



## RESPOSTA DINÂMICA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO SUBMETIDAS À COMBINAÇÃO DE VENTOS CONVECTIVOS E SINÓTICOS

**Vanessa Vanin**

**Leandro Fleck Fadel Miguel**

vanessavanin3@yahoo.com.br

leandro.miguel@ufsc.br

Federal University of Santa Catarina

Rua João Pio Duare, s/n, 88037-000, Florianópolis, Santa Catarina, Brazil

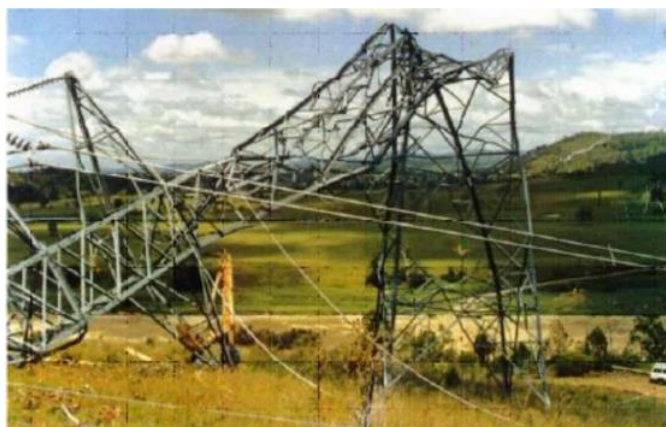
**Abstract.** Numerous failures of transmission lines are linked to the occurrence of Thunderstorms. The localized nature of this type of meteorological event is particularly damaging to large structures, as in the case of transmission lines, because it generates uneven distributions of forces. In this context, this work proposes to analyze the dynamic nonlinear geometric response of a section of transmission line composed of a tower and two spans of adjacent cable. This section of LT will be subjected to the loadings coming from some scenarios of combinations between downbursts and synoptic winds. The model of wind velocity fields during thunderstorms, described by Ponte (2005) and Ponte and Riera (2007), adapted by Miguel and Riera (2013), and later by Gheno (2014) and Gheno, Menezes and Miguel (2015), was adopted in this work, because it is based on meteorological variables, which are susceptible to statistical evaluation. For the same wind speed at a height of 10 m above the ground, the response of the cables and the lightning rods presented the highest value in the case in which the synoptic wind is perpendicular to them, which consequently also generated the greatest effort the tower uprights. In the other cases, in relation to the cables combinations between bottom wind and downburst could generate greater efforts. However, in the analyzed tower uprights, maximum forces always occurred in the presence of synoptic wind only, because all the cables are exposed to the same wind load, unlike what occurs during downbursts, which induce localized and unequal loads.

**Keywords:** High Intensity Winds, Wind Action, Downburst, Transmission Line, Synoptic Wind

## 1 INTRODUÇÃO

Linhas de Transmissão (LTs) são estruturas responsáveis por transmitir energia elétrica das usinas até os centros consumidores. Tendo em vista que, geralmente, essas usinas são construídas em locais afastados, as linhas de transmissão se estendem por grandes extensões, o que as sujeita a grandes variações de topologia e as expõe a fenômenos climáticos.

No Brasil, o principal fenômeno climático a ser levado em consideração como agente causador de esforços no projeto de uma linha de transmissão é o vento, uma vez que não há ocorrência de acúmulo de gelo nos elementos que compõem uma LT. Porém, as normas adotadas no dimensionamento dos componentes levam em conta apenas ventos do tipo sinótico, os quais são, tradicionalmente, representados por processos estocásticos, estacionários e ergódicos e podem ser descritos por um crescimento potencial com a altura e modelados satisfatoriamente a partir de uma velocidade de referência paralela ao solo dada a 10 m de altura.



**Figura 01. Torre colapsada após evento TS**  
**Fonte: Hawes & Fikke (2004)**

Dempsey & White (1996 apud SHEHATA; DAMATTY; SAVORY, 2005) relatam que mais de 80% de todas as falhas de linha relacionadas com o clima, nas Américas, Austrália, África do Sul e muitas outras organizações, foram causadas por ventos de alta intensidade, que estão associados com a ocorrência de tempestades elétricas. A Figura 01 apresenta uma torre colapsada após uma tormenta elétrica.

Os ventos de alta intensidade de natureza convectiva, apesar de atingirem suas maiores velocidades próximo ao solo e, por isso, serem de fundamental importância na engenharia de estruturas, foram, há apenas algumas décadas, identificados corretamente.

Durante a década de 1970, Fujita, baseado no estranho padrão de danos a árvores nas florestas e em danos estruturais causados por ventos semelhantes, identificou a existência do *downburst*. Esse evento meteorológico foi descrito como uma tempestade local produzida por uma nuvem cumulonimbus a qual é sempre acompanhada de relâmpagos e trovões (FUJITA, 1990).

O *downburst* é uma corrente de ar descendente que gera fortes ventos, e ocorre durante uma tempestade elétrica (thunderstorm, ou evento TS).

As primeiras investigações a respeito dos danos causados por esse fenômeno meteorológico se deram na área da aviação. Zhu & Etkin (1985), relataram ser a causa de inúmeros acidentes durante pousos e decolagens, partindo daí a necessidade de um modelo que representasse adequadamente os perfis de velocidades gerados por um *downburst*.

Desde então, vários autores como Zhu & Etkin (1985), Oseguera & Bowles (1988) e Vicroy (1991), Holmes & Oliver (2000), Ponte & Riera (2007), entre outros, propuseram modelos que descrevessem o campo de velocidades gerado durante um evento TS (*thunderstorm*) de maneira adequada.

Nos últimos anos, as pesquisas têm se concentrado no aprimoramento dos modelos que descrevem os perfis de velocidade e na reprodução de eventos que causaram ruína de estruturas. Ponte & Riera (2010) que, partindo de uma abordagem probabilística do modelo de TS proposto em Ponte & Riera (2007), apresentaram um histograma das velocidades anuais máximas durante um período de 50 anos para a região de Porto Alegre e de Miguel & Riera (2013) que adaptaram o método de Ponte & Riera (2007) para gerar, por simulação de Monte Carlo, uma série de 50 anos de máximos anuais de momentos de flexão e cortante na base de torres de seção transversal constante. Posteriormente, Gheno (2014) modificou esse mesmo modelo e estudou a resposta de cabos condutores sujeitos a tormentas elétricas.

## 2 MODELO DE DOWNBURST E LINHA DE TORMENTA

Ponte (2005) e Ponte & Riera (2007) propuseram um modelo baseado nas variáveis meteorológicas, a partir do qual é possível simular a excitação do vento para fins de projeto, como em linhas de transmissão.

As premissas adotadas são de que, no caso de uma nuvem cumulonimbus estacionária, o campo de vento é axissimétrico e dependente dos seguintes parâmetros: queda de pressão, velocidade e direção do vento de fundo, altura do nível do solo ao centro da bigorna, proporção da base da nuvem e tempo característico da tormenta. Isso permite a geração de um campo de velocidades com variação temporal e espacial, uma vez que todos os parâmetros estão relacionados a variáveis meteorológicas suscetíveis de avaliação estatística.

Gheno (2014) e Gheno *et al.* (2015) inseriram novas considerações relacionadas à espacialidade característica de um evento de TS ao modelo de Ponte e Riera. O modelo passou a delimitar a área de ação da TS (horizontal/radialmente) e a altura vertical das rajadas, esse último chamado de linha corrente limite. Foram introduzidos os conceitos de velocidade efetiva e relativa que estão relacionados à expansão da TS. Por último, foi considerada a formação de uma camada limite de escoamento.

### 2.1 Velocidade Tangencial

Em uma região sob atmosfera em condições estáveis, mudanças climáticas alteram suas variáveis meteorológicas, o que incorre na formação de uma nuvem cumulonimbus.

Considera-se que:

- a) a base da nuvem encontra-se a uma altura  $h$  em relação ao solo, definida como  $h = 0,1 H_c$ ;
- b)  $H_c$  é a altura do solo ao centro da bigorna;
- c) a base da nuvem é circular de raio  $R_0$ ;
- d) existe uma diferença de pressão ao longo da altura  $H_c$ , suficiente para desencadear um escoamento descendente de ar.

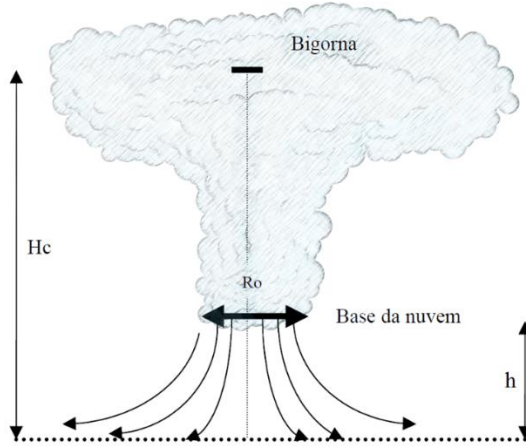


Figura 02. Esquema de Tormenta Elétrica

A velocidade tangencial (Equação 01) em altura  $z$  ao longo de uma linha de fluxo pode ser obtida aplicando o teorema de Bernoulli para as alturas  $H_c$  e  $z$  acima do solo, em que  $\Delta p$  denota a diferença de pressão, enquanto  $\rho$  é a massa específica modelada pela Equação 02.

$$V_t = \sqrt{2 \int_z^{H_c} \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (01)$$

$$\rho(z) = \rho_0 \cdot e^{-\beta z} \quad (02)$$

Onde  $\rho$  é a massa específica do ar;  $\rho_0$  é a massa específica no nível do mar;  $z$  é a altitude e  $\beta$  é o coeficiente de ajuste da equação. Neste caso  $\beta = 0,000095$ .

Admitindo-se que a queda de pressão atmosférica possui valor  $\Delta p_0$  ao nível do mar e é nula na altitude  $H_c$ , define-se que a variação entre os dois pontos  $\Delta p$  é linear, resultando na Equação 03:

$$\Delta p(z) = \Delta p_0 \left( 1 - \frac{z}{H_c} \right) \quad (03)$$

A equação 04 da velocidade tangencial  $V_t$  para a altura  $z$ , que expressa a velocidade do fluxo de ar descendente, é obtida pela combinação das equações 01, 02 e 03.

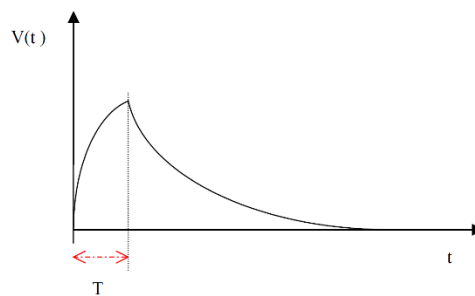
$$V_t = \sqrt{\frac{2 \Delta p_0}{H_c \rho_0 \beta} (e^{\beta H_c} - e^{\beta z})} \quad (04)$$

Seguindo o mesmo raciocínio de Holmes & Oliver (2000), Ponte (2005) admitiu que a velocidade em função do tempo se ajusta ao modelo exponencial expresso nas seguintes equações:

$$V(t) = 1,58 V_t [1 - e^{\frac{-t}{T}}], \quad \text{para } t \leq T \quad (05)$$

$$V(t) = V_t [e^{\frac{-(t-T)}{T}}], \quad \text{para } t > T \quad (06)$$

Nas quais o parâmetro  $T$  representa a duração característica da tormenta e descreve o tempo em que uma partícula percorre a distância  $D_N + H_c$ , onde  $D_N$  é o diâmetro da bigorna. O coeficiente 1,58 corrige o modelo para satisfazer a condição de contorno a qual impõe que em  $t=T$ ,  $V(t) = V_t$ . A Figura 03 apresenta a evolução da velocidade ao longo do tempo.

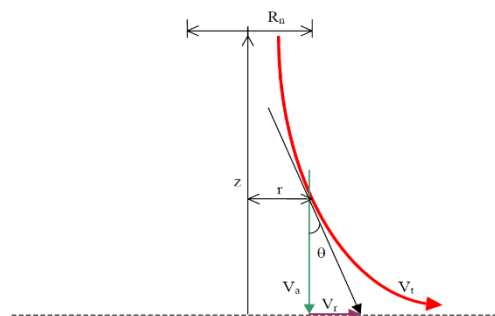


**Figura 03. Duração Característica da Tormenta**  
Fonte: Ponte (2005)

Ponte (2005) admite que as linhas de corrente se desenvolvem de forma axial simétrica em relação ao eixo central da nuvem e são descritas da seguinte forma:

$$z(r) = \frac{k}{r^a} \quad (07)$$

Em que  $a$  e  $k$  são constantes e  $r$  é a distância do eixo central da tormenta a um ponto de referência.



**Figura 04. Linha de Corrente Genérica**  
Fonte: Ponte (2005)

A Figura 04 apresenta uma linha de corrente limite genérica de velocidade tangencial ( $V_t$ ) e suas componentes de velocidade radial ( $V_r$ ) e axial ( $V_a$ ).

Essa linha de corrente ( $z(r)$ ) é matematicamente expressa pela Equação 08 e sua derivada em relação a  $r$  ( $z'(r)$ ) fornece a tangente do ângulo  $\theta$  em relação ao eixo  $r$ .

$$z(r) = \frac{z_h r_h^{1,2}}{r^{1,2}} \quad (08)$$

Sendo  $\theta$  o ângulo que a linha corrente faz com a vertical:

$$z'(r) = -\frac{1,2 r_h^{1,2} z_h}{r^{2,2}} \quad (09)$$

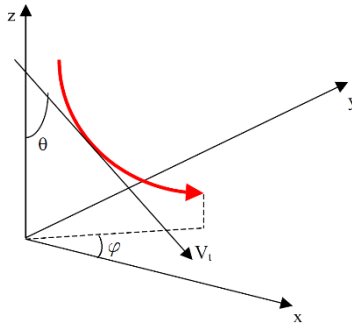
As velocidades radial e axial podem, então, ser descritas por:

$$V_r = V_t \sin(\theta) \quad (10)$$

$$V_a = V_t \cos(\theta) \quad (11)$$

$$\sin(\theta) = \sqrt{\frac{1}{1 + (z'(r))^2}} \quad (12)$$

$$\cos(\theta) = \sqrt{\frac{(z'(r))^2}{1 + (z'(r))^2}} \quad (13)$$



**Figura 05. Eixos Coordenados e Ângulos**  
Fonte: Ponte (2005)

Para facilitar a aplicação do campo de velocidades, até então descrito em coordenadas cilíndricas, em estruturas, este pode ser definido em componentes cartesianas, partindo das seguintes equações:

$$V_x = V_t \sin(\theta) \cos(\varphi) = V_r \cos(\varphi) \quad (14)$$

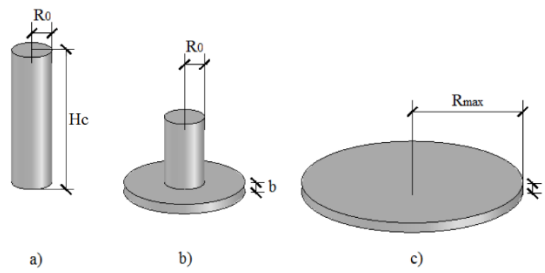
$$V_y = V_t \sin(\theta) \sin(\varphi) = V_r \sin(\varphi) \quad (15)$$

$$V_z = V_t \cos(\theta) = V_a \quad (16)$$

Onde  $V_x$ ,  $V_y$  e  $V_z$  são a velocidade do vento nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  respectivamente e  $\varphi$  é o ângulo de projeção da linha corrente no plano  $xy$ .

## 2.2 Área de Expansão da TS

A área de ação da TS, partindo da premissa de que o ar é um fluido incompressível, é definida considerando 3 estágios da tormenta, como mostra a Figura 06. Onde em (a) a geometria da nuvem sofre uma simplificação, é apresentada como um cilindro de altura  $H_c$  e raio  $R_0$ , que inicia em (b) a transferência de volume para um cilindro concêntrico de altura  $b$  (altura média da ação da TS, definida como 100 m) e raio  $R_t$ . Essa expansão continua até que o volume do cilindro inicial tenha sido integralmente transferido, o que ocorre em (c) quando o cilindro de altura  $b$  atinge o raio máximo ( $R_{max}$ ).



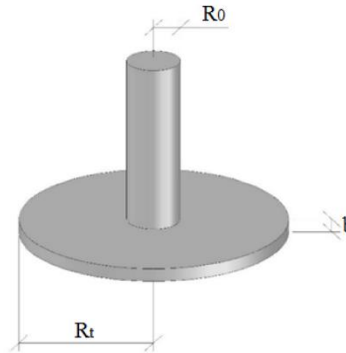
**Figura 06. Modelo para a definição da área da TS**  
Fonte: Gheno (2014)

A Equação 17 mostra a relação de igualdade dos volumes dos cilindros, de onde é possível, por meio de manipulação algébrica, isolar o  $R_{max}$  (Equação 18).

$$\pi R_0^2 H_c = \pi R_{max}^2 b \quad (17)$$

$$R_{max} = R_0 \sqrt{\frac{H_c}{b}} \quad (18)$$

Esse processo de expansão é descrito pela Equação 19 que inclui a variável temporal  $t$ , que pode ser isolada conforme a Equação 20 em que  $R_t$  é o raio no instante  $t$ .



**Figura 07. Representação do modelo de expansão da TS**  
Fonte: Gheno (2014)

$$\pi V t R_0^2 = \pi b (R_t^2 - R_0^2) \quad (19)$$

$$t = \frac{b}{V} \frac{R_t^2 - R_0^2}{R_0^2} \quad (20)$$

Segundo Gheno (2014), a ação de uma TS incidindo em obstáculos não pontuais, como estruturas de grande dimensão horizontal (cabos suspensos, por exemplo), necessita da consideração de que, em diferentes pontos no espaço, os efeitos do vento chegam em instantes distintos.

Para tanto, partindo da Equação 20, determina-se a velocidade com a qual a tormenta se expande, chamada velocidade efetiva ( $V_{ef}$ ). A razão entre a velocidade efetiva e a velocidade de escoamento é denominada velocidade relativa de expansão ( $V_{rel}$ ).

$$V_{ef} = \frac{R_t}{t} = \frac{R_t R_0^2}{b (R_t^2 - R_0^2)} V \quad (21)$$

$$V_{rel} = \frac{R_t R_0^2}{b (R_t^2 - R_0^2)} \quad (22)$$

### 2.3 Linha da Corrente Limite e Camada Limite de Escoamento

De acordo com Gheno (2014), tem-se como premissa que existe uma limitação vertical para as rajadas de vento, representada por uma linha de corrente considerada como superior. Define-se que esta linha de corrente é a que passa pelo ponto  $(R_0, h)$ , no qual  $h$  representa a altura da base da nuvem, admitida como  $(0, 1H_c)$ . Por meio da particularização da Equação 08, a altura máxima que o campo de vento gerado pela TS atinge ( $z_{max}$ ), em função do afastamento da origem da tormenta ( $r$ ), é dada pela Equação 23, desde que  $r > R_0$ .

$$z_{max} = \frac{R_0^{1,2} (0, 1H_c)}{r^{1,2}} \quad (22)$$

A camada limite é a região adjacente a uma superfície sólida na qual tensões viscosas estão presentes. Essas tensões estão presentes, porque existe cisalhamento das camadas do fluido, isto é, gradientes de velocidade na camada-limite (Fox; Mcdonald, 2006).

A definição mais direta é espessura de perturbação,  $\delta$  que representa a distância da superfície na qual a velocidade se situa dentro de 1% da velocidade da corrente livre (Fox; Mcdonald, 2006).

O desenvolvimento da camada limite de escoamento descendente foi considerado a partir das equações fornecidas por Fox & Mcdonald (2006), que expressam a espessura da camada limite turbulenta, apresentada nas Equações 23 e 24.

$$\delta = \frac{0,382(r - R_0)}{Re^{\frac{1}{5}}} \quad (23)$$

$$Re = \frac{V (r - R_0)}{\nu} \quad (24)$$

Onde  $\nu$  é a viscosidade dinâmica do fluido e  $(r - R_0)$  representa a distância percorrida pelo fluido do raio de escoamento na base da nuvem a um ponto de interesse localizado em  $r$ ;  $Re$  o nº de Reynolds e  $\delta$  a espessura da camada limite.

## 2.4 Vento de Fundo

O modelo até então descrito representa um evento estacionário. O deslocamento da nuvem é causado por um vento de fundo com perfil vertical  $V_f(z)$ , dado pela Equação 25, que é incorporado ao modelo pela soma das velocidades horizontais da tormenta TS com as do vento de fundo.

$$V_f(z) = V_0 \left( \frac{z}{10} \right)^p \quad (25)$$

Em que  $V_f(z)$  é a velocidade média sobre 3 s a uma altura  $z$  do solo e  $V_0$  é a velocidade média sobre 3 s a uma altura de referência de 10 m. O expoente  $p$  depende da rugosidade do terreno, neste trabalho adotado com 0,085.

$$V_{fx}(z) = V_f(z) \cos(\gamma) \quad (26)$$

$$V_{fy}(z) = V_f(z) \sin(\gamma) \quad (27)$$

Sendo  $V_{fx}(z)$  e  $V_{fy}(z)$  as componentes em  $x$  e  $y$  da velocidade do vento de fundo e  $\gamma$  o ângulo entre a direção do vento de fundo e o eixo  $x$ .

## 3 TRECHO DE LT EM ESTUDO E DADOS DE SIMULAÇÃO DO VENTO

Foram simulados e analisados alguns casos definidos de combinação entre vento de fundo e TS. A modelagem numérica dos eventos TS ocorreu por meio de uma rotina escrita por Ponte (2005) e Gheno (2014) em MATLAB e adaptada, neste trabalho, para contemplar o trecho de LT, apresentado anteriormente que tem como saída os campos de força devidos ao vento. Esses campos de força são aplicados à LT para que seja realizada a análise dinâmica. Essa análise é feita pela rotina escrita em linguagem FORTRAN que utiliza o método das diferenças finitas centrais.

### 3.1 Descrição da Linha de Transmissão

O trecho de linha de transmissão analisado (Figura 8) é composto por uma torre de suspensão autoportante, isoladores, cabos condutores e cabos para-raios adjacentes.

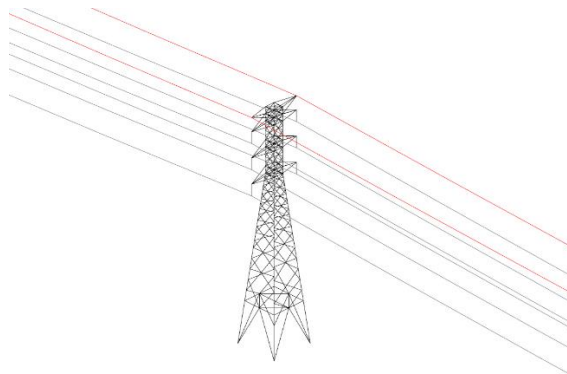


Figura 08. Trecho da Linha de Transmissão

A torre de suspensão autoportante (Figura 9) tem formato tronco-piramidal denominada “SY”, com 33,4 m de altura e 5 m de abertura da base. Oito diferentes perfis de cantoneira (ASTM A 572 grau 50) compõem a torre, que foi modelada como treliça espacial e possui 174 nós e 415 barras.

As cadeias de isoladores têm 1,65 m de comprimento e cada uma delas foi modelada com um único elemento e têm suas propriedades descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades dos Isoladores

|                               |        |                 |
|-------------------------------|--------|-----------------|
| Área da Seção Transversal     | 1150   | mm <sup>2</sup> |
| Peso por Metro                | 505,36 | N/m             |
| Módulo de Elasticidade        | 200    | GPa             |
| Coefficiente de Amortecimento | 0,5    | s <sup>-1</sup> |

Cabos suspensos em linhas de transmissão apresentam formato de catenária. Na condição EDS (*Every Day Stress*), os cabos condutores são projetados para uma tração em torno de 20% de sua capacidade (UTS -*Ultimate Tension Stress*). Nos cabos para-raio, esta tração é de aproximadamente 14% (KAMINSKI, 2007).

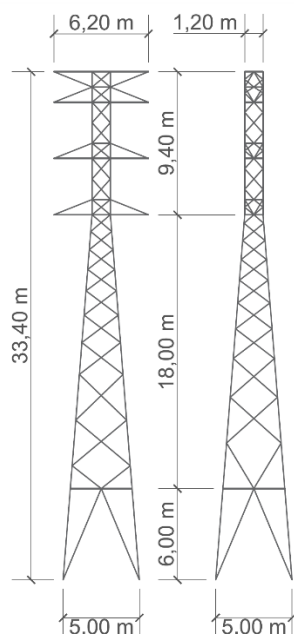


Figura 09. Dimensões da Torre Autoportante

O cabo condutor utilizado nessa modelagem foi o cabo *Grosbeak ACRS (Aluminum Conductor Steel Reinforced)* 26/7 (26 fios de alumínio e alma com 7 fios de aço) com suas propriedades apresentadas na Tabela 2.

Os cabos para-raios são de aço do tipo *Extra High Strength (EHS)* com 7 fios de 3/8 de polegadas com suas propriedades apresentadas na Tabela 3.

Tabela 2. Propriedades dos Cabos Condutores

|                               |         |                 |
|-------------------------------|---------|-----------------|
| Diâmetro Externo              | 25,146  | mm              |
| Área da Seção Transversal     | 374,7   | mm <sup>2</sup> |
| Tração de Ruptura             | 112095  | N               |
| Peso por Metro                | 12,7726 | N/m             |
| Módulo de Elasticidade        | 74,515  | GPa             |
| Coefficiente de Amortecimento | 0,5     | s <sup>-1</sup> |

Tabela 2. Propriedades dos Cabos Para-Raio

|                               |         |                 |
|-------------------------------|---------|-----------------|
| Diâmetro Externo              | 9,144   | mm              |
| Área da Seção Transversal     | 51,08   | mm <sup>2</sup> |
| Tração de Ruptura             | 68502,6 | N               |
| Peso por Metro                | 3,98413 | N/m             |
| Módulo de Elasticidade        | 172,369 | GPa             |
| Coefficiente de Amortecimento | 0,5     | s <sup>-1</sup> |

As leis constitutivas dos cabos, bem como a formulação utilizada para determinar a catenária e o comprimento teórico, a flecha máxima e sua posição encontram-se descritas em Kaminski (2007).

### 3.2 Casos de Ventos Oriundos de TS Combinados com Vento de Fundo

Os parâmetros que definem a duração da tormenta ( $T$ ) e o raio da base da nuvem ( $R_0$ ) com maior probabilidade de ocorrência, de acordo com Gheno (2014), são ( $T = 300$  s) e ( $R_0 = 700$  m). Estes valores foram adotados para todas as simulações a seguir.

A Tabela 4 apresenta as combinações de vento de fundo ( $V_0$ ) e velocidade tangencial da linha de corrente da TS ( $V_t$ ) para a altura de referência ( $z = 10$  m)}, bem como os parâmetros ( $H_c$ ) e ( $\Delta p_0$ ) que foram fixados para definir a velocidade tangencial.

Tabela 4. Parâmetros e velocidades a 10 m do solo

| $H_c$ (m) | $\Delta p_0$ (Pa) | $V_t$ (m/s) | $V_0$ (m/s) |
|-----------|-------------------|-------------|-------------|
| -         | -                 | 0           | 25          |
| 8500      | 40                | 10          | 15          |
| 9600      | 80                | 15          | 10          |
| 11200     | 120               | 20          | 5           |
| 12800     | 160               | 25          | 0           |

Três casos de trajeto, para as combinações descritas, são apresentados na Tabela 5 e nas Figuras 10, 11 e 12. A área adotada foi a de um quadrado de 20000 m de lado.

Tabela 5. Coordenadas iniciais da TS e direção do vento de fundo

|        | $x_0$ (m) | $y_0$ (m) | $\gamma(^{\circ})$ |
|--------|-----------|-----------|--------------------|
| Caso 1 | 0         | -2000     | 90                 |
| Caso 2 | -2000     | -1000     | 0                  |
| Caso 3 | -500      | -2000     | 60                 |

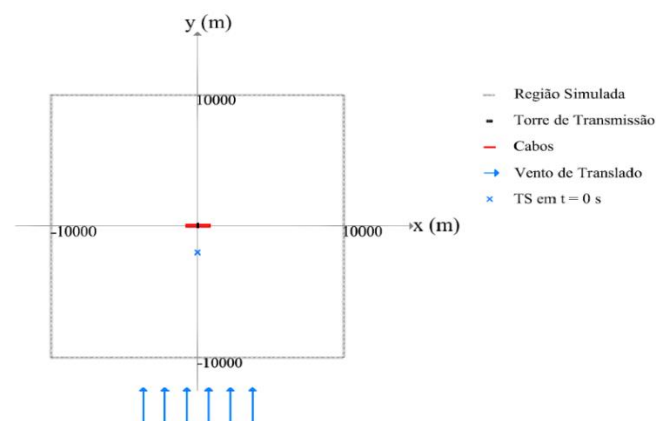


Figura 10. Esquema do Domínio do Caso 1

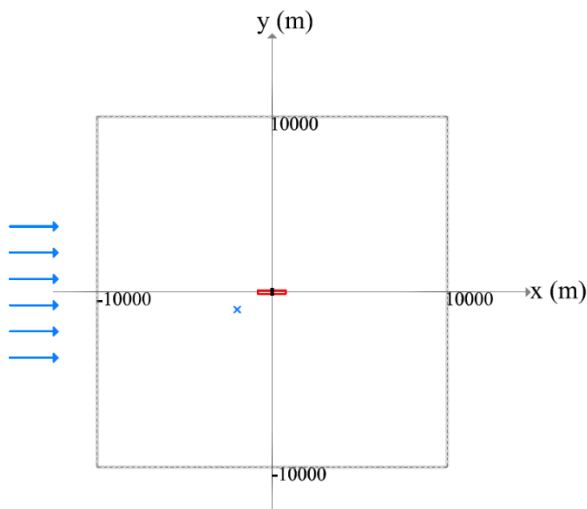


Figura 11. Esquema do Domínio do Caso 2

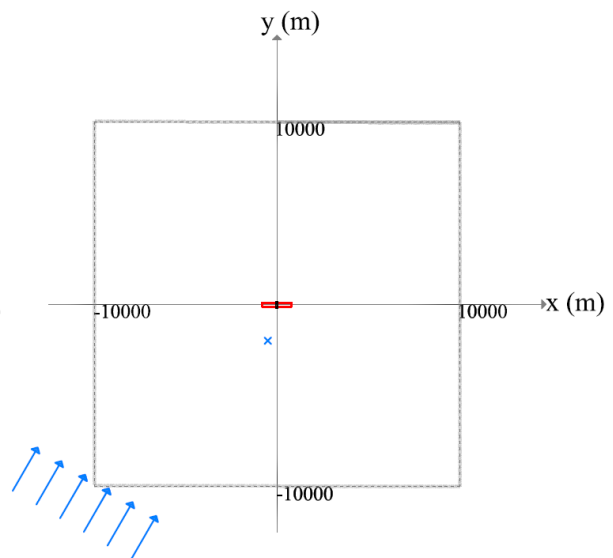


Figura 12. Esquema do Domínio do Caso 3

Os casos descritos têm a finalidade de possibilitar a avaliação das diferenças entre tormentas TS estacionárias, TS combinadas com vento de fundo e tormenta EPS nos esforços máximos resultantes nos montantes das torres e nos pontos de fixação de um cabo condutor e um cabo para-raio da LT.

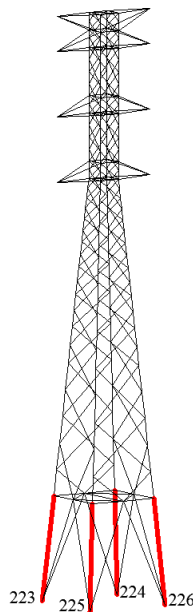


Figura 13. Torre de transmissão utilizada na simulação. Em destaque, barras dos montantes analisadas

Os esforços axiais máximos obtidos nas simulações descritas anteriormente são apresentados nas Tabelas 5 (tração dos cabos condutores), 6 (tração dos cabos para-raio) e 7 (esforços axiais dos montantes da torre de transmissão).

As Figuras 15 e 16 ilustram a evolução dos esforços axiais com o tempo para o cabo condutor e para o cabo para-raio respectivamente. É possível observar que, para o caso combinado entre vento de fundo e *downburst*, o esforço apresenta uma variação temporal que é característica de eventos TS, enquanto o caso apenas com vento sinótico mantém a mesma resposta ao longo do tempo de análise.

Essa mesma característica pode ser observada nas Figuras 17 e 18, as quais apresentam os esforços axiais das barras da torre.

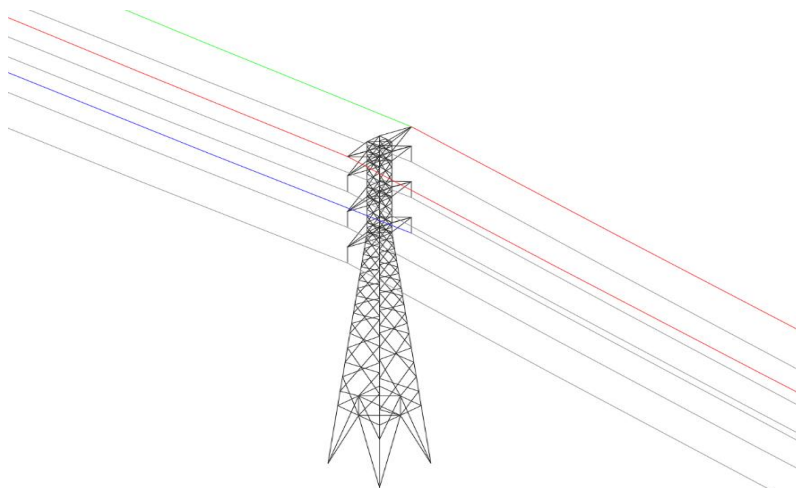


Figura 14. Linha de Transmissão utilizada na simulação. Em destaque verde, cabo para-raio analisado, em azul, cabo condutor analisado

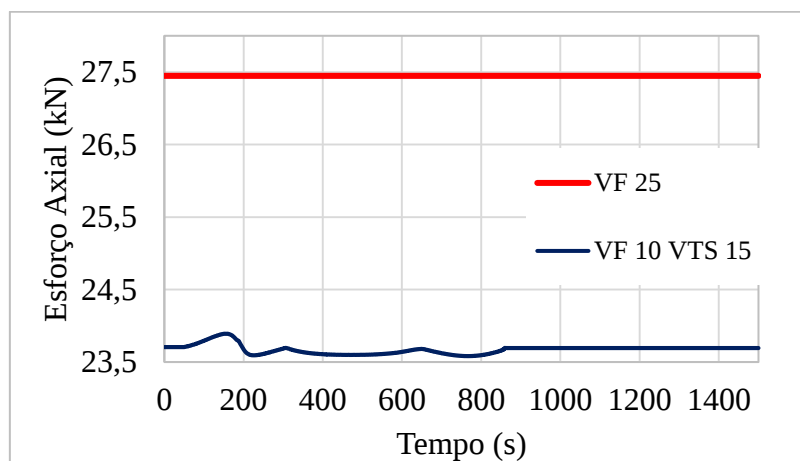
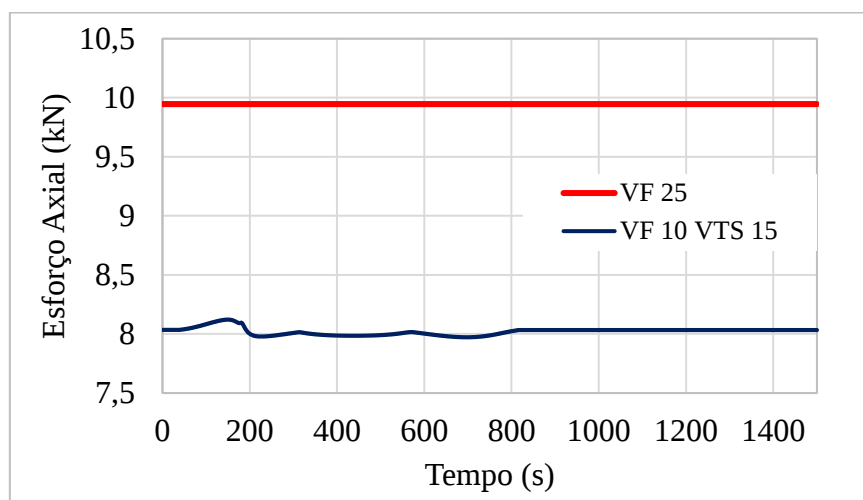


Figura 15. Esforço axial resultante no ponto de fixação do cabo condutor para caso 1 (vento de fundo 25 m/s e combinação entre vento de fundo 10 m/s e vento da TS 15 m/s)

Tabela 5. Esforços axiais dos cabos condutores em kN

| $V_t$ (m/s) | $V_0$ (m/s) | Caso 1 (kN) | Caso 2 (kN) | Caso 3 (kN) |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0           | 25          | 27,45       | 23,59       | 25,87       |
| 10          | 15          | 24,22       | 23,59       | 23,96       |
| 15          | 10          | 23,89       | 23,76       | 23,80       |
| 20          | 5           | 24,60       | 24,44       | 24,51       |
| 25          | 0           | 26,05       | 23,68       | 25,80       |



**Figura 16. Esforço axial no ponto de fixação do cabo para-raio para caso 1 (vento de fundo 25 m/s e combinação vento de fundo 10 m/s e vento da TS 15 m/s)**

Tabela 6. Esforços axiais dos cabos para-raios em kN

| $V_t$ (m/s) | $V_0$ (m/s) | Caso 1 (kN) | Caso 2 (kN) | Caso 3 (kN) |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0           | 25          | 9,95        | 8,09        | 9,19        |
| 10          | 15          | 8,27        | 8,00        | 8,17        |
| 15          | 10          | 8,03        | 7,99        | 8,06        |
| 20          | 5           | 8,03        | 7,98        | 8,27        |
| 25          | 0           | 9,05        | 7,97        | 9,02        |

Tabela 7. Esforços axiais da barra do montante mais solicitado em kN

| $V_t$ (m/s) | $V_0$ (m/s) | Caso 1 (kN) | Caso 2 (kN) | Caso 3 (kN) |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0           | 25          | - 90,78     | - 35,80     | - 76,74     |
| 10          | 15          | - 43,65     | - 25,40     | - 38,39     |
| 15          | 10          | - 34,81     | - 31,17     | - 31,29     |
| 20          | 5           | - 51,83     | - 47,92     | - 48,59     |
| 25          | 0           | - 70,23     | - 36,94     | - 67,72     |

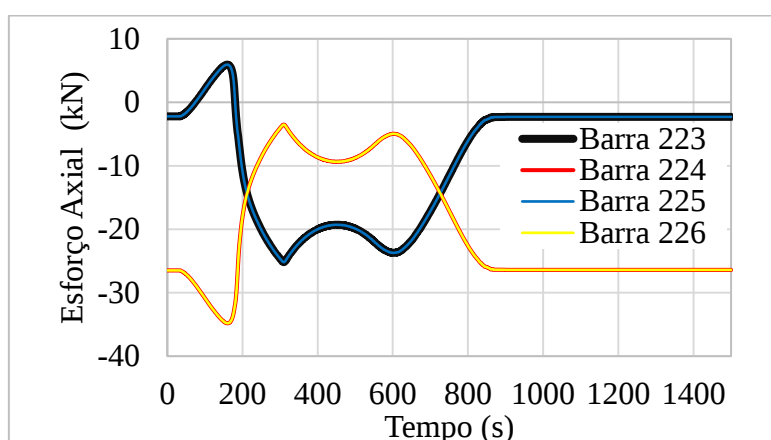


Figura 17. Esforço axial resultante dos montantes da torre para caso 1 (combinação entre vento de fundo 10 m/s e vento da TS 15 m/s).

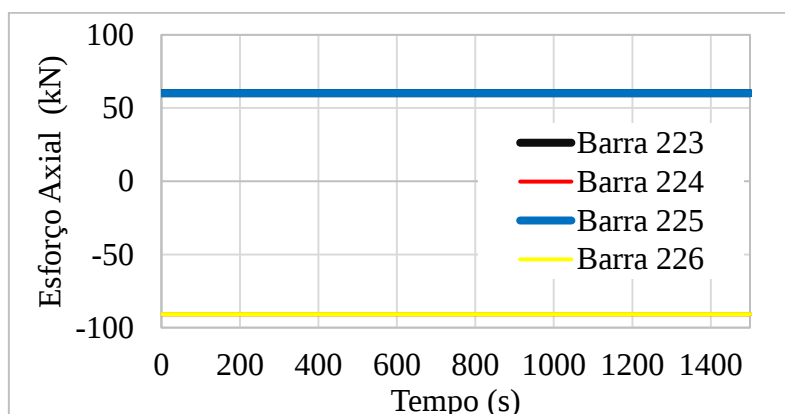


Figura 18. Esforço axial resultante dos montantes da torre para caso 1 (vento de fundo 25 m/s).

## 4 CONCLUSÃO

Linhas de Transmissão são estruturas de grande dimensão horizontal e, em caso de carregamentos gerados por tormentas EPS, o vento irá atingir a estrutura de maneira uniforme. Entretanto, carregamentos oriundos de tormentas elétricas, por se tratar de um evento localizado e de curta duração, encontram diferentes pontos da estrutura em diferentes instantes de tempo.

Foram simulados alguns casos definidos de combinação entre vento de fundo e TS, propostos em Gheno (2014). Para esses casos específicos de combinação de tormentas TS e EPS, a resposta dos cabos condutores e dos cabos para-raios apresentaram o maior valor no caso em que o vento sinótico é perpendicular a eles (caso 1, velocidade de 25 m/s) que, consequentemente também gerou o maior esforço axial nos montantes da torre. Os esforços máximos ocorreram nesse caso, pelo fato de todos os cabos estarem expostos ao mesmo carregamento devido ao vento, diferentemente do que ocorre durante *downburst*, que induzem a carregamentos localizados e desiguais.

Vale salientar que essa diferença entre os carregamentos nos cabos, em casos de tormentas elétricas com velocidades maiores que as simuladas, podem gerar danos às torres.

## ACKNOWLEDGEMENTS

Os autores desejam agradecer o apoio do CNPq e CAPES (Brasil).

## REFERENCES

- Dempsey, D., White, H. B., 1996. Winds wreak havoc on lines. *Transmission and Distribution World*, v. 48, n. 6, p. 32–42.
- Elawady, A., Damatty, A. E., 2016. Longitudinal force on transmission towers due to non-symmetric downburst conductor loads. *Engineering Structures*, v. 127, p. 206–226.
- Fox, R. W., McDonald, A. T., 2006. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 6. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC S.A.
- Fujita, T. T., 1990. Downbursts: Meteorological features and wind field characteristics. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Amsterdam, v. 36, p. 75–86.
- Gheno, R. M., 2014. Campo de velocidades gerado pela combinação de ventos convectivos e sinóticos em cabos suspensos. *Dissertação (Dissertação de Mestrado)* — Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS - BR.
- Gheno, R. M., Menezes, R. C. R., Riera, J. D., Miguel, L. F. F., 2015. Loads induced on cables by convective winds in temperate latitudes. *ICWE*, Porto Alegre, Brasil, p. 1–11.
- Hawes, H., Fikke, S. M., 2004. Report on current practices regarding frequencies and magnitude of high intensity winds. *CIGRE-IEC*, p. 1–8.
- Holmes, J. D., Oliver, S. E., 2000. An empirical model of a downburst. *Engineering Structures*, n. 22, p. 1167–1172.

- Kaminski, J., 2007. Incertezas de modelo na análise de torres metálicas treliçadas de linhas de transmissão. *Tese (Doutorado)* — Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS - BR.
- Miguel, L. F. F., Riera, J. D., 2013. Loads induced on tall structures by thunderstorm winds in temperate latitudes. *Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures*, New York, USA, p. 1–6.
- Oseguera, R. M., Bowles, R. L., 1988. A simple, analytical 3-dimensional downburst model based on boundary layer stagnation flow. *Nasa Technical Memorandum 100632*, p. 1–19.
- Ponte Jr., J., 2005. Modelagem e Simulação do Campo de Velocidades do Vento em Tormentas Elétricas. *Tese (Doutorado)* — Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS - BR.
- Ponte, J., Riera, J. D., 2007. Wind velocity field during thunderstorms. *Wind and Structures*, v. 10, n. 3, p. 1–15.
- Ponte, J., Riera, J. D., 2010. Simulation of extreme wind series caused by thunderstorms in temperate latitudes. *Structural Safety*, v. 32, p. 231–237.
- Savory, E., Parke, G. A. R., Zeinoddini, M., Toy, N., Disney, P., 2001. Modelling of tornado and microburst-induced wind loading and failure of a lattice transmission tower. *Engineering Structures*, v. 23, p. 365–375.
- Shehata, A. Y.; Damatty, A. A. E.; Savory, E., 2005. Finite element modeling of transmission line under downburst wind loading. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 42, p. 71–89.
- Vicroy, D. D., 1995. A simple analytical, axisymmetric microburst model for downdraft estimation. *Nasa Technical Memorandum 104053*, p. 1–13.
- Zhu, S., Etkin, B., 1985. Model of the wind field in a downburst. *Journal of Aircraft*, v. 22, n. 7, p. 595–601.