



MONITORAMENTO DE UMA TORRE DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM OPERAÇÃO SUJEITA AO VENTO

Hermes Carvalho

Gilson Queiroz

Tarcísio Gonçalves da Silva Filho

Paula Moura Leite Vilela

hermes@dees.ufmg.br

gilsonmarque@gmail.com

p2.tarcisio@gmail.com

paulinhamlvilela@gmail.com

Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais

Antônio Carlos, nº6627, Escola de Engenharia, CEP 31270-901, Belo Horizonte/MG, Brasil

Resumo. *Efeitos estáticos e dinâmicos do vento em estruturas de torres de transmissão podem ser avaliados por meio de procedimentos normativos, que sugerem o emprego de análises estáticas e lineares. Através de simulações numéricas é possível observar a forte influência dos efeitos das não-linearidades geométricas no comportamento dos cabos de transmissão. Os efeitos dinâmicos também apresentam fortes influências, inclusive com possibilidade de ressonância com a estrutura. Com o intuito de validar experimentalmente uma metodologia completa de análise (estática e dinâmica) foi escolhida uma torre de suspensão em operação de propriedade das Centrais Elétricas de Minas Gerais (CEMIG). Nessa torre foi instalado um anemômetro tridimensional para a medição dos valores e direções das velocidades do vento. Simultaneamente serão medidos valores de deformações nos principais elementos da torre por meio de extensômetros ópticos, sensores esses imunes às interferências eletromagnéticas. O ângulo de balanço da cadeia será avaliado através de uma câmera de alta resolução e um acelerômetro tridimensional. Com a instrumentação utilizada torna-se possível criar uma base de dados completa correlacionando velocidades do vento com as respostas do conjunto estrutural.*

Palavras-chave: *Monitoramento de linhas de transmissão, Sensores ópticos, Redes de Bragg.*

1 INTRODUÇÃO

As preocupações relativas aos carregamentos resultantes da ação dos ventos sobre componentes de linhas aéreas de transmissão vêm crescendo no Brasil nos últimos anos, como também em outros países, à medida que as ocorrências de quedas de estruturas resultam em prejuízos de maior importância num sistema de fornecimento de energia elétrica (Blessmann, 1995). Uma reportagem do jornal “O Estado de São Paulo” noticiou que no dia 4 de novembro de 1997 ventos de até 36 m/s provocaram o colapso de 10 torres de transmissão da usina de Itaipu. Esse caso representa somente um exemplo, pois desde o início das construções de torres metálicas treliçadas há vários registros semelhantes devidos a ventos de alta intensidade. Isto sugere que, na ausência de outro fenômeno, o carregamento do vento pode ser bastante severo a ponto de causar o colapso de torres de linhas aéreas (Yang et al 2015; Wang et al. 2015).

As metodologias atuais de cálculo sugeridas pelas normas de dimensionamento de torres de transmissão indicam a utilização de análises lineares com carregamentos estáticos equivalentes ao efeito do vento (Holmes, 2015). Efeitos de não linearidades geométricas, obtidos por análises não lineares de todo o conjunto estrutural (torre, isoladores e cabos), foram considerados relevantes para sistemas estruturais com cabos de grandes vãos (Carvalho, 2015). Análises dinâmicas indicaram esforços até três vezes superiores aos obtidos por meio de análises estáticas equivalentes, indicando que a ocorrência de acidentes provocados pela ação do vento pode se acentuar, caso as análises de torres sejam conduzidas utilizando modelos inadequados (Battista et al., 2003). Muitos estudos teóricos foram desenvolvidos até o momento, porém poucas validações experimentais foram realizadas, sendo os principais trabalhos experimentais nessa área desenvolvidos por Bjerkan (2000), Henriques et al. (2015) e John et al. (2011).

Com esta motivação, este artigo tem como objetivo apresentar um projeto experimental desenvolvido pelas Centrais Elétricas de Minas Gerais (CEMIG), em parceria com a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), em uma torre de transmissão de suspensão de 28 metros de altura, componente de uma linha aérea fase/fase com potência de 138 kV. Com o sistema de monitoramento em funcionamento torna-se possível obter registros simultâneos do balanço das cadeias de isoladores, velocidade de vento e deformações na estrutura suporte para situações reais. Tais dados permitirão a validação de metodologias de análise, uma vez que contêm as informações referentes às ações e respectivas respostas estruturais.

Para obtenção das informações experimentais foi utilizada a tecnologia de monitoramento em tempo real (Molina et al. 2014), adaptada para medição do balanço das cadeias de isoladores e outras grandezas. O sistema de monitoramento é composto, basicamente, dos seguintes subsistemas:

- Conjunto de alimentação (painéis solares e baterias);
- Elementos sensores elétricos (umidade, temperatura, radiação solar, velocidade do vento, ângulo de balanço);
- Datalogger elétrico;
- Elementos sensores ópticos (deformação e temperatura da estrutura);
- Datalogger óptico (*OSA – OPTICAL SPECTRUM ANALYZER*);
- Câmera digital;
- Sistemas de comunicação
- Elementos de fixação.

2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1 Arquitetura do Sistema de Monitoramento

Basicamente serão monitoradas na estrutura em estudo as informações referentes às ações do vento e as respectivas respostas estruturais. As ações serão obtidas através de um anemômetro e de um 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 Fig. 1 apresenta o sensor de balanço integrado com os demais componentes deste sistema.

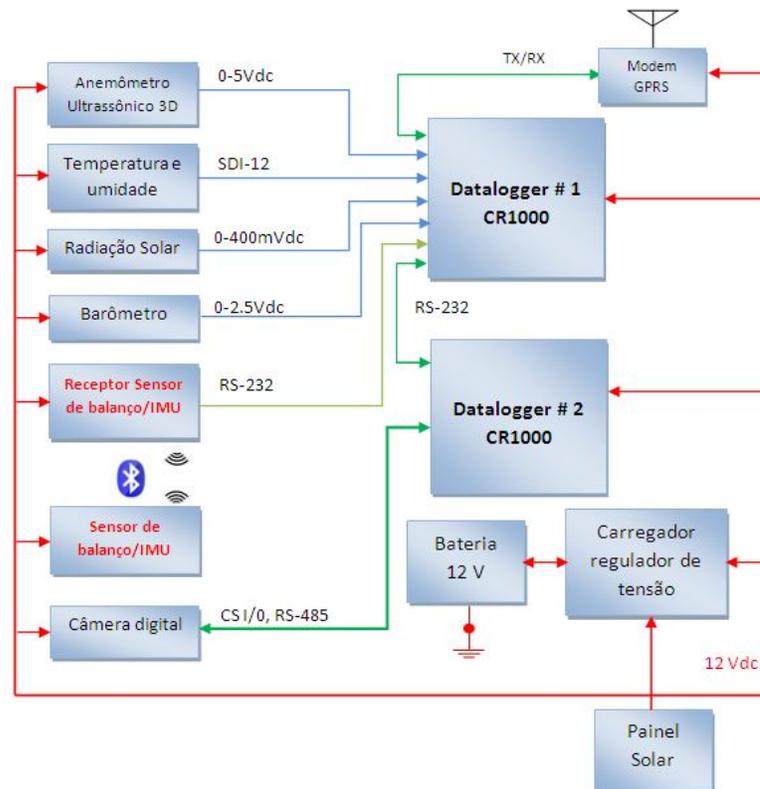


Figura 1. Arquitetura do sistema de monitoramento de balanço.

O sistema de aquisição de dados da câmera, da plataforma inercial e dos componentes de transmissão do sistema de medição do ângulo ficam em uma caixa metálica. A plataforma inercial é fixada na cadeia de isoladores. Para fixação da câmera foi construída uma estrutura auxiliar de forma a afastá-la da estrutura da torre longitudinalmente aos cabos de transmissão, possibilitando a captação do movimento transversal das cadeias de isoladores. Para alimentação do sistema foi empregado um conjunto de baterias, painéis solares e um regulador de carga.

A montagem em laboratório está apresentada na Fig. 2. O arranjo de fixação dos sensores e demais equipamentos na estrutura metálica da torre está ilustrado na Fig. 3.

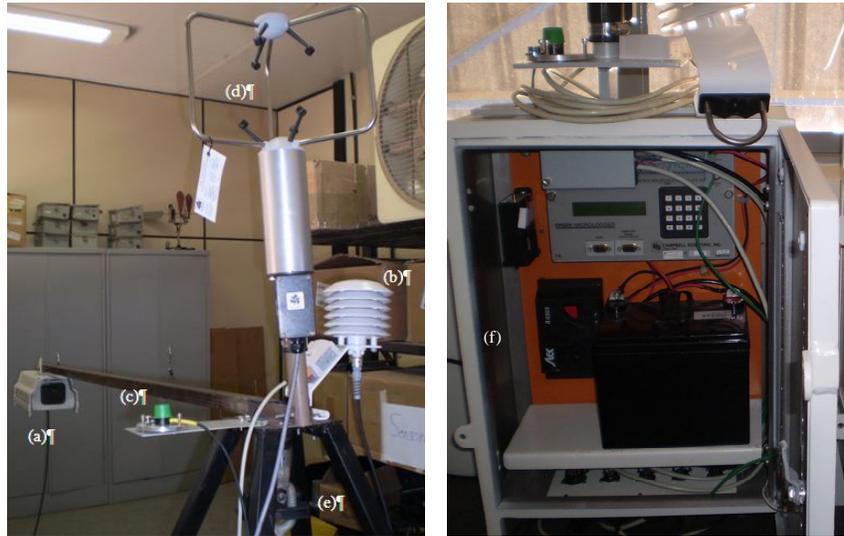


Figura 2. Montagem experimental em laboratório: (a) câmera digital; (b) sensor de umidade e temperatura; (c) sensor de radiação solar; (d) sensor de velocidade de vento; (e) sensor do ângulo de balanço junto à cadeia de isoladores; (f) datalogger elétrico.

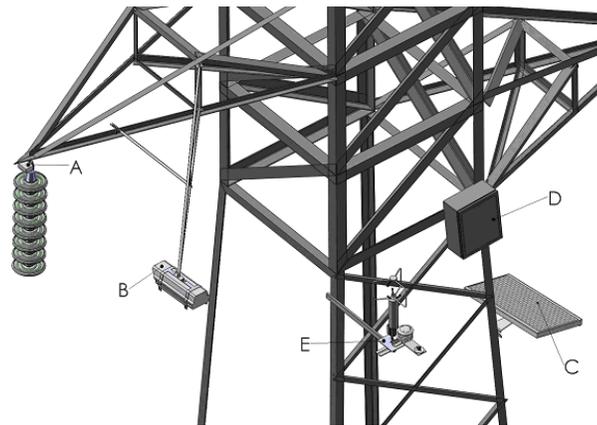


Figura 3. Fixação do sistema de monitoramento na torre: (A) sensor do ângulo de balanço; (B) câmera digital; (C) painel solar; (D) caixa com datalogger, bateria e modem; (E) sensores de radiação solar, temperatura, velocidade de vento 3D e pressão atmosférica.

O deslocamento da cadeia é captado pela câmera a partir de um determinado valor de velocidade de vento ou um determinado valor de ângulo de balanço. Um pulso lógico do datalogger dispara a câmera, iniciando uma sequência de fotos. 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 remoto pode ser realizado através de um computador equipado com um modem.

As respostas estruturais 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 (Hill et al. 1997).

Como a estrutura da torre é construída com cantoneiras de abas iguais, são utilizados 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 Fig.4 apresenta os elementos instrumentados da torre bem como as respectivas disposições na estrutura como um todo.

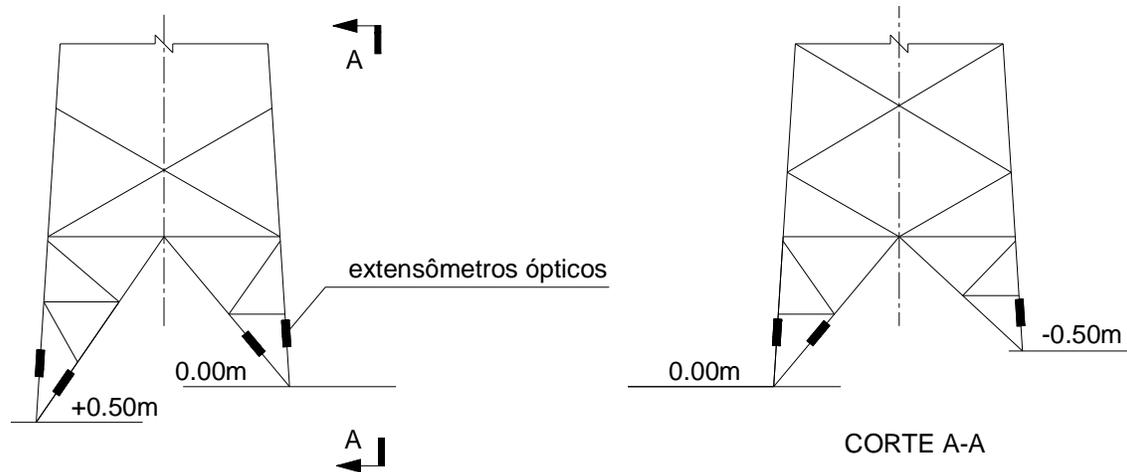


Figura 4. Localização dos sensores nos elementos da torre.

Devido à alta sensibilidade dos extensômetros ópticos à variação de temperatura, será instalado um sensor de temperatura, também óptico, junto a cada par de extensômetros. Os valores de deformação medidos, neste caso deformações totais, poderão ser decompostos em duas parcelas, sendo uma a deformação correspondente à variação de temperatura do aço e dos cabos de fibra óptica e a outra a deformação devido ao carregamento, conforme exposto na Eq. (1) (Tian et al. 2005).

$$\Delta\varepsilon_{\text{total}} = \Delta\varepsilon_{\text{carga}} + \Delta\varepsilon_{\text{temperatura}} = \frac{\Delta\lambda_B}{(1 + \rho_e)\lambda_B} + (TCS)\Delta T \quad (1)$$

Sendo:

$\Delta\varepsilon_{\text{total}}$ = variação de deformação medida no elemento estrutural;

$\Delta\varepsilon_{\text{carga}}$ = variação de deformação devido à variação de carga no elemento estrutural;

$\Delta\varepsilon_{\text{temperatura}}$ = variação de deformação devido à variação de temperatura no elemento estrutural;

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

ρ_e = sensibilidade da rede de Bragg à deformação, igual a -0,22;

λ_B = comprimento de onda da rede de Bragg refletido na fibra óptica;

TCS= sensibilidade cruzada da rede de Bragg à temperatura, igual a $8,59 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$;

ΔT = variação de temperatura;

2.2 Protótipo para avaliação dos sensores ópticos

Para a validação das respostas obtidas com os sensores ópticos, foi criado um protótipo composto por chapas de extremidade e uma cantoneira, conforme Fig. 5.



Figura 5. Protótipo em cantoneira para validação dos sensores ópticos.

No protótipo foram instalados 4 sensores de deformação e um sensor de temperatura, todos ópticos. Os sensores foram soldados através de solda ponto. Além dos sensores ópticos foram instalados mais dois sensores elétricos em posições semelhantes no protótipo. A localização dos sensores de deformação encontra-se na Fig. 6.

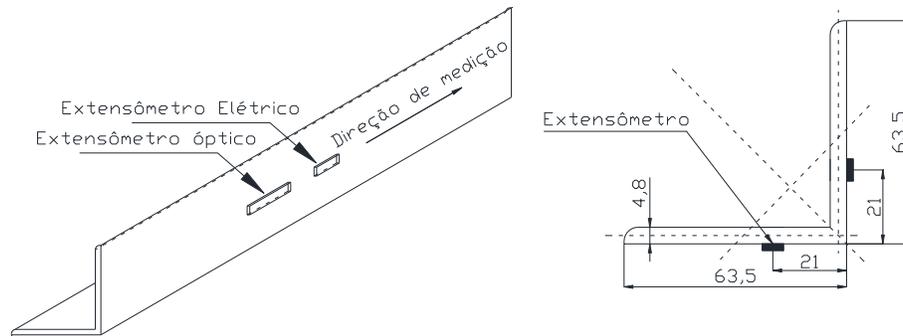


Figura 6. Localização dos sensores de deformação no protótipo.

Os sensores, como mostrado na figura anterior, não foram posicionados sobre a linha neutra da cantoneira, estando assim aptos a captar os efeitos devidos à flexão na cantoneira.

Foram realizados 4 ensaios no LAEES (Laboratório de Análise Estrutural de Estruturas da UFMG), todos com a peça comprimida. Devido à sensibilidade dos resultados ao posicionamento do cabeçote de aplicação da carga, observada durante os ensaios, o posicionamento foi modificado nos 4 ensaios de forma aleatória, não superando 3 centímetros de deslocamento do centro de introdução da carga em relação ao centro de gravidade da cantoneira.

2.3 Desenvolvimento do Sensor de Balanço

O sistema de medição de ângulo é composto basicamente por uma plataforma inercial denominada IMU (Inertial Measurement Unit). 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. (Molina et al. 2014)

No protótipo do sensor de balanço foi utilizado o IMU Spark Fun Electronics, 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 Fig. 7a, contém os sensores (acelerômetro, girômetro e magnetômetro) e um transmissor RF. A segunda unidade, mostrada na Fig. 7b, 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.

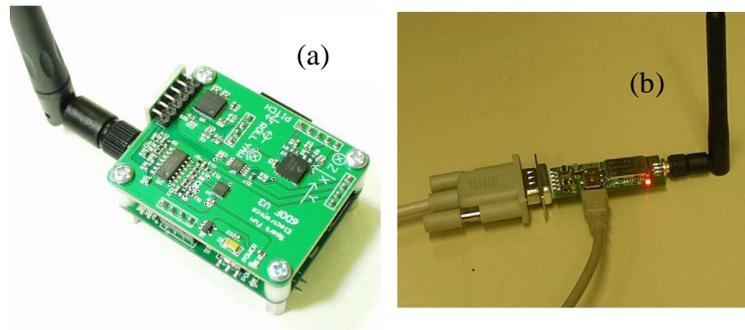


Figura 7. Plataforma inercial Spark Fun Eletronics: (a) circuito transmissor com sensores e (b) circuito receptor.

A Fig. 8 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 ortogonal ao posicionamento 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.

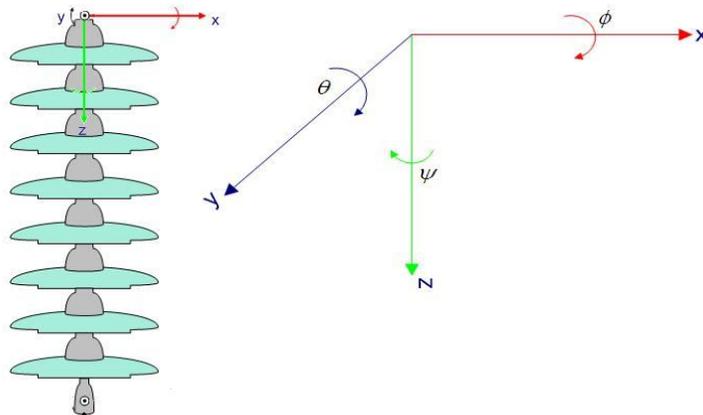


Figura 8. Plataforma inercial e grandezas medidas.

2.4 Instalação em campo

Foi escolhida uma estrutura de suspensão de uma linha de transmissão 138 kV para a instalação do sistema de medição e monitoramento do comportamento do sistema estrutural composto por torre e cabos submetidos à ação do vento. Nessa mesma torre foi instalada, a 10 m de altura, uma estação climatológica, permitindo monitorar ao mesmo tempo a direção e velocidade do vento, radiação solar e demais dados climatológicos. A Fig. 9 e a Fig.10

mostram a instalação do sensor de medição de ângulo, do sistema de registro digital (câmera) e da estação climatológica.



Figura 9. Instalação do acelerômetro e sistema de registro digital do ângulo da cadeia.



Figura 10. Monitoramento de dados climatológicos: sistema instalado na estrutura 138 kV.

A Fig. 11 mostra a instalação de um sensor de medição de deformações óptico e o conjunto de alimentação do sistema, composto por baterias e painéis solares.



Figura 11. Sensor óptico instalado no elemento estrutural e conjunto de alimentação do sistema.

3 RESULTADOS

3.1 Resultados obtidos em laboratório

Foram realizados um total de quatro ensaios para validação das medidas realizadas com os sensores ópticos. A Tab. 1 apresenta os dois últimos valores das forças normais aplicadas à cantoneira com as respectivas deformações obtidas.

Tabela 1. Deformações medidas no protótipo com sensores ópticos e elétricos.

Ensaio	Carga Axial [N]	Sensor 1 óptico [me]	Sensor 1 elétrico [me]	Diferença %	Sensor 2 óptico [me]	Sensor 2 elétrico [me]	Diferença %
Ensaio 1	31270	214,09	208	-2,93	159,92	172,1	7,08
	49680	347,18	425	18,31	281,67	311,8	9,66
Ensaio 2	35580	270,22	268,18	-0,76	237,7	282,4	15,83
	44970	336,81	364,23	7,53	296,92	356,2	16,64
Ensaio 3	35450	251,75	231	-8,98	200,16	213,1	6,07
	45520	317,78	397,9	20,14	256,9	277,5	7,42
Ensaio 4	26920	179,52	177,6	-1,08	128,45	130,4	1,49
	35450	300,24	351,7	14,63	236,79	255,5	7,32

Observando os valores de deformação medidos pode-se concluir que há uma forte 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 sobre na interseção do eixo “Y-Y” com a face da aba da cantoneira, conforme apresentado na Figura 6.

Pode-se observar também que os sensores ópticos apresentaram valores inferiores aos sensores elétricos. Uma das possíveis explicações é de que os momentos aplicados à cantoneira resultam em tração na linha dos sensores 1 e 2, reduzindo assim os valores de deformação. Como os sensores ópticos estão posicionados no centro do protótipo e os sensores elétricos posicionados abaixo destes, o efeito da curvatura da peça indica um momento fletor maior no centro da peça em relação aos demais pontos, resultando em uma redução maior de deformação nos sensores ópticos.

O extensômetro elétrico 1 apresentou saltos muito desproporcionais aos últimos valores de carga nos ensaios 1, 3 e 4, sendo, portanto, desconsiderados. Nas cargas anteriores a estas e no ensaio 2 a maior diferença foi de 16%, sendo essa diferença considerada aceitável mediante as considerações anteriores.

3.2 Resultados obtidos em campo

Durante 5 meses foram coletados valores de velocidade de vento na estrutura em estudo. Foram obtidos valores com média em 3 segundos (valores de rajada) e com média horária. Analisando os valores coletados é possível observar que os valores médios nos meses de agosto, setembro e outubro são de 20% a 40% superiores às médias dos meses de junho e julho. Tal comportamento é esperado, uma vez esses são os meses de maior ocorrência de velocidades de vento elevadas na região. A velocidade máxima de rajada observada é igual a 24,6 m/s, cerca de 75% do valor máximo esperado na região pela norma de referência ABNT NBR 6123, para um período de recorrência igual a 50 anos. A Fig. 12 apresenta os valores obtidos.

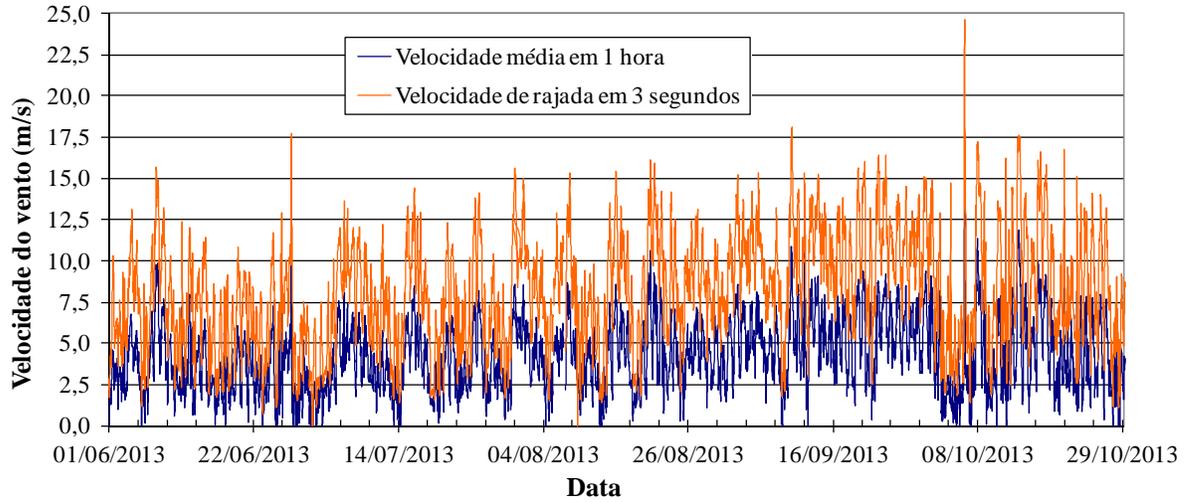


Figura 12. Velocidades do vento com média em 3 segundos e média horária

A Fig. 13 apresenta os histogramas das velocidades adquiridas durante os 2 meses de medição.

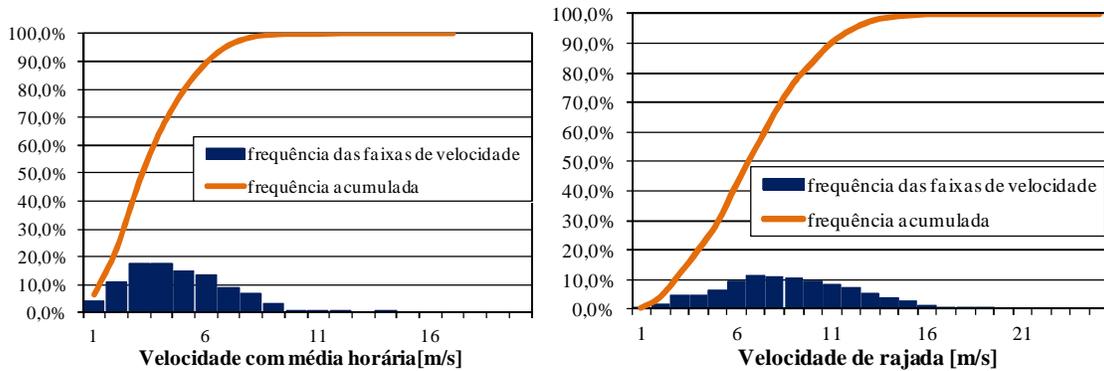


Figura 13. Histogramas das velocidades do vento com média horária e com média em 3 segundos.

A Fig. 14 apresenta valores de deformação e temperatura coletados nos sensores ópticos, com influência somente da temperatura nas deformações. A variação das deformações observadas nos sensores 2 e 3 estão relacionadas a variação de temperatura do sensor 1 e as deformações dos sensores 5 e 6 ao sensor de temperatura 4.

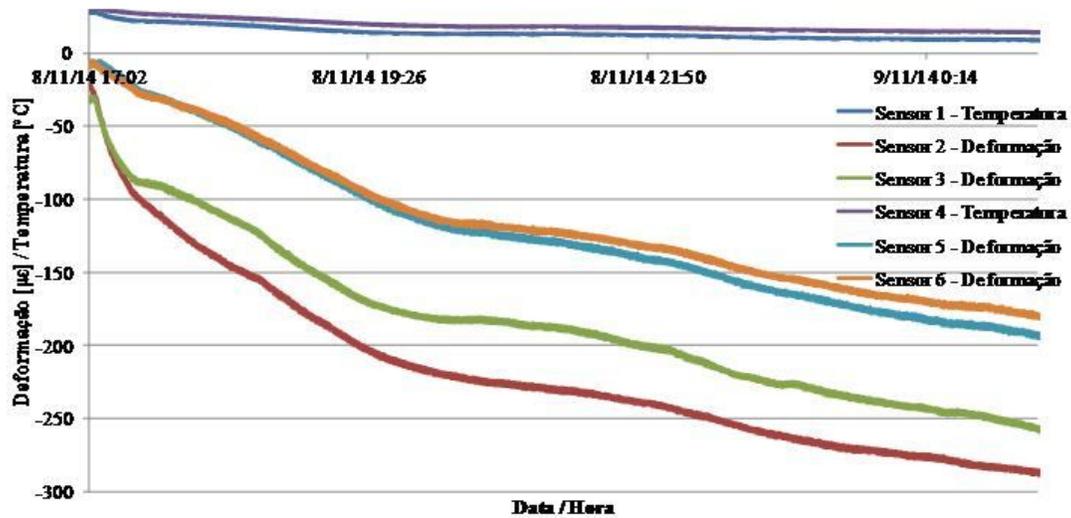


Figura 14. Valores de deformação e temperatura coletados a cada segundo, com influência de temperatura nas deformações.

A Fig.15 apresenta valores de deformação e temperatura coletados nos sensores ópticos, com influência da temperatura e as cargas de vento nas deformações. A variação das deformações observadas nos sensores 2 e 3 estão relacionadas a variação de temperatura do sensor 1 e as deformações dos sensores 5 e 6 ao sensor de temperatura 4.

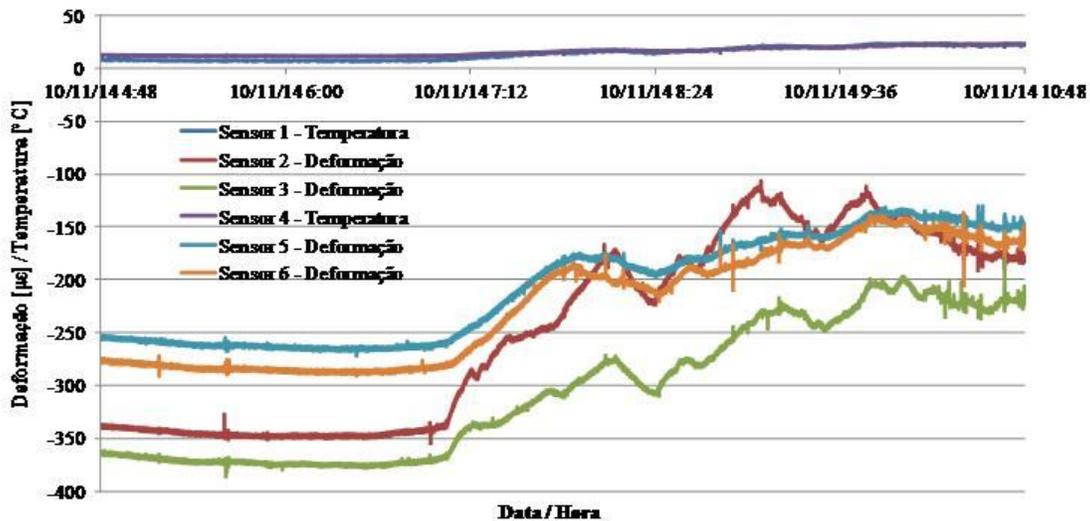


Figura 15. Valores de deformação e temperatura coletados a cada segundo, com influência de temperatura e cargas de vento nas deformações.

4 CONCLUSÕES

Resultados experimentais são fundamentais para a validação de uma metodologia completa (estática e dinâmica) para a análise e dimensionamento de torres de linhas de

transmissão aéreas. Somente após essa validação é possível avaliar e refinar os critérios de projeto de linhas de transmissão.

Neste trabalho foi apresentado um sistema de medição e monitoramento do comportamento do sistema estrutural composto por torre e cabos submetidos à ação do vento, baseado em sistemas de monitoramento em tempo real de linhas de transmissão. Valores de velocidade de vento, deformações e temperatura obtidos nos sensores instalados na estrutura foram apresentados. A proposta do desenvolvimento desse sistema é muito importante no aprimoramento e validação de uma metodologia completa (estática e dinâmica, teórica e experimental) para análise de torres de linhas aéreas de transmissão. Espera-se, com isso, avaliar e aperfeiçoar os critérios de projetos de linha.

Através de ensaios de laboratório foi possível avaliar e validar a utilização de sensores ópticos comerciais na análise de deformações em elementos estruturais de aço, que tiveram sua utilização aprovada.

No momento atual a instrumentação está em fase final de testes e sincronização. Após esta etapa serão realizadas medidas em tempo real utilizando todos os instrumentos instalados na estrutura.

REFERÊNCIAS

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

BATTISTA, R.C., PFEIL, M.S., RODRIGUES, R.S. Dynamic behavior and stability of transmission line towers under wind forces. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 91, p. 1051-1067, 2003.

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

Blessmann, Joaquim. *O Vento na Engenharia Estrutural*. (1. Ed.) Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS. 1995. 282p.

CARVALHO, H. Efeitos do vento em linhas de transmissão. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2015. 146f. (Ph.D. Thesis in Structural Engineering).

HENRIQUES, J.; PAIVA, F.; BARROS, R. Wind action in the tower testing station. *International Conference on Wind Engineering*, Porto Alegre, 2015.

HILL, K.O.; MELTZ, G. Fiber Bragg Grating technology fundamentals and overview. *Journal of Lightwave Technology*, v. 15, n. 8, 1997.

Holmes, John D. *Wind loading of structures*. (3 Ed.) Florida: CRC Press. 2015. 384p.

JOHN, A.D.; GAIROLA, A., GANJU, E.; GUPTA, A. Design wind loads on reinforced concrete chimney – An experimental case study. *Procedia Engineering*, v. 14, p. 1252-1257, 2011.

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

PAVEL, F.; KOJI F.; FRIEDRICH, K.; JAN R. Tower top geometry and mid span clearances. Paris: CigreWorking Group B2, 2007. 187p.

PEREIRA, D.C.A., Sensores de fibra óptica baseados em redes de Bragg para monitorização ambiental e estrutural. Porto: Universidade do Porto, 2003. 210f. (Ph.D. Thesis in Electrical Engineering).

SCHROEDER, K.; ECKE, W.; APITZ, J.; LEMBKE, E.; LENSCHOW, G. A fiber Bragg grating sensor system monitors operational load in a wind turbine rotor blade. *Measurement Science and Technology*, v.17, n.15, 2006.

TIAN, K.; LUI, Y.; Wang, Q. Temperature-independent fiber Bragg grating strain sensor using bimetal cantilever. *Optical Fiber Technology*, v. 11, Issue 4, p. 370–377, 2005.

WANG, D.; LI, K.; LIANG, S. Wind tunnel tests on aeroelastic dynamic tension effects of overhead transmission. *International Conference on Wind Engineering*, Porto Alegre, 2015.

YANG, F.; YANG, J.; NIU, H., ZHANG, H. Design wind loads for tubular-angle steel cross-arms of transmission towers under skewed wind loading. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 140, p. 10-18, 2015.