



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

CB/GLT/16

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO - III**

**GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT**

**QUEDA DE ESTRUTURAS DE GRANDE PORTE NA TRAVESSIA DO RIO JACUÍ EM FUNÇÃO DE EVENTO CLIMÁTICO DO TIPO TORMENTA ELÉTRICA: ANÁLISE E EXPERIÊNCIA DA CEEE-GT NA RECOMPOSIÇÃO DE LTS DENTRO DO PARQUE ESTADUAL DELTA DO JACUÍ**

**Yuri Neves Gazen(\*)  
CEEE-GT**

**Leonardo Alves de Campos  
CEEE-GT**

**Augusto Carlos Dias  
CEEE-GT**

**RESUMO**

O dia 14 de outubro de 2015 ficou marcado como a data em que o Rio Grande do Sul sofreu uma de suas tempestades mais severas. Um de seus efeitos foi deixar mais de 700 mil pessoas sem energia elétrica em todo o Estado, visto que causou um cenário de destruição em redes de distribuição e que também ocasionou estragos em Linhas de Transmissão. O acidente mais grave ocorreu na queda de estruturas de duas Linhas de Transmissão 230 kV da CEEE-GT na travessia do Rio Jacuí, próximo à região metropolitana de Posto Alegre.

Ambas as LTs foram projetadas na década de 70 à luz da antiga norma NB-182, a qual apresenta critérios de projeto já ultrapassados. Dada a importância destas LTs para a conexão da região metropolitana com a zona sul do Estado, a CEEE-GT buscou reconstruí-las de forma emergencial e com um projeto eletromecânico utilizando normas atualizadas associadas a critérios de confiabilidade rigorosos, sendo até mais rigorosos do que indicam os Procedimentos de Rede.

Neste artigo serão apresentados os critérios de projeto utilizados para o novo projeto eletromecânico da travessia, as dificuldades enfrentadas durante a reconstrução e aprofundar a discussão sobre a preocupação com estruturas que foram projetadas segundo normas de projeto ultrapassadas.

**PALAVRAS-CHAVE**

Tormenta TS, *Thunderstorms*, Linha de Transmissão, Recuperação, Confiabilidade

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Durante a tarde e noite do dia 14 de outubro de 2015, uma onda de tempestades severas se desenvolveu sobre o Estado do Rio Grande do Sul, provocando chuvas localizadas de forte intensidade, intensa incidência de descargas atmosféricas, queda de granizo e rajadas de ventos com forte poder destrutivo sobre diversas regiões, sobretudo entre o centro e o leste gaúcho.

O quadro de instabilidade atmosférica que propiciou o desenvolvimento desta onda de tempestades envolveu uma série de fatores (1). A intensificação da corrente de jato de baixos níveis favoreceu ao transporte de umidade e calor sobre o sul do Paraguai, noroeste e nordeste da Argentina e sobre o Rio Grande do Sul. Este jato de baixos níveis também favoreceu a intensificação de um sistema de baixa pressão sobre o noroeste da Argentina. Este sistema de baixa pressão atmosférica aumentou a convecção sobre a região, favorecendo ao desenvolvimento de nuvens de elevado desenvolvimento vertical sobre o oeste do Rio Grande do Sul no começo da tarde do dia 14. À noite o aprofundamento deste sistema de baixa pressão e o desenvolvimento de um cavado sobre o Estado intensificou a instabilidade sobre o território gaúcho.

(\*) Avenida Joaquim Porto Villanova, n° 201 – sala 478 - Prédio A2 – CEP 91.410-400 Porto Alegre, RS – Brasil  
Tel: (+55 51) 3382-3046 – Fax: (+55 51) 3382-6519 – Email: yuri.gazen@ceee.com.br

Ainda durante o período da tarde do dia 14 as primeiras células convectivas começaram a se desenvolver sobre o oeste do Rio Grande do Sul. Entretanto, a onda de tempestades que provocou uma série de destruição sobre o centro/leste do Estado só começou a se desenvolver no final da tarde a partir do oeste gaúcho. Imagens de satélite mostram que o conjunto de células convectivas possuía nuvens de elevado desenvolvimento vertical, com temperaturas de topo de nuvens na ordem de  $-70^{\circ}\text{C}$ , o que por si só já indicaria condições para ocorrência de tempestades severas, e, além disso, o tempo de deslocamento deste sistema foi extremamente rápido, percorrendo cerca de 600 km em apenas 5 horas, indicando uma velocidade em torno de 120 km/h. Quanto mais rápido o deslocamento de sistemas de tempestades, maior a possibilidade de ele produzir ventos intensos.

Sobre a região metropolitana de Porto Alegre a chegada destes sistemas de tempestades provocou chuvas fortes, intensa atividade elétrica e queda de granizo, porém o que mais se destacou na atuação desta tempestade sobre a região de Porto Alegre foi a intensidade dos ventos. Pelas características da tempestade que atingiu a região, tratando-se muito provavelmente de uma supercélula, não se pode descartar que a mesma tenha produzido microexplosões. Segundo a literatura, ventos em microexplosões podem oscilar em média entre 90 e 180 km/h.

Uma forma de estimar a velocidade dos ventos sobre uma região em áreas em que não há anemômetros é através da escala Beaufort, que serve para quantificar a intensidade dos ventos de acordo com os estragos provocados pelo mesmo em um determinado local. Analisando os estragos provocados pelas rajadas de ventos durante a noite de 14 de outubro sobre a região de Porto Alegre, com cerca de 351 árvores arrancadas, sendo pelo menos 13 de grande porte (segundo estimativas da Prefeitura da cidade), destelhamento de casas e postos de gasolina, destruição de vidraças, queda de muros de alvenaria, tombamento de diversos postes e queda de torres de linhas de transmissão, pode-se estimar, de acordo com a escala, que as rajadas mais intensas dos ventos sobre a região tenham oscilado entre 128 e 148 km/h.

Este evento foi um dos mais intensos a atingir o Rio Grande do Sul nos últimos anos, tendo o saldo de três vítimas fatais e mais de 10 feridos, centenas de árvores caídas em diversas cidades do Estado e cerca de 710 mil clientes sem luz. Porto Alegre também sofreu com queda de postes, torres de transmissão de energia elétrica e diversos danos estruturais espalhados pela cidade.

Como consequência do evento, concessionárias de transmissão e distribuição do Rio Grande do Sul experimentaram diversos problemas em suas redes de distribuição e linhas de transmissão. Nas instalações da CEEE-GT, este temporal afetou principalmente as LTs 230 kV Guaíba 2 – Porto Alegre 9 (LT 230 kV GUA2 – PAL9) e Cidade Industrial – Guaíba 2 (LT 230 KV CIN – GUA2). Na primeira, houve queda de duas estruturas e danos severos em outra. Na LT 230 kV Cidade Industrial – Guaíba 2 foram cinco estruturas danificadas: três sofreram queda, uma teve dano elevado e uma teve danos pequenos. A FIGURA 1 mostra no mapa o local da queda das estruturas.



FIGURA 1 - Mapa do local da queda das torres

O local das quedas das estruturas situa-se nas margens do Rio Jacuí, em área de difícil acesso dentro do Parque Estadual Delta do Jacuí (PEDJ), localizado entre os municípios de Eldorado do Sul e Triunfo. O PEDJ é uma das maiores Unidades de Conservação do Estado do Rio Grande do Sul. Constitui-se num complexo hídrico formado pelos rios Taquari, Caí, Sinos, Gravataí e Jacuí, os quais formam o Lago Guaíba. Esta junção dá origem a um arquipélago composto por 30 ilhas e áreas continentais.

A combinação dos fatores de que o local de queda se situa em um Parque Estadual, na travessia de um rio navegável com distância entre margens de quase 800m, associados a condições climáticas adversas, implicaram em grandes dificuldades para a recomposição da LT.

## 2.0 - ANÁLISE CONCEITUAL DO ACIDENTE

No intuito de embasar tecnicamente esta análise, serão tratados os seguintes temas:

- a. Efeitos das tormentas TS nas estruturas de linhas de transmissão;
- b. Ação do vento em estruturas de linhas de transmissão;
- c. Premissas de projeto – Estrutura ETB-80
- d. Travessias

### 2.1 Tormentas TS e seus efeitos nas estruturas

Fenômenos meteorológicos que causam ventos fortes próximos à superfície terrestre tem fundamental importância para o dimensionamento de estruturas de engenharia. Esses fenômenos incluem tempestades tropicais e extratropicais, tornados, furacões e Tormentas TS ou *ThunderStorms*.

Tormenta TS é um fenômeno meteorológico onde uma coluna de vento descendente retilínea localizada provida de uma nuvem *cumulonimbus* é lançada ao solo e quando em contato com o mesmo se espalha em todas as direções.

Um evento de tormenta TS costuma não levar mais de cinco minutos e tem caráter localizado, além disso, a nuvem causadora pode ser carregada por outras frentes de tempestade ou ventos que circulam na região aumentando o valor das velocidades de ventos.

As formações dessas tempestades variam muito, porém a maioria começa com granizo ou grandes gotas de chuva que derretem ou evaporam através do ar mais seco e quente, essa transferência de calor resfria o ar consideravelmente, o mesmo circundado pelo ar mais quente tem a tendência de descer, já que o ar mais frio possui uma densidade mais elevada. Quando esse atinge o solo, ele se espalha e forma a chamada frente de rajada. A área que sofre essa descarga imediata do ar mais frio tem a ocorrência de chuvas e ventos mais fortes. Ao se espalhar o vento perde velocidade. A tormenta TS tende a durar pouco tempo, mas suas consequências podem ser de extrema importância.

Tormenta TS se tornou assunto frequente em pesquisas acadêmicas nas últimas décadas devido principalmente aos efeitos destrutivos da tempestade. Na década de 80, os estudos focaram principalmente na formação e caracterização de uma tormenta TS.

Em função das características supracitadas, atualmente nos projetos de estruturas metálicas treliçadas para linhas de transmissão, é considerada uma hipótese de carregamento que representa os principais efeitos da tormenta TS: efeito localizado aplicado diretamente sobre a estrutura, curta duração e perfil uniforme de velocidades.

### 2.2 Ação do vento em estruturas de linhas de transmissão

Uma das principais preocupações nos projetos de torres de LT é a ação do vento. Isso é justificável, pois seu efeito nas estruturas de suporte, em termos mecânicos, são muito significativos. O efeito da ação do vento, em torres de suspensão, é responsável pelo esforço máximo em cerca de 80% das barras da estrutura (2).

Os eventos de falhas e colapsos em torres de linhas de transmissão, em sua maior parte, estão associados à ação do vento e, em menor escala, à ruptura de cabo. Esses eventos geram grandes prejuízos e, em razão disso, alguns trabalhos têm sido desenvolvidos para minimizar as probabilidades de novas ocorrências, buscando melhorar a forma de análise e a concepção dos projetos.

A ação do vento possui natureza dinâmica, porém, por simplicidade, os procedimentos usuais de projeto a considera de forma estática, por meio de “ações estáticas equivalentes”. Ainda que, para obter resultados mais satisfatórios e realistas, o ideal seria que a natureza dinâmica das ações devidas ao vento fosse levada em consideração na análise.

Até 1985 era utilizada como referência a NB-182 onde as cargas mecânicas oriundas do vento recebiam um tratamento determinístico. Com o passar dos anos e com o advento da informática, foi possível caracterizar e analisar de forma mais consolidada a ação do vento e evidenciando que o tratamento determinístico se mostra inadequado para representar o nível de confiabilidade operacional da linha de transmissão.

Na tabela abaixo são indicadas as condições atmosféricas que deviam ser consideradas na elaboração dos projetos conforme a NB-182. Os três estados da região sul eram definidos como “Região A”.

| Região | Condições Atmosféricas     |  |       |        |        |
|--------|----------------------------|--|-------|--------|--------|
|        | Velocidade do vento máximo | Temperatura  |       |        |        |
|        |                            | Mais provável quando da ocorrência do vento máximo | Média | Mínima | Máxima |
|        | km/h                       | °C   | °C    | °C     | °C     |
| A      | 130                        | 15   | 15    | 5      | 40     |
| B      | 110                        | 10   | 20    | 0      | 50     |
| C      | 110                        | 15   | 20    | 5      | 50     |
| D      | 105                        | 20   | 25    | 15     | 50     |

FIGURA 2 - Tabela do item 12.2 da norma desatualizada NB-182 (Norma desatualizada)

Atualmente no Brasil, as ações de vento em linhas de transmissão, são determinadas pelas normas (3) e (4), além das recomendações de (5).

De acordo com a referência (5), a confiabilidade de uma linha está associada a um dado período de retorno das ações, usualmente uma velocidade de vento. No entanto, nenhuma referência é feita ao modelo mecânico utilizado na determinação da resposta da torre (deslocamentos, esforços e tensões nas barras, etc.) frente às ações externas.

Atualmente, os projetos de linhas de transmissão, além de atenderem os requisitos estabelecidos nos códigos normativos vigentes também devem estar em conformidade com os requisitos do ONS (6). Os requisitos estabelecidos em (6) aplicam-se a "toda linha de transmissão (LT) aérea de tensão eficaz fase-fase superior ou igual a 230kV, em corrente alternada (CA), integrante da rede básica (...)".

Quanto aos requisitos mecânicos, (6) recomenda, dentre outras coisas, que o projeto mecânico de uma LT deve ser desenvolvido segundo (5), e que o nível de confiabilidade do projeto eletromecânico, expresso pelo período de retorno do vento extremo, deve ser compatível com um nível intermediário entre os níveis 2 e 3 preconizados em (5). Deve ser adotado período de retorno do vento igual ou superior a 150 (cento e cinquenta) anos para LT de tensão nominal igual ou inferior a 230 kV e igual ou superior a 250 (duzentos e cinquenta) anos para LT de tensão superior a 230 kV

Nesse sentido, em função dessas exigências, os projetos de estruturas para linhas transmissão já contemplam hipóteses de carregamento que representam tanto a as tormentas elétricas TS quanto as tormentas extratropicais EPS e suas características quanto a incidência e amplitude na estrutura.

### 2.3 Premissas de projeto – Estrutura ETB-80

O projeto da estrutura especial de travessia ETB-80 foi desenvolvido em 1972 seguindo os critérios estabelecidos na NB-182. Como já indicado anteriormente, a NB-182 não representava adequadamente as ações oriundas do vento, em especial as tormentas do tipo TS e EPS. Nessa época eram utilizados dados determinísticos para determinar as pressões de vento, diferente dos conceitos de confiabilidade aplicados nos projetos atuais.

Para caracterizar essas mudanças, a FIGURA 3 traz o roteiro básico para análise e dimensionamento de estruturas em geral segundo os conceitos da engenharia estrutural.

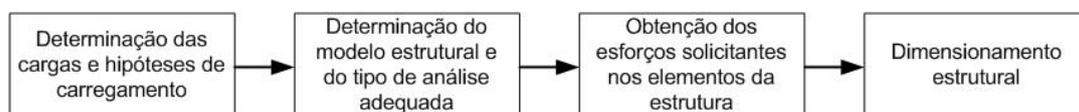


FIGURA 3 - Roteiro básico para análise e dimensionamento de estruturas

Todas as etapas deste roteiro básico evoluíram ao longo do tempo, Em especial as etapas relacionadas a determinação das cargas, em função do melhor entendimento dos eventos climáticos e da implementação dos conceitos de confiabilidade estrutural, e do dimensionamento estrutural dos elementos, em função do melhor entendimento do comportamento dos materiais e respectiva confiabilidade estrutural.

Para exemplificar a amplitude destas mudanças, a FIGURA 4 ilustra a árvore de carregamento que representa a hipótese de vento extremo transversal utilizada no dimensionamento da estrutura ETB na década de 70 (a) e o que seria essa hipótese considerando as premissas contidas (b) na referência (5). Essas árvores de carregamento apresentam apenas as cargas mecânicas oriundas dos cabos.

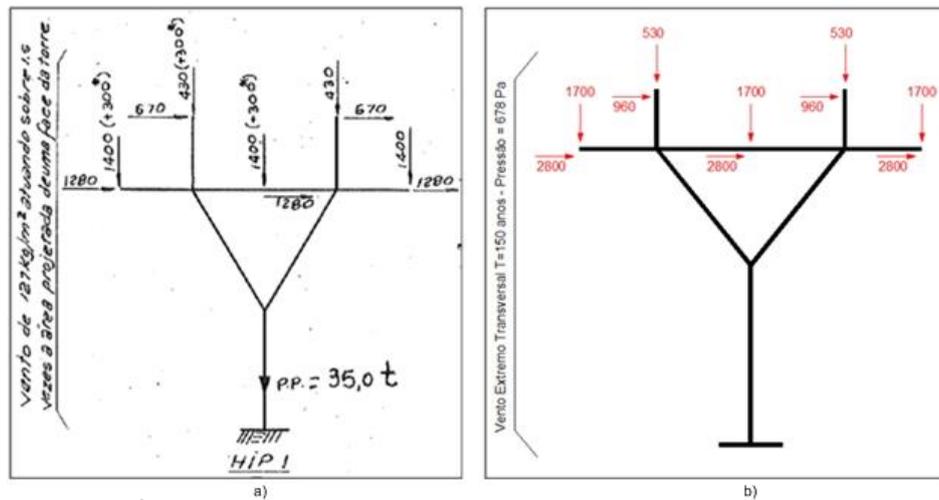


FIGURA 4 - Árvore de carregamento da estrutura ETB: a) nos critérios da década de 70 e b) sob critérios atuais

É possível observar para as cargas oriundas dos cabos, comparando as duas árvores de carregamento, quando calculadas pelos critérios atuais de projeto levam a cargas mecânicas de maior intensidade em função da melhor caracterização dos eventos climáticos, do principalmente em tormentas do tipo EPS e dos níveis de confiabilidade operacional exigidos para linhas de transmissão da rede básica.

Cabe ainda destacar que na elaboração de novos projetos de estruturas são consideradas hipóteses de vento de alta intensidade ou tormenta que tentam representar a ação das tormentas tipo TS atingindo a estrutura. Essa hipótese considera um vento de alta intensidade, com pressão constante ao longo da altura, e incidindo diretamente na estrutura e sobre 20% de cada vão adjacente.

No caso da estrutura ETB-80 essa hipótese de carregamento não foi considerada no projeto original. Se fossem considerados os critérios atuais para determinação das ações do vento e dimensionamento estrutural dos perfis metálicos, a estrutura ETB seria dimensionada para carregamentos mecânicos que representam um nível de confiabilidade do projeto eletromecânico, expresso pelo período de retorno do vento extremo, entre 30 e 40 anos o que é muito aquém do preconiza a IEC 60826 e o Procedimento de Redes.

### 3.0 - RECOMPOSIÇÃO DA TRAVESSIA

#### 3.1 Detecção dos danos

As primeiras dificuldades encontradas para a recomposição da travessia estiveram no acesso ao local das quedas. Em função da cheia dos rios, no dia seguinte ao acidente foi realizada uma visita de barco ao local do acidente onde pode-se ter uma visão parcial dos danos. A FIGURA 5 mostra o antes e o depois do acidente.



FIGURA 5 - Travessia do Rio Jacuí: a) torres ETB antes do acidente e b) imagem das mesmas torres em sobrevoo após o acidente



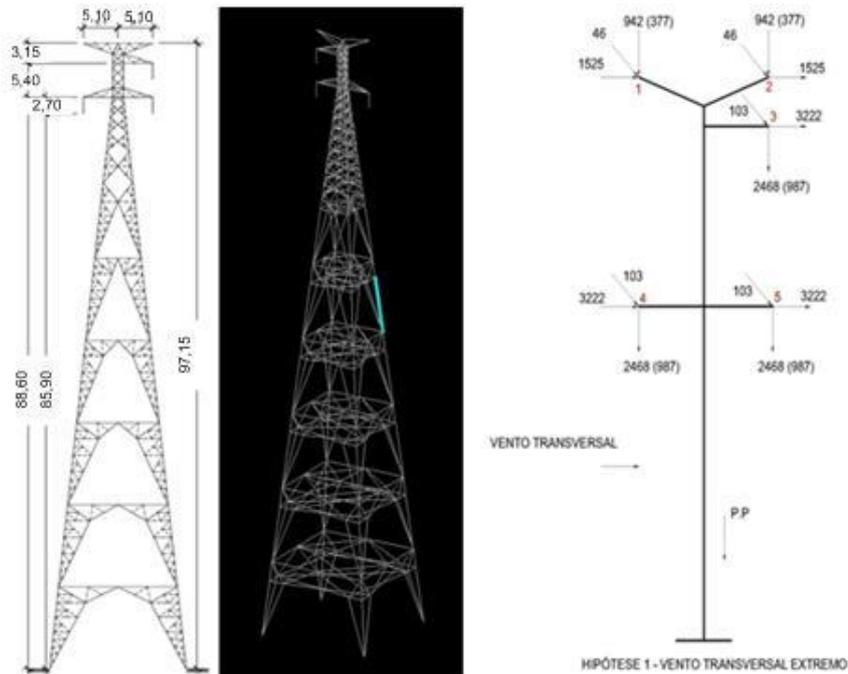


FIGURA 7 - Silhueta da torre TJ15 e sua árvore de carregamento para a hipótese de vento transversal extremo

Em virtude da necessidade sistêmica de se recompor ambas as LTs no menor prazo possível, todo o processo de contratação foi feito de forma emergencial.

### 3.3 Reconstrução

O acesso às estruturas nas margens do rio foi feito utilizando-se de pequenas embarcações para o transporte dos funcionários, e balsas de grande porte que realizaram todo o transporte dos equipamentos e máquinas necessárias na obra. Isto permitiu uma redução no impacto ambiental da construção já que foi necessária a ocupação apenas da área das torres, sem construir grandes acessos por terra na área do Parque.

A cravação das estacas foi feita por percussão, com frentes em ambos os lados do Rio Jacuí. A quantidade total de perfil metálico cravado nesta recomposição foi próximo de 3000 metros.

Já o concreto foi levado em caminhões transportados nas balsas até os locais das torres. Foram necessários 270 m<sup>3</sup> de concreto para a execução das fundações. A FIGURA 8 mostra a fundação de uma das torres e guindastes utilizados para montagem das torres.



FIGURA 8 - Fotos da reconstrução das torres de travessia

A montagem das estruturas metálicas foi feita inicialmente com apoio de guindastes, com altura aproximada de 80 metros. O término da montagem foi feito através do içamento das partes metálicas que compõem a cabeça da estrutura.

O lançamento dos cabos nos vãos da travessia contou com o apoio de equipes da Marinha, que deram suporte para o controle do fluxo de embarcações no dia do lançamento. Inicialmente, foi efetuada a passagem de cabo guia, e o lançamento dos condutores foi efetuado por tração.

#### 4.0 - CONCLUSÃO

O evento climático severo que atingiu o estado do Rio Grande do Sul no dia 14 de outubro de 2015 ocasionou, dentre tantos outros danos, a queda das estruturas de travessia das LTs 230 kV CIN – GUA2 e GUA2 – PAL9 sobre o Rio Jacuí.

Apesar do fato de que a CEEE-GT caracterizou e trabalhou com esta ocorrência como uma situação de emergência, o restabelecimento das Linhas de Transmissão envolvidas nesta falha enfrentou alguns aspectos agravantes que dificultaram as ações para a sua solução definitiva, onde podemos citar a instabilidade do clima, a precariedade dos acessos às estruturas e praças de lançamento e a ausência de estruturas de travessia sobressalentes.

Considerando todos estes aspectos, foi evidenciada a necessidade de que a recomposição das travessias das LT's sobre o Rio Jacuí fosse executada segundo critérios de confiabilidade operacional diferenciados a fim de evitar que eventos climáticos como o ocorrido em 14 de outubro de 2015 gerem danos permanentes causando a indisponibilidade da Linha de Transmissão por longos períodos.

Ambas as LTs foram reenergizadas em outubro de 2016, um ano após o acidente que resultou na queda das estruturas.

O período de indisponibilidade e o alto custo associado são fatores suficientes para afirmarmos que são necessários critérios de projeto especiais quando da construção de LTs nestes casos de travessia em áreas ambientalmente sensíveis e com difíceis acessos. Os principais critérios de projeto sugeridos nestes casos de travessia em áreas ambientalmente sensíveis e com difíceis acessos seriam a adoção de um período de retorno de projeto diferenciado, superior ao indicado nos Procedimentos de Rede, e que considerem hipóteses de vento que apresentem fenômenos climáticos como as tormentas TS e as tormentas EPS.

Outro ponto a ser verificado é o risco que as LTs projetadas sob a luz da NB-182 implicam ao setor elétrico e a segurança em geral. No caso deste artigo, torres projetadas para o período de retorno de 50 anos nos critérios da NB-182 teriam um período de retorno entre 30 e 40 anos nos critérios atuais. Logo, uma LT da década de 70 está sob risco de acordo com este critério estatístico. Assim, sugere-se que os projetos sejam verificados e as estruturas reforçadas ou substituídas conforme o caso.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) COMPANHIA ESTADUAL DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Relatório Meteorológico do dia 14/10/2015. Brasil, 2015.
- (2) KAMINSKI JR., J. Incertezas de modelo na análise de torres metálicas treliçadas de linhas de transmissão. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- (3) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica - NBR 5422. Brasil.
- (4) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Forças devidas ao vento em edificações - NBR 6123. Brasil.
- (5) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Design criteria of overhead transmission lines – IEC 60826. Suíça.
- (6) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. Procedimentos de rede: Requisitos mínimos para linhas de transmissão aéreas – Submódulo 2.4. Brasil.
- (7) AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Design of Latticed Steel Transmission Structures – ASCE 10-97. Estados Unidos da América.
- (8) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Execução de Suportes Treliçados para Linhas de Transmissão - NBR 8850. Brasil.

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Yuri Neves Gazen** nasceu em São Sepé/RS no ano de 1989. Possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria, em 2010 e 2016, respectivamente. Também obteve título de Especialista em Planejamento pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul no ano de 2013. Desde 2011 desenvolve atividades de projeto de linhas de transmissão e de subestações na Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica – CEEE-GT.



**Leonardo Alves de Campos** nasceu em Pelotas/RS no ano de 1979. Graduou-se em Engenharia Civil no ano de 2003 pela Fundação Universidade Federal do Rio Grande. Em 2007, obteve título de mestre em Engenharia de Estruturas pela Universidade Federal de Santa Catarina. Também obteve título de Especialista em Planejamento pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul no ano de 2013. Desde 2011 desenvolve atividades de projeto de linhas de transmissão na Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica – CEEE-GT.



**Augusto Carlos Dias** nasceu em Cachoeira do Sul/RS no ano de 1986. Graduou-se em Engenharia Civil no ano de 2008 pela Fundação Universidade Federal do Rio Grande. Desde 2009 desenvolve atividades de projeto de linhas de transmissão na Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica – CEEE-GT.