



Estudo de Caso de Tombamento de Torre de Transmissão de Energia Elétrica no Sudoeste do Paraná Durante Evento de Microexplosão
Study of an Energy Transmission Tower Blow
Down Over Southwest Paraná During a Microburst Event

Leonardo Calvetti¹; William Ferreira Coelho¹; Cesar Beneti²;
Rafael Toshio Inouye²; José Eduardo Gonçalves²; Bianca Maske² & Reverton Luis Neundorf²

¹Universidade Federal de Pelotas,

Centro de Pesquisas e Previsões Meteorológicas, Av. Ildefonso Simões Lopes, 2751, 96060-290, Pelotas, RS, Brasil.

²Sistema Meteorológico do Paraná, Av. Francisco H. dos Santos, 210, Curitiba, PR, Brasil.

E-mails: lcalvetti@ufpel.edu.br; williamufpel@gmail.com; cesar.beneti@simepar.br;
rafael.toshio.simepar@gmail.com; jose.eduardo@simepar.br; bianca.maske@gmail.com; revertonluis@gmail.com

Recebido em: 18/09/2017 Aprovado em: 16/10/2017

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2017_3_139_146

Resumo

Este trabalho tem por objetivo estudar um evento de tombamento de torre de suporte de Linha de Transmissão de Energia Elétrica (LT) ocorrido no dia 12 de julho de 2016 em Cascavel – PR devido a ocorrência de uma microexplosão. Para o estudo foram utilizados dados de anemômetros sônicos instalados em quatro níveis de altura (10m, 22m, 33m e 44m) da torre de transmissão número 37 da LT Toledo-Cascavel na região oeste do Paraná. Para análise espacial das rajadas e das assinaturas de mesoescala foram utilizados dados de velocidade radial e refletividade do radar meteorológico banda S Doppler de dupla polarização do Simepar instalado em Cascavel. As análises da assinatura de mesoescala principalmente da velocidade radial do radar Doppler indicaram a presença de uma microexplosão a qual gerou rajadas próximas de 45 ms⁻¹. O registro no anemômetro na torre situada a 300m de distância registrou uma rajada de 32,6 m.s⁻¹. A microexplosão foi gerada por uma supercélula que se formou no Paraguai e se propagou zonalmente até o oeste do Paraná durante 5 horas com velocidade de propagação de 18,5 ms⁻¹. Pela análise dos dados de radar no momento do tombamento da torre não foram identificadas assinaturas de tornado.

Palavras-chave: rajadas de vento; anemômetros; radar meteorológico; torres de transmissão de energia

Abstract

The objective of this work is to study an event of microburst that blow down a tower of electric transmission line on July 12, 2016 in Cascavel – PR. For the study, data of sonic anemometers installed in four-height levels (10m, 22m, 33m and 44m) of the tower 37 on Toledo-Cascavel line in the western Paraná were used. For the spatial analysis of the microburst and mesoscale signatures it were used radial velocity and reflectivity data of the double-polar Doppler S-band radar of Simepar installed in Cascavel. At the moment of the tower fall, it was found a signature of a microburst in the radial velocity which generated wind gusts approximately to 45 ms⁻¹. The anemometer, located in a tower 300m away of the blow down tower, recorded a 32.6 ms⁻¹ wind gust. The microburst was generated by a supercell initiated in Paraguay and propagated zonally to the west of Paraná during 5 hours at a propagation velocity of 18.5 ms⁻¹. It was not found tornado signature in the radar data near the time of tower fall.

Keywords: wind gusts; storms; weather radar; power transmission towers

1 Introdução

A área oeste das regiões sul e sudeste do Brasil é sistematicamente atingida por rajadas de vento muito intensas (acima de 20 ms^{-1}) ocasionadas pela passagem de linhas de instabilidade, supercélulas e sistemas convectivos em geral (Kneib, 2004; Beneti, 2012). Como as frentes de rajada possuem extensão de poucos quilômetros, durante eventos de queda de torres não há registro de rajadas compatíveis com o tombamento de linhas de transmissão (LTs), dificultando a identificação da real magnitude da rajada que provocou a carga de vento suficiente para derrubar as estruturas. Estima-se que 80% dos casos de falhas em LTs provocadas por fenômenos meteorológicos no mundo sejam decorrentes de tornados e correntes descendentes explosivas (Aboshosha & Damatty, 2015).

Linhas de transmissão são obras de engenharia que atravessam extensas áreas com o objetivo de transmitir energia elétrica de uma unidade geradora de energia para uma unidade distribuidora, compostas por torres metálicas e cabos condutores. As torres utilizadas são metálicas de dois tipos, autoportantes as quais possuem quatro pontos de sustentação (fundações/sapatas), e estaiadas onde uma torre com apenas um ponto de fixação ao solo é sustentada por diversos cabos (Gheno, 2014). As torres ainda são classificadas quanto a sua função: suspensão, onde a torre serve para manter os cabos suspensos, e de ancoragem e de terminal as quais servem para suportar toda a tração das linhas de um determinado lote de torres (Gheno, 2014). Por esse motivo, conhecer o carregamento devido a força do vento é fundamental para elaborar um correto projeto de construção de torres (Savory *et al.*, 2001). Atualmente, boa parte dos projetos de LT e de torres que às suportam consideram a norma NBR 6123 da ABNT e normas internacionais como a IEC 60826 (IEC 60826, 2003).

A norma NBR 6123 da ABNT estipula que a velocidade básica do vento é uma medida de rajada em 3 segundos, excedida uma vez em 50 anos, medida a 10 metros de altura. A força exercida pela rajada de vento na estrutura, denominada de carregamento do vento, depende de uma série de propriedades, não só do vento mas também das dimensões da estrutura, da turbulência atmosférica, da rugosidade do terreno e do tipo

de suporte da estrutura, estaiada ou não. No caso de linhas aéreas de transmissão, a determinação é ainda mais complexa, pois o dimensionamento das torres deve considerar cabos aéreos suspensos que interconectam as estruturas e, de forma não incomum, provocam o tombamento em cascata das estruturas.

Para a prática de engenharia, as propriedades do carregamento de vento em estruturas são consideradas a partir de diversas simulações em túneis de vento, onde os efeitos da intensidade, duração e direção do vento são avaliados nas estruturas de projeto (ISO 4354, 2009). Porém, diante da dificuldade na escolha de um valor de rajada de vento para qual as estruturas devem ser projetadas, conforme a região e tempo de retorno da rajada, os eventos de queda de torres tornam-se um desafio à engenharia (Hawes *et al.*, 2012). Não faz sentido construir estruturas que suportem tornados EF4 ou EF5 (onde as velocidades do vento atingem 74 e 90 ms^{-1} , respectivamente) no Brasil, se este tipo de fenômeno é raríssimo, o que ocasionaria gastos desnecessários no projeto. Por outro lado, subdimensionar a estrutura acarreta em custos elevados ocasionados da interrupção de transmissão e reposição de torres.

Por esse motivo, foi realizado um projeto de pesquisa P&D Aneel onde anemômetros sônicos foram instalados em quatro torres de transmissão de energia da Companhia Paranaense de Energia (Copel), na região oeste do Paraná. As torres foram escolhidas dentro de um raio de 40 km distante do radar meteorológico banda S de dupla polarização do Sistema Meteorológico do Paraná (Simepar) localizado no município de Cascavel-PR para melhor identificar as assinaturas de mesoescala das tempestades. Essas medições foram realizadas no período de fevereiro de 2016 a janeiro de 2017. O objetivo deste trabalho foi identificar e analisar o fenômeno que causou o tombamento de uma torre de transmissão de energia elétrica ocorrida no dia 12 de julho de 2016, no município de Cascavel-PR.

2 Metodologia e Dados

Para análise das rajadas de vento foram instalados anemômetros em quatro torres de transmissão de energia situadas na região oeste

do estado do Paraná (Figura 1), a qual possui um histórico de quedas de torres de transmissão devido à força do vento. Também foi considerado a presença de sinal de celular para transmissão dos dados e a distância inferior a 40 km do radar meteorológico de Cascavel, com o objetivo de melhor analisar as assinaturas de mesoescala das tempestades, inclusive em baixa altitude. Foram instalados dois tipos de anemômetros, o modelo 2D WindSonic4-L do fabricante Campbell Scientific e o modelo 3D 1590-PK-020 do fabricante Gill Instruments (Tabela 1). Enquanto o sensor 2D mede a direção e a velocidade do vento na horizontal, o 3D conta com medições das três componentes: zonal (u), meridional (v) e vertical (w). A rajada de vento medida é considerada de acordo com as especificações do manual de instrumentação da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2014), ou seja, valor médio de 3 segundos com uma frequência de pelo menos 1 Hz. A rajada foi registrada como o valor máximo de cada medida de 3 segundos durante o intervalo de 10 minutos.

Especificações	Anemômetro 2D WindSonic 4L Campbell		Anemômetro 3D Gill 1590-PK	
	Velocidade	Direção	Velocidade	Direção
Range	0 a 60 ms^{-1}	0 a 359°	0 a 45 ms^{-1}	0 a 359°
Acurácia	$\pm 2\%$ a 12 ms^{-1}	$\pm 3^\circ$ a 12 ms^{-1}	$< 1,5\%$ a 12 ms^{-1}	$\pm 2^\circ$ a 12 ms^{-1}
Resolução	0,01 ms^{-1}	1°	0,01 ms^{-1}	0,1°
Frequência de Operação	4 Hz	4 Hz	4 Hz	4 Hz

Tabela 1 Especificações técnicas dos anemômetros conforme os manuais dos respectivos fabricantes.

3 Resultados e Discussão

A torre de transmissão N° 37 da linha Toledo-Cascavel, localizada a 300 metros oeste da torre Cascavel/Parque Industrial, instalada no município de Cascavel-PR (Figura 1), tombou entre 23:30 UTC de 12/07/2016 e 00:10 UTC do dia 13/07/2016, provocando interrupção de transmissão de energia da linha (Figura 2).

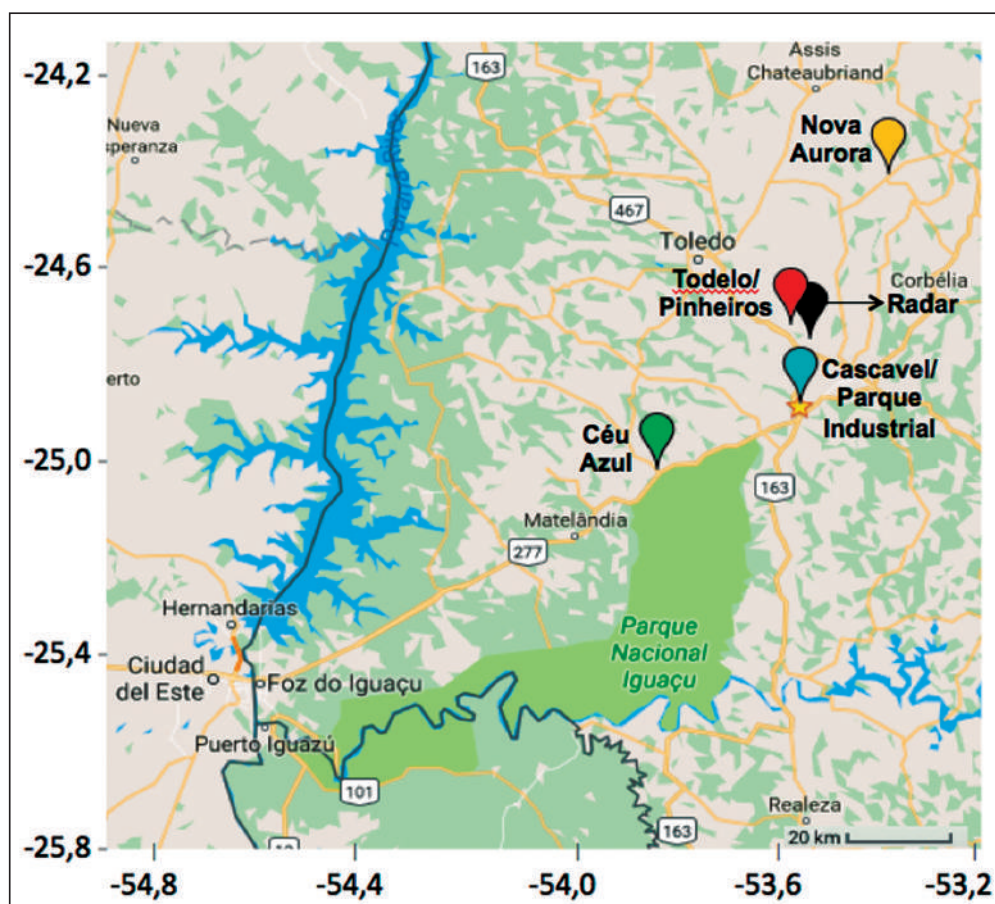


Figura 1 Localização das torres de transmissão de energia da COPEL onde foram instalados os anemômetros e o radar meteorológico banda S do Simepar em Cascavel – PR (Fonte: Google Maps).



Figura 2 Torre de transmissão da Copel tombada na região de Cascavel-PR devido a ação de uma microexplosão no dia 12 de julho de 2016 às 23:30 UTC (Fonte: Copel GeT).

Às 00:10 UTC de 13/07/2016 foi registrada uma velocidade de rajada de $32,6 \text{ ms}^{-1}$ no anemômetro instalado a 44 m na torre Cascavel/Parque Industrial a qual fica a 300 m da torre que tombou (Figura 3). Esse pico foi antecedido por um registro de $26,4 \text{ ms}^{-1}$ às 00:00 UTC e sucedido por outro de $28,6 \text{ ms}^{-1}$ às 00:20 UTC, indicando um intenso carregamento de vento na torre por um período de pelo menos 30 minutos.

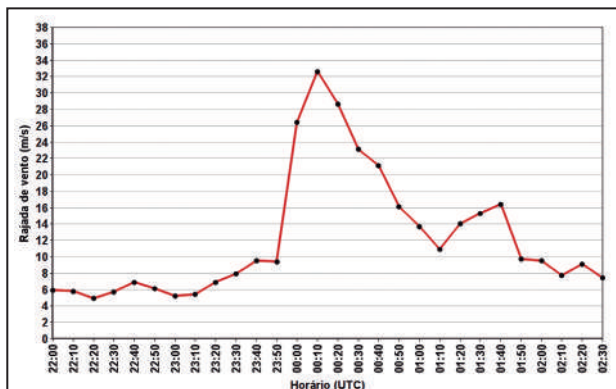


Figura 3 Valores de rajadas de vento registradas pelo anemômetro sônico 3D instalado na torre Cascavel/Parque Industrial para o final do dia 12/07/2016 e início de 13/07/2016; o valor máximo foi de $32,6 \text{ ms}^{-1}$.

Na engenharia de projetos de linhas de transmissão, as estruturas de torres são construídas para suportar o carregamento de vento com valores similares aos registrados no experimento (IEC 60826, 2003). Logo, fez-se necessário investigar o fenômeno meteorológico incidente e a magnitude real das rajadas. Deste modo, foram analisados dados de velocidade radial e refletividade do radar meteorológico para os horários próximos a queda da torre de transmissão.

A supercélula se formou sobre a região de atuação de um cavado localizado entre o Paraguai e o oeste dos estados do Mato Grosso do Sul, Paraná e Santa Catarina (Figura 4). Este cavado estava conectado a passagem de um sistema frontal no oceano Atlântico próximo a costa da Argentina, Uruguai e sul do Brasil (Figura 5) gerando muita instabilidade na região. Ambos sistemas estavam associados por uma região de relativa baixa pressão ao nível médio do mar (Figura 5). O vento instantâneo da reanálise em 700 mb (Figura 4), nível muito utilizado para indicar as direções de deslocamento dos sistemas de mesoescala, indicava um escoamento quase zonal para leste, exatamente a direção em que a supercélula se propagou.

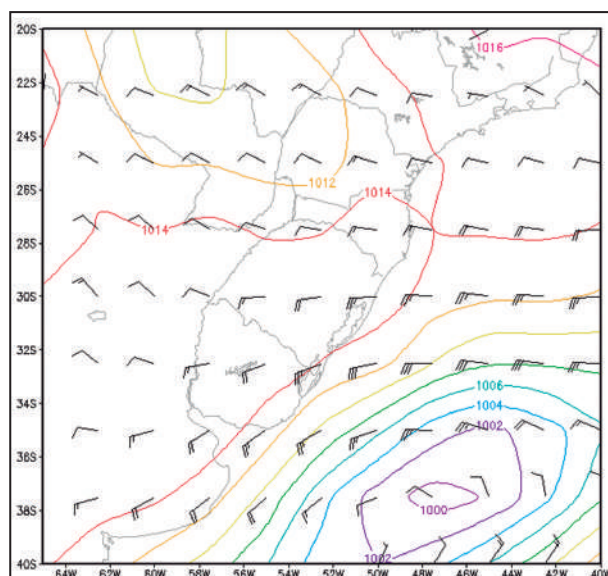


Figura 4 Pressão reduzida ao nível do mar (contorno) e barbelas de vento em 700 mb de 00 UTC do dia 13 de julho de 2016. (Reanálise do NCEP; Kanamitsu *et al.*, 2002).

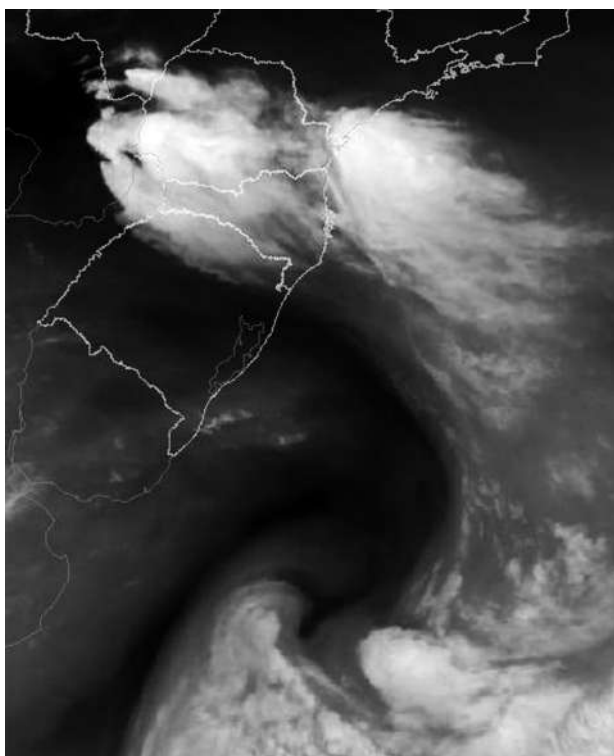


Figura 5 Imagem do canal vapor d'água do satélite Goes 13 para o dia 12 de julho de 2016 às 23 30 UTC (Cptec/Inpe).

A partir das imagens de refletividade observou-se que a tempestade que provocou o tombamento da torre se formou na região central do Paraguai por volta das 21:00 UTC de 12/03/2016 (Figura 6a). Sua propagação ocorreu aproximadamente zonal por 334 km em 5 horas, desde a cidade de Vaqueria no Paraguai até a cidade de Nova Laranjeiras no Paraná (Figura 6), com velocidade média de propagação de $18,5 \text{ ms}^{-1}$, ou seja, muito rápida se comparada com a propagação de linhas de instabilidade (LI) típicas da região com valores próximos de 11 ms^{-1} (Beneti, 2012). Durante a propagação da tempestade sobre o oeste do Paraná, foram registrados picos de refletividade entre 67 e 71 dBZ. Esses valores são típicos de tempestades de grande severidade, as quais provocam intensas frentes de rajadas, chuvas de forte intensidade e até mesmo ocorrência de granizo em solo (Held *et al.*, 2010; Markowski & Richardson, 2010; Fabry, 2015).

Para estimar a evolução da intensidade da tempestade, foi utilizado o valor máximo da refletividade no volume amostrado pelo radar de Cascavel com o alcance de 240 km (Figura 7).

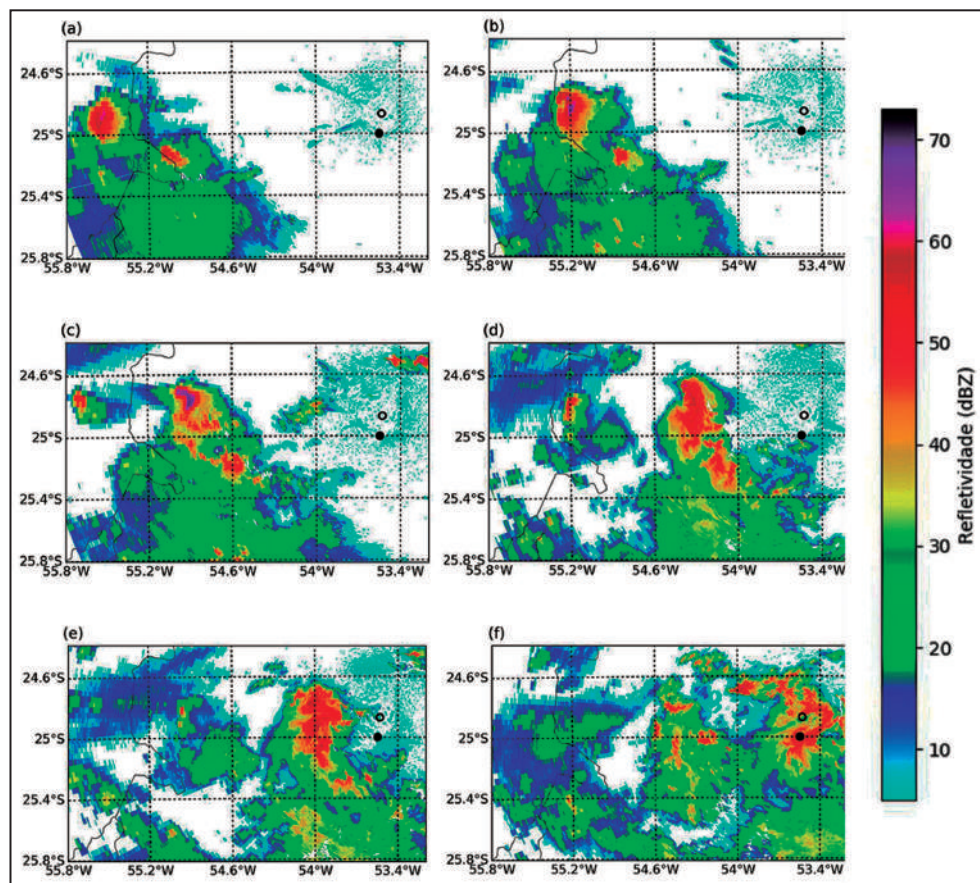


Figura 6 Sequência de imagens de refletividade (PPI 1.4) do radar de Cascavel para os horários de 21:00 UTC (a), 21:30 UTC (b), 22:00 UTC (c), 23:00 UTC (d) e 23:30 (e) de 12/07/2016 e 00:08 UTC (f) de 13/07/2016. O círculo aberto indica a posição do radar e o círculo fechado a localização da torre tombada.

Enquanto picos de até 71 dBZ foram observados entre 21:40 e 22:10 UTC, no momento da queda da torre o valor máximo de refletividade foi de 68 dBZ às 00:00 UTC. A dissipação ocorreu próximo de 01:00 UTC do dia 13/07/2016, cerca de 80 km à oeste do radar com valores próximos a 50 dBZ. Por esta sequência conclui-se que em mais de 90% do tempo de vida a tempestade se propagou com características de tempestade severa o que somente ocorre em supercélulas ou sistemas convectivos de grandes proporções (Markowski & Richardson, 2010).

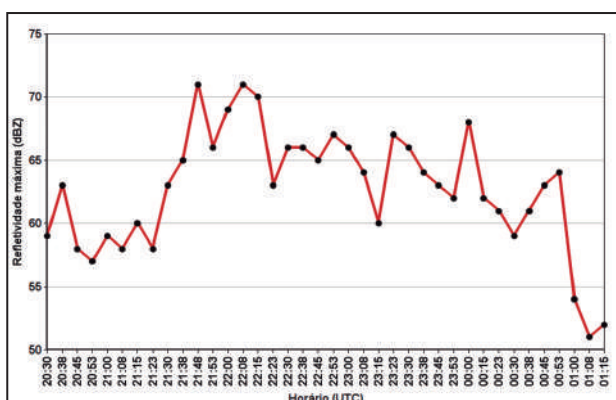


Figura 7 Refletividade Máxima obtida no volume de 240 km de alcance do radar meteorológico de Cascavel durante o ciclo de vida da supercélula dos dias 12 e 13/07/2016.

A partir dos dados de velocidade radial obtido pelo radar de Cascavel foi possível observar a presença de um mesociclone durante o ciclo de vida da tempestade (Figura 8), um dos requisitos dinâmicos mais aceitos para caracterizar um fenômeno como supercélula (Rotunno & Klemp, 1982). A assinatura do mesociclone pode ser observada no campo de velocidade radial em praticamente todo o ciclo de vida da supercélula e desaparece no momento de queda da refletividade máxima, cinco horas depois da sua gênese.

No momento próximo da queda da torre de transmissão, é possível observar uma assinatura típica de microexplosão, com um núcleo de rajadas acima de 45 ms⁻¹ na direção do radar e da linha de transmissão (Figura 8).

Para analisar as velocidades do vento na região da torre de transmissão Cascavel/Parque Industrial e da torre próxima que tombou devido às rajadas de vento, foram examinados vários cortes verticais de refletividade e velocidade radial. No presente trabalho foram utilizadas figuras da seção vertical no azimute de 268°, o qual passa transversalmente a supercélula que atingiu as torres de transmissão. Às 23:37 UTC de 12/07/2016 observa-se uma forte corrente descendente de vento, a partir da altura de 2

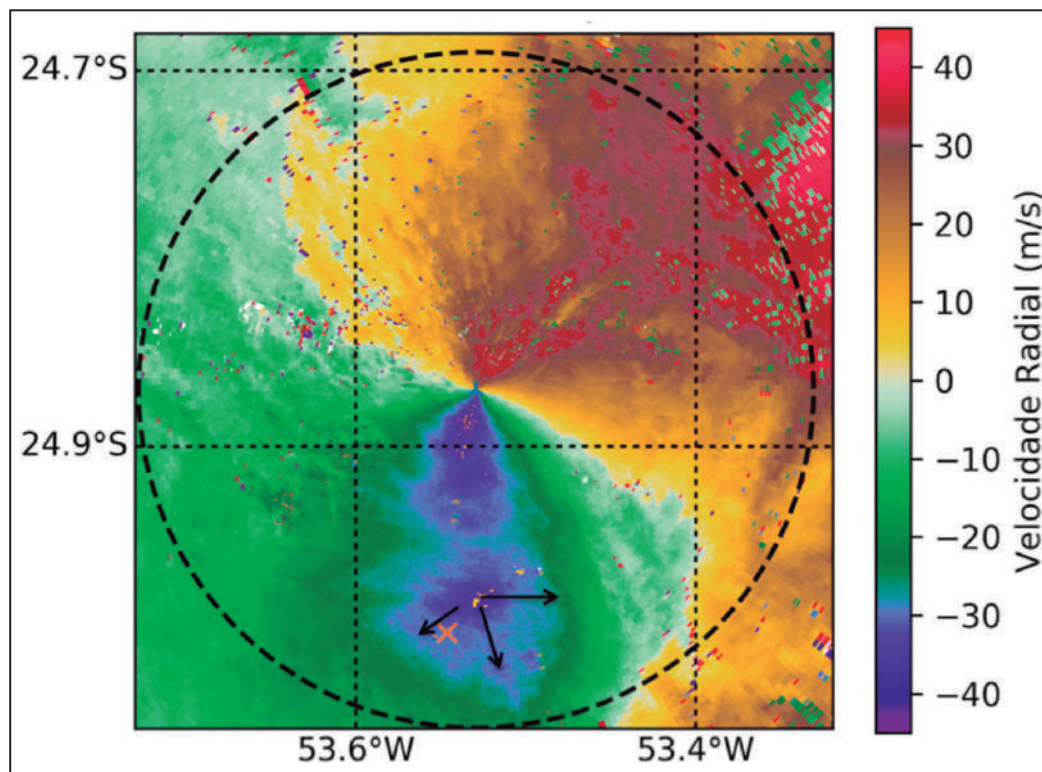


Figura 8 Velocidade radial, PPI 0,5° às 00:23 UTC de 13/07/2016; o símbolo “X” laranja indica a localização da torre 37 tombada durante a microexplosão. As setas representam a direção da microexplosão.

km até a superfície (Figura 9). No volume seguinte, às 23:45 UTC (Figura 10), a área de fortes correntes descendentes avança rapidamente em direção ao radar e as torres com valores acima de 40 ms⁻¹ entre 1,5 km de altura até a superfície, o que demonstra a interceptação da microexplosão na área da torre que tombou. Desta forma, pode-se determinar a mais provável causa da queda da torre: rajadas de vento acima de 45 ms⁻¹ geradas por uma microexplosão originária de uma supercélula que se propagou desde o Paraguai até o oeste do Paraná. Em tempestades supercelulares com duração similar a esta, a

ocorrência de tornados é relativamente comum, podendo ser detectados nas variáveis velocidade radial, refletividade e correlação das refletividades obtidas por polarização horizontal e vertical (Brangi & Chandrasekar, 2001; Ryzhkov et al., 2005). Porém, nos horários próximos a queda da torre não foram detectados sinais de formação de tornados. O intervalo entre as amostragens feitas pelo radar foi de 7 minutos e, portanto, a ocorrência de tornado entre os intervalos de medição seria pouco provável, embora não impossível.

Figura 9 Seção vertical de Refletividade (a) e velocidade radial (b) no azimute de 268° do radar de Cascavel às 23:37 UTC do dia 12 de julho de 2017; o desenho da antena representa a localização do radar e o da torre a localização da torre de transmissão que foi derrubada.

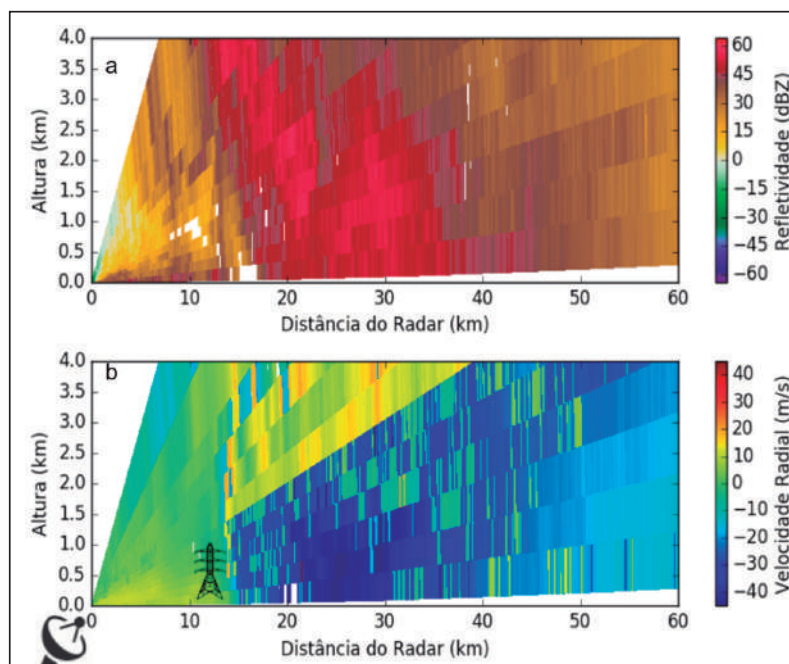
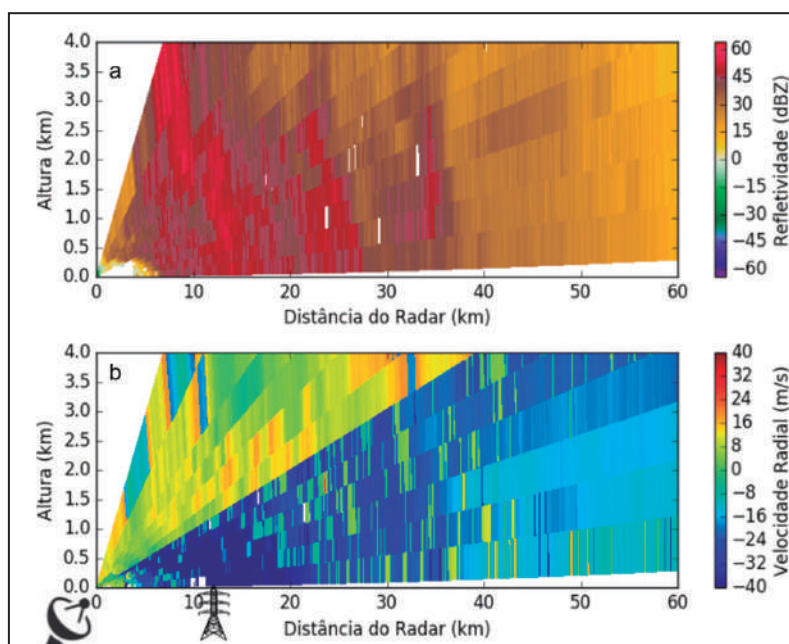


Figura 10 Seção vertical de Refletividade (a) e velocidade radial (b) no azimute de 268° do radar de Cascavel às 23:45 UTC do dia 12 de julho de 2017. O desenho da antena representa a localização do radar e o da torre a localização da torre de transmissão que foi derrubada.



4 Conclusões

No presente estudo pode-se concluir que uma microexplosão com rajadas de vento acima de 40 ms^{-1} foi a causadora do tombamento da torre de transmissão N° 37 da linha Toledo-Cascavel da Copel no município de Cascavel-PR. A análise mostrou que essa microexplosão foi gerada por uma supercélula de rápida propagação ($18,5 \text{ ms}^{-1}$) originária do Paraguai e que se dissipou depois de 5 horas em Laranjeiras do Sul, oeste do Paraná. Embora a rajada registrada no anemômetro foi de $32,6 \text{ ms}^{-1}$, pelos dados de velocidade radial do radar foi possível observar valores de até 45 ms^{-1} durante a microexplosão e, portanto, com alto poder destrutivo. Não foram detectados sinais de tornado nas imagens de dados polarimétricos do radar meteorológico de Cascavel.

Devido a elevada complexidade de medição de rajadas de vento, sugere-se a instalação de novos anemômetros em áreas de ocorrência de queda de torres e LT e, preferencialmente, em áreas próximas a radares meteorológicos, até 40 km, para que seja possível identificar novas assinaturas de fenômenos explosivos como o analisado neste projeto. Assim, futuramente será possível ter uma série consistente de estudos para melhorar as normas de construção de estruturas no Brasil.

5 Agradecimentos

Os dados de anemômetros e os estudos foram suportados pela Copel Transmissão e Geração, por meio do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento código Aneel PD6491-0259_2012.

6 Referências

Aboshosha, H. & Damatty, A.E. 2015. Engineering method for estimating the reactions of transmission line conductors under downburst winds. *Engineering Structures*, 99: 272-284.

- Beneti, C.A.A. 2012. *Caracterização hidrodinâmica e elétrica de sistemas convectivos de mesoescala*. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 131p.
- Bringi, V.N. & Chandrasekar, V. 2001. *Polarimetric Doppler weather radar: principles and applications*. Cambridge, Cambridge University Press, 636p.
- Fabry, F. 2015. *Radar Meteorology – Principles and Practice*. Londres, Cambridge University Press, 272p.
- Gheno, R.M. 2014. *Campo de velocidades gerado pela combinação de ventos convectivos e sinóticos em cabos suspensos*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de Mestrado, 127p.
- Hawes, H.; Sakamoto, Y.; Shinozaki, T.; Bertola, L.; Shin, K.-Y.; Lake, R.; McClure, G.; Ishac, M.; Kemptner Jr., L.; Menezes, R.C.R.; Herrerias, P.R.; Marais, P.; Riisio, P. & Carstairs, D. 2012. *Overhead Line Design Guidelines for Mitigation of Severe Wind Storm Damage*. Cigré Publication. Working Group B2.39.
- Held, G.; Gomes, A.M. & Naccarato, K.P. 2010. Estrutura e comportamento de tempestades supercélulas no estado de São Paulo, Brasil. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Belém, *Anais*, UFA, p. 01-07.
- IEC 60826. 2003. *Design criteria of overhead transmission lines*. Geneva, International Electrotechnical Commission, Switzerland-IEC, 9p.
- ISO 4354. 2009. *Wind Actions on Structures*. International Organization for Standardizations, 68p.
- Kanamitsu, M.; Ebisuzaki, W.; Woollen, J.; Yang, S-K; Hnilo, J.J.; Fiorino, M. & Potter. G.L. 2002. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1: 1631-1643.
- Kneib, R.O. 2004. *Estudo Observacional de Linhas de Instabilidade no estado do Paraná*. Programa de Pós-graduação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Dissertação de Mestrado, 171p.
- Markowski, P. & Richardson, Y. 2010. *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*. West Sussex, Wiley-Blackwell, 407p.
- NBR 6123 – ABNT. 1988. *Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 66p.
- Rotunno, R. & Klemp, J.B. 1982. The influence of the shear-induced pressure gradient on thunderstorm motion. *Monthly Weather Review*, 110: 136-150.
- Ryzhkov, A.V.; Giangrande, S.E.; Melnikov, V.M. & Schuur, T.J. 2005. Calibration Issues of Dual-Polarization Radar Measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22: 1138-1155.
- Savory, E.; Parke, G.A.R.; Zeinodini, M.; Toy, N. & Disney, P. 2001. Modelling of tornado and microburst-induced wind loading and failure of a lattice transmission tower. *Engineering Structures*, 23: 365-375.
- WMO, 2014. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Vol. 8, 1139p.