



TORRES DE LINHA DE TRANSMISSÃO SOB AÇÃO DE VENTOS ORIGINADOS DE CICLONES EXTRATROPICAIS E DE DOWNBURSTS

Rodolfo S. Conceição

rodolfo.aju@hotmail.com

Instituto Federal de Sergipe - IFS

Av. Eng. Gentil Tavares, 1166, Getúlio Vargas, 49055260, Aracaju, Sergipe, Brasil

Michèle S. Pfeil

Ronaldo C. Battista

mpfeil@coc.ufrj.br

battista@coc.ufrj.br

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Av. Pedro Calmon, 550 - Cidade Universitária, 21941-901, Rio de Janeiro, Brasil

Resumo. Em geral, as normas de projeto para torres e linhas de transmissão não são aplicáveis a estruturas para grandes travessias (maiores do que 1000m) e consideram apenas ações de ventos originados de ciclones extratropicais. Registros de acidentes nestes tipos estruturais têm motivado constantes pesquisas acerca do comportamento estrutural e da adequação dos critérios de projeto. Este trabalho apresenta análises de modelos numéricos do sistema torre-linhas aéreas sob a ação de ventos originados de ciclones extratropicais (EPS) e de downbursts efetuadas por meio de uma ferramenta computacional especialmente desenvolvida. Exemplo de um feixe de cabos de 1000m de vão foi utilizado para validação de implementações computacionais realizadas e para avaliação de certas considerações nas análises dinâmicas. Um modelo de torre de 118,4 m de altura foi idealizado para suporte de 3 feixes de 4 cabos condutores cada um e dois cabos para-raios com vãos adjacentes de 1000m e verificado em estados limites últimos para esforços estáticos de ação de vento EPS. A análise dinâmica deste modelo sob ação do vento tipo EPS gerou fator de amplificação dinâmica significativo e para o vento do tipo downburst foi mostrado que é suficiente uma análise estática não linear utilizando apenas a configuração "crítica" para sua localização.

Palavras-chave: Torres e linhas de transmissão de energia elétrica, Ação do vento, Downburst.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, ainda hoje a principal fonte de energia elétrica são as usinas hidrelétricas devido a seu custo de produção e aos amplos recursos hídricos existentes. Sua principal forma de distribuição utiliza linhas aéreas de transmissão apoiadas em torres compostas, em sua maioria, de estruturas de aço e devido às propriedades deste material possuem elementos muito esbeltos e que tornam sua estrutura bastante leve e flexível.

No Brasil há um histórico significativo de acidentes em torres e linhas de transmissão, sendo a causa predominante a ação do vento. Estes acidentes causam grandes prejuízos sejam pela reconstrução e/ou reparos nas linhas e torres, ou ainda pela interrupção do fornecimento provocada pela falha em qualquer ponto da linha. CONCEIÇÃO (2013) apresenta exemplos de algumas torres danificadas pela ação do vento no Brasil, em que se verifica pelas datas dos eventos que trata-se de um problema atual. Em outras partes do planeta também se verificam frequentes acidentes com torres de linhas de transmissão (HOLMES, 2000; OLIVER *et al.*, 2000; FU *et al.*, 2010).

Estes acidentes têm motivado diversas pesquisas tanto em torres isoladas quanto no sistema completo torre-linha para melhor entendimento de suas causas. Algumas destas pesquisas incluem também a caracterização e aplicação de ventos originados de outras tormentas, além dos ciclones extratropicais que são mais comuns.

As tormentas são os sistemas meteorológicos que originam ventos de alta velocidade (ventos fortes), independentemente de seu mecanismo de formação. Dentre estes ventos estão os originados por ciclones extratropicais, ciclones tropicais, tormentas elétricas e tornados. Em ciclones extratropicais, com ventos de alta velocidade, a rugosidade da superfície terrestre causa uma turbulência tão intensa que a mistura entre camadas adjacentes de ar impede processos de convecção. As flutuações são quase que exclusivamente causadas por agitação mecânica do ar, com a formação de um grande número de turbilhões ou redemoinhos (BLESSMANN, 1995). Entretanto, há tormentas que contêm componentes importantes de origem térmica, tais como ciclones tropicais (furacões, no Atlântico Norte) em seus estágios iniciais e tormentas elétricas.

As normas de projeto brasileiras, que tratam da ação do vento nas estruturas, consideram apenas os ventos originários de sistemas de ciclones extratropicais, os quais já foram bastante estudados e são caracterizados por um escoamento horizontal de velocidade média aproximadamente constante em torno da qual se observam flutuações devidas principalmente à rugosidade da superfície do terreno. Entretanto, mesmo com baixa probabilidade de ocorrência, outros tipos de tormentas podem atuar no sistema estrutural como os ciclones tropicais e as tormentas elétricas. Em estudo realizado pelo CIGRÉ (2008) – *International Council on Large Electric Systems* – foram registradas recomendações específicas para ventos do tipo *downburst* e tornados nas normas de países como Austrália, Estados Unidos, Argentina, África do Sul e Canadá.

Tradicionalmente o projeto de linhas aéreas de transmissão de energia e seus suportes (torres e fundações) é feito com base em análises estáticas de modelos analíticos e/ou numéricos da torre desacoplada das linhas aéreas para ação de vento originado de ciclones extratropicais. No Brasil a norma que rege estes projetos é a NBR5422 - Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica (ABNT, 1985). Entretanto, a norma internacional IEC60826 (2003) vem sendo utilizada nos projetos de torres e linhas aéreas no Brasil conforme levantamento sobre as práticas de projeto realizado pelo CIGRÉ (2004, 2008).

Os modelos indicados nas normas podem ser adequados para linhas até certo comprimento de vãos acima do qual os efeitos dinâmicos devem ser investigados. Além disso, ventos originados de outros fenômenos meteorológicos devem também ser considerados.

Tradicionalmente a análise dinâmica do sistema torres – linhas aéreas é feita desacoplando-se as linhas das torres, com base no argumento de que a frequência fundamental da torre isolada f_T é muito maior do que a frequência fundamental f_L das linhas ou feixes de linhas livremente suspensas, ou não, pelas cadeias de isoladores. Entretanto, análises de vibração livre e de respostas aeroelásticas de modelos acoplados torre-linhas aéreas propostos por RODRIGUES (1999, 2004) mostraram que a torre participa dos modos de vibração dominados pelo movimento dos condutores. Assim, a hipótese de desacoplamento dinâmico entre linhas e torres fica prejudicada. YASUI *et al.* (1999), DIANA *et al.* (1998) e MENEZES *et al.* (2012) também efetuaram análises dinâmicas com o modelo acoplado torre-linha.

Dentre os primeiros pesquisadores a chamar a atenção para o efeito destrutivo de *downbursts* em torres de LT estão HOLMES e OLIVER (1996), que realizaram estudos para realizar a reprodução dos registros de anemômetros produzidos por *downbursts* e determinar as dimensões físicas destes eventos.

OLIVER *et al.* (2000) estudaram um modelo prático para estimar o risco de um ataque de *downburst* prejudicial sobre uma linha de comprimento e orientação especificados, o qual foi desenvolvido e aplicado para linhas de alta tensão na Austrália. LOU *et al.* (2009) compararam os efeitos da ação do vento *downburst* aos do vento de tormentas extratropicais em torre de linha de transmissão com 178m de altura, foi verificado que os deslocamentos no topo da torre para o *downburst* são superiores em mais de 100% que o vento EPS.

FU *et al.* (2010) investigaram um acidente destrutivo de uma linha de transmissão de Zhengxiang, na China, no qual seis torres colapsaram por rajadas de vento *downburst*. O estudo verificou que as tensões geradas nas torres ultrapassaram os valores de projeto sobrecarregando as torres e levando-as ao colapso.

Diversas pesquisas sobre torres e linhas de transmissão foram feitas também pelo CIGRÉ (2004, 2008, 2010) quanto aos critérios utilizados nos projetos, tipos de tormentas que atuam nestes sistemas e ainda sobre efeitos dinâmicos gerados pela ação do vento.

Partindo do suposto que outros tipos de vento podem ser causadores de alguns dos colapsos de torres de linhas de transmissão será abordada neste trabalho, além dos ventos de ciclones extratropicais, a verificação dos efeitos de ventos do tipo *downbursts* originários de tormentas elétricas.

2 AÇÃO DO VENTO

2.1 Ventos originados de ciclones extratropicais

Os ciclones extratropicais são os fenômenos mais comuns que originam ventos fortes em regiões temperadas e apresentam comportamento de características bem conhecidas. Eles ocorrem devido ao efeito mecânico de cadeias de montanhas sobre correntes atmosféricas de grandes dimensões ou pela interação de massas de ar ao longo das frentes frias. Recebem o nome de sistemas de pressão plenamente desenvolvidos ou tormentas EPS (*extended pressure systems*) quando se encontram em seu estágio “maduro”, por esta razão, doravante serão chamados apenas de tormentas EPS (BLESSMANN, 1995; CIGRÉ, 2004).

As tormentas EPS produzem ventos em equilíbrio dinâmico com a rugosidade da superfície terrestre, daí denominados ventos oriundos de camada limite. Estes ventos têm como principal característica pequenas variações na intensidade e direção da velocidade média por várias horas, ou até dias, por isso são também chamados de bem comportados.

Modelagem Matemática das Forças de Vento

Para ventos oriundos de tormentas EPS, a componente da velocidade na direção média do escoamento (direção longitudinal, x), pode ser decomposta em duas parcelas: uma de valor

médio $\bar{U}$, aproximadamente constante ao longo do tempo e variável apenas com a altura, e outra flutuante em torno da média u , de modo que em dado ponto situado em uma altura z a velocidade de vento pode ser escrita como:

$$U(x, y, z, t) = \bar{U}(z) + u(x, y, z, t) \quad (1)$$

Existem também componentes flutuantes nas duas direções ortogonais à direção principal do escoamento, a componente lateral $v(x, y, z, t)$ e vertical $w(x, y, z, t)$, muitas vezes desprezadas, entretanto neste trabalho serão também consideradas.

A velocidade média varia ao longo da altura acima do solo em função do perfil de rugosidade do terreno, o qual pode ser representado através da lei logarítmica ou da lei potencial (SIMIU e SCANLAN, 1996). A lei potencial, utilizada na NBR6123 (ABNT, 1988), relaciona duas velocidades médias em duas alturas, dentro da camada limite atmosférica, e é representada pela seguinte expressão:

$$\frac{\bar{U}(z)}{\bar{U}(z_g)} = \left(\frac{z}{z_g} \right)^p \quad (2)$$

onde z é a altura na qual se deseja conhecer a velocidade média, z_g é uma altura de referência com velocidade conhecida e p é um coeficiente que depende das características de rugosidade do terreno.

Existem diversas expressões propostas para os espectros S_u , S_v e S_w . Em geral estas expressões são baseadas em medições experimentais e são escritas na forma adimensional. Dentre os espectros de flutuação da componente longitudinal S_u mais utilizados estão o espectro de Harris, adotado na NBR6123 (ABNT, 1988), o espectro de Davenport, o espectro de Kaimal e o espectro ESDU (Engineering Sciences Data Unit, 1974) o qual é adotado pelo Eurocódigo 1 (2005). O espectro de Harris é dado pela seguinte equação:

$$\frac{f S_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{0,6 X_1}{(2 + X_1^2)^{5/6}} \quad (3)$$

onde X_1 é a frequência adimensional, dada pela equação (4), em que L_1 é uma dimensão característica tomada igual a 1800m em função de ajustes e dados experimentais. E a variância σ_u^2 é dada pela equação (5)

$$X_1 = \frac{f L_1}{\bar{U}(z)} \quad (4)$$

$$\sigma_u^2 = \frac{20}{3} C_{as} U_{10}^2 \quad (5)$$

onde C_{as} é o coeficiente de arrasto superficial e U_{10} é a velocidade média a uma altura de 10m e para o tempo de 10 minutos.

As velocidades flutuantes do vento em dois pontos distintos são também distintas, entretanto, há uma interdependência entre os valores. A correlação espacial, no domínio da frequência, pode ser obtida através da função densidade espectral cruzada de turbulência, cuja parte real é chamada co-espectro cruzado, dada pela expressão (SIMIU e SCANLAN, 1996):

$$S_{ij}(f) = \sqrt{S_i(f) S_j(f)} \Psi_u(\Delta_r, f) \quad (6)$$

sendo $\Psi_u(\Delta_r, f)$ a função de co-espectro normalizado, dada pela expressão:

$$\Psi_u(\Delta_r, f) = \exp \left[- \frac{f \sqrt{C_x^2(x_i - x_j)^2 + C_y^2(y_i - y_j)^2 + C_z^2(z_i - z_j)^2}}{\bar{U}_{ref}} \left(\frac{z_m}{z_{ref}} \right)^{-\beta} \right] \quad (7)$$

onde x_i, y_i, z_i e x_j, y_j, z_j são as coordenadas dos pontos i e j , respectivamente; z_m é a altura média entre os pontos i e j ; $\bar{U}_{ref}$ é a velocidade média na altura de referência z_{ref} ; β é um coeficiente igual a 0,3 e C_x, C_y, C_z são os coeficientes de decaimento das correlações.

A resposta devida à ação do vento em estruturas de comportamento fracamente não linear pode ser obtida superpondo-se a resposta estática não linear devido a força média de vento à máxima resposta dinâmica para a força flutuante obtida através da análise no domínio da frequência utilizando a função densidade espectral. Para estruturas com não linearidade mais forte, entretanto, utiliza-se a análise no domínio do tempo para a determinação da máxima resposta dinâmica.

O cálculo da resposta no domínio do tempo requer a geração de históricos de vento correlacionados espacialmente. A duração de tais históricos precisa ser suficientemente longa para que a variância da resposta calculada seja permanentemente constante, para a qual a máxima resposta esperada pode ser obtida multiplicando o desvio padrão da resposta pelo fator de pico (Eq. 9) (DAVENPORT, 1961). Em geral utiliza-se um intervalo de tempo igual a 10 minutos.

$$x_{max} = \bar{x} + g \sigma_x \quad (8)$$

$$g = \sqrt{2 \ln(f_j T)} + \frac{0,577}{\sqrt{2 \ln(f_j T)}} \quad (9)$$

onde $\bar{x}$ é o deslocamento devido a força média, g é um fator de pico, f_j é a frequência do modo de vibração da resposta e T é o intervalo de tempo da estimativa.

Um método para gerar histórias simples de vento que apresentam características semelhantes é o da auto-regressão (BUCHHOLDT *et al.*, 1985). A correlação entre duas velocidades flutuantes de vento em dois pontos é expressa em termos da função de correlação cruzada e do espectro cruzado e devem também ser incluídas na geração dos históricos de vento. BUCHHOLDT (1998) apresentou um método, o qual baseia-se numa análise de autovalores da matriz de correlação cruzada $R(0)$.

As forças de arrasto devidas à ação do vento são calculadas, geralmente, pela expressão:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho C_a A_{ef} U_{rel}^2 \quad (10)$$

onde ρ é a massa específica do vento; C_a é o coeficiente de arrasto da estrutura, ou parte da estrutura, da direção em que está sendo considerada a ação do vento; A_{ef} é a área de referência (área da projeção), sobre a qual é calculada a força exercida pelo vento; U_{rel} é a velocidade de vento em relação à estrutura.

Além das forças de arrasto tem-se também outras duas componentes de força resultante de vento sobre um corpo, forças de sustentação e lateral, definidas de modo semelhante à força de arrasto (Eq. 10), porém com os coeficientes de força de sustentação e lateral.

Para a análise de estruturas de comportamento dinâmico sob a ação do vento, a força de arrasto é decomposta nas duas parcelas, média e flutuante; assim a Equação (10) aplicada apenas à direção longitudinal (direção da velocidade média) é reescrita na forma:

$$F_a(t) = \frac{1}{2} \rho C_a A_{ef} (\bar{U} + u - \dot{x})^2 \quad (11)$$

onde $\dot{x}$ é a velocidade da estrutura na direção da força.

Previamente à análise dinâmica realiza-se a análise estática na qual é aplicada a força média, calculada com a velocidade média sobre o intervalo de 10 minutos $\bar{U}$.

Para projetos de torres e linhas de transmissão, existem no Brasil duas normas para determinação das forças devidas à ação do vento: a NBR6123 – Forças devidas ao vento em edificações (ABNT, 1988) e a NBR5422 – Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica (ABNT, 1985). As duas normas apresentam discrepâncias quanto à definição de velocidade do vento e procedimentos de cálculo das forças no sistema LTEE (torre, isoladores e cabos), algumas destas diferenças foram mostradas por CARVALHO (2010) e KOELLER (2012). Neste trabalho serão consideradas as prescrições da NBR 6123 (ABNT, 1988).

Para os cabos serão consideradas as velocidades média $\bar{U}$, flutuante na direção principal u , flutuante na direção vertical w e velocidades da estrutura $\dot{x}$ e $\dot{z}$, como mostrado na figura 1.

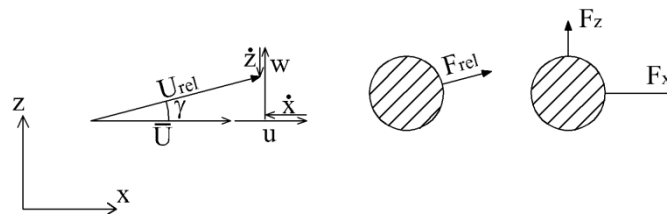


Figura 1 – Forças atuantes nos cabos

Para determinar as forças de vento atuantes nas torres de suporte das linhas de transmissão, a torre é decomposta em segmentos menores denominados painéis. Discretizada a estrutura calculam-se então as forças para cada painel individualmente. Para o cálculo dos coeficientes de arrasto serão consideradas as recomendações da NBR6123 (ABNT, 1988).

Para a torre serão consideradas as velocidades média $\bar{U}$, flutuante na direção principal u e flutuante na direção transversal v , como mostrado na Figura 2. Para a velocidade resultante e seu ângulo de incidência α são calculadas as forças de arrasto e sustentação. As parcelas de amortecimento aerodinâmico podem ser desprezadas.

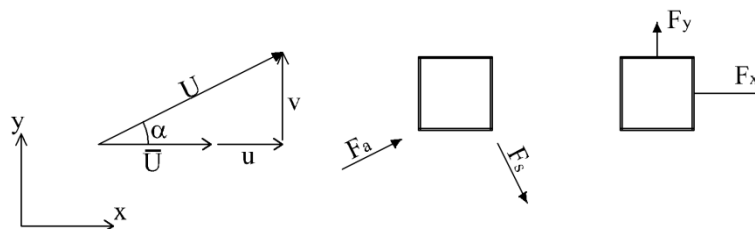


Figura 2 – Forças de arrasto atuantes na torre.

2.2 Tormentas elétricas - downbursts

O *downburst* foi definido por FUJITA (1985, *apud* HOLMES e OLIVER, 1996) como “uma forte corrente de ar descendente que induz uma explosão de ventos fortes sobre ou próximo ao solo”. Quando este escoamento atinge o solo, o jato converte-se em um escoamento radial, encabeçado por um vórtice ao redor do *downburst*, formando um anel de

vórtices. O *downburst* apresenta duração de 2 a 10 minutos (VICROY, 1991), e seu campo de velocidade é considerado como sendo axissimétrico, onde o vetor velocidade $V_t(r, z, t)$ é decomposto em dois: componente vertical V_z e componente radial V_r .

As nuvens cumulonimbus, formadoras do *downburst*, podem ser transportadas pela circulação dos ventos da região em que ela se encontra. Esse tipo de vento é geralmente chamado de vento de fundo e é modelado com velocidade e direção constantes.

O estudo do vento *downburst* é relativamente novo se comparado ao de ventos de tormentas EPS. DAMASCENO NETO (2012) apresenta uma descrição resumida dos principais modelos encontrados na literatura.

Modelagem Matemática das Forças de Vento

A Figura 3 mostra um modelo típico de *downburst* para a velocidade radial. Na Figura são mostrados o perfil vertical, conforme modelo de WOOD e KWOK (1998) (Eq. 12), e o perfil radial, conforme modelo de HOLMES e OLIVER (2000) (Eqs. 14 e 15), de variação da componente radial V_r da velocidade. Radialmente esta componente V_r apresenta uma variação linear positiva (acrécimo) desde o centro da tormenta até atingir seu valor máximo em r_{max} (aproximadamente 1,5km) e depois decai de forma exponencial até $2r_{max}$ (aproximadamente 3,0km). Verticalmente a velocidade radial apresenta um acréscimo exponencial a partir do terreno (cota $z=0$) até z_{max} (aproximadamente 80m) e depois decai suavemente até $4z_{max}$.

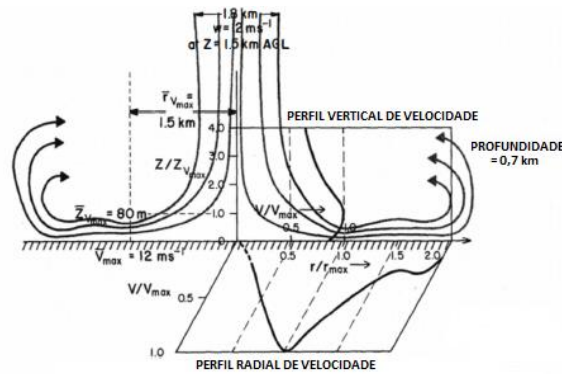


Figura 3 – Perfis de velocidade radial V_r de um *downburst* (HJELMFELT, 1988).

$$V_r(z) = 1,55 \left(\frac{z}{\delta} \right)^{\frac{1}{6}} \left[1 - \operatorname{erf} \left(0,70 \frac{z}{\delta} \right) \right] V_{r,max} \quad (12)$$

onde $V_r(z)$ é a velocidade radial a uma altura z acima do solo; $V_{r,max}$ é a máxima velocidade radial do *downburst*; δ é a altura onde a velocidade radial é igual a metade da velocidade radial máxima; erf é a função erro que é dada pela equação (13).

$$\operatorname{erf}|x| = [1 - (1 + 0,2784|x| + 0,2314|x|^2 + 0,0781|x|^4)^{-4}] \quad (13)$$

$$V_r(r) = V_r(z) \cdot e^{\left(-\frac{r}{r_{max}} \right)}, \quad r < r_{max} \quad (14)$$

$$V_r(r) = V_r(z) e^{\left(-\frac{r}{r_{max}} \right)} \cdot e^{-\left(\frac{r-r_{max}}{R} \right)^2}, \quad r \geq r_{max} \quad (15)$$

onde $V_r(r)$ é a velocidade radial a uma distância radial r do centro da tormenta; $V_r(z)$ é a velocidade radial máxima de z ; r_{max} é a distância na qual ocorre $V_{r,max}$; R é uma escala de

comprimento radial; t é o tempo medido a partir de quando o *downburst* está no pico de intensidade; T é a duração característica da tormenta.

CHEN e LETCHFORD (2007) propuseram um modelo denominado NDESH (*Nonparametric deterministic-stochastic hybrid*) para simular a parcela flutuante $u(z,t)$ da velocidade do *downburst*, neste modelo considera-se que a turbulência é função da intensidade da velocidade radial média. Desta maneira CHEN e LETCHFORD (2007) propuseram a seguinte expressão para cálculo da velocidade flutuante.

$$u(z,t) = \tilde{\sigma}(z,t) \cdot v(z,t) \quad (16)$$

onde $\tilde{\sigma}(z,t)$ é o desvio padrão variável e $v(z,t)$ é o vetor de velocidade flutuante com variância e desvio padrão unitários. O desvio padrão variável $\tilde{\sigma}(z,t)$ pode ser obtido através da expressão da intensidade de turbulência dada pela Equação (17), onde V_R é a velocidade resultante no plano horizontal.

$$\tilde{\sigma}(z,t) = I_v(z,t) \cdot V_R(z,t) \quad (17)$$

CHEN e LETCHFORD (2007) verificaram que o modelo empírico para variação ao longo da altura da intensidade de turbulência do vento tradicional de camada limite, proposto no ASCE7-98 (ASCE, 1999) também se aplica para *downbursts*.

$$I_u(z) = I_{u_{10}} \left(\frac{10}{z} \right)^{1/6} \quad (18)$$

onde $I_{u_{10}}$ é a intensidade de turbulência a 10m de altura. Para dois registros de *downburst* observou-se que $I_{u_{10}}$ assumiu os valores de 0,088 e 0,085 (CHEN e LETCHFORD, 2007).

A Figura 4 mostra o modelo típico para a componente vertical V_z da velocidade de vento em um *downburst*, apresentando os perfis radial e vertical de variação de V_z , conforme modelo de VICROY (1992) (Eq. 19). O perfil radial apresenta sua intensidade máxima no centro do *downburst* (onde a velocidade radial é nula) e decai até tornar-se nula quando a velocidade radial é máxima voltando a aumentar novamente, contudo em sentido ascendente, devido à formação dos vórtices radiais. O perfil vertical de velocidade vertical apresenta crescimento quase linear a partir da superfície.

$$V_z(r,z) = g(r^2) q(z) \quad (19)$$

onde os perfis radial $g(r^2)$ e vertical $q(z)$ da velocidade vertical de vento são dados pelas expressões:

$$g(r^2) = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r^2}{r_{\max}^2} \right)^\alpha \right] e^{\left[\frac{2 - \left(\frac{r^2}{r_{\max}^2} \right)^\alpha}{2\alpha} \right]} \quad (20)$$

$$q(z) = -\lambda \left\{ \frac{z_{\max}}{C_1} [e^{C_1(z/z_m)} - 1] - \frac{z_{\max}}{C_2} [e^{C_2(z/z_m)} - 1] \right\} \quad (21)$$

onde α, C_1, C_2 são constantes do modelo; $z_{\max}$ é a altura em que a velocidade radial V_r máxima é atingida (m); r é a coordenada radial (m); z é a altitude acima do solo (m); $V_z(r,z)$ é a componente vertical da velocidade numa coordenada radial r a uma altura z ; λ é um fator

de escala (Eq. 22). VICROY (1992) recomendou para as constantes do modelo os valores de $\alpha = 2$; $C_1 = -0,15$; $C_2 = -3,2175$.

$$\lambda = 2 \frac{V_{r,m\acute{a}x}}{r_{m\acute{a}x}} \left[\frac{1}{e^{\frac{1}{2\alpha}(e^{C_1} - e^{C_2})}} \right] \quad (22)$$

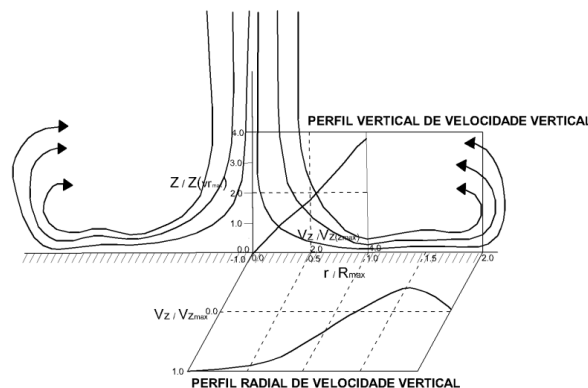


Figura 4 – Perfis de velocidade vertical de um *downburst* (adaptado de HJELMFELT, 1988).

Para a engenharia estrutural, considerando a ação de um *downburst* em estruturas altas como torres e edificações, somente há interesse na componente horizontal V_r . Já para elementos estruturais suspensos e leves, tais como cabos de linhas de transmissão e coberturas, a componente vertical V_z da velocidade de vento pode gerar forças verticais importantes se o “olho” do *downburst* atinge estes elementos.

As forças devidas à ação do vento são dadas, como dito anteriormente, pela Eq (10). Inicialmente deve-se calcular a velocidade horizontal total V_H (velocidade radial média + velocidade radial flutuante + velocidade do vento de fundo) e a velocidade vertical V_z . Para tanto, se faz necessário definir os dados característicos do fenômeno.

Assim como foi descrito para tormentas EPS, nos cabos serão consideradas as componentes horizontal e vertical das velocidades do *downburst* e da estrutura e na torre serão consideradas apenas as velocidades do *downburst*, desprezando-se o amortecimento aerodinâmico.

3 PROGRAMA COMPUTACIONAL VESFEM

Esta seção apresenta uma breve descrição do programa computacional utilizado e um conjunto de resultados gerados a partir do modelo de um cabo LTEE isolado sob ações de vento EPS e *downburst* para avaliar certas considerações na análise de cabos de grande vão. A validação do programa foi efetuada com exemplos simples e está descrita em (CONCEIÇÃO, 2013).

Para realização das análises estruturais dos modelos computacionais criados será utilizado o programa VESFEM, desenvolvido em trabalhos anteriores do Instituto COPPE (PFEIL, 1993, RODRIGUES, 2004 e CONCEIÇÃO, 2013). O programa VESFEM foi desenvolvido em linguagem FORTRAN utilizando uma linguagem de macro-instruções, cada qual associada a um conjunto de subprogramas compactos destinados a realizar uma ou mais tarefas no processo de solução pelo MEF (RODRIGUES, 2004).

PFEIL (1993) e RODRIGUES (2004) desenvolveram o programa VESFEM com o campo de velocidades de tormentas EPS, para o qual utiliza-se a lei exponencial para o perfil

de velocidades médias, o método da auto-regressão para geração dos históricos simples de velocidades flutuantes com o espectro de Harris e o Procedimento apresentado por BUCHHOLDT *et al.* (1985) para geração dos históricos correlacionados espacialmente. CONCEIÇÃO (2013) desenvolveu novos procedimentos no programa VESFEM sendo estes; geração de campo de velocidades de vento correlacionadas pelo procedimento apresentado por BUCHHOLDT (1998), rotina para geração do campo de velocidades de um *downburst* e cálculo das correspondentes forças de vento, procedimento para análises dinâmica linear e dinâmica não linear sob ação de vento *downburst* e procedimento para análise estática sob ação de vento *downburst*.

A análise dinâmica utilizando o vento *downburst* é realizada atribuindo um ponto de origem para a tormenta e fazendo-a percorrer no plano horizontal em função da velocidade do vento de fundo e do seu ângulo de deslocamento. Em cada instante de tempo, ou seja, para cada nova posição, são calculadas e aplicadas à estrutura as forças radiais e verticais, gerando assim, as respectivas respostas no modelo estrutural (deslocamentos, velocidades, acelerações e esforços).

Na análise estática com o vento *downburst*, as forças aplicadas na estrutura correspondem a uma condição crítica, caracterizada pela posição da tormenta em que a velocidade radial atinge seu valor máximo em um determinado nó de referência do modelo (atribuído no arquivo de entrada). Da mesma forma que para a análise com ventos originados de tormentas EPS, a análise estática é não linear geométrica.

3.1 Exemplo numérico – Exemplo de cabo de LT isolado

O modelo simplificado de um feixe de cabos (Figura 5) será utilizado para avaliação da necessidade de análise dinâmica linear ou não linear quando sujeito a tormentas EPS e *downbursts*.

O modelo foi criado com elementos de treliça com 5m de comprimento em um vão total de 1000m para o feixe de cabos e outros 2 elementos com 2,90 metros para os isoladores, além de 2 elementos de conexão localizados nas extremidades dos feixes de cabos para representar as condições de contorno elásticas da continuidade da linha, totalizando 204 elementos.

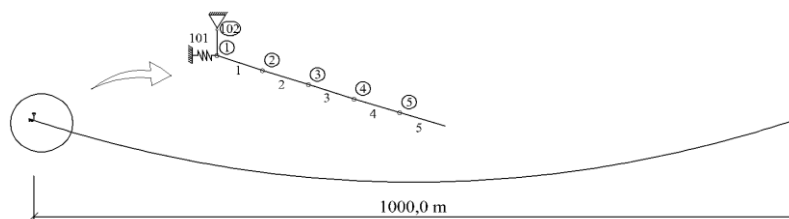


Figura 5 – Modelo do cabo isolado

O modelo estrutural adotado neste item representa um feixe de quatro cabos tipo AACSR 535/240 (AACSR – *Aluminum Alloy Conductor Steel Reinforced*) e que será adotado também no modelo completo torre-linha para os condutores da seção seguinte. A deformada do cabo para ação do peso próprio assume a forma de uma catenária. O cabo é projetado de forma que após a aplicação da carga peso, a tração equivalente resulte em 20% da tração última de ruptura (condição de tração EDS *Every Day Stress*) (NBR5422, ABNT 1985). Assim, o cabo apresenta uma flecha máxima de 44,1m, e está suspenso nos isoladores na cota de altura igual a 113,6m.

Analisando o modelo do cabo em regime de vibração livre não amortecida sob tensões iniciais (peso próprio, tração de projeto no cabo e ação das forças de vento devido a

velocidade média) tem-se para as frequências naturais associadas aos primeiros modos diversos valores abaixo de 1,0 Hz, sendo a frequência fundamental igual a 0,084Hz. Nas análises dinâmicas subsequentes foram utilizados todos os modos de vibração com frequência abaixo de 1,0Hz.

As frequências naturais abaixo de 1,0 Hz indicam que o sistema, quando submetido à ação do vento turbulento, pode apresentar resposta flutuante significativa na direção da velocidade média, apresentando um fator de amplificação dinâmica significativo. Para cabos, o movimento é dominado pelo amortecimento aerodinâmico, sendo o amortecimento estrutural menos importante, especialmente em ventos fortes (BACHMANN, 1995 *apud* CAPPELLARI, 2005). Nas análises dinâmicas para obtenção das respostas devidas à ação do vento adotou-se o modelo de amortecimento estrutural proporcional à massa, sendo a taxa associada ao primeiro modo igual a 2,0%. O amortecimento aerodinâmico é considerado automaticamente pelo programa desenvolvido (CONCEIÇÃO, 2013), sendo a taxa de associada ao primeiro modo igual a 28,0%.

Análise estática x dinâmica linear x dinâmica não linear – Tormentas EPS

A tabela 1 apresenta os deslocamentos horizontais (na direção da velocidade média) e verticais e os esforços, para o modelo do cabo, obtidos através de análise estática não linear sob ação das forças de vento correspondentes ao instante em que ocorre o pico de resposta dinâmica, dinâmica linear e dinâmica não linear. Em todas as análises considerou-se velocidade básica do vento igual a 30m/s, localizado em terreno de categoria de rugosidade II e para as análises dinâmicas utilizou-se o espectro de Harris para geração dos históricos de velocidade flutuante.

Tabela 1 – Respostas máximas no modelo do cabo sob ação de tormentas EPS

Parâmetro	Tipo de Análise	Freq. Modo Dominante (Hz)	Fator de pico (Eq. 9)	Valor Médio	Desvio Padrão	Valor máximo (Eq. 8)
Deslocamentos horizontais (m)	Estática de pico	---	---	---	---	28,02
	Din. Linear	0,084	3,01	23,6	3,44	33,95
	Din. Não Linear	0,084	3,01		3,33	33,62
Deslocamentos verticais (m)	Estática de pico	---	---	---	---	5,26
	Din. Linear	0,135	3,16	3,9	1,56	8,83
	Din. Não Linear	0,135	3,16		1,63	9,06
Esforços Axiais (kN)	Estática de pico	---	---	---	---	441,88
	Din. Linear	0,135	3,16	428,2	14,67	474,56
	Din. Não Linear	0,135	3,16		13,95	472,28

Na análise estática de pico são consideradas as forças correspondentes ao instante em que ocorre o pico de resposta obtido na análise dinâmica.

Para as análises dinâmicas, inicialmente é feita uma análise estática não linear geométrica do cabo sujeito ao peso próprio, protensão e forças de vento devido à velocidade média. A análise dinâmica linear é realizada com o método da superposição modal a partir dos modos obtidos após a análise estática prévia. Para análise dinâmica não linear é também considerada a não linearidade geométrica nos elementos ao longo do tempo e as respostas dinâmicas são obtidas através do algoritmo de integração direta de Newmark.

Nas análises dinâmicas a resposta máxima esperada é obtida pelas expressões (8) e (9). Assim, adotam-se para cálculo do fator de pico g , as frequências dominantes das respostas obtidas através da transformada de Fourier dos históricos.

Das análises realizadas verifica-se que as análises dinâmicas forneceram valores superiores aos obtidos nas análises estáticas em todos os parâmetros analisados, apesar do amortecimento aerodinâmico ser alto neste tipo de estrutura, ratificando a necessidade da análise dinâmica. Por fim, nota-se que as respostas da análise dinâmica linear são muito próximas às da análise dinâmica não linear.

A Figura 6 mostra a transformada de Fourier da resposta no domínio do tempo dos esforços axiais nos elementos de cabo. Observa-se uma resposta ressonante para o modo associado à frequência de 0,135Hz além da resposta quase-estática. A forma do modo principal da resposta corresponde preponderantemente a deslocamentos modais verticais.

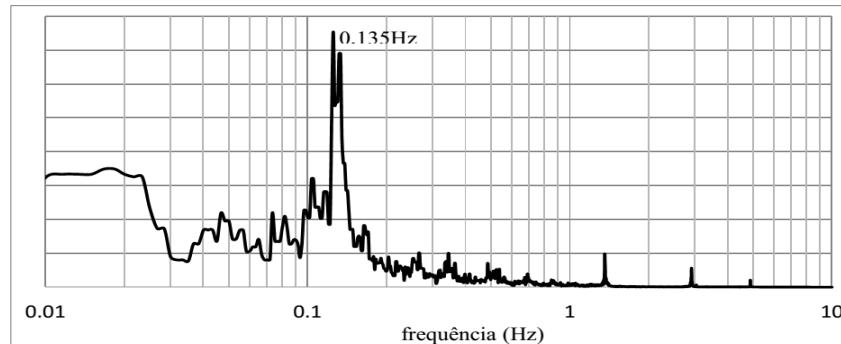


Figura 6 – Transformada de Fourier da resposta para esforços axiais nos elementos de cabo

Análise Estática x dinâmica linear x dinâmica não linear – Downburst

Dados os grandes deslocamentos gerados nos cabos pela ação do *downburst* torna-se necessário realizar uma análise dinâmica não linear geométrica para considerar o acréscimo de rigidez no cabo devido ao aumento dos esforços axiais. Para cálculo do fator de amplificação dinâmica FAD realizou-se também uma análise estática, na qual é feita uma varredura de todas as possíveis localizações do *downburst*, sendo aplicadas apenas as forças geradas no tempo em que foi medida a maior velocidade radial.

Considerou-se o campo tridimensional de velocidade de vento de um *downburst* sendo transladado por um vento de fundo em direção ao cabo isolado adotado como exemplo. Para o campo de velocidades foram adotados: velocidade máxima radial $V_{r,max} = 60m/s$, altura onde ocorre $V_{r,max}$, $z_{max} = 80m$, distância radial onde ocorre $V_{r,max}$, $r_{max} = 1500m$, fator de escala $R=750m$, duração característica da tormenta $T = 300s$.

Comparando as respostas das análises dinâmicas linear e não linear verifica-se que os deslocamentos horizontais (transversal ao eixo da LT), como esperado, apresentam redução significativa na análise não linear em relação à linear (CONCEIÇÃO, 2013).

Para avaliação da amplificação dinâmica no modelo para o vento *downburst*, realizaram-se análises estáticas e dinâmicas não lineares com intensidades de turbulência a 10m de altura iguais a 8,8% e 18%. Na Tabela 2 são apresentados os valores de pico para deslocamentos horizontais (perpendicular à linha) e verticais no ponto médio do cabo e os esforços axiais para um elemento do modelo gerados com a análise dinâmica não linear e a análise estática. A mesma tabela mostra os correspondentes fatores de amplificação dinâmica gerados (FADs).

Observa-se na Tabela 2 que os deslocamentos horizontais máximos no ponto médio do cabo e os esforços axiais nos elementos praticamente não apresentam amplificação dinâmica. Já os deslocamentos verticais para o ponto médio do cabo apresentam amplificação de 10% e 15%, respectivamente, para os modelos com intensidade de turbulência iguais a 8,8% e 18,0%. Como os resultados para os esforços apresentaram boa correlação entre as análises estática e dinâmica não linear, com um fator de amplificação dinâmica máximo de 3%, justifica-se apenas uma análise estática simplificada para estruturas sob ação do *downburst*.

Tabela 2 – Respostas para o modelo simplificado do cabo sob ação do *downburst*

Intensidade de turbulência	Parâmetro	Anal. Est. Não Linear	Anal. Din. Não Linear	FAD
8,8%	Desloc. Horiz. (m)	-58,56	-58,89	1,01
	Desloc. Vert. (m)	20,88	22,97	1,10
	Esforços Axiais (kN)	678,61	688,22	1,01
18,0%	Desloc. Horiz. (m)	-58,73	-58,81	1,00
	Desloc. Vert. (m)	21,01	24,09	1,15
	Esforços Axiais (kN)	683,50	700,75	1,03

4 TORRE DE LINHA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

4.1 Descrição do modelo estrutural

O trecho da linha de transmissão em estudo encontra-se em alinhamento reto e as torres são compostas por perfis cantoneiras com padrões em polegadas, aço carbono ASTM-A572 Grau60 ($f_y = 415\text{MPa}$) e ligações parafusadas entre os perfis metálicos. A escolha do perfil tipo cantoneira para diagonais e montantes é justificada porque as abas desses perfis facilitam os detalhes das ligações parafusadas e a aplicação de proteção superficial.

A torre apresenta 118,4m de altura e serve como suporte para três feixes de condutores elétricos e dois cabos para-raios. Os vãos adjacentes à torre analisada são de 1000m e as cadeias de isoladores compostas por discos com corpo isolante de vidro temperado com 2,90m de comprimento.

O modelo estrutural para análise estática representa dois vãos adjacentes de condutores e para-raios em nível, suspensos por torres de mesma altura e silhueta, conforme Figura 7. Os montantes da torre foram considerados engastados em suas bases e às extremidades dos cabos foram impostas as condições de contorno para simular a continuidade da linha, sendo acopladas às extremidades as características elásticas e inerciais. Assim sendo foram modelados apenas a torre central e os trechos de condutores e para-raios a ela ligados.

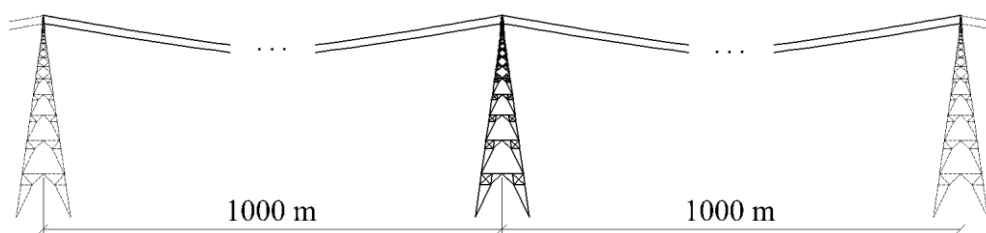


Figura 7 – Esquema estrutural adotado para análise

O modelo foi dimensionado para suportar as cargas de peso próprio e ação do vento agindo de forma estática. Os elementos dos condutores elétricos utilizados são feixes com 4 cabos do tipo AACSR 535/240 (AACSR – *Aluminum Alloy Conductor Steel Reinforced*) e os para-raios são do tipo OPGW (Optical Fiber Composite Overhead Ground Wire).

No cálculo das forças devidas ao vento foi adotada como referência a norma NBR6123 (ABNT, 1988), conforme apresentado anteriormente, exceto para os casos inexistentes nesta norma, como o coeficiente de arrasto para feixes de cabos, em que utilizaram-se de dados experimentais apresentados por CAPPELLARI (2005). Para o dimensionamento da torre foram adotados os seguintes parâmetros: velocidade básica $V_0 = 35 \text{ m/s}$, fator topográfico $S_1 =$

1,0 e fator probabilístico $S_3 = 1,1$; terreno com categoria de rugosidade III. Para o perfil de variação de velocidades médias foi utilizada a lei potencial (Eq. 2).

Analisando a estrutura completa em regime de vibração livre não amortecida sob tensões iniciais (peso próprio, protensão nos cabos e ação das forças de vento devido a velocidade média) tem-se para as frequências naturais associadas aos primeiros modos diversas frequências abaixo de 1,0 Hz. A oscilação lateral dos cabos elétricos e condutores sob ação do vento desperta os principais modos de vibração da torre, sendo a frequência fundamental de 0,081 Hz. O 1º modo de vibração em que começam a aparecer deslocamentos modais na torre apresenta frequência de 0,376 Hz, entretanto a forma modal é predominantemente do cabo.

A presença de frequências naturais inferiores a 1,0 Hz significa que o sistema formado por torre e cabos elétricos, quando exposto aos efeitos dinâmicos da turbulência atmosférica, pode apresentar resposta flutuante significativa na direção da velocidade média, assim como na direção ortogonal à incidência do vento. Entretanto, vale ressaltar que isto depende muito da taxa de amortecimento e, em especial, no caso de cabos de LTEE também do amortecimento aerodinâmico.

4.2 Modelo estrutural sob ação dinâmica de tormentas EPS

Para análise dinâmica do modelo estrutural considerou-se os mesmos parâmetros utilizados para realizar o dimensionamento, a torre analisada pertence a um sistema de linha de transmissão localizada na região amazônica ($V_0 = 35\text{m/s}$), assim, a velocidade média de projeto, na elevação 10m, é determinada pela Equação:

$$\bar{U}(10) = 0,69 b U_0 S_1 S_3 \quad (23)$$

onde, o fator 0,69 representa uma adequação do tempo de exposição à 10 minutos. Os parâmetros b e p , para cálculo do perfil de velocidades médias, assumem os valores de 0,86 e 0,185 correspondentes à categoria III da NBR6123 (ABNT, 1988).

Na simulação numérica das velocidades flutuantes foi adotado o método da autoregressão para geração dos históricos não correlacionados e o procedimento apresentado por BUCHHOLDT (1998) para geração da correlação entre os históricos das 88 faixas de vento consideradas. Para geração dos históricos foram considerados: tempo de geração do sinal, $T_{\max} = 600$ segundos; intervalo de tempo para geração, $\Delta t = 0,10$ segundos; velocidade média do vento na altura de referência: $\bar{U}(10) = 22,85\text{m/s}$; comprimento de rugosidade: $z_0 = 0,200\text{m}$. Atribuiu-se para o primeiro modo de vibração com participação da torre a taxa de amortecimento estrutural $\zeta_{\text{Torre}} = 1,0\%$, resultando para o primeiro modo de vibração a taxa de amortecimento ζ_{cabos} igual a 4,6% que é pequena em relação ao amortecimento aerodinâmico.

A resposta dinâmica da torre foi obtida usando integração numérica utilizando o algoritmo de Runge-Kutta com o método da superposição modal. Para comparação dos resultados foram obtidos os deslocamentos no topo da torre, nos nós 305 e 312 e os esforços axiais nos elementos 790, 1026, 1235 e 1502 da base da torre (Figura 8).

Na análise estática equivalente, utilizada para o dimensionamento dos elementos estruturais, os deslocamentos na direção horizontal (perpendicular à linha) e vertical do nó 305 foram iguais a -0,739m e -0,240m, respectivamente, e para o nó 312 os deslocamentos na direção horizontal e vertical foram iguais a -0,740m e 0,181m, respectivamente. Os esforços axiais nos elementos da face de barlavento (Elementos 790 e 1026) e da face de sotavento (Elementos 1235 e 1502) foram iguais a 575,7kN e -816,9kN, respectivamente.

Aplicando a transformada de Fourier nas respostas do modelo estrutural verificou-se que não há predominância de apenas um modo de vibração, assim, adotou-se para cálculo do fator de pico g , a frequência correspondente ao primeiro modo de vibração $f_1 = 0,081\text{Hz}$. Os deslocamentos e esforços apresentam os valores mostrados na Tabela 3.

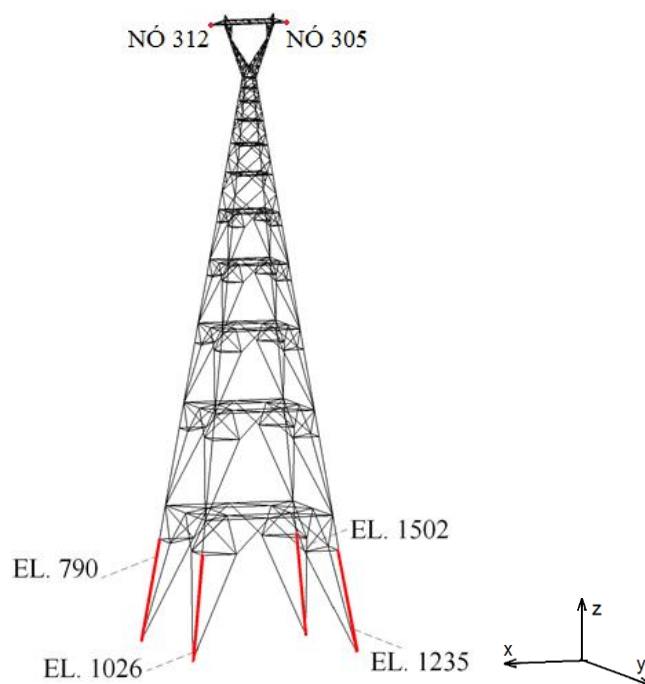


Figura 8 – Nós e elementos para verificação dos deslocamentos e esforços, respectivamente.

Tabela 3 – Respostas máximas no modelo da Torre LTEE sob ação de tormentas EPS

Local	Parâmetro	Valor Médio	Desvio Padrão	Valor máximo (Eq. 8)
Deslocamentos horizontais	Nó 305	-0,665m	0,129m	-1,052m
	Nó 312	-0,666m	0,129m	-1,053m
Deslocamentos verticais	Nó 305	-0,223m	0,048m	-0,367m
	Nó 312	0,163m	0,048m	0,307m
Esforços axiais	Elem. 790 e 1026	494,5kN	104,8kN	808,9kN
	Elem. 1235 e 1502	-734,6kN	115,7kN	-1081,7kN

Na Tabela 4 os resultados em termos de valores extremos obtidos da análise dinâmica são comparados aos resultados obtidos a partir de análise estática não-linear da estrutura sob a ação do carregamento de vento equivalente estático (aplicável à estrutura de comportamento quase-estático). Observa-se pela Tabela 4 que o carregamento estático equivalente não representa satisfatoriamente o comportamento da estrutura quando sujeita a carga dinâmica.

Tabela 4 – Comparação de resultados das análises estática equivalente e dinâmica

Parâmetro	Local	Est. Equiv. (NBR6123)	Estática de pico	Análise Dinâmica
Desl. horizontais	Nó 305	-0,739m	-0,851m	-1,052 m
Desl. verticais	Nó 305	-0,240m	-0,260m	-0,367 m
Esforços axiais	Elem. 790 e 1026	575,7kN	778,8kN	808,9 kN
	Elem. 1235 e 1502	-816,9kN	-1023,0kN	-1081,7 kN

Para verificação do fator de amplificação dinâmica foram aplicadas a estrutura através de uma análise estática não linear as forças de geradas no instante em que ocorre o pico das

respostas na análise dinâmica. Observa-se que a análise dinâmica fornece coeficientes de amplificação dinâmica consideráveis para os deslocamentos horizontais e verticais, entretanto para os esforços as respostas foram próximas.

4.3 Modelo estrutural sob ação de downburst

Para avaliar a influência do *downburst* agindo sobre o modelo de torres e linhas e transmissão foram feitas simulações com este tipo de vento, sendo transladado por um vento de fundo a 90° e 45° com o eixo da linha, e com o centro da tormenta passando sobre a torre e sobre o ponto médio de um dos vãos. Desta forma serão verificados três casos, com a posição inicial do *downburst* indicadas na Figura 9:

- Caso 1 – Vento transladado a 90° com o eixo da linha e cruzando com a torre;
- Caso 2 – Vento transladado a 90° com o eixo da linha e cruzando com o ponto médio de um dos vãos da linha;
- Caso 3 – Vento transladado a 45° com o eixo da linha e cruzando com a torre.

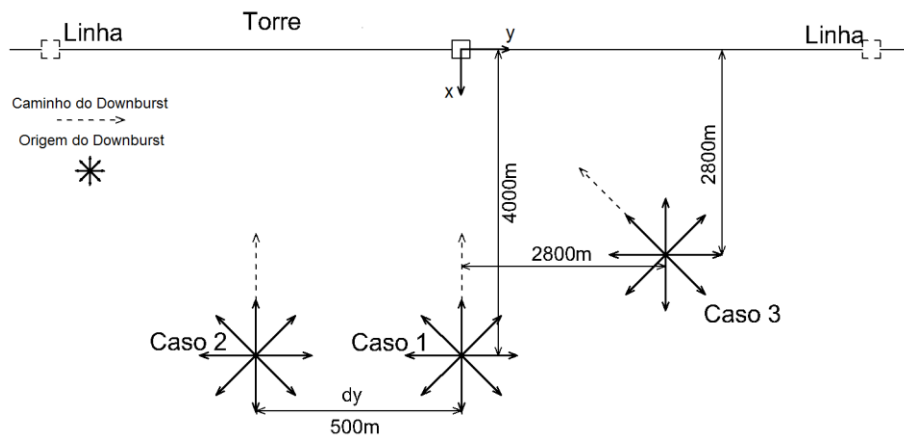


Figura 9 – Posição inicial e direção de deslocamento do *downburst*

Em todos os casos foram adotadas as seguintes hipóteses: altura onde a velocidade é igual a metade de $V_{r,max} = 400\text{m}$; distância radial do centro do *downburst* ao ponto onde ocorre $V_{r,max} = 1000\text{m}$; escala de comprimento radial = 700m ; duração característica da tormenta 350s ; tempo inicial do *downburst* = 100s ; velocidade do vento de fundo = 20m/s ; velocidade radial máxima, $V_{r,max} = 60\text{m/s}$.

Com base nos resultados obtidos da análise do feixe do cabo isolado em que a ação do *downburst* produziu resposta com pequena amplificação dinâmica apresenta-se a seguir resultados do modelo completo obtidos da análise não linear estática correspondente ao valor máximo das forças devidas ao vento. A Tabela 5 apresenta os deslocamentos, nas direções x (transversal ao eixo da LT), y (longitudinal ao eixo da LT) e z (vertical), obtidos nos nós 305 e 312, para os três casos considerados.

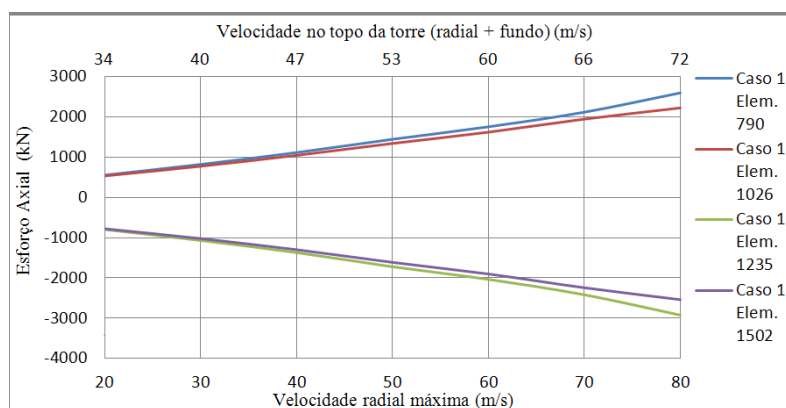
No caso 1 a componente horizontal da velocidade do vento na direção x (transversal ao eixo da LT) é predominante para o colapso da estrutura e no caso 2, embora o *downburst* seja transladado com a mesma inclinação do caso 1 a componente em y (longitudinal ao eixo da LT) também se torna importante quando o *downburst* se aproxima da linha. Entretanto, como pode ser visto na Tabela 5, os deslocamentos no topo da torre na direção y (longitudinal ao eixo da LT) ainda são muito inferiores se comparados aos deslocamentos na direção x (transversal ao eixo da LT), isto ocorre devido aos cabos, que atuam como um apoio elástico para flexão no plano YZ, o que não ocorre no plano XZ, em que a torre se comporta como engastada na base e livre no topo.

Tabela 5 – Deslocamentos no topo da torre para ação do vento *Downburst*

Caso	Vr _{max} (m/s)	Nó	Deslocamentos (m)		
			X	Y	Z
1	60	305	-1,227	0,083	-0,154
		312	-1,228	0,081	0,103
2		305	-1,178	0,285	-0,167
		312	-1,179	0,285	0,114
3		305	-1,049	-0,334	-0,311
		312	-1,051	-0,340	0,252

Comparando-se ainda os casos 1 e 2, verifica-se que embora o *downburst* não incida diretamente na torre no caso 2, agindo neste caso diretamente sobre os cabos, o deslocamento horizontal máximo (transversal ao eixo da LT) no topo da torre ainda representa cerca de 95% do deslocamento máximo obtido no caso 1, indicando a importância das componentes de forças agindo sobre os cabos em relação às componentes agindo sobre a torre. Observando-se os deslocamentos na direção longitudinal ao eixo da LT constata-se que o caso 1 impõe flexão reta na torre enquanto que os casos 2 e 3 impõem flexões nos planos principais.

Dadas às incertezas presentes no campo de velocidades do *downburst* foram obtidas as respostas quanto aos esforços para os três casos apresentados, considerando diferentes valores para velocidade radial máxima $V_{r,max}$, variando entre 20 e 80 m/s. A Figura 10 apresenta para o caso 1 (Figura 9) a variação de esforços nos elementos 790, 1026, 1235 e 1502 (ver Figura 8).

Figura 10 – Variação dos esforços nos elementos da base da torre para o *downburst* do caso 1

Comparando-se os esforços obtidos para os casos 1 e 2, verificou-se que os elementos 790 e 1235 apresentam valores superiores para o caso 2 devido a flexão oblíqua imposta sobre eles, e por outro lado, os elementos 1026 e 1502 apresentam esforços menores em relação ao caso 1. O mesmo pode ser observado comparando-se o caso 3 ao caso 1 em que os elementos 1026 e 1502 apresentam esforços superiores para o caso 3 em relação ao caso 1 e nos elementos 790 e 1235 esforços inferiores para o caso 3 em relação ao caso 1.

Para o caso 3, verificou-se também que devido ao ângulo de incidência do vento, as solicitações ocorrem principalmente nos elementos 1026 e 1502 e que os esforços para os elementos 790 e 1235 se devem principalmente ao carregamento do peso próprio.

Por fim, comparando os resultados obtidos entre a ação da tormenta EPS com o caso 1 do *downburst*, cujo ângulo de incidência da tormenta (transversal ao eixo da LT) corresponde ao ângulo de incidência da velocidade média da tormenta EPS considerado no item anterior,

verifica-se que para velocidades semelhantes no topo da torre (cota $z=118,4\text{m}$) as respostas geradas são próximas para o *downburst* (Figura 10) e a tormenta EPS (Tabela 4). A velocidade no topo da torre para tormenta EPS foi de $32,8\text{m/s}$.

A velocidade radial máxima para o *downburst*, como visto, representa um parâmetro de suma importância para determinação das respostas na estrutura, assim é importante que sejam realizados estudos para medição desta grandeza. Outros parâmetros importantes são as dimensões (raio de ação) e a distância do centro da tormenta à estrutura analisada.

5 CONCLUSÕES

Apresentou-se neste trabalho uma avaliação das respostas de modelos numéricos de estruturas de torres e linhas de transmissão sob a ação de ventos originados de tormentas EPS (ciclones extratropicais) e de *downbursts*. As análises foram efetuadas por meio de um programa computacional de análise estrutural (estática, dinâmica no domínio do tempo, linear ou não linear) pelo método dos elementos finitos. Neste programa, que foi especialmente desenvolvido para tratar estruturas sob ação de vento, foram implementadas no âmbito deste trabalho novas rotinas para cálculo de forças de vento.

Com o modelo de um feixe de cabos com vão de 1000m objetivou-se verificar a importância do tipo de análise. Verificou-se para a ação de vento EPS que as análises dinâmicas lineares e não lineares produziram os mesmos resultados. Já para a ação do vento originado de *downburst* é necessário incluir a não linearidade na análise dinâmica em função dos grandes deslocamentos.

A análise dinâmica do modelo de feixe de cabos sob ação de vento EPS em terreno de categoria II forneceu coeficientes de amplificação dinâmica iguais a $1,40$ e $1,12$, respectivamente, para os deslocamentos horizontais e para os esforços axiais.

Para ação do vento *downburst* verificou-se que as amplificações dinâmicas para deslocamentos horizontais e esforços axiais no cabo são muito pequenas para as intensidades de turbulência verificadas ($8,8$ e $18,0\%$). Desta maneira para ação do vento *downburst* pode-se realizar análises estáticas utilizando apenas a configuração “crítica” para ação do *downburst*.

Um modelo de torre de $118,4\text{m}$ de altura foi idealizado para suporte de 3 feixes de 4 cabos condutores cada um e dois cabos para-raios com vãos adjacentes de 1000m e verificado em estados limites últimos para esforços estáticos de ação de vento EPS com V_0 igual a 35m/s em terreno de categoria III. A análise dinâmica no domínio do tempo deste modelo para as mesmas condições de vento descritas forneceu coeficientes de amplificação dinâmica iguais a $1,42$ para deslocamento horizontal no topo da torre e $1,41$ para esforço axial nos montantes do painel de base da torre. Verificou-se, portanto, que para estas dimensões da estrutura o projeto deve ser feito com análises dinâmicas do sistema torre – linhas aéreas. Entretanto, vale ressaltar que os valores de FAD encontrados referem-se especificamente ao exemplo analisado; novas análises dinâmicas são requeridas para cada projeto.

Para o mesmo modelo de TLTEE verificou-se os efeitos da ação do vento *downburst* para três configurações distintas, utilizando velocidade radial máxima de 60m/s para avaliação dos deslocamentos e variando entre 20m/s e 80m/s para avaliação dos esforços gerados. Para o primeiro caso considerou-se o *downburst* deslocando-se em direção a torre, perpendicularmente à linha, para o segundo deslocando-se em direção ao meio de um dos vãos e o terceiro deslocando-se em direção a torre com um ângulo de 45° em relação à linha. Para todos os casos foi verificado que os esforços gerados na base da torre são muito superiores aos obtidos para análise com o vento EPS quando a velocidade radial máxima se aproxima do valor típico de 80m/s .

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR5422: *Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de energia Elétrica*, 1985, Rio de Janeiro.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR6123: *Forças Devidas ao Vento em Edificações*, 1985, Rio de Janeiro.
- ASCE, American Society of Civil Engineers!, *Minimum design loads for buildings and other structures*. ASCE 7-98, 1999, ASCE, Reston, Va
- BACHMANN, H. et al. *Vibration problems in structures: practical guidelines*; Birkhauser Verlag Basel; 1995.
- BLESSMANN J., *O vento na engenharia estrutural*, 1ª ed., Editora da Universidade UFRGS, 1995, Porto Alegre, RS.
- BUCHHOLDT H.A.; IANNUZZI A.; SPINELLI P., *Time domain dynamic response of slender structures to wind loading*. Asia Pacific Symposium on Wind Engineering, University of Roorkee, Roorkee, India, 1985.
- BUCCHOLDT, H. A. 1998. *Introduction to cable roof structures*. 2.ed. Ed. Thomas Telford Ltda,
- CAPELLARI T.T.O. *Determinação da resposta dinâmica de feixes de condutores e linhas aeres de transmissão*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2005.
- CARVALHO H., *Metodologias para Análise Estática do Efeito do Vento em Linhas de Transmissão*. M.Sc. Dissertação, Engenharia Mecânica, UFMG, 2010.
- CHEN L.; LETCHFORD C.W., *Numerical simulation of extreme winds from thunderstorm downbursts*, JWEIA, pp. 977-990, 2007.
- CIGRÉ Working Group B2.16, *Report on current practices regarding frequencies and magnitude of high intensity winds*. CIGRÉ, France, 2004.
- CIGRÉ Working Group B2.06.09. *How overhead lines respond to localized high intensity winds*, CIGRÉ, France, 2008.
- CIGRÉ Working Group B2.016. *Local wind speed-up on overhead lines for specific terrain features*, CIGRÉ, France, 2010.
- CONCEIÇÃO, R.S., *Torres de linha de transmissão (LTEE) sob ação de ventos originados de ciclones extratropicais e de downbursts*, M.Sc. Dissertação, Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 2013.
- DAMASCENO NETO W.T., *Estruturas de torres sob ação de ventos originados de Downbursts*, M.Sc. Dissertação, Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 2012..
- DAVENPORT A.G., *The application of statistical concepts to the wind loading of structures*, In: *Proceedings, Institution of Civil Engineers*, pp. 449-472, 1961.
- DIANA G.; BRUNI S.; CHELI F.; FOSSATI F.; MANENTI A., 1998. Dynamic analysis of the transmission line crossing “Lago de Maracaibo”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 74-76, pp 977-986.
- EUROCÓDIGO 1, 2005. *Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions*. The European Standard EN 1991-1-4.
- FU D.; YANG F.; LI Q.; YANG J., *Simulations for Tower Collapses of 500kV Zhengxiang Transmission Line Induced by the Downburst*. International Conference on Power System Technology, 2010.
- FUJITA T.T., *The downburst: microburst and macroburst*, SMRP Research Paper 210, University of Chicago, 1985.
- HJELMFELT M.R., *Structure and life circle of microburst outflows observed in Colorado*, *Journal of Applied Meteorology*, pp. 900-927, 1988.

- HOLMES J.D.; OLIVER S.E. *A model of downburst winds near the ground for transmission line loading*. CSIRO Div. of Building, Construction and Engineering, Australia. Report DBCE Doc 96/3, January 1996.
- HOLMES J.D., OLIVER S.E. *An empirical model of a downburst*. Engineering Structures, 2000.
- IEC – International Electrotechnical Commission, IEC 60826/2003, *Design criteria of overhead transmission lines*, 2003.
- KOELLER W.M., 2012, *Verificação estrutural de torre LTEE sob ação de vento*. Monografia, Engenharia Civil, Rio de Janeiro, POLI/UFRJ, Brasil.
- LOU W., WANG X., JIANG Y., *Wind-induced responses of a high-rise transmission tower to thunderstorm downbursts*. Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Taipei/Taiwan, 2009.
- MENEZES R. C. R., RIERA J. D., MIGUEL L. F. F., KAMINSKI JR J., MIGUEL L. F. F., SILVA J. B. G. F. On modeling the dynamic response of the 190m – high TL tower for the crossing of trombetas river in the amazon region, *CIGRÉ, France*, 2012.
- OLIVER S.E., MORIARTY W.W., HOLMES, J.D. *A risk model for design of transmission line systems against thunderstorm downburst winds*. Engineering Structures, 2000.
- PFEIL, M.S.. *Comportamento aeroelástico de pontes estaiadas*, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 1993.
- RODRIGUES, R.S, *Colapso de torres TEE sob ação do vento*. M.Sc. Dissertação, Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 1999.
- RODRIGUES, R.S, *Mecânica do Colapso de torres TEE*. D.Sc. Tese, Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 2004.
- SIMIU E., SCALAN R., *Wind effects on structures*. , 3 ed. John Wiley, 1996.
- VICROY, D.D., A simple, Analytical, Axisymmetric Microburst Model for Downdraft Estimation. NASA Technical Memorandum 104053, February, 1991.
- VICROY, D.D., *Assessment of microburst models for downdraft estimation*. Journal of Aircraft, 1992.
- WOOD G.S.; KWOK K.C.S., *An empirically derived estimate for the mean velocity profile of a thunderstorm downburst*. 7th AWES Workshop. Auckland, 1998.
- YASUI H.; MARUKAWA H., MOMOMURA Y., OHKUNA T, 1999. Analytical study on wind-induced vibration of power transmission towers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 83, pp 431-441.