].

Tabela 6.4 – Comparação dos resultados obtidos para a reação F_y entre a metodologia proposta neste trabalho e a de Loredo-Souza (1996).

F_y	Valores experimentais obtidos por Loredo-Souza (1996)	Valores obtidos, neste trabalho, com a consideração da interação entre o fluido e a estrutura	Erro [%]
Mínima [kN]	1,7	1,5	11,8
Média [kN]	3,0	2,9	3,3
Máxima [kN]	4,5	4,3	4,4

7

CONCLUSÕES

7.1 Programa experimental desenvolvido para linhas de transmissão

O programa experimental aplicável a linhas de transmissão foi desenvolvido em parceria com o Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG e a CEMIG/ANEEL. Esse programa tem como finalidade a formação de um banco de dados, ao longo do tempo, com informações sobre velocidades do vento e comportamento estrutural do sistema formado pela torre 50 e seus vãos de cabo adjacentes, incluindo as cadeias de isoladores.

Esse programa experimental foi implantado na região de Acuruí/MG, composto por quatro estações de medição. Nessas estações, estão sendo mapeadas as condições climatológicas (temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica absoluta, radiação solar, velocidade e direção do vento) ao longo de uma linha de transmissão. Em uma dessas estações foi escolhida uma estrutura de suspensão (torre 50) na qual, além das condições climatológicas, o movimento da cadeia de isoladores, a temperatura de alguns elementos metálicos da torre e as respectivas respostas estruturais (deformações) devidas às excitações do vento podem ser monitoradas.

O registro das velocidades de vento na torre 50 é feito por um anemômetro ultrassônico 3D instalado na torre a 10 metros de altura em relação ao solo.

O movimento das cadeias de isoladores é captado por um sistema de medição constituído por uma câmera de registro de imagem e um sensor de balanço tridimensional. A inclusão de uma célula de carga que meça a força axial na cadeia de isoladores seria extremamente útil para a determinação das forças que os cabos aplicam na estrutura suporte.

As respostas estruturais da torre são captadas através de sensores de deformação instalados nos principais elementos estruturais da torre, com frequência de 1 Hz. Como o sensor de deformação com princípio de funcionamento elétrico é muito sensível à influência dos campos eletromagnéticos externos, ocasionados pelas elevadas correntes dos cabos elétricos, foram utilizados extensômetros com princípios de funcionamento óptico, com Redes de Bragg, imunes à interferência elétrica.

Todos os sistemas instalados em campo tiveram seu funcionamento verificado em laboratório. Foram utilizados equipamentos auxiliares para a calibração e verificação das respostas de cada equipamento. Além das medições realizadas em laboratório, foram feitas algumas medições isoladas *in loco*, que foram apresentadas no capítulo 4.

Todos os sensores foram devidamente instalados e a conexão via GPRS foi confirmada. O sistema de monitoramento do ângulo de balanço aguarda a parada da linha para a substituição do sensor danificado. Com a substituição, o sistema retornará à operação normalmente. O sistema de monitoramento de deformações e temperatura dos elementos estruturais da torre 50 também se encontra instalado e coletando informações. A única etapa pendente para a finalização do projeto experimental é a sincronização de todos os sistemas presentes na torre 50, que aguarda a substituição do sensor de balanço para sua conclusão. Na atualidade, a estação climatológica e o sistema de monitoramento de deformações operam em separado. Após a sincronização, os três sistemas de monitoramento passarão a operar em conjunto, com a mesma base de tempo.

Dessa forma, mesmo não tendo sido realizadas ainda medições sincronizadas com todos os sistemas em conjunto, o laboratório experimental, inédito no Brasil, encontra-se disponível para o armazenamento contínuo de dados ao longo de qualquer período de tempo. Com o banco de dados, podem-se validar estudos teórico-numéricos sobre linhas de transmissão submetidas a ações do vento.

Considera-se que esse programa experimental foi uma contribuição muito importante deste trabalho de doutoramento para o desenvolvimento do estado da arte na análise estrutural de linhas de transmissão.

7.2 Análise estática não linear do conjunto estrutural completo

Para a análise estática do conjunto estrutural, foram construídos e processados dois modelos computacionais durante o mestrado do autor deste trabalho (CARVALHO, 2010). O primeiro modelo, denominado simplificado, contempla somente a estrutura da torre, conforme as especificações da NBR 5422 (1985). Nesse modelo, foram avaliadas as forças devidas ao vento, conforme dispõem as normas NBR 5422 (1985) e 6123 (1988).

A comparação dos esforços axiais nas barras devidos à incidência de vento no modelo simplificado indicou valores mais elevados para a NBR 6123 (1988). Tal fato justifica-se pelas maiores cargas aplicadas aos perfis metálicos e cabos, provenientes principalmente dos maiores valores de massa específica do ar e coeficiente de arrasto de cabos, da não consideração do coeficiente de efetividade e dos menores tempos de integração de velocidades básicas sugeridos por essa norma para os cabos. O somatório das cargas de vento para a norma ABNT NBR 6123 (1988) apresentou um valor 46% superior às recomendadas pela norma ABNT NBR 5422 (1985). Essa comparação evidencia que, mesmo sendo a norma específica para o dimensionamento de LT's, a NBR 5422 (1985) fica contra a segurança quando comparada com o recomendado pela NBR 6123 (1988). Tais conclusões confirmam as afirmações do trabalho desenvolvido por Blessmann (2001).

Maiores cargas horizontais ocasionaram maiores momentos na base da torre, aumentando as reações verticais. No modelo simplificado, foram encontrados valores de reações verticais de tração 55% maiores para a norma ABNT NBR 6123. Caso ocorram as cargas de vento sugeridas por essa norma, em uma estrutura dimensionada conforme o especificado na norma ABNT NBR 5422, existe a possibilidade de ocorrência de colapso por arrancamento das fundações.

O modelo da torre isolada foi avaliado quanto aos efeitos de 1ª e 2ª ordens. Os resultados obtidos foram semelhantes devido às características de baixa deslocabilidade da torre, evidenciada nos campos de deslocamentos resultantes em ambas as análises. Com baixos níveis de deslocamento, os efeitos de 2ª ordem foram poucos evidenciados.

O segundo modelo avaliado contemplam a estrutura da torre, as cadeias de isoladores e os cabos condutores no sistema estrutural. Nesse modelo, foram avaliados os esforços solicitantes nos

elementos da torre e nos cabos devidos à atuação do peso próprio e das cargas de vento, conforme a NBR 6123 (1988).

As forças normais máximas da torre, calculadas através do modelo completo com atuação apenas do peso próprio, apresentaram-se próximas das obtidas no modelo simplificado, com diferenças da ordem de 3%.

Com a atuação das cargas de vento, as diferenças entre os esforços tornaram-se mais pronunciadas. Com a consideração das não linearidades geométricas, captou-se o surgimento de uma componente horizontal de força, provocada pela desigualdade das componentes horizontais da tração nos cabos. Outro efeito captado foi a movimentação dos centros de gravidade das catenárias, implicando a mudança das reações dos cabos nas estruturas de suporte.

Devido aos efeitos mencionados, não contemplados na análise simplificada sugerida pela NBR 5422 (1985), observa-se a necessidade da revisão dos procedimentos de projeto no que diz respeito à modelagem estrutural, sugerindo-se a substituição do modelo de torre isolada por um modelo que contemple a interação entre os cabos e a estrutura.

A modelagem dos cabos também possibilita a determinação dos deslocamentos laterais dos mesmos submetidos ao vento. Tal cálculo pode ser utilizado na determinação das faixas de segurança da linha durante a fase de projeto. Nas verificações realizadas, os valores de ângulo de balanço encontrados através do modelo numérico foram superiores aos estimados através do procedimento analítico da NBR 5422 (1985), ficando esta, mais uma vez, contra a segurança.

7.3 Análise dinâmica de um cabo isolado

Sendo o sistema estrutural formado por torres, cabos e cadeias de isoladores governado dinamicamente pelo movimento dos cabos, desenvolveu-se um procedimento para a análise de cabos isolados sujeitos à ação do vento. O procedimento proposto não se limita a cabos, e pode ser adaptado para qualquer tipo de estrutura.

O ineditismo dos resultados obtidos através do procedimento proposto em relação a outros estudos relacionados (RODRIGUES, 2004; OLIVEIRA, 2006 e SANTOS, 2008) foi a consideração da interação entre o fluido e a estrutura. Uma vez que os cabos assumem

velocidades consideráveis em relação às velocidades do vento, a não consideração dessa interação é muito conservadora e pode levar a resultados exagerados.

Alguns autores apresentaram trabalhos propondo a modelagem do amortecimento dinâmico. Davenport (1988) sugeriu uma formulação matemática para o amortecimento aerodinâmico de cabos, também avaliado por Loredou-Souza (1996) através de ensaios em túnel de vento. Cappellari (2005) apresentou um estudo numérico para a consideração da interação entre o fluido e a estrutura, também aplicado a cabos. Entretanto, nenhum dos trabalhos mencionados sugere um procedimento geral, aplicável a qualquer estrutura que desenvolva velocidades consideráveis quando excitada pelo vento. Para essa generalização, o programa de análise estrutural tem que abranger sistemas estruturais genéricos.

Propõe-se neste trabalho o cálculo do amortecimento aerodinâmico diretamente na determinação das pressões dinâmicas do vento, por meio da utilização de velocidades relativas entre a estrutura e o vento. Sendo a formulação proposta aplicada ao carregamento, o amortecimento aerodinâmico é considerado implicitamente e o procedimento torna-se genérico, independente das características dinâmicas da estrutura (rigidez, distribuição de massa, modos de vibração, entre outros). Esta é a maior contribuição do presente trabalho.

No procedimento proposto, a solução dinâmica é finalizada a cada passo de tempo e novas pressões aerodinâmicas, considerando as velocidades relativas entre o cabo e o vento, são aplicadas sobre o modelo. Devido à complexidade da solução, algumas dificuldades de convergência foram identificadas e superadas. Basicamente, a limitação de mil arquivos de resultados gerados pelo programa e a introdução da pressão associada à velocidade média do vento nos cabos podem levar a problemas de convergência.

Velocidades médias diferentes de vento foram aplicadas para a verificação da estabilidade e da convergência do procedimento proposto. Para o vão em estudo, adjacente à torre 50, foram avaliadas três velocidades de rajada, 20, 32 e 50 m/s. Em todos os casos, foi identificada uma redução considerável dos deslocamentos e das velocidades do cabo e das reações de apoio quando comparados com as soluções onde a interação entre o fluido e a estrutura é desprezada.

As reações de apoio obtidas para uma análise estática com a velocidade de rajada, mesmo para essa velocidade elevada, não foram muito diferentes dos valores máximos obtidos para a análise dinâmica. Entretanto, para a estrutura suporte, é geralmente mais desfavorável aplicar as solicitações dinâmicas provenientes do cabo do que aplicar os valores máximos estaticamente, conforme prática usual de projeto.

O procedimento ora proposto pode ser utilizado para a simulação de cabos com e sem a interação entre o fluido e a estrutura. Os resultados obtidos através da programação sem a consideração da interação foi validada através da comparação com resultados obtidos por Oliveira (2006). A rotina com a consideração da interação foi validada através de uma simulação considerando o amortecimento aerodinâmico proposto por Davenport (1988) e por resultados de ensaios de cabos em túnel de vento realizados por Loredou-Souza (1996). Todas as comparações apresentaram-se satisfatórias, validando o procedimento.

7.4 Objetivos alcançados

7.4.1 Objetivo principal

Os estudos realizados sugerem que os atuais critérios de projeto devem ser revisados, considerando ou uma análise dinâmica do sistema completo, ou a análise da torre isolada, com as reações dinâmicas obtidas da simulação dos cabos sujeitos à ação do vento, ambas com a consideração da interação entre o fluido e a estrutura. Evidentemente que as conclusões desta tese podem ser complementadas por trabalhos futuros.

7.4.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos listados a seguir foram alcançados:

- a) avaliação da distribuição espacial e temporal do vento;
- b) avaliação do comportamento estático do sistema estrutural composto pela torre e cabos, considerando as não linearidades geométricas (dissertação de mestrado);
- c) avaliação do comportamento dinâmico dos cabos, considerando o amortecimento aerodinâmico;

- d) comparação dos resultados numérico-teóricos obtidos com resultados de outros autores que apresentaram estudos acerca do tema.

Quanto à obtenção experimental do banco de dados, não foi possível iniciá-la devido às dificuldades mencionadas no Capítulo 4. Entretanto, o laboratório experimental está pronto, a menos de ajustes. O tempo necessário para uma coleta de dados, passível de tratamento estatístico, vai exigir um novo trabalho de pesquisa, provavelmente dedicado exclusivamente ao programa experimental.

7.5 Sugestões para trabalhos futuros

Apontam-se os seguintes temas como sugestões para trabalhos futuros, dando continuidade à pesquisa já realizada:

- a) sincronização dos sistemas de medição já instalados em campo;
- b) utilização do laboratório experimental implantado no campo e formação de bancos de dados ao longo de um período de tempo suficiente para propiciar o tratamento estatístico dos dados;
- c) elaboração de estratégias numéricas para eliminar a restrição relativa à quantidade de arquivos de resultados gerados para uma mesma análise;
- d) comparação, validação e consolidação das metodologias teórico-numéricas, com os resultados coletados através do programa experimental;
- e) análise dinâmica completa do sistema estrutural composto de torres, cabos e cadeias de isoladores submetidos a forças de vento, levando em conta o amortecimento aerodinâmico.

8

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJIT, K.M.; SERVA, J.S. *Deformation of Elastic Solids*. Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 1991.

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

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

BJERKAN, L. Application of fiber-optic Bragg grating sensors in monitoring environmental loads of overhead power transmission lines. *Applied Optics*, n.4, v.39, p. 554-560, February, 2000.

BATHE, K. J. *Finite Element Procedures*. New Jersey: Prentice Hall, Englewood, Cliffs, 2006.

BLESSMANN, Joaquim. *Acidentes causados pelo Vento*. 4. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS, 2001.

BLESSMANN, Joaquim. *Aerodinâmica das Construções*. 1. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1983.

BLESSMANN, Joaquim. *Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento*, 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS, 2005.

BLESSMANN, Joaquim. *O Vento na Engenharia Estrutural*. 1. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS, 1995.

CAPPELLARI, T.T.O. *Determinação da resposta dinâmica de feixes de condutores em linhas aéreas de transmissão*. 2005. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CARVALHO, H. *Metodologias para análise estática do efeito do vento em linhas de transmissão*. 2010. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CHISHOLM, W. A. Case Study: 230 kV Transmission Corridor Rating using Mechanical Measurements to establish Long-Axis Hot-Wire Anemometer Wind Speer. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE ENGENHARIA DO VENTO. Belo Horizonte, 2010.

CLARK, M. *et al.* *Measured Dynamic Performance of Electricity Transmission Towers Following Controlled Broken-Wire Events*. Paris: Conseil International des Grands Réseaux Electriques, CIGRÉ, 2006.

CLOUGH, R. W., PENZIEN, J. *Dynamics of Structures*. 2. nd. Ed. McGraw-Hill, Inc., 1975.

COOPER, K.R.; WATTS, J.A. Wind Tunnel and Analytical Investigations into the Aeroelastic Behavior of Bundled Conductors. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, n. 2, v. PAS-94, p. 642-654, may, 1976.

CULSHAW, B.; DAKIN, J. *Optical Fiber Sensors: systems and applications*. *Artech Hous*, v. II, p.799-811, december, 1989.

DAVENPORT, A. G. *Gust Response Factors for Transmission Line Loading*. In: PROCEEDINGS OF THE FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, Colorado State University: Pergamon Press, 1979.

DAVENPORT, A.G. The response of tensions structures to turbulent Wind: the role of aerodynamic damping. In: 1st INTERNATIONAL OLEG KERENSKY MEMORIAL CONFERENCE ON TENSION STRUCTURES, London, june, 1988.

EL-GHAZALY, H.A.; AL-KHAIAT, H.A. Análisis and Design of Guyed Transmisión Towers – Case Study in Kuwait. *Computers & Structures*, n. 3, v. 55, p. 413-431, april, 1995.

HARTOG, J., P., D. *Mechanical Vibrations*. 3. th. Ed. McGraw-Hill, Inc., 1985.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION - IEC. IEC 60826: *Design Criteria of Overhead Transmission Lines*, Technical Comitee n.11, Ed. 3, 2003.

IRVINE, T. Acoustics, Shock, Vibration e Signal Processing: *Vibrationdata. Newsletter*, 2006.

JAMES, M.L. *et al.* *Vibration of mechanical and structural systems*. New York: Harper and Row, 1989.

KATOH, T. *et al.* Full-Scale Measurements of Wind-Induced Vibration of Transmission Line System in Mountaineous Areas. In: PROCEEDINGS OF THE NINTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGENEERING. New Delhi, Índia, january 9-13, 1995. v. I, pp.433-444.

KEMPNER, L.; LAURSEN, H.I. Measured Dynamic Response of a Latticed Transmission Line Tower and Conductors to Wind Loading. In: PRE-PRINTS OF THE FOURTH U.S. NATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGINEERING. Seattle, Washington, july 27-29, 1981. p.348-355.

KLEIN, T. *Estudo em túnel de vento das características aerodinâmicas de torres metálicas treliçadas*. 2004. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

KRISHNASAMY, S. Wind and Ice Loading on Overhead Transmission Lines. In: PRE-PRINTS OF THE FOURTH U.S. NATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGINEERING. Seattle, Washington, July 27-29, 1981. p.356-364.

LABEGALINI, P.R. *et al. Projetos Mecânicos das Linhas de Transmissão*. 2. ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1992.

LEE, P.S.; MCCLURE, G. Elastoplastic Large Deformation Analysis of a Lattice Steel Tower Structure and Comparison with Full-Scale Tests. *Journal of Construction Steel Research*, v. 63, p. 709-717, June, 2007.

LÉGERON, F.; GANI, F. Dynamic wind effects on transmission line structures. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SEMINAR ON MODELING AND IDENTIFICATION OF STRUCTURES SUBJECTED TO DYNAMIC EXCITATION. Bento Gonçalves: Editora UPF, 2009. p. 357-378.

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

MENIN, R.C.G. Análise estática e dinâmica de torres metálicas estaiadas. 2002. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Brasília, Brasília.

MOLINA, R. *et al.* Cálculo e medição do ângulo de balanço de cadeias de isoladores de linhas de transmissão. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, n. 1, v.18, p.145-159, Mayo, 2014.

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

NAGAO, F. *et al.* Basic study on spatial correlations of fluctuating lifts acting on plates. *Journal of Wing Engineering*, v. 91, p. 1349-1361, 2003.

NASCIMENTO, C.A.M. *et al.* Estudo do balanço de cadeias de isoladores de linhas aéreas – parte 1: Metodologia experimental para monitoramento em tempo real. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE ENGENHARIA DO VENTO. Belo Horizonte, 2010.

OGAWA, Y. *et al.* A multiplexing load monitoring system of power transmission lines using fiber Bragg grating. *Optical Fiber Sensors*, v.16, p.468-471, April, 1997.

OLIVEIRA, M.I.R. *Análise estrutural de torres de transmissão de energia submetidas aos efeitos dinâmicos induzidos pelo vento*. 2006. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

OLIVEIRA, M.I.R. *et al.* Structural Analysis of Guyed Steel Telecommunication Towers for Radio Antennas. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Rio de Janeiro, n. 2, v. 29, p. 185-195, april-june, 2007.

PFEIL, M. S. *Comportamento aeroelástico de pontes estaiadas*. 1993. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

RIPPEL, L.I. *Estudo em túnel de vento para arrasto aerodinâmico sobre torres treliçadas de linhas de transmissão*. 2005. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RODRIGUES, R.S. *et al.* Colapso de Torres TEE sob Ação do Vento – Proposta para revisão de normas e procedimentos de projeto. In; SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, XVII SNPTEE. Uberlândia, 2003.

RODRIGUES, R.S. *Mecânica do colapso aeroelástico do torres TEE*. 2004. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SACHS, P. *Wind forces in engineering*. 2. ed. New York: Pergamon Press, 1978.

SANTOS, A.S. *Estudo de vibrações eólicas em linhas de transmissão de energia elétrica de alta tensão*. 2008. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém.

SILVA, J.B.G.F.; CARVALHO, M.M. Algumas considerações sobre a problemática dos efeitos dinâmicos nas estruturas de linhas de transmissão. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SEMINAR ON MODELING AND IDENTIFICATION OF STRUCTURES SUBJECTED TO DYNAMIC EXCITATION. Bento Gonçalves: editora UPF, 2009. p. 37-66.

SIMIU, E.; SCANLAN, R.H. *Wind Effects on Structures: Na Introduction to Wind Engineering*, 2. ed. New York: John Wiley and Sons, 1986.

SNEGOVSKI, D. Health Monitoring of Overhead Power Transmission Line: User Needs. In: SAMCO WORKSHOP 5th. Vienna, Austria, 2004.

VERMA, H. *The Stickridge Damper as a Continuous Hysteretic System in Single Overhead Transmission Lines*. 2002. Master in Structural Engineering - Department of civil Engineering, Indian Institute Technology, Bombay, Mumbai, Índia.

VICKERY, B.J. *Advanced structural dynamics I*. (Engineering Science 610) Course notes. The University of Western Ontario, Canadá, 1992.

WABHA, Y.M.F. *et al.* Effect of Icing on Free Vibration of Guyed Antenna Towers. *Atmospheric Research*, v. 46, p. 27-35, december, 1998.

9

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

ANSYS-11.0. *Release 1.0 Documentation for Ansys*. Canonsburg, United States, 2007.

BATTISTA, R.C.; PFEIL, M.S. Double controller of wind induced oscillations in telecom towers. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SEMINAR ON MODELING AND IDENTIFICATION OF STRUCTURES SUBJECTED TO DYNAMIC EXCITATION. Bento Gonçalves: Editora UPF, 2009. p. 67-81.

DOWELL, E.H. *et al.* *A modern course in aeroelasticity*. 3.ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1995.

EIFFEL, G. *Résistance de l'air et l'aviation: Expériences effectuées au laboratoire Du Champ-de-Mars*. Paris: Dunoid, 1911.

ELETRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. *Transmission Line Reference Book: Wind-Induced Conductor Motion*. Tennessee: Inc Tullahoma, 1979.

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

GOULD, R.W.F.; RAYMER, W.G. *Measurements over a wide range of Reynolds numbers of the wind forces on models of lattice frameworks with tubular members*. S.L., National Physical Laboratory, 1972.

HENRY, L. *Wind Engineering*. New Jersey: Prentice Hall, 1991.

HODGES, D.H.; PIERCE, G.A. *Introduction to structural dynamics and aeroelasticity*. 2.ed., 2014. (Cambridge Aerospace Series).

JONES, K., F. Coupled vertical and horizontal galloping. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 118 (1), 1992.

KAMINSKI, J.Jr. *et al.* Resposta dinâmica de uma torre metálica treliçada de travessia considerando a flexibilidade das fundações. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, XXI SNPTEE. Florianópolis, 2011.

LOREDO-SOUZA, A.M.; DAVENPORT, A.G. A novel approach for wind tunnel modeling of transmission lines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. v. 89, p. 1017-1029, 2001.

LOREDO-SOUZA, A.M.; DAVENPORT, A.G. The effects of high winds on transmission lines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 74-76, p. 987-994, 1998.

LOREDO-SOUZA, A.M.; DAVENPORT, A.G. The influence of the design methodology in the response of transmission towers to wind loading. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. v. 91, p. 995-1005, 2003.

LOREDO-SOUZA, A.M.; DAVENPORT, A.G. Wind tunnel aeroelastic studies on the behavior of two parallel cables. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. v. 90, p. 407-414, 2002.

MENEZES, R.C.R. *et al.* Resposta dinâmica de feixes de cabos submetidos à excitação do vento. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, XVIII SNPTEE. Curitiba, 2005.

NEXANS. *Catálogo de Produtos*: Alumínio, condutores nus, 2003.

SHAMES, Irning H. *Mecânica dos fluidos*. Editora Edgard Blucher, v. 2, 1978.

SILVA, A.O.S. *et al.* Coeficientes de arrasto aerodinâmico em estruturas treliçadas de linhas de transmissão. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, XVIII SNPTEE. Curitiba, 2005.

SIMPSON, A. Wake induced flutter of circular cylinders: Mechanical aspects. *The Aeronautical Quarterly*, p.101-108, may 1971.

SIMPSON, A., LAWSON, T., V. Oscillations of twin power transmission lines. Proceedings of the Symposium on Wind Effects, Loughborough University, april, 1968.

10

APÊNDICE

10.1 Rotina para o cálculo do cabo submetido ao peso próprio

```
/CONFIG,NRES,5000
```

```
FINISH
```

```
/CLEAR,NOSTART
```

```
*DEL,ALL
```

```
/PREP7
```

```
ALLSEL,ALL
```

```
LSCLEAR,ALL
```

```
!* DEFINIÇÃO DOS TIPOS DE ELEMENTOS *
```

```
ET, 101, LINK10
```

```
!* PARÂMETROS GERAIS
```

```
*
```

```
F = 7.5
```

```
! FLECHA NO CENTRO DO VÃO [M]
```

```
L = 150.00
```

```
! COMPRIMENTO DO VÃO [M]
```

```
NDIV_X = 10
```

```
! N° DE SEGMENTOS (PAR)
```

```
N_NO = NDIV_X-1
```

```
! N° DE NÓS
```

```
N_ELEM = NDIV_X/2
```

```
! N° DE ELEMENTOS
```

```
DELT_X = L/NDIV_X
```

```
A = 4*F/L**2
```

```
B = -A*L
```

```
*DIM, POS_X, ARRAY, 10000
```

```
*DIM, POS_Z, ARRAY, 10000
```

```

*DO, I, 1, NDIV_X - 1, 1
      X = DELT_X*I
      POS_X(I) = I*DELT_X
      POS_Z(I) = A*X**2 + B*X
*ENDDO

!* DEFINIÇÃO DO MATERIAL *
AREA = 706.8E-6           ! ÁREA MÉDIA DA SEÇÃO DO CONDUTOR
E_EQUIV = 82150E6        ! MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONDUTOR
MP, NUXY, 101, 0.3
MP, EX, 101, E_EQUIV

!* CRIAÇÃO DOS ELEMENTOS *
R,2,AREA,0.00000257,
TYPE, 101
SECNUM, 1
MAT, 101
REAL,2

NO_MAX = 100000
NO_INI = 1+10000
N,10001,0,0,0
N,10002,L,0,0
NUMSTR, NODE, NO_MAX

*DO, I, 1, NDIV_X - 1, 1
      N, , POS_X(I), 0, POS_Z(I)
*ENDDO

E, 10001, 100000
E, 10002, 100008
*DO, I, 1, 8, 1
      E, 99999+I, 100000+I
*ENDDO

```

!* APLICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO E GRAVIDADE *

D,10001,ALL

D,10002,ALL

D,10002, ,0.0145, , , ,UX, , , , ,

ACEL,0,0,0,

F,ALL,FZ,-148.13

!* PARAMETROS DA SOLUCAO*

/SOL

ANTYPE,4

TRNOPT,FULL

LUMPM,0

NLGEOM,1

OUTRES,ERASE

OUTRES,ALL,ALL

!PSTRES,1

TIMINT,OFF ! TIME INTEGRATION EFFECTS OFF FOR STATIC SOLUTION

TIMEST=1

TIME,TIMEST

NSUBST,30,100,20 ! DEFAULT, MAX E MIN

KBC,0

SOLVE

10.2 Rotina para o cálculo dos modos e frequências naturais de cabos

/CONFIG,NRES,5000

FINISH

/CLEAR,NOSTART

*DEL,ALL

/PREP7

ALLSEL,ALL

LSCLEAR,ALL

!* DEFINIÇÃO DOS TIPOS DE ELEMENTOS *

ET, 101, BEAM189

ET, 102, MASS21

KEYOPT,102,1,0

KEYOPT,102,2,0

KEYOPT,102,3,0

R,1,27.5613,27.5613,27.5613, , , ,

!* PARÂMETROS GERAIS *

F = 9.59 ! FLECHA NO CENTRO DO VÃO [M]

L = 400.00 ! COMPRIMENTO DO VÃO [M]

NDIV_X = 10 ! Nº DE SEGMENTOS (PAR)

N_NO = NDIV_X-1 ! Nº DE NÓS

N_ELEM = NDIV_X/2 ! Nº DE ELEMENTOS

DELT_X = L/NDIV_X

A = 4*F/L**2

B = -A*L

*DIM, POS_X, ARRAY, 10000

*DIM, POS_Z, ARRAY, 10000

*DO, I, 1, NDIV_X - 1, 1

X = DELT_X*I

POS_X(I) = I*DELT_X

POS_Z(I) = A*X**2 + B*X

*ENDDO

!* DEFINIÇÃO DO MATERIAL *

AREA = 198E-6 ! ÁREA MÉDIA DA SEÇÃO DO CONDUTOR

A_ACO = 27.68E-6 ! ÁREA MÉDIA DOS FIOS DE AÇO

A_ALU = 170.32E-6 ! ÁREA MÉDIA DOS FIOS DE ALUMÍNIO

E_EQUIV = 82150E6 ! MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONDUTOR

MASS_LIN = 0.688 ! MASSA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO

MP, NUXY, 101, 0.3

MP, EX, 101, E_EQUIV

!* DEFINIÇÃO DA SEÇÃO E CONSTANTE REAL *

PI = ACOS(-1)

D_EQUIV = SQRT(AREA*4/PI)

SECTYPE, 101, BEAM, CSOLID, COND, 0

SECOFFSET, CENT

SECDATA,D_EQUIV/2,0,0,0,0,0,0,0,0

!* CRIAÇÃO DOS ELEMENTOS *

TYPE, 101

SECNUM, 101

MAT, 101

NO_MAX = 100000

NO_INI = 1+10000

NL = 501+20000

N, NL, L/2, 0, 500

N,10001,0,0,0

N,10002,L,0,0

NUMSTR, NODE, NO_MAX

*DO, I, 1, NDIV_X - 1, 1

N, , POS_X(I), 0, POS_Z(I)

*ENDDO

*DO, I, 1, NDIV_X - 4, 2

E, NO_MAX + I, NO_MAX + I + 2, NO_MAX + I + 1, NL

*ENDDO

E, 10001, NO_MAX + 1, NO_MAX, NL

E, NDIV_X + NO_MAX - 3, 10002, NDIV_X + NO_MAX - 2, NL

TYPE, 102

MAT, 101

REAL, 1

```
ESYS, 0
SECNUM, 101
TSHAP, LINE
E, 100000
E, 100001
E, 100002
E, 100003
E, 100004
E, 100005
E, 100006
E, 100007
E, 100008
```

```
!* APLICACAO DAS CONDICAOES DE CONTORNO E GRAVIDADE *
```

```
D, 10001, ALL
D, 10002, ALL
D, 10002, , 0.0145, , , , UX, , , , ,
F, ALL, FZ, -270.37
```

```
!* CALCULO DAS FREQUENCIAS NATURAIS *
```

```
FINISH
/SOL
ANTYPE, 0
PSTRES, 1
SOLVE
FINISH
ANTYPE, 2
MODOPT, LANB, 10
EQSLV, SPAR
MXPAND, 0, , , 0
LUMPM, 0
PSTRES, 1
MODOPT, LANB, 10, 0.01, 10, , ON
SOLVE
FINISH
```

10.3 Rotina para a análise dinâmica do cabo

```

/CONFIG,NRES,5000
FINISH
/CLEAR,NOSTART
*DEL,ALL
/PREP7
ALLSEL,ALL
LSCLEAR,ALL

!* DEFINIÇÃO DOS TIPOS DE ELEMENTOS *
ET, 101, LINK10
ET, 102, MASS21
KEYOPT,102,1,0
KEYOPT,102,2,0
KEYOPT,102,3,0
R,1,27.5613,27.5613,27.5613, , , ,

!*****
!* PARÂMETROS GERAIS *
!*****

F = 9.59 ! FLECHA NO CENTRO DO VÃO [M]
L = 400.00 ! COMPRIMENTO DO VÃO [M]
NDIV_X = 10 ! N° DE SEGMENTOS (PAR)
N_NO = NDIV_X-1 ! N° DE NÓS
N_ELEM = NDIV_X/2 ! N° DE ELEMENTOS
DELT_X = L/NDIV_X
A = 4*F/L**2 ! COEFICIENTE A DA PARÁBOLA
B = -A*L ! COEFICIENTE B DA PARÁBOLA
*DIM, POS_X, ARRAY, 10000
*DIM, POS_Z, ARRAY, 10000

```

```

*DO, I, 1, NDIV_X - 1, 1
      X = DELT_X*I
      POS_X(I) = I*DELT_X
      POS_Z(I) = A*X**2 + B*X
*ENDDO

!* DEFINIÇÃO DO MATERIAL *

AREA = 198E-6           ! ÁREA MÉDIA DA SEÇÃO DO CONDUTOR
E_EQUIV = 82150E6       ! MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONDUTOR
MASS_LIN = 0.688       ! MASSA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO
MP, NUXY, 101, 0.3
MP, EX, 101, E_EQUIV

!* CRIAÇÃO DOS ELEMENTOS *
R,2,AREA,0.00000257,
TYPE, 101
SECNUM, 1
MAT, 101
REAL,2
NO_MAX = 100000
NO_INI = 1+100000
N,10001,0,0,0
N,10002,L,0,0
NUMSTR, NODE, NO_MAX

*DO, I, 1, NDIV_X - 1, 1
      N, , POS_X(I), 0, POS_Z(I)
*ENDDO

E, 10001, 100000
E, 10002, 100008
*DO, I, 1, 8, 1
      E, 99999+I, 100000+I
*ENDDO

```

```
TYPE, 102
MAT, 101
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM, 101
TSHAP,LINE
E, 10000
E, 10001
E, 10002
E, 10003
E, 10004
E, 10005
E, 10006
E, 10007
E, 10008
```

```
!* APLICACAO DAS CONDICAOES DE CONTORNO E PESO PROPRIO *
```

```
D,10001,ALL
D,10002,ALL
D,10002, ,0.0145, , , ,UX, , , ,
F,ALL,FZ,-270.37
```

```
!* LEITURA DO ARQUIVO DE ESPECTO DE VELOCIDADES *
```

```
/INPUT,'KAIMAL_TFIX_VINTERPOLADA','TXT', , , 0 ! REFERENCIANDO O CALCULO DAS
VELOCIDADES DE VENTO
PARRES,CHANGE,'PAR','PAR',''
```

```
!* DEFINICAO DA SOLUCAO TRANSIENTE *
```

```
/SOL
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
NLGEOM,1
```

```

OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
!PSTRES,1
TIMINT,OFF    ! TIME INTEGRATION EFFECTS OFF FOR STATIC SOLUTION
TIME,1
NSUBST,30,100,20 ! DEFAULT, MAX E MIN
KBC,0        ! STEPPED LOADS
LSWRITE      ! WRITE LOAD DATA TO LOAD STEP FILE (JOBNAME.S01)
TIMINT,ON    ! TIME-INTEGRATION EFFECTS ON FOR TRANSIENT SOLUTION

J=1

      TIME,2
      NSUBST,30,100,20 ! DEFAULT, MAX E MIN
      F,100000,FY,FUNCGERAL(J,1)
      F,100001,FY,FUNCGERAL(J,2)
      F,100002,FY,FUNCGERAL(J,3)
      F,100003,FY,FUNCGERAL(J,4)
      F,100004,FY,FUNCGERAL(J,5)
      F,100005,FY,FUNCGERAL(J,6)
      F,100006,FY,FUNCGERAL(J,7)
      F,100007,FY,FUNCGERAL(J,8)
      F,100008,FY,FUNCGERAL(J,9)
      LSWRITE

!ALPHAD,0.04425
!BETAD,0.000625

RESCONTROL,DEFINE,LAST,1
LSSOLVE,1,2,1,
FINISH
T_INTERPOLACAO=0.1
*DIM,VCABO, ARRAY, TIME_POS-((N_NO-1)*TAU/T_INTERPOLACAO)+1,N_NO+1
*DIM,VRELATIVA, ARRAY, TIME_POS-((N_NO-1)*TAU/T_INTERPOLACAO) +1,N_NO+1
*DIM,FVENTO, ARRAY, TIME_POS-((N_NO-1)*TAU/T_INTERPOLACAO)+1,N_NO+1
*DO, J, 2,(TF_DIN-2)/T_INTERPOLACAO, 1

```

```

/POST26
  *DO,I,1,N_NO,1
    NSEL,S,,99999+I
    *GET,VY,NODE,99999+I,V,Y,,
    VCABO(J,I)=VY
    VRELATIVA(J,I)=VENTOGERALINT(J+1,I)-VCABO(J,I)
    *IF,VRELATIVA(J,I),GT,0,THEN

FVENTO(J,I)=(L/NDIV_X)*D_SECAO*1.1*0.613*(VRELATIVA(J,I))**2
    *ELSE
FVENTO(J,I)=-((L/NDIV_X)*D_SECAO*1.1*0.613*(VRELATIVA(J,I))**2
    *ENDIF

  *ENDDO

/SOLU
ALLSEL,ALL
AUTOTS,0
TIME,2+((J-1)/10)
NSUBST,30,100,20 ! DEFAULT, MAX E MIN
PSTRES,1
PARSAV,ALL,'VETORES','TXT',' '
ANTYPE,,REST,J,,
PARRES,NEW,'VETORES','TXT',' '
  *DO,I,1,N_NO,1
    F,I+99999,FY,FVENTO(J,I)
  *ENDDO

!ALPHAD,0.04425
!BETAD,0.000625
TIME,2+((J-1)/10)
DELTIM, 0.1, 0.1, 0.1,
/SOLU
  PSTRES,1
  LSWRITE
  LSSOLVE,J+1,J+1,1
  FINISH
  PARRES,NEW,'VETORES','TXT',' '

```

*ENDDO

10.4 Rotina para a geração das funções temporais do vento

```
!* CARREGAMENTO NÃO-DETERMINÍSTICO DO VENTO          *
!* GERAÇÃO DE SÉRIES TEMPORAIS PARA A PARCELA FLUTUANTE *
!* DA VELOCIDADE LONGITUDINAL DO VENTO              *
```

!* DADOS DE ENTRADA 1 - VEL. BÁSICA, PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

```
U0 = 32.00          ! VELOCIDADE BÁSICA DO VENTO [M/S]
Z = 23             ! ALTURA EM [M]
Z0 = 0.07          ! COMPRIMENTO DE RUGOSIDADE
ZD = 0             ! DESLOCAMENTO DO PLANO ZERO (APROX. NULO)
S1 = 1.00          ! FATOR TOPOGRÁFICO
S3 = 1.00          ! FATOR ESTATÍSTICO
P = 0.15           ! EXPOENTE RELATIVO À RUGOSIDADE DO TERRENO
```

!* DADOS DE ENTRADA 2 - INPUT PARA O ESPECTRO DE KAIMAL *

```
F_UP = 12.0001     ! FREQUÊNCIA LIMITE SUPERIOR
F_LO = 0.0001      ! FREQUÊNCIA LIMITE INFERIOR
F_INC = 0.10       ! INCREMENTO DA FUNÇÃO
```

!* DADOS DE ENTRADA 3 - PROPRIEDADES DO HISTÓRICO DE VELOCIDADE

```
TIME_LOW = 2.000   ! LOWER BOUNDARY OF TIME RANGE
TIME_UPP = 110.000 ! UPPER BOUNDARY OF TIME RANGE
TIME_INC = 1        ! TIME INCREMENT
DIV_SPECTRUM = 1000 ! SPECTRUM DIVISIONS
FREQ_SUP = 10.0150 ! FREQUENCIA SUPERIOR
FREQ_INF = 0.0150  ! FREQUENCIA INFERIOR
TAU = 3.14         ! DEFASAGEM ENTRE AS FUNÇÕES
```

```

CA_COND = 1.1          ! COEFICIENTE DE ARRASTO DO CONDUTOR
DIAM  = 18E-3         ! DIÂMETRO DO CONDUTOR
DELT_X = L/NDIV_X    ! DELTA DE COMPRIMENTO DO CABO ENTRE NÓS
PI = ACOS(-1)
R2 = SQRT( 2)

V10 = 0.69*U0*S1*S3   ! VELOCIDADE MÉDIA DE REFERÊNCIA
VZ = V10*(Z/10)**0.15 ! VELOCIDADE E FORÇA MÉDIA NA ALTURA "Z"
PRESS_AVG = 0.613*CA_COND*DIAM*DELT_X*(VZ)**2
V_FRIC = 0.4*VZ/(LOG(Z/Z0)) ! VELOCIDADE DE FRICÇÃO U

!* ENTRADA DO ESPECTRO DE KAIMAL
NUM_F = (F_UP-F_LO)/F_INC + 1
*DIM, SV_0, TABLE, NUM_F, , , , ,
*DIM, SV_1, TABLE, NUM_F, , , , ,
      I = 1
      *DO, F, F_LO, F_UP, F_INC
          X = F*(Z-ZD)/VZ
          SV_0(I, 1) = 200*X*V_FRIC**2/((1+50*X)**(5/3))/F
          SV_0(I, 0) = F
          SV_1(I, 1) = 200*X*V_FRIC**0/((1+50*X)**(5/3))
          SV_1(I, 0) = F
          I = I + 1
      *ENDDO

!* DIMENSIONAMENTO DAS FUNÇÕES FORÇA NO TEMPO
*DEL,NOME
FUNC_N = 1 ! NUMBER OF DEFINED FUNCTIONS
*DIM,NOME,CHAR,100
NOME( 1 ,1 ,1) ='FUNC001'

!* DETERMINAÇÃO DO HISTÓRICO ATRAVÉS DE SÉRIE DE FOURIER
T_INTERPOLACAO=0.1

```

```

TIME_POS  = (TIME_UPP - TIME_LOW)/T_INTERPOLACAO
FREQ_INC  = (FREQ_SUP - FREQ_INF)/DIV_SPECTRUM
*DIM, FUNC000, TABLE, TIME_POS+1
*DIM, THET, ARRAY, DIV_SPECTRUM+1
*DIM,FOURCOEF, ARRAY, DIV_SPECTRUM+1

      *DO, I, 1, FUNC_N
          *DIM, %NOME(I, 1, 1)%, TABLE, TIME_POS+1, , , , ,
      *ENDDO

*VFILL,THET,RAND,0,2*PI,

K = 1
*DO, F, FREQ_INF, FREQ_SUP, FREQ_INC
    FOURCOEF(K) = SQRT(SV_0(F)*FREQ_INC)
    K = K + 1
*ENDDO

!* CARREGAMENTOS NOS CONDUTORES
J = 1
T=0

*DO, T, TIME_LOW, TIME_UPP, TIME_INC
    K = 1
    SOMA = 0
        *DO, F, FREQ_INF, FREQ_SUP, FREQ_INC
            SOMA = SOMA + FOURCOEF(K)*COS(2*PI*F*T+THET(K))
            K = K + 1
        *ENDDO

    FLOAT = R2*SOMA
    FUNC000(J, 0) = T
    FUNC000(J, 1) = VZ+FLOAT
    PRESS = 0.613*CA_COND*DIAM*DELT_X*(VZ+FLOAT)**2
    FUNC001(J, 0) = T
    FUNC001(J, 1) = 0.613*CA_COND*DIAM*DELT_X*(VZ+FLOAT)**2

```

```

        J = J + 1
    *ENDDO

!CRIACAO DA MATRIZ COM VETORES DE CARGA
N_NO=9
*DIM, FUNCGERAL, ARRAY, TIME_POS-((N_NO-1)*TAU/TIME_INC)+1,N_NO+1

J=1
TF_DIN=(TIME_UPP-(N_NO-1)*TAU)

    *DO, T, TIME_LOW, TF_DIN, TIME_INC
        *DO, I, 1, N_NO,1
            FUNCGERAL(J,I)=FUNC001(T+(I-1)*TAU,1)
        *ENDDO
        J = J + 1
    *ENDDO

*DIM, VENTOGERAL, ARRAY, TIME_POS-((N_NO-1)*TAU/TIME_INC)+1,N_NO+1
J=1
TF_DIN=(TIME_UPP-(N_NO-1)*TAU)

    *DO, T, TIME_LOW, TF_DIN, TIME_INC
        *DO, I, 1, N_NO,1
            VENTOGERAL(J,I)=FUNC000(T+(I-1)*TAU,1)
        *ENDDO
        J = J + 1
    *ENDDO

*DIM, VENTOGERALINT, ARRAY, (TIME_POS-((N_NO-1)*TAU/TIME_INC)+4)*10,N_NO+1
J=1

    *DO, T, TIME_LOW, TF_DIN, TIME_INC
        *DO, I, 1, N_NO,1
            VENTOGERALINT((J-1)*10+1,I)=VENTOGERAL(J,I)
        *ENDDO
        J = J + 1
    *ENDDO

```

J=1

```
*DO, T, TIME_LOW, TF_DIN, TIME_INC
```

```
  *DO, I, 1, N_NO, 1
```

```
    *DO, K, 2, 10, 1
```

```
      VENTOGERALINT((J-1)*10+K,I)=(K-  
      1)*((VENTOGERALINT((J*10+1),I)-VENTOGERALINT((J-  
      1)*10+1,I))/10)+VENTOGERALINT((J-1)*10+1,I)
```

```
    *ENDDO
```

```
  *ENDDO
```

```
    J = J + 1
```

```
  *ENDDO
```

```
PARSAV,ALL,'PAR','PAR',''
```