



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO - III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

**MONITORAMENTO DE TORRES DE TRANSMISSÃO PARA AVALIAÇÃO
DOS ESFORÇOS APLICADOS À FUNDAÇÃO**

**R. B. Boszczowski (*)
LACTEC**

**L. A. de Lacerda
LACTEC**

**J. V. da Rocha Jr.
COPEL**

**L. M. de Oliveira Jr.
COPEL**

RESUMO

O presente trabalho apresenta os procedimentos de monitoramento de estruturas de transmissão com vistas a determinar os esforços aplicados na fundação decorrentes de cargas externas. Para esse estudo foram selecionadas seis torres de transmissão de energia elétrica situadas no Estado do Paraná. A instrumentação aplicada nessas estruturas consiste em um sensor de vento, que mede intensidade e direção dos ventos; strain gages fixados próximos aos pés das torres e um sistema de aquisição e transmissão de dados. O sistema está fixado em cada uma das torres de transmissão e é alimentado por um painel de energia solar.

PALAVRAS-CHAVE

Torres de transmissão, fundações, sistemas de monitoramento, carregamentos dinâmicos.

1.0 - INTRODUÇÃO

As estruturas de suporte de linhas de transmissão (LT) e de distribuição de energia estão entre as obras de engenharia que podem ter as fundações submetidas à tração. O esforço de tração nas fundações das torres é resultado de momentos que tendem a tombar a torre, os quais são ocasionados por (1) vento na própria torre e principalmente nos cabos; (2) eventuais rupturas de cabos; (3) desequilíbrio dos esforços nos cabos nas torres de ancoragem (por exemplo, final de linha) e nas torres de ângulo, onde ocorre inflexão na direção dos cabos (Orlando, 1985). Portanto, o dimensionamento das fundações dessas estruturas deve levar em consideração esforços de compressão, arrancamento e ainda tombamento, aplicados em carregamento estáticos e dinâmicos. Os carregamentos dinâmicos são dimensionados considerando-se dados estatísticos e tempos de recorrência de ventos (ABNT, 1985). Ainda, o projeto de fundação dessas torres distingue-se do das demais obras de engenharia por uma série de fatores importantes como por exemplo, o número elevado de fundações a serem executadas e a grande distância entre essas fundações, as dificuldades de acesso aos locais das torres e a inexistência de uma estrutura de apoio logístico em cada local de torre (Danziger, 1985). Outra característica de fundações de torres é que, ao contrário das fundações para edifícios, onde se espera uma certa uniformidade no terreno, nas linhas de transmissão normalmente se tem um conjunto de tipos de fundações que devem ser compatíveis com os diferentes tipos de solos encontrados ao longo do traçado da LT.

Observa-se, da grande rede de transmissão que hoje existe no Brasil, que ocorrem acidentes com queda de linhas provocados pela ocorrência de fortes ventos, inclusive tornados, e que o dimensionamento convencional das fundações das torres de transmissão por vezes resultam em estruturas super dimensionadas e por vezes em estruturas aparentemente estáveis na prática e instáveis na teoria (Stephan e Costa, 2007). Uma das dificuldades encontradas na elaboração de projetos de fundações de torres de transmissão é a definição de carregamentos dinâmicos (geralmente devido ao vento) e sua influência no comportamento da fundação.

Com o objetivo de se mensurar as cargas advindas dos carregamentos de vento, este artigo descreve um sistema de monitoramento de seis torres de transmissão, localizadas no Estado do Paraná. Esse sistema de monitoramento é parte integrante de uma pesquisa atualmente em desenvolvimento pela COPEL e LACTEC.

2.0 - SELEÇÃO DAS ESTRUTURAS A SEREM MONITORADAS

Para o estudo foram escolhidas seis torres de transmissão que estão em operação no Estado do Paraná. A escolha das estruturas teve como referência critérios como intensidade e tempo de retorno dos ventos, número de desligamentos ocorridos em cada linha de transmissão, condições de acesso à torre, condições gerais da integridade da estrutura, risco de vandalismo, cargas atuantes nas estruturas e por fim a visada à subestação. A torre deveria ter uma distância máxima de 10 km de uma subestação, pois os dados obtidos com o sistema de monitoramento são coletados por um sistema de rádio transmissores localizados nas subestações (Boszczowski et al., 2008).

As torres selecionadas estão localizadas em região rural, afastadas de centros urbanos. Quatro das seis torres monitoradas estão localizadas entre Cascavel e Guaíra, pois esta é uma das regiões do Estado que apresenta maior intensidade de vento e onde estão concentradas várias linhas de transmissão do sistema interligado brasileiro. Na região de Cascavel foram selecionadas três torres e na região de Guaíra foi selecionada uma estrutura. Ainda há uma torre instrumentada na região da Grande Curitiba, devido à facilidade de acesso e a distância ao LACTEC (esta torre foi a primeira a ser instrumentada) e a sexta torre encontra-se em Figueira, em uma linha que deverá ser recapitada.

As torres de transmissão selecionadas são estruturas de ancoragem da linha de transmissão (estruturas mais robustas das linhas), com classes de tensão variando entre 138 kV e 525 kV. Cada torre apresenta uma geometria diferente, mas com uma característica em comum que é a existência do elemento chamado "montante" e dos elementos "ponteira" compondo o pé da torre, conforme mostrado na Figura 1. O ângulo do montante com a vertical depende do tipo de torre e é geralmente pequeno, da ordem de 7° a 10°. Em decorrência do treliçamento e dessa geometria, embora com projetos estruturais distintos, o esforço resultante em cada pé tem praticamente a direção do montante. Ou seja, a contribuição dos esforços no montante é muito maior que as contribuições das outras duas peças (ponteiras). Todas as estruturas instrumentadas possuem fundação do tipo grelha.

A escolha de torres com diferentes geometrias e carregamentos objetivou a avaliação do efeito do vento em fundações de diferentes tipos de estruturas. A Tabela 1 mostra um resumo das principais características das torres selecionadas.

Tabela 1 – Características das torres instrumentadas.

Torre	Município	Torre	Classe (kV)	Altura (m)	Elemento instrumentado	Dimensões do elemento (pol)		Área (cm ²)
1	Cascavel	T43	138	15,8	Montante	6"	3/4"	54,44
2	Cascavel	BT1	525	16,0	Montante	6"	3/4"	54,44
3	Cascavel	T43	230	17,3	Montante	6"	3/4"	54,44
					Ponteira	3"	1/4"	9,29
4	Guaíra	CR	138	15,5	Montante	6"	3/4"	54,44
5	São José dos Pinhais	T43	230	18,8	Montante	6"	3/4"	54,44
					Ponteira	3"	1/4"	9,29
6	Figueira	FM	230	21,1	Montante	6"	3/4"	54,44
					Ponteira	3"	1/4"	9,29

3.0 - SISTEMA DE MONITORAMENTO

O sistema de monitoramento consiste em um sensor de vento, que mede intensidade e direção dos ventos; strain gages fixados próximos aos pés das torres e um sistema de aquisição e transmissão de dados. O sistema está fixado em cada uma das torres de transmissão e é alimentado por um painel de energia solar. Em uma subestação próxima a cada uma das torres está um sistema de recepção de dados.

Os strain gages foram instalados nos montantes e ponteiras das torres de transmissão. Os elementos (montantes e ponteiras) são perfis em "L", sendo que cada aba do perfil recebeu dois strain gages, um externo e um interno, compondo uma ponte completa de wheatstone. Ou seja, as informações de deformação são obtidas para cada aba em separado. Essas informações são enviadas através de um sinal elétrico para um datalogger que se encontra em uma caixa instalada aproximadamente à 10 m da superfície do solo, através de cabos que sobem através de um tubo instalado em um pé da torre. Próximo à caixa se encontra um sensor de vento que fornece informações de velocidade e direção do vento e um painel de energia solar que alimenta todo o sistema.

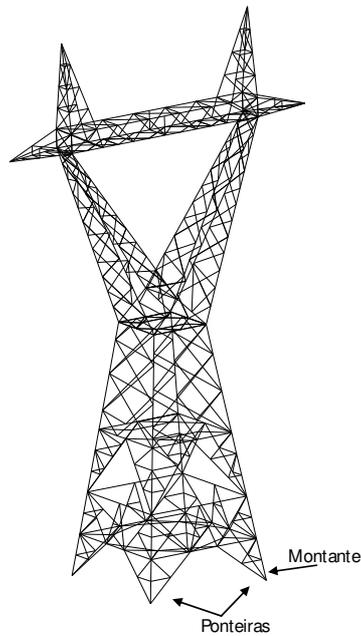


Figura 1 – Geometria de uma das torres instrumentadas.

Os strain gages utilizados são do modelo KFN-5-350-C9-11 (Kyowa), com Gage Factor de 1.98 (incerteza de 2%) e resistência de 350 ohms (incerteza de 1.8 ohms). O coeficiente de expansão térmica do strain gage aplicado é de $10.8/^{\circ}\text{C}$. O strain gage em questão é específico para trabalhar em locais com presença de campos eletromagnéticos fortes. O modelo de cabo utilizado para a instrumentação foi o “Vinil Coated Normal Temperature Low-Noise 3 Wire Cable”, ou L13 modelo da Kyowa. Este cabo possui como material condutor o cobre, área de 0.09 mm^2 e resistência de 0.46 ohm/m . Os comprimentos de cabo variaram para cada uma das torres. Este cabo também possui um sistema de blindagem para possíveis efeitos provenientes de presença de campos eletromagnéticos. Todo o sistema de monitoramento está protegido por supressores de surto e sistema de aterramento.

A instalação do sistema de monitoramento ocorreu entre os meses de novembro de 2007 e fevereiro de 2008. Foram utilizados 140 strain gages e aproximadamente 2.000 m de cabos blindados. A instalação foi dividida em 4 etapas: colagem de strain gages, fixação dos instrumentos na torre, ligação elétrica entre os strain gages e os instrumentos e instalação de sistemas de proteção do sistema.

Nas torres 1, 2 e 4 foram instalados 16 sensores, a torre 3 recebeu 32 sensores e as torres 5 e 6 receberam 30 sensores cada. Após a instalação dos strain gages nos pés da torre, procedeu-se a fixação dos sensores de vento, sistemas de aquisição e transmissão de dados e os painéis solares. Esses equipamentos foram instalados a aproximadamente 10 m de altura. Maiores detalhes sobre a instrumentação e a instalação nas torres pode ser obtida em Boszczowski et al. (2008).

4.0 - DADOS OBTIDOS EM CAMPO

Foram analisados os dados de monitoramento de um período de aproximadamente um ano. Para cada estrutura são obtidos dados de intensidade e direção do vento, temperatura, deformações dos elementos metálicos instrumentados (montantes e ponteiras) e dados internos do sistema como, por exemplo, voltagem da bateria. A temperatura coletada se refere à temperatura do sistema de aquisição de dados no interior de uma caixa onde se localiza o sistema. Este valor de temperatura é de grande importância devido à compensação de temperatura que é necessária na análise de deformações.

Os dados do sistema são continuamente monitorados, porém, apenas os dados que ocorrem em ventos superiores a 10 m/s são registrados. Ventos com menores intensidades foram considerados desprezíveis para avaliação de efeitos de carregamentos nas fundações das torres de transmissão.

A Tabela 2 mostra as máximas temperaturas e intensidades de ventos registradas entre os meses de Dezembro de 2007 e Janeiro de 2009 e os ventos máximos de projeto. De acordo com a NBR 5422 (ABNT, 1985), para a determinação dos esforços máximos decorrentes de ventos, a velocidade básica do vento (V_b) é determinada a partir de um mapa básico de ventos do território nacional. A velocidade de vento do projeto é calculada a partir de V_b , corrigida de modo a levar em conta o grau de rugosidade da região de implantação da linha, o intervalo de tempo necessário para que o obstáculo responda à ação do vento, a altura do obstáculo e o período de retorno

adotado. Na região das torres, a velocidade básica do vento é de 31 m/s a uma altura de 10 metros, considerando um tempo de retorno de 50 anos, tempo de integração de 10 minutos e um terreno aberto com poucos obstáculos. Na Figura 2 apresenta-se os dados de direção e intensidade do vento para a Torre 4 durante o período de monitoramento. Observa-se que as maiores intensidades de vento ocorrem nas direções de 120° e entre 200° e 250°.

Tabela 2 – Temperatura e ventos máximos de dezembro de 2007 a janeiro de 2009 e vento máximo de projeto.

Torre	Vento máximo (m/s)	Direção de ocorrência do vento máximo (°)	Temperatura máxima (°C)	Vento máximo de projeto (m/s)
1	23,81 – Set/08	115°	35,8 – Set/08	45,31
2	35,18 – Ago/08	128°	34,19 – Jan/09	45,36
3	34,2 – Out/08	70°	36,16 – Jan/09	45,66
4	26,26 - Set/08	200°	41,1 – Jan/08	45,24
5	20,83 – Jan/09	142°	34,58 – Dez/07	45,97
6	24,5 – Abr/08	265°	40,82 – Nov/08	46,42

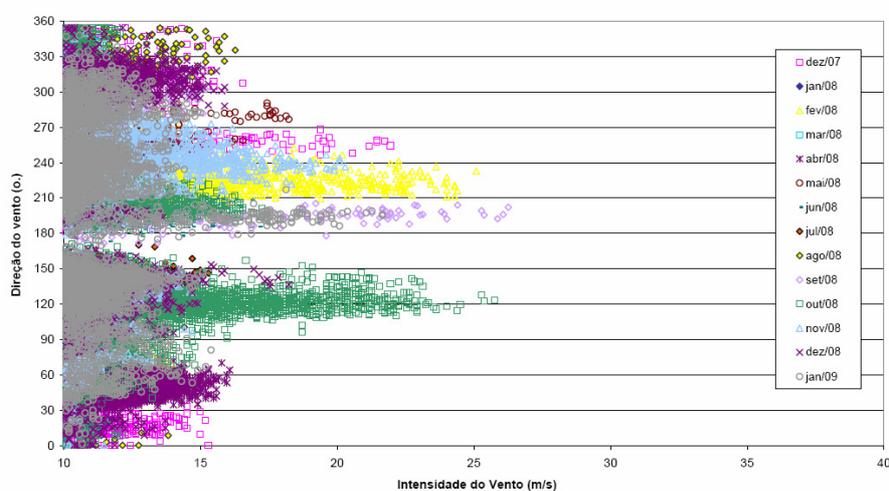


Figura 2 – Dados de intensidade e direção do vento para a Torre 4.

Os strain gages não fornecem diretamente o valor das deformações, o valor lido é em mV/V (milivolt por volt) e é necessário fazer uma análise para a obtenção das deformações. Em laboratório onde o comprimento dos cabos é pequeno e onde não há grandes variações de temperatura é possível se calcular a deformação a partir da relação direta entre a constante do strain gage e a variação de suas leituras. Porém, no sistema de monitoramento instalado nas torres de transmissão há grandes variações de temperatura e longos comprimentos de cabos. A determinação da deformação não pode ser feita como a de laboratório, é necessária uma análise para se compensar os efeitos de temperatura e comprimento dos cabos. O presente trabalho utilizou as recomendações de Dally et al (1993, 2005).

No presente trabalho serão analisados os dados obtidos da Torre 4, situada no município de Guaira com tensão de 138 kV. A Figura 3 apresenta as leituras da Ponte 6 da torre e os valores de temperatura na caixa de leitura. Nota-se que variações de temperatura podem provocar expansão e contração de materiais metálicos que são registrados pela instrumentação como deformações da peça.

Outra questão importante a ser levantada é o fato de que o strain gage está sujeito a ações cíclicas: variações de temperatura e carga-descarga. Em situações como estas ocorre o fenômeno da histerese e uma possível mudança de zero. A Figura 4 apresenta a histerese e mudança de zero para a Ponte 6 da Torre 4. Observa-se que existe um comportamento linear no carregamento e descarregamento devido a temperatura e um desvio de linearidade entre o carregamento e descarregamento. Desta forma no estudo das deformações é necessário trabalhar com eventos de máximos ventos e com deformações relativas, por exemplo, o acréscimo de deformação causado por um vento de 20 m/s em relação a uma situação em que a torre está sujeita a um vento de 10 m/s. Portanto, essa questão torna a análise e filtragem dos dados fundamental para a obtenção de informações coerentes entre vento e deformação.

Na Figura 5 apresenta-se a variação de direção e intensidade do vento e deformação axial registrada em uma das abas do montante do pé D da Torre 4 para um período curto de 7 minutos no dia 19 de setembro de 2008. Os valores de temperatura e deformação são valores relativos, relacionados a um tempo zero, considerado às 20h36 do dia 19 de setembro. Neste período a variação de temperatura foi de menos de 1 grau, a direção do vento é igual a 200° mudando para 150° no último minuto analisado e a velocidade do vento varia entre 10 e 26 m/s. Os valores de deformação estão compensados do efeito da temperatura. Observa-se que o aumento da velocidade do vento, de 10 m/s para 26 m/s, provoca um acréscimo de deformação de cerca de 15 mS. Como cada elemento estrutural tem suas abas monitoradas em separado por pontes de wheatstone, para a determinação da deformação final do montante, realiza-se a média das deformações das duas abas. No evento ocorrido em 19 de dezembro a deformação apresentada pela ponte 8 foi de 5 mS. Portanto, a deformação média do montante do pé D resulta em 10 mS.

A partir das deformações medidas na estrutura podem ser determinadas as tensões atuantes utilizando a relação $s = e.E$. O módulo de elasticidade dos perfis metálicos foi determinado em laboratório a partir de peças de reposição das torres através de ensaios de compressão axial. O valor do módulo elástico é de 206 GPa. As forças atuantes na estrutura podem ser determinadas a partir das tensões e áreas dos elementos solicitados. A Tabela 3 apresenta as forças atuantes para um dado valor de deformação para o montante da Torre 4. Para uma deformação de 10 mS a força axial de tração aplicada no montante é de 9.807 N.

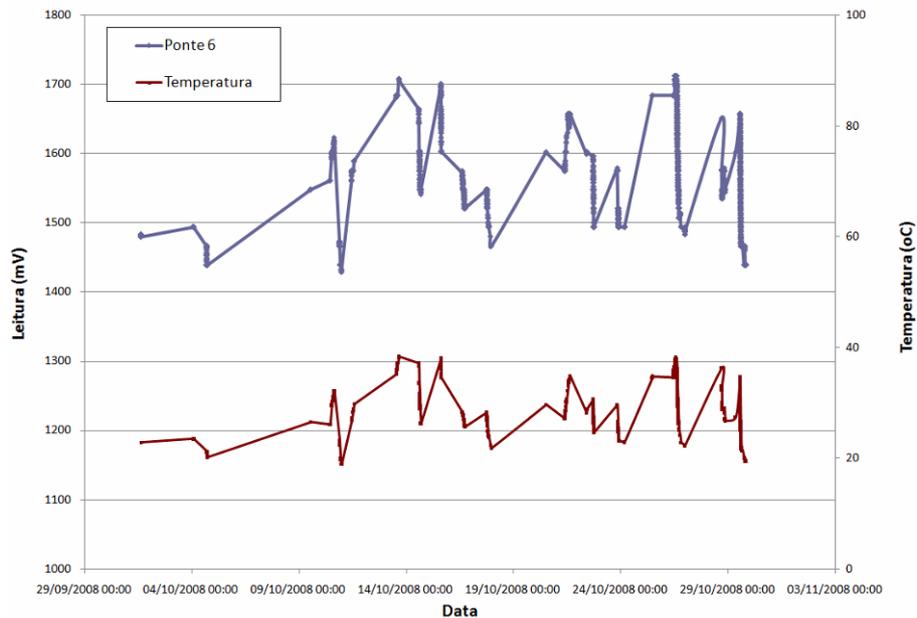


Figura 3 – Leitura da ponte 6 e temperatura no mês de outubro de 2008 para a Torre 4.

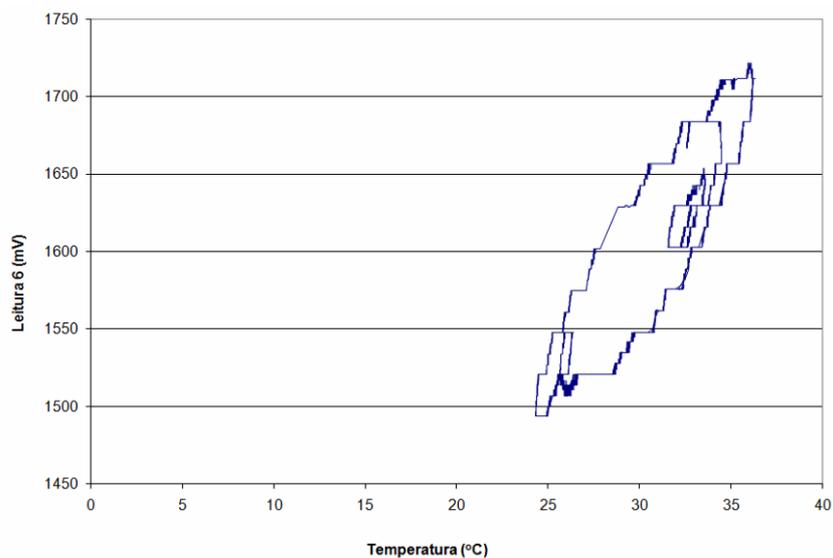


Figura 4 – Histerese observada na Ponte 06 da Torre 04.

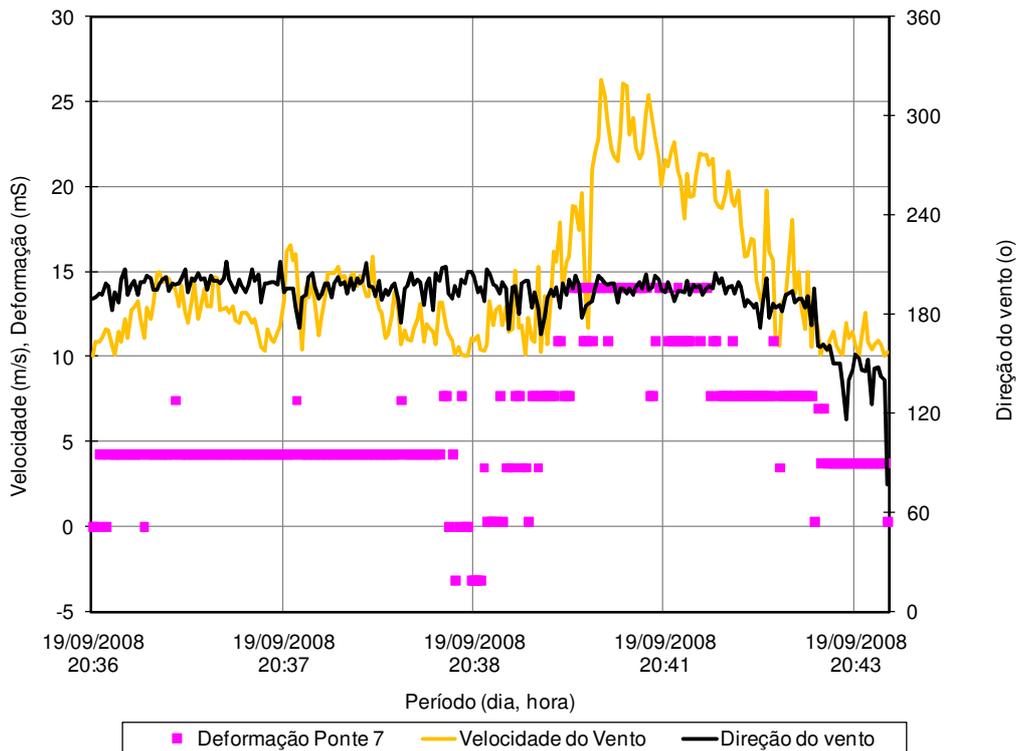


Figura 5 – Variação da velocidade e direção do vento e deformação axial em uma das abas do montante do pé D (Ponte 7) para a Torre 4.

Tabela 3 – Forças atuantes em função das deformações na Torre 4.

Deformação (μS)	Forças atuantes no montante (tf)	Forças atuantes no montante (N)
10	1	9.807
20	2	19.614
30	3	29.421
40	5	49.035
50	6	58.842
100	11	107.877
200	23	225.561
300	34	333.438
400	46	451.122
500	57	558.999

5.0 - MODELAGEM NUMÉRICA

As torres instrumentadas foram modeladas no programa TOWER, utilizando dados fornecidos pela COPEL, para análises em diferentes condições de carregamento. Foram geradas árvores de carregamento adotando velocidade de vento entre 20 m/s e 30 m/s variando de 2 em 2 m/s e entre 30m/s e 50m/s, variando de 5 em 5 m/s. Foram adotados também ventos atuando de 0° a 360° variando de 10° em 10°, para cada uma das velocidades de vento utilizadas no projeto. Tendo como base a NBR-5422 “Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica”, foram geradas árvores de carregamentos seguindo todos os critérios normativos recomendados, resultando em um total de 360 hipóteses que são executadas no software.

Para esta análise, os pés das torres foram considerados engastados no solo. As cantoneiras das torres foram modeladas como elementos de viga. Para a torre 4 totalizam 528 elementos. A Figura 6 apresenta a convenção utilizada para a árvore de carregamento. Para cada hipótese analisada foram obtidos os resultados teóricos para as forças axiais atuantes nas barras instrumentadas de cada torre, possibilitando a comparação com os dados experimentais. A Figura 7 ilustra os resultados obtidos para o pé D da torre 4, incluindo o peso-próprio da estrutura. Os dados são apresentados em coordenadas polares, permitindo avaliar para cada direção e intensidade de vento o esforço axial na peça. Pode-se observar que nas direções em que o vento atua ortogonalmente às linhas de transmissão o esforço axial é maior ou menor dependendo da posição do pé em relação aos demais. Em situações extremas, observa-se a inversão dos resultados indicando a presença de esforços de tração na peça.

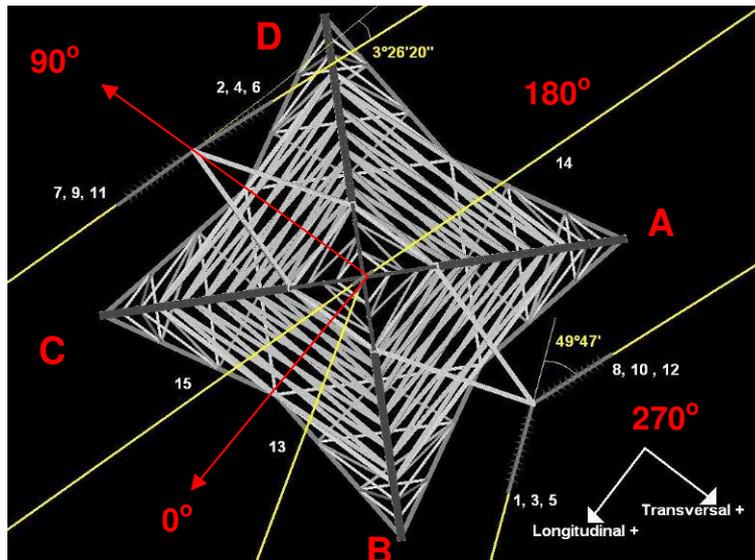


Figura 6 – Convenções da árvore de carregamento.

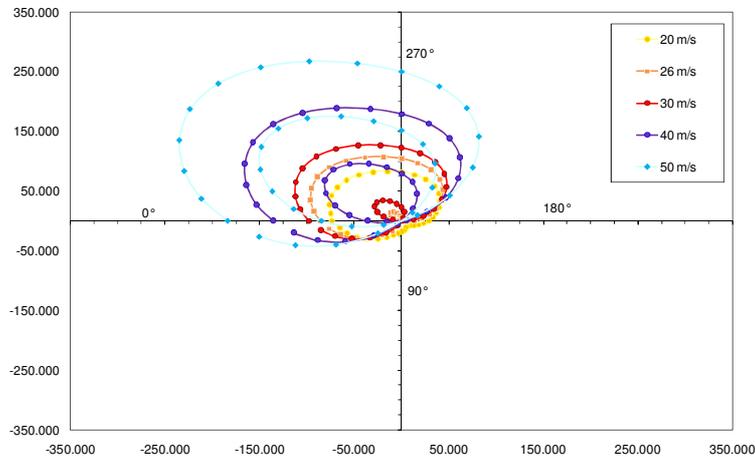


Figura 7 – Ângulo de vento (graus) versus carregamento (Newtons) do montante do pé D da Torre 4.

6.0 - DISCUSSÃO DOS DADOS

O vento de projeto desta torre é de 45,24 m/s. As fundações metálicas das torres foram projetadas levando-se em consideração os efeitos de: volume de terra; segurança ao arrancamento; momento devido às cargas horizontais; momento estabilizante; e compressão do solo. Nas memórias de cálculo dos projetos de torre de transmissão os valores encontrados pra forças de tração e compressão atuantes na fundação da Torre 4 foram de 37 tf (362.859 N) e 40 tf (392.280 N), respectivamente tração e compressão. Na Tabela 4 apresenta-se os esforços máximos de tração e compressão determinados pelo programa TOWER para cada pé da torre 4 para o vento de 45 m/s. Observa-se que os esforços são distintos em cada montante. Os maiores esforços de compressão e tração ocorrem nos pés B e D, respectivamente, quando o vento atua na direção de 50°. Comparando-se os valores de projeto com os máximos esforços obtidos pelo TOWER tem-se fatores de majoração das cargas de 1,32 e 1,43, para compressão e tração, respectivamente.

Tabela 4 – Esforços máximos determinados através do programa TOWER.

Elemento (montante)	Intensidade vento (m/s)	Compressão		Tração	
		Direção (°)	Esforço (N)	Direção (°)	Esforço (N)
Pé A	45 m/s	130°	-287.912	310°	169.943
Pé B	45 m/s	50°	-296.785	230°	112.733
Pé C	45 m/s	310°	-212.186	130°	244.767
Pé D	45 m/s	230°	-154.608	50°	253.541

O vento máximo observado na Torre 4 durante o período de monitoramento foi de 26,26 m/s na direção de 200° (Figura 2). Esse evento, ocorrido em setembro de 2008, provocou uma deformação média de 10 mS no montante

do pé D desta torre, o que equivale a uma força de tração de 9.807 N. O registro dos esforços não leva em consideração o peso próprio da estrutura. Como a estrutura tem peso aproximado de 53.000 N, o que confere um esforço médio de compressão de 13.250 N em cada pé, resulta para o montante do pé D 3.443 N de compressão. De acordo com o modelo numérico, um vento de 26 m/s na direção de 200° provoca na torre um esforço de compressão de 2.713 N (Figura 7). A diferença é pequena e em parte é explicada pelos esforços causados pela disposição geométrica dos cabos em relação à torre e que não foram considerados na distribuição do peso próprio.

7.0 - CONCLUSÃO

A determinação dos esforços provocados pelo vento nos elementos estruturais e fundações de torres de transmissão é fator importante para o projeto destas estruturas. Para a obtenção das cargas aplicadas em fundações de torres de transmissão foram instrumentadas 6 torres de transmissão localizadas em pontos distintos no Estado do Paraná. Este trabalho apresentou a análise de esforços resultantes de um vento de 26 m/s na torre do tipo CR de 138 kV localizada em Guaira.

Os registros de campo indicaram para o vento de 26 m/s esforços compatíveis com valores teóricos obtidos através da modelagem numérica com o programa TOWER. Os dados obtidos até o momento compreendem um período de um ano sendo necessário a continuidade dos registros para a avaliação de eventos mais extremos.

8.0 - AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pelos subsídios para a importação, constantes da Lei 8010/90, L.I. 07/0834353-5, LI 07/2326133-1 (2º embarque), 07/2578455-2 (1º embarque), LI 07/2326134-0 e LI 05/1494138-0, ao LACTEC e à ANEEL, pelo financiamento e infra-estrutura para a condução deste projeto de pesquisa.

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1985). NBR 5422 – Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica – Procedimentos.
- (2) ASHCAR, R. (1999). Recomendações e informações técnicas sobre fundações de linhas de transmissão, VIII ERLAC- Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ. Ciudad del Leste.
- (3) BAZAN, H. V.; BOSZCZOWSKI, R. B.; LIGOCKI, L. P. (2008). RT LAME.007.2008-R0. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC. Curitiba.
- (4) BOSZCZOWSKI, R. B., LIGOCKI, L. P., BAZAN, H. W., KORMANN, A. C. M., PERNA, B. P. J. C. N. Monitoramento de Torres de Transmissão para Avaliação dos Esforços Aplicados à Fundação In: XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2008, Búzios. Anais do COBRAMSEG. ABMS, 2008.
- (5) DALLY, J. W.; RILEY, W. F.; MCCONNELL, K. G. (1993). Instrumentation for Engineering Measurements, Second Edition.
- (6) DALLY, J. W.; RILEY, W. F. (2005). Experimental Stress Analysis, Fourth Edition.
- (7) DANZIGER, F.A.B. (1985). Práticas de Projeto e Execução de Fundações de Torres de Linhas de Transmissão. I Encontro Regional sobre Linhas de Transmissão (COBEI/CELG), Goiânia, Brasil.
- (8) MELFI, A.J.; PICCIRILLO, E.M.; NARDY, A.J.R. (1988). Geological and Magmatic Aspects of the Paraná Basin – an introduction. In: The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin, petrogenetic and geophysical aspects. Cap. 1, p.1-13.
- (9) ORLANDO, C. (1985). Fundações Submetidas a Esforços Verticais Axiais de Tração. Análise de Provas de Carga de Tubulões em Areias Porosas, Tese de M.Sc., Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil.
- (10) STEPHAN, J.C.S.; COSTA, C.F. (2007). Projeto, escolha de tipo e reforço de fundações de suportes de linhas de transmissão – recapacitação e confiabilidade. XII ERIAC- Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ. Foz do Iguaçu.