



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

CB/GLT/13

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA DE VENTOS DESTRUTIVOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PELA ANÁLISE DE DANOS CAUSADOS

**Daniele R. Ornelas de Lima(*)
FURNAS**

**Pedro Jourdan
FURNAS**

**Marcelo Belassiano
FURNAS**

RESUMO

Este trabalho visa apresentar os serviços da equipe de Meteorologia de FURNAS Centrais Elétricas S/A, criada pioneiramente em 1991, inicialmente para suprir as áreas de geração hidrelétrica. Atualmente supre também as atividades nas áreas de engenharia, de meio ambiente, financeira, entre outras.

São descritas as atividades voltadas à Diretoria de Operação e Manutenção, com destaque à atuação no Plano de Atendimento a Emergências de Linhas de Transmissão (PAE LTs), em eventos de desligamentos, devido a queda de estruturas de transmissão por ventos fortes oriundos de tempestades severas. As análises meteorológicas são consideradas essenciais para obtenção de isenção da parcela variável, conforme previsto no Art. 16 da Resolução Normativa da ANEEL, nº 729 de 2016, em substituição à Resolução nº 270 de 2007.

PALAVRAS-CHAVE

Meteorologia, Linhas de Transmissão, Queda de Torres, Parcela Variável, Tempestade Severa, Desligamentos Não-Programados

1.0 - INTRODUÇÃO

Os desligamentos não-programados aparecem como importantes causadores de prejuízos para as companhias de energia elétrica, com eventuais interrupções de fornecimento à população, e assim as repercussões de tais acidentes atingem âmbitos técnicos, legais, regulatórios e políticos.

No contexto dos desligamentos não-programados recorrentes no sistema elétrico, fontes naturais se destacam entre as principais causas. As descargas atmosféricas são as mais frequentes, consideradas comuns em muitos casos e normalmente eliminadas pelas proteções sistêmicas, que religam automaticamente o circuito, em questão de poucos segundos (1). As ocorrências provocadas por queimadas têm valor de impedância de falta normalmente mais elevado que os provocados por descargas atmosféricas, e normalmente são sucedidos por religamento automático não satisfatório, acarretando na necessidade de religamento manual e, às vezes, necessidade de inspeção na linha pela equipe de manutenção. Outras fontes extremamente relevantes são as ocorrências com queda de estruturas, podendo ser as causas: erosão do solo, oxidação de peças, vandalismo, enchentes ou, a mais recorrente de todas, ventos extremos (1) – esta última sendo objeto deste documento.

A principal causa de queda de estruturas de linhas transmissão de energia elétrica de FURNAS são ventos extremos, conforme Figura 1(a), sendo esta a realidade de outras empresas do setor. Para essas situações, em que se configurar caso fortuito ou de força maior, é previsto na Resolução Normativa nº 729/2016 que o agente de transmissão reivindique junto ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) que os cálculos para aplicação de

(*) Rua Real Grandeza, nº 219 – sala 406 - Bloco E – CEP 22181-035 Rio de Janeiro, RJ, – Brasil
Tel: (+55 21) 2528-5480 – Email: dornelas@furnas.com.br

descontos de receita, devido à parcela variável por indisponibilidade (PVI), considerem prazos extras, que resultam em menores descontos. Na Figura 1(b) apresenta-se ainda a distribuição entre 1970 e 2016 do número destes eventos no sistema de FURNAS.

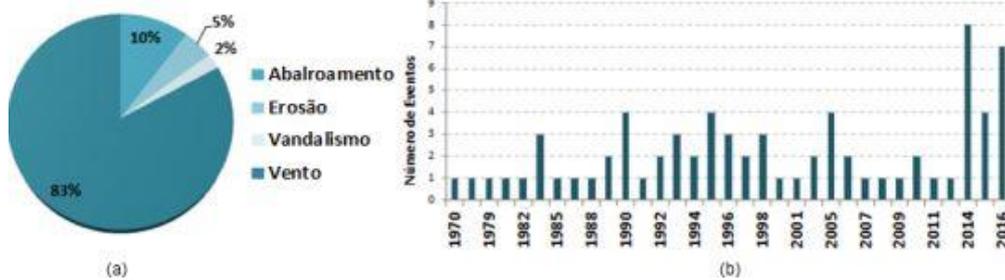


Figura 1 (a) Causas de queda de estruturas do sistema de linhas transmissão de energia elétrica de FURNAS. (b) Número de eventos de queda de estruturas ocasionadas por vento extremo no decorrer dos anos.

O sistema de transmissão de energia elétrica de FURNAS, conta com mais de 20.000 km de linhas de transmissão, configurado em linhas com tensões de 138, 230, 345, 500, 750 e ± 600 kV, que passam por oito estados e o Distrito Federal. Pela experiência adquirida em mais de vinte anos de ocorrências neste sistema de transmissão, que é um dos maiores do país e de fundamental importância para o SIN (Sistema Interligado Nacional), a empresa é hoje reconhecida pelo seu Plano de Atendimento a Emergências em Linhas de Transmissão (PAE LTs), montado através de parâmetros padronizados e que funcionam de acordo com a criticidade do sistema e suas correlações com o SIN (2).

As sistemáticas de atendimento a ocorrências emergenciais em linhas de transmissão têm como objetivo a recomposição da função o mais breve possível, restabelecendo os elevados índices de confiabilidade e disponibilidade, sempre respeitando aspectos relacionados à segurança do trabalho. Para esse desempenho, FURNAS conta com uma estrutura adequada, de recursos humanos altamente qualificados, bem como recursos materiais e equipamentos sobressalentes.

O Plano Global para Atendimento de Emergências em Linhas de Transmissão (PAE LTs) consiste de uma estratégia interna de coordenação entre diferentes áreas da Empresa no sentido de prover toda a infraestrutura de pessoal e de material para um atendimento eficiente e rápido. Formam esse plano equipes interdisciplinares de apoio administrativo, comunicação, suporte eletromecânico, telecomunicação, saúde, suprimentos e supervisão da obra, que se subdivide em canteiro, topografia, montagem, cabos e meteorologia.

Neste Informe Técnico aborda-se o trabalho realizado desde 2005 pela equipe de Meteorologia, frente às ocorrências atendidas pelo PAE LTs de FURNAS. É apresentado um exemplo prático das análises realizadas em duas etapas: em escritório, pela avaliação de imagens de satélite e de radares meteorológicos, dados de descargas atmosféricas e de estações de superfície; e em levantamento de campo, pela identificação de todos os indicadores de danos presentes. O objetivo desta avaliação é identificar o fenômeno meteorológico e estimar a velocidade máxima do vento associada à ocorrência.

FURNAS vem tendo sucesso nas caracterizações de casos fortuitos ou de força maior, que garantem isenções ou reduções de descontos de receitas por parcela variável por indisponibilidade, em ocorrências de quedas de torres de linhas de transmissão por ventos extremos. Dessa forma, por esta e outras razões, é considerado pela coordenação do PAE LTs da empresa como de grande importância a caracterização meteorológica nos relatórios técnicos de análise de tais ocorrências, conforme discutido no 3º SMEALT (Seminário de Manutenção de Equipamentos de Alta Tensão e Linhas de Transmissão), realizado em 2016 (3).

2.0 - TEMPESTADES LOCAIS, FRENTE DE RAJADA E MICRO-EXPLOÇÃO

No Brasil, a maioria dos danos causados por ventos em LTs se deve à ação das chamadas tempestades convectivas, as quais representam um exemplo de convecção profunda na atmosfera, podendo se estender por toda a troposfera (~ primeiros 15km da atmosfera). No âmbito deste trabalho, o interesse está nas tempestades severas, que são aquelas capazes de produzir rajadas de vento destrutivas (tipicamente, acima de 90km/h), e/ou grandes pedras de granizo (tipicamente, acima de 2cm), e/ou tornados, e/ou altos índices de precipitação.

Durante a fase de maturidade e de dissipação da tempestade ocorrem correntes descendentes no interior da nuvem cumulonimbus (de tempestade), que se dispersam horizontalmente na superfície, dando origem as chamadas frentes de rajada. Estas frentes em mesoescala são formadas na região limite entre as correntes de ar frio descendentes da nuvem e a massa de ar quente e úmida do ambiente, sendo caracterizadas pela ocorrência de ventos extremamente fortes em um curto período de tempo. Em alguns casos, associado à frente de rajada, pode ocorrer a chamada micro-

explosão, causando destruição numa área menor que 12,5km², que tem duração em torno de 5 minutos e ventos com intensidade de até 233km/h (4).

3.0 - CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA PELA ANÁLISE DE DANOS CAUSADOS

Uma vez que se trata de fenômeno muito localizado, conforme explicado no item anterior, há uma dificuldade de medição da rajada máxima do vento associada a um evento de queda de torres ocasionado por uma tempestade. Então, dada a necessidade de constatação da causa da ocorrência por efeito de condição adversa, a equipe de Meteorologia de FURNAS é responsável pela caracterização meteorológica destas ocorrências, incluindo a avaliação dos ventos destrutivos pela análise de danos causados.

Esse trabalho, apesar de iniciado antes do ano 2000, vem sendo aprimorado principalmente desde 2005, quando esta equipe foi inserida no PAE LTs da empresa e passou a realizar levantamento de campo na área no entorno da ocorrência. O intuito deste trabalho, juntamente com as análises realizadas em escritório, é apontar o fenômeno meteorológico responsável pelos ventos extremos e estimar a velocidade máxima do vento associada ao referido fenômeno meteorológico ocorrido, pela identificação de todos os indicadores de danos presentes.

A metodologia utilizada na avaliação dos danos baseia-se no curso da *Warning Decision Training Branch*, do NWS (*National Weather Service* - Serviço Meteorológico dos EUA), o qual foi adaptado e ministrado às equipes de Meteorologia e de Linhas de Transmissão de FURNAS pelo PhD Ernani L. Nascimento, da Universidade Federal de Santa Maria, cujas áreas de especialização são: meteorologia de mesoescala; climatologia, previsão de muito curto prazo e “nowcasting” de tempestades; dinâmica da convecção; e estudos de episódios de tornados.

3.1 Escala Fujita Aprimorada - Enhanced Fujita (EF) Scale

Tetsuya Fujita realizou, a partir dos anos 60, um intenso levantamento fotogramétrico da destruição causada por tornados e microexplosões nos EUA. Baseado na ampla experiência adquirida ele propôs uma escala de classificação de tornados por intensidade até hoje reconhecida mundialmente – a Escala de Fujita (5). Sua ideia foi criar uma escala de velocidade dos ventos para tornados, porém, a escala Fujita trata-se claramente de uma escala de destruição e não de uma escala explícita de velocidade do vento, como proposta originalmente.

Esta escala foi adotada imediatamente pelo NWS em 1971 para classificar a intensidade dos tornados e também de outros ventos destrutivos, como por exemplo os advindos de microexplosões. A comunidade de engenharia acabou também a adotando, reconhecendo por ser a melhor opção disponível na época. Com o decorrer dos anos, observou-se uma grande insatisfação das comunidades de meteorologia e de engenharia em relação à escala de Fujita, reconhecida pelo próprio Fujita, devido à falta de maior detalhamento nos indicadores de danos, a não levar em consideração a qualidade (e a variabilidade da qualidade) da construção, a falta de uma melhor correlação entre danos e velocidade do vento.

Estudos como o de Phan e Simiu (6) mostravam, por exemplo, que ventos de 420 km/h não seriam necessários para destruir completamente uma casa bem construída e espalhar seus escombros, conforme indicado na escala FUJITA. Velocidades abaixo deste limiar já seriam capazes de causar este tipo de destruição. Então, em 2007, os EUA abandonaram a escala Fujita, adotando a denominada Escala de Fujita Aprimorada - *Enhanced Fujita Scale* (7), a qual tem como premissas:

- Identificar indicadores de danos (IDs) mais detalhados;
- Discriminar níveis de destruição (NDs) para cada ID;
- Melhorar a estimativa dos ventos para cada categoria de tornado; e
- Realizar a estimativa dos ventos para um valor médio de 3s (rajadas).

Desde 2009 a escala de Fujita aprimorada (EF Scale) foi adotada em FURNAS para caracterização meteorológica de ventos destrutivos pela análise dos danos causados, para avaliação dos eventos de desligamentos, por causa da queda de torres de suas linhas de transmissão ocasionadas por tempestades severas.

4.0 - CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS ADVERSAS: LT FOZ DO IGUAÇU – IVAIPORÃ, EM 05/06/2014 (ESTUDO DE CASO)

Das trinta ocorrências analisadas entre 2005 e 2016, escolheu-se, a título de exemplo, o evento de queda de torres da linha de transmissão de 750 kV que liga as subestações de Foz do Iguaçu e Ivaiporã, entre os municípios de Cascavel e Cafelândia (PR) – torre 303 do circuito 2 e torre 306 do circuito 1 - em torno das 17h02min do dia 05/06/2014. A localização geográfica desta ocorrência é apresentada na Figura 2: (a) uma visão macro da LT e da posição da ocorrência no sudoeste do Paraná, a aproximadamente 138 km da subestação de Foz do Iguaçu; (b) imagem aérea sobre a área da ocorrência, com a indicação das torres afetadas. A direção de queda das torres de Noroeste para Sudeste (NO-SE) é uma informação importante na identificação do fenômeno meteorológico.



Figura 2 - Localização da ocorrência em análise: (a) uma visão macro da LT e da posição da ocorrência no sudoeste do Paraná; (b) Imagem aérea sobre a área da ocorrência. (Fonte das imagens: Google Earth)

Na Figura 2 é possível identificar, pelas áreas destacadas nas elipses azuis, as duas torres que sofreram queda e a sede da fazenda, a qual sofreu diversos danos decorrentes da ventania: perda total de um galpão, casas com telhados e janelas danificados, perda total de um automóvel atingido por destroços, perda de plantação.

A numeração identificada na Figura 2 refere-se a regiões onde foram observados danos significativos, os quais serviram de subsídio para estimativa do vento e apresentados na sequência deste trabalho (item 4.1.1). Além da identificação dos danos foi possível entrevistar o dono da propriedade e trabalhadores residentes na sede da fazenda, que estavam presentes durante a passagem da tempestade no dia 05/06/2014.

Apresenta-se a seguir o levantamento das condições meteorológicas favoráveis à ocorrência de ventos fortes, que ocasionaram o desligamento da linha de transmissão de 750 kV entre Foz do Iguaçu e Ivaiporã, circuitos 1 e 2, deste ponto em diante identificada como LT FIIV.

Na Figura 3 (a) apresenta-se uma imagem do satélite GOES 13, no canal infravermelho, às 17h08min do dia 05/06/2014, cobrindo grande parte da América do Sul. Observa-se muita nebulosidade sobre o Paraná e Santa Catarina (elipse azul), associada a um sistema de baixa pressão atmosférica que atuava na região. As imagens seguintes (Figura 3 “b” e “c”) são um recorte sobre o sudoeste do Paraná e com aplicação de cores, do azul ao vermelho, indicando a presença de nuvens convectivas – cumulonimbus. Observa-se, que a região da ocorrência em análise coincide com a parte mais intensa da tempestade. As nuvens cumulonimbus apresentam grande extensão vertical e estão associadas à ocorrência de precipitação intensa, descargas atmosféricas, ventos fortes e até tornados. Outra observação importante é quanto à direção de deslocamento da tempestade, coincidente com a direção de queda de ambas as torres. Este é o primeiro indício da atuação de uma frente de rajada associada à passagem de uma tempestade.

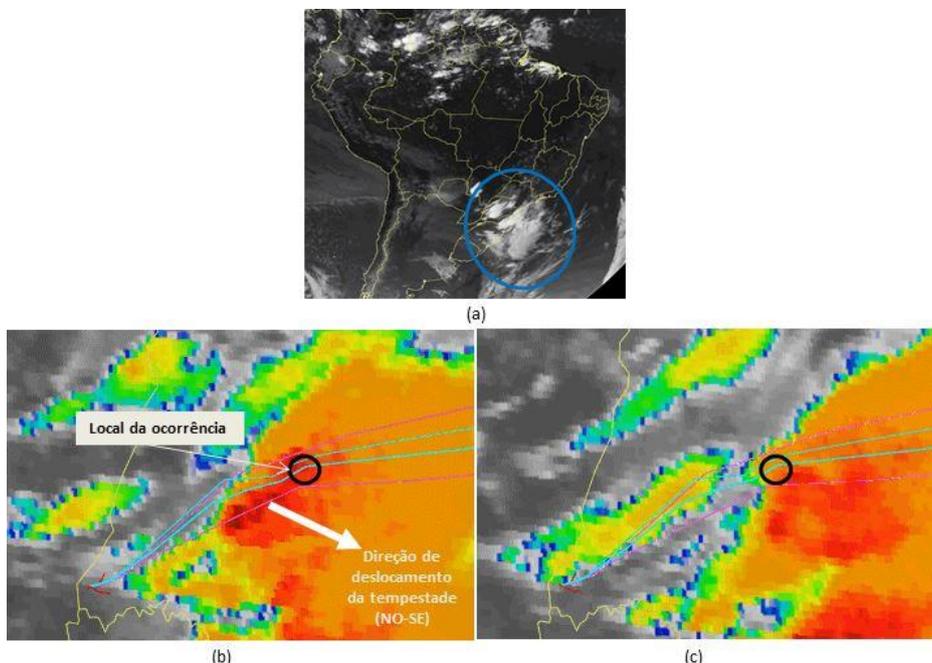


Figura 3 - Imagens do satélite GOES-13 do dia 05/06/2014, no canal infravermelho: (a) , às 17h08min sobre a América do Sul; e sobre o sudoeste do Paraná: (b) 16h38min e (c) 17h08min. (Fonte das Imagens: FURNAS).

FURNAS faz parte do convênio da Rede Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (8), cujo objetivo é monitorar as descargas atmosféricas solo-nuvem na porção centro-sul do Brasil. Na Figura 4 são apresentadas as descargas atmosféricas detectadas entre 15h30min e 17h30min do dia 05/06/2014. Observam-se descargas

atmosféricas associadas à tempestade que atingiu a LT FIV, sobre a região onde ocorreu a queda das torres 303 do circuito 2 e 306 do circuito 1, em torno das 17h02min.

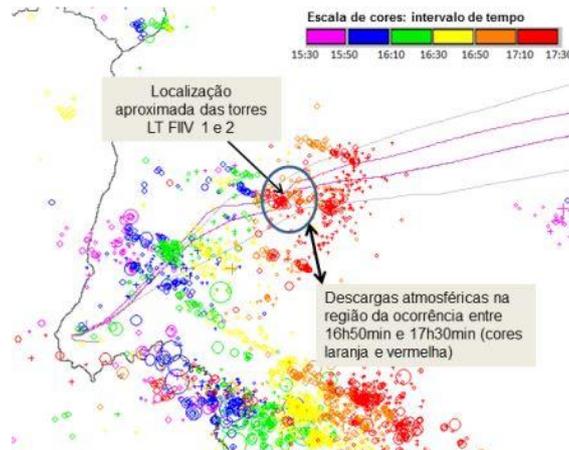


Figura 4 Descargas atmosféricas entre 15:30 e 17:30 do dia 05/06/2014, sobre o sudoeste do Paraná. (Fonte dos dados: RINDAT)

É importante destacar, que a ocorrência de descargas atmosféricas é mais uma indicação da presença de convecção profunda, pois estas só ocorrem em nuvens de tempestades (cumulonimbus).

As imagens de radar meteorológico mostram dados de refletividade, aos quais se podem associar taxas de precipitação e até indicar a presença de granizo, sendo usadas em todo o mundo no monitoramento meteorológico, sendo a melhor indicação da presença de tempestades convectivas mais intensas. Deve-se ter em mente, que altos índices de precipitação e a presença de granizo podem caracterizar uma tempestade como severa.

Na Figura 5 são apresentadas duas imagens do radar meteorológico de Teixeira Soares, no final da tarde do dia 05/06/2014, recortadas sobre o sudoeste do Paraná. A escala de cores refere-se à refletividade (dBz), estando associada à intensidade de precipitação: fraca, em tons de verde; moderada, em tons de amarelo e laranja; forte, em tons de vermelho; e roxa, associadas a chuva muito forte. Observa-se uma nuvem convectiva, com altas taxas de precipitação e se deslocando sobre a região em que ocorreu a queda da torre de transmissão de energia elétrica, havendo intensificação do sistema durante sua passagem sobre as torres e em horário compatível a queda.

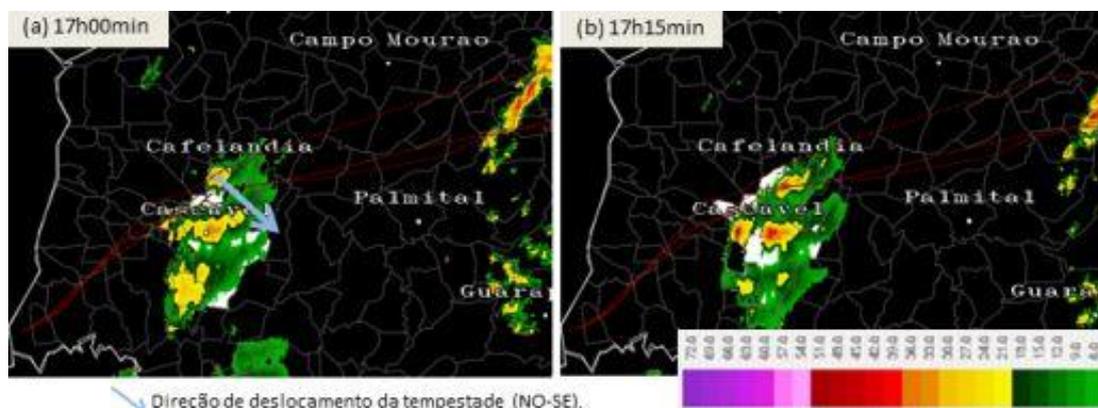


Figura 5 – Imagens do radar meteorológico do Teixeira Soares recortadas na região de interesse, às (a) 17:00 e (b) 17:15 do dia 05/06/2014 (Imagens cedidas pelo SIMEPAR).

Com as imagens de radar foi possível confirmar a direção de deslocamento da tempestade de Noroeste para Sudeste, assim como a direção da queda de ambas as torres, corroborando com a indicação da ocorrência de uma frente de rajada na dianteira da tempestade.

4.1.1 Análise do Levantamento de Campo

Conforme explicado anteriormente, visando melhor determinar o fenômeno meteorológico ocorrido e melhor estimar a intensidade do vento na região, foi feito um levantamento de campo por um meteorologista de FURNAS para avaliação dos danos causados pelo fenômeno meteorológico.

Nas imagens a seguir, do lado direito, foram inseridos quadros assinalando-se a característica do dano e a intensidade da rajada máxima associada, segundo a metodologia proposta no guia de análise de danos pela escala de Fujita Aprimorada (escala EF).

A identificação dos pontos de referência em cada foto, nas figuras 6 a 11, indica sua localização, conforme mostrada na Figura 2 (b).



Figura 6 Análise de danos na região atingida pela tempestade de acordo com a metodologia do National Weather Service (EUA) - Warning Decision Training Branch – PARTE 1.



Figura 7 Análise de danos na região atingida pela tempestade de acordo com a metodologia do National Weather Service (EUA) - Warning Decision Training Branch – PARTE 2.

Entre os pontos 3 e 4



Figura 8 Análise de danos na região atingida pela tempestade de acordo com a metodologia do National Weather Service (EUA) - Warning Decision Training Branch – PARTE 3.



Figura 9 Análise de danos na região atingida pela tempestade de acordo com a metodologia do National Weather Service (EUA) - Warning Decision Training Branch – PARTE 4.



Figura 10 Análise de danos na região atingida pela tempestade de acordo com a metodologia do National Weather Service (EUA) - Warning Decision Training Branch – PARTE 5.



Figura 11 Análise de danos na região atingida pela tempestade de acordo com a metodologia do National Weather Service (EUA) - Warning Decision Training Branch – PARTE 6.

Os danos identificados na sede da fazenda, a cerca de 350-400 m das torres de Furnas, são coerentes com velocidade de ventos acima de 200 km/h, podendo ter chegado a algo em torno de 245 km/h.

Entrevistas realizadas com moradores, presentes durante o evento, indicam a severidade da tempestade e do vento que atingiu a região:

- Possível presença de dois funis da tempestade até o solo, sugerindo a ocorrência de tornados;
- Que o vento durou cerca de apenas dois minutos.

Foi observado traçado na plantação (Figura 12) indicando o deslocamento da tempestade, coerente com a direção no qual o vento atingiu a região, e direções de tombamento da plantação e de queda das árvores, assim como com a queda de uma das laterais do galpão e direção de queda das torres.



Figura 12 Traçado aproximado do deslocamento da tempestade sobre a região.

5.0 - CONCLUSÃO

Esse trabalho apresentou a metodologia adotada pela equipe de meteorologia de FURNAS para caracterização de eventos de desligamentos por caso fortuito ou força maior, devido à queda de torres de transmissão por ventos extremos.

Juntamente com as análises realizadas em escritório, pela avaliação de imagens de satélite e de radares meteorológicos, assim como dados de descargas atmosféricas e de estações de superfície, os pareceres meteorológicos visam apontar o fenômeno responsável pelos ventos extremos e pela identificação de todos os indicadores de danos presentes, bem como estimar a velocidade máxima do vento associada.

O levantamento de campo baseia-se na metodologia adotada proposta pelo National Weather Service dos EUA, tendo como base a escala de Fujita Aprimorada (EF Scale).

FURNAS vem tendo sucesso nas caracterizações de casos fortuitos ou de força maior, que garantem isenções ou reduções de descontos de receitas por parcela variável por indisponibilidade,

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CUNHA, L. V. Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a descargas Atmosféricas: Influência do Efeito Corona na Ruptura a Meio de Vão. 2010. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais. 2010.
- (2) OLIVEIRA, A. B. Plano de Atendimento a Emergências com Queda de Torres em Linhas de Transmissão: Medidas Corretivas e Preventivas, XIX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, RJ. 14 a 17 de Outubro de 2007.
- (3) LIMA, D. R. O; ANA C. F. Marotti, 2016. A Meteorologia de FURNAS e a RINDAT – Uma Parceria Histórica. 3º SMEALT - Seminário de Manutenção de Equipamentos de Alta Tensão e Linhas de Transmissão. Foz do Iguaçu, PR. 07 a 10 de Novembro de 2016.
- (4) COTTON, W. R. E R, A. ANTHES, 1989: Storm AND Cloud Dynamics, San Diego, CA, Academic Press, 883p.
- (5) FUJITA, T.T, 1971. "Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity". Satellite Mesometeorology Research Program Research Paper Number 91, Department of Geophysical Sciences, University of Chicago. 42pp.
- (6) PHAN, L. T.; SIMIU, E, 1998. Fujita Tornado Intensity Scale: A Critique Based on Observations of the Jarrell Tornado of May 27, 1997. NIST TN 1426; 23 p. July 1998.
- (7) MC DONALD, JAMES; KISHOR C. MEHTA, 2006. A recommendation for an Enhanced Fujita scale (EF-Scale) (PDF). Lubbock, Texas: Wind Science and Engineering Research Center, Texas Tech University. Retrieved 2013-05-21.
- (8) RINDAT, 2014: Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas. Recepção de dados própria.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Daniele Rodrigues Ornelas de Lima

Nascida na cidade do Rio de Janeiro, RJ, em 25 de maio de 1976.

Graduada em Meteorologia pela UFRJ (2000) e Mestre em Ciências Atmosféricas em Engenharia pela COPPE-UFRJ (2005).

Atividade atual: Meteorologista em FURNAS Centrais Elétricas S/A desde 2000.

Pedro Jourdan

Nascido na cidade do Rio de Janeiro, RJ, em 27 de fevereiro de 1982.

Graduado (2007) e Mestre (2015) em Meteorologia pela UFRJ.

Atividade atual: Meteorologista em FURNAS Centrais Elétricas S/A desde 2014.

Marcelo Belassiano

Nascido na cidade do Rio de Janeiro, RJ, em 13 de outubro de 1976.

Graduado em Meteorologia pela UFRJ (1998) e Mestre em Ciências Atmosféricas pela USP (2000).

Atividade atual: Meteorologista em FURNAS Centrais Elétricas S/A desde 2004.