



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

GLT - 15  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

**GRUPO III  
GRUPO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT**

**RESPOSTA DINÂMICA DE FEIXES DE CABOS SUBMETIDOS À EXCITAÇÃO DO VENTO**

**Ruy Carlos Ramos de Menezes \***

**Jorge Daniel Riera**

**Tatiana Thomé de Oliveira Cappellari**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**RESUMO**

Será apresentado um método para determinar a resposta dinâmica de feixes. O modelo considera a interação entre o vento incidente e o movimento do condutor. A solução é obtida por integração numérica, no domínio do tempo, das equações de movimento de um modelo não-linear discreto de feixe, as quais definem as forças nos espaçadores e cabos através de coeficientes aerodinâmicos obtidos experimentalmente. A resposta de um típico vão de linha, quando submetido a uma tempestade extratropical (EPS) e a uma tempestade elétrica (TS), é determinada por simulação. Também são descritos os modelos de ambos fenômenos meteorológicos utilizados na simulação.

**PALAVRAS-CHAVE**

Linhas de Transmissão; Feixe Cabos de LTs; Análise Dinâmica; Carregamentos Dinâmicos em LTs

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Este trabalho objetiva a aplicação do método da integração direta das equações do movimento, através do método numérico das diferenças finitas centrais, na análise de feixes de cabos de Linhas de Transmissão (LT) quando submetidos à ação de carregamentos mecânicos variáveis no tempo. Esses carregamentos referem-se principalmente a excitação de ventos oriundos de fenômenos com natureza complexa (Tempestades Elétricas, por exemplo). O método permite a avaliação dos Estados Limites das LT relacionados à distância relativa entre sub-condutores e à estabilidade do movimento. O tema está inserido numa pesquisa mais ampla que visa abordar problemas de estabilidade de feixes de cabos em diversas configurações e diferentes padrões de carregamentos.

A aplicação realizada neste Informe Técnico se justifica pois, mesmo que a resposta dinâmica de cabos seja importante em muitos enfoques na avaliação do desempenho de LTs, a abordagem usual até hoje empregada é a estática. Por outro lado, não se pode desconhecer que a natureza dinâmica da maioria dos fenômenos a que as LTs estão submetidas. Além disso, até mesmo a análise estática tem sido simplificada, considerando normalmente apenas casos contemplados com soluções analíticas.

Entre os diversos métodos utilizados na engenharia estrutural, a integração direta das equações do movimento, através de métodos numéricos como as diferenças finitas, se constitui numa poderosa ferramenta por possibilitar tratar de problemas envolvendo não linearidades consideráveis, como são os casos onde se avalia a resposta de cabos suspensos, quando submetidos a carregamentos com característica de variarem no tempo e que tal variação seja relevante, como é o caso dos fenômenos anteriormente mencionados.

Este informe técnico é complementar ao apresentado ao XI ERIAC pelos mesmos autores, que contém uma breve revisão da teoria, da descrição da metodologia e das suas potencialidades. Neste informe apresentaremos alguns modelos de excitações do vento e as forças resultantes nos cabos dispostos em feixes. Como ilustração, será apresentado exemplo de modelagem de vão em feixe de cabos para demonstrar a capacidade de avaliação de Estados Limites relacionados à distância relativa entre sub-condutores, a estabilidade do feixe e representação das suas propriedades e comportamento dinâmico, bem como os carregamentos transmitidos às estruturas. O trabalho utiliza conhecidas relações constitutivas para representar o comportamento tensão-deformação dos cabos. O enfoque assim dado possibilita a avaliação bem mais precisa de casos reais que, em razão das limitações de soluções analíticas clássicas, ainda não podiam ser convenientemente tratados, bem como também permite a extensão para estudos bem mais complexos, tais como feixes com disposições assimétricas, como é o objetivo da mencionada pesquisa.

## 2.0 - MODELOS DE FENÔMENOS METEOROLÓGICOS

A evidência desses diversos fenômenos meteorológicos implica a necessidade de considerá-los no projeto de linhas de transmissão. Assim, empregam-se modelos do escoamento ou modelos simplificados do campo de velocidades do ar na atmosfera para tormentas, tornados e ciclones. Neste trabalho serão estudadas as tormentas EPS e tormentas TS, por serem os fenômenos mais frequentes na região centro-sul e sul do Brasil e, também, os responsáveis por maior parte dos danos provocados pelo vento.

### 2.1 Modelos de Tormenta EPS

As tormentas EPS são caracterizadas por serem grandes massas de ar em movimento, com extensão de algumas centenas de quilômetros a poucos milhares de quilômetros. No caso de se estudar o efeito dessas tormentas em um vão de linha de transmissão, de cerca de 400m, as EPS podem ser consideradas como semelhantes a um vento de fundo, ou seja, um vento com velocidade e direção constantes em relação às coordenadas espaciais  $x$  e  $y$ . Assim, o que diferencia a tormenta EPS do vento de fundo, quando atuando em uma estrutura de pequena dimensão, é a magnitude da velocidade média. As EPS podem alcançar velocidades de cerca de 30m/s, dependendo das características da região, tais como: topografia e velocidade básica característica do vento.

As EPS podem ser consideradas constituídas de ventos que não mudam bruscamente de direção e apresentam velocidade média praticamente constante durante cerca de algumas horas. Dessa forma, num determinado período, teremos a velocidade constituída da componente média adicionada de uma flutuação variante no tempo.

$$V(t) = \bar{V}_0 + \Delta V(t); \quad |V|_{\max} = \bar{V}_0 + \Delta V_{rms} \zeta \quad \zeta \text{ varia de 3 a 5 (conforme características da região)}$$

A parcela referente às flutuações do vento são usualmente modeladas como processos aleatórios estacionários, que podem ser simuladas por um ruído branco submetido a um filtro de características adequadas.

Se definirmos uma função:  $f(t) = C_1 y(t) + C_2 \dot{y}(t) + C_3 \ddot{y}(t)$ , sendo  $y(t)$  a resposta do filtro e  $C_1, C_2, C_3$  constantes arbitrárias, e se admitir que o filtro é um oscilador linear amortecido e a excitação ruído branco, sua equação de movimento será:  $\ddot{y}(t) + 2\zeta_f \omega_f \dot{y}(t) + \omega_f^2 y(t) = u(t)$

onde  $\omega_f$  é a frequência natural do filtro,  $\zeta_f$  é o coeficiente de amortecimento do filtro e  $u(t)$  é um ruído branco que representa um processo aleatório estacionário com energia espectral constante. Os parâmetros  $\omega_f, \zeta_f$  e  $C_i$  determinam as propriedades do filtro.

No caso de cargas aleatórias produzidas por flutuações de vento, as características de suas frequências no domínio do tempo podem ser obtidas através do espectro de potência do vento atmosférico. Há diversas expressões que o definem, como por exemplo, as expressões de Davenport e Harris, as quais são independentes da altura em relação ao solo [Blessmann, 1995].

Se utilizado um oscilador linear amortecido para filtrar o ruído branco, os espectros de resposta a um ruído branco são dados pelo quadrado do fator de ganho  $|H(f)|^2$ , sendo a frequência dada por  $f = \omega/2\pi$ . As expressões dos espectros de resposta em termos de deslocamento, velocidade e aceleração são, de acordo com Bendat & Piersol:

$$S_{\ddot{y}}(f) = \frac{4\pi^2 f^2}{\left[1 - \left(\frac{f}{f_f}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta_f \left(\frac{f}{f_f}\right)\right]^2}; \quad S_{\dot{y}}(f) = \frac{16\pi^2 f^4}{\left[1 - \left(\frac{f}{f_f}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta_f \left(\frac{f}{f_f}\right)\right]^2}$$

A comparação com os espectros de Davenport e Harris permite estabelecer que o melhor ajuste se obtém utilizando a expressão (ver Figura 1):  $S_f(f) = aS_{\ddot{y}}(f) + bS_{\dot{y}}(f)$

Mesmo sendo esses espectros independentes da altura, quando se expressam em função das frequências, é produzido um deslocamento nas frequências dos mesmos de acordo com a variação da velocidade média, que por sua vez, depende da altura na atmosfera. Os parâmetros do filtro obtidos para uma velocidade média de 20m/s que melhor se ajustaram aos espectros de Davenport e Harris foram:  $f_f [Hz] = 0,041$ ;  $\zeta_f = 2$ ;  $a = 60$ ;  $b = 6$ .

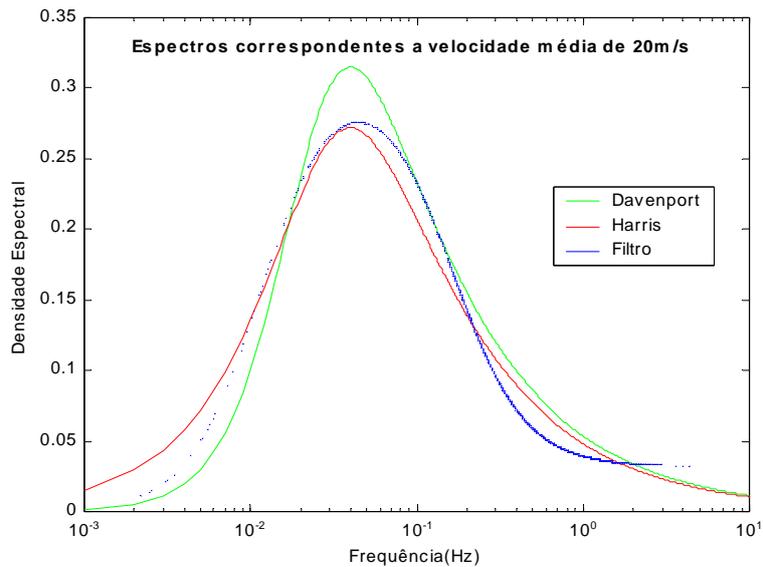


FIGURA 1 - Comparação entre os espectros de Davenport, Harris e o filtrado

A Figura 2 apresenta uma tormenta EPS de velocidade média em torno de 25m/s e flutuações que chegam a 15% do valor médio. As flutuações foram geradas através do espectro filtrado determinado com os parâmetros apresentados.

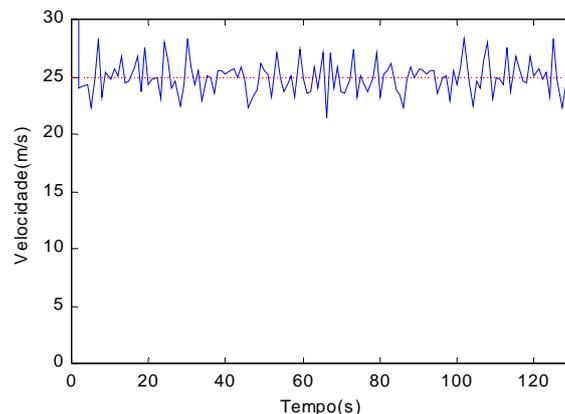


FIGURA 2 - Flutuações de velocidade de uma tormenta EPS

## 2.2 Modelos de Tormenta TS

Zhu & Etkin [1985] propõem um modelo que procura descrever o campo de velocidades durante uma tormenta TS. Posteriormente esse modelo foi utilizado por Riera & Rocha [1998] para simular o campo de velocidades próximo ao solo quando a tormenta TS é transportada por um vento de fundo com velocidade constante. Ainda visando os mesmos objetivos, Holmes & Oliver [2000] propõem um modelo empírico. Mais recentemente, este assunto vem sendo estudado por Ponte [2002], que parte do modelo proposto por Riera & Rocha [1998].

Ponte [2002] apresenta as seguintes expressões que definem temporalmente e espacialmente as tormentas TS. A velocidade tangencial é dada por:

$$V_t = \left( 2 \cdot \left( \frac{(h-z) \cdot dP}{h \cdot \rho} \right) \right)^2 \quad \text{sendo: } h: \text{ altura da nuvem; } z: \text{ distância do solo ao ponto de interesse; } \rho: \text{ massa específica do ar; } dP: \text{ Diferença de pressão ( 2 a 8 mb ) = ( 200 a 800 N/m}^2\text{)}.$$

Em um ponto fixo, independente das coordenadas  $x$ ,  $y$  pois o escoamento é considerado axissimétrico em relação aos eixos principais (Figura 3), e a uma altura variável, a velocidade tangencial é modelada em função do tempo:

$$V_t(t) = 1.58 \cdot V_t \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad \text{para } t \leq T \quad V_t(t) = V_t \cdot e^{-\left(\frac{t-T}{T}\right)}, \quad \text{para } t > T$$

sendo,  $T$ : Duração característica da tormenta - parâmetro que depende da intensidade da tormenta, seria o tempo que a tormenta leva para atingir sua velocidade máxima;  $1,58$  - parâmetro que corrige o modelo para que este

obedeça a uma condição de contorno, ou seja, para  $t = T$  tem-se  $V_t(t) = V_t$ . As componentes de velocidade são dadas em coordenadas espaciais:

$$V_r = V_t \left( \frac{r^2}{h^2 + r^2} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad V_a = V_t \left( \frac{h^2}{h^2 + r^2} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad r = (x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}}; \quad V_a: \text{velocidade axial e } V_r: \text{velocidade radial}$$

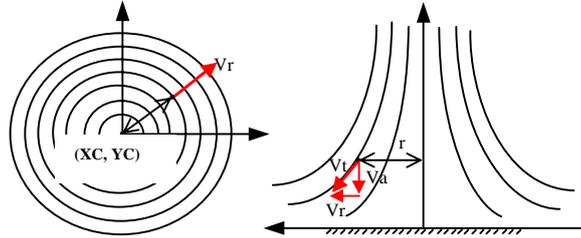


FIGURA 3 - Desenho esquemático da forma de uma TS apresentando as suas componentes de velocidade tangencial, radial e axial

O parâmetro diferença de pressão determina a curva de velocidade tangencial característica da tormenta elétrica, implicando em valores diferentes para a velocidade máxima alcançada (ver Figura 4).

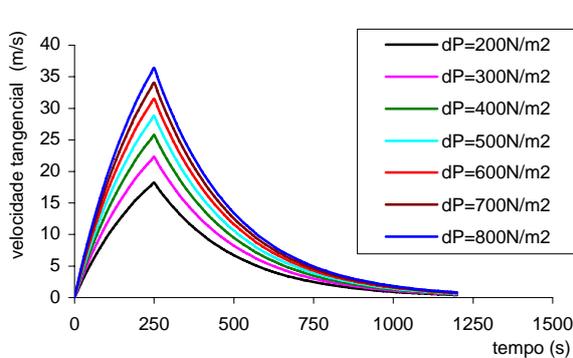


FIGURA 4 - Velocidade tangencial em função do tempo de TS com diferenças de pressão entre 200 e 800N/m<sup>2</sup>

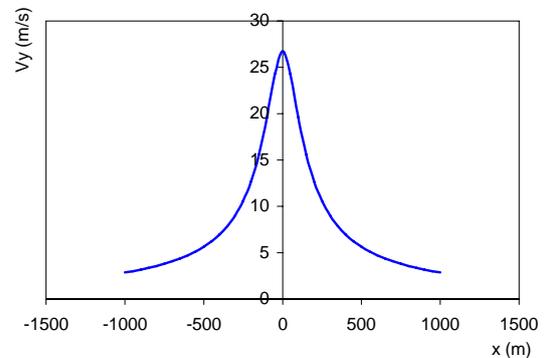


FIGURA 5 - Variação espacial da velocidade na direção do eixo y (Figura 3) para uma dada TS

Os modelos propostos de TS consideram uma velocidade média e flutuações em torno dessa velocidade, que são originadas pela presença de uma turbulência atmosférica. Assim como para as EPS, as flutuações de velocidade das TS podem ser simuladas por uma componente aleatória simuladas por um ruído branco. A intensidade da turbulência está relacionada ao coeficiente de variação dessas flutuações em torno da sua componente determinística. No caso de uma TS com tempo característico de 62,5 segundos e diferença de pressão de 500N/m<sup>2</sup>, temos o comportamento da velocidade do vento ao longo do tempo apresentado nas Figura 6.

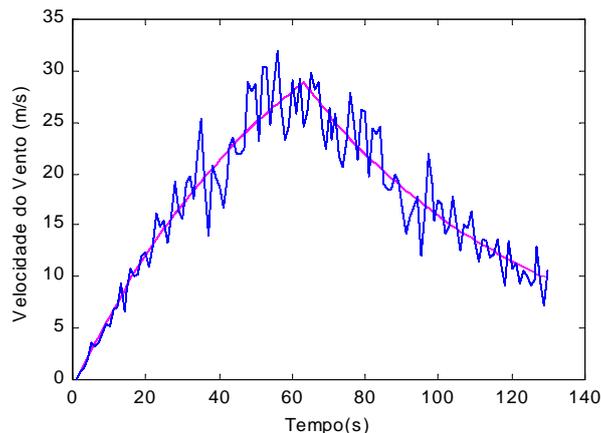


FIGURA 6 - Velocidades do vento da TS com coeficiente de variação de 30%

Também são frequentes sistemas mistos, onde as TS podem ser transportadas por uma EPS ou por um vento de fundo, definido como um vento com velocidade e direção constantes em relação às coordenadas espaciais  $x$  e  $y$ . No caso de um vão de linha de transmissão, devido a sua pequena extensão, as EPS são equivalentes a um vento de fundo, se diferenciando apenas na magnitude da velocidade média.

### 3.0 - MODELOS DO CAMPO DE VELOCIDADE DO VENTO

Foi desenvolvida uma sub-rotina que determina a velocidade do vento atuante em cada nó da estrutura e nas direções das coordenadas espaciais, devido às tormentas com características definidas em arquivo de dados preenchido pelo usuário.

O modelo de TS permite a escolha das coordenadas do centro da tormenta em relação ao eixo de coordenadas global da linha (localizado na extremidade de um dos cabos). A tormenta TS é simulada sendo transportada por vento de fundo de diferentes velocidades  $e/$  ou por tormentas EPS. Para a geração das flutuações de velocidade das tormenta EPS se aplicou o filtro, citado anteriormente, a sinais aleatórios provindos de distribuição normal com média zero e variância equivalente à unidade, após isso, se aplicou a Transformada Inversa de Fourier ao sinal filtrado. Da mesma forma, obteve-se as flutuações de velocidade das tormentas TS, só que essas são multiplicadas pela curva de velocidade média e depois somadas a essa. As flutuações geradas variam com o tempo e são diferentes para cada elemento cabo ao longo do comprimento do vão. Considerando-se a existência de correlação espacial da excitação do vento, determinou-se as componentes de flutuações conforme equações apresentadas a seguir. Admitiu-se o comprimento de correlação de 40 metros, ou seja, as flutuações em pontos distantes de 40 metros ou mais em um vão, não estão correlacionadas.

As componentes flutuantes da velocidade do vento serão:

$$\tilde{z} = \frac{a_1 u_1 + a_2 u_2}{(a_1^2 + a_2^2)^2}; \quad \tilde{y} = \frac{a_1 v_1 + a_2 v_2}{(a_1^2 + a_2^2)^2}; \quad a_1 = 1 - \xi \quad a_2 = \xi \quad \xi = \frac{\Delta x}{L_c}$$

sendo  $u_1, u_2, v_1, v_2$  variáveis aleatórias independentes,  $\Delta x$  a distância entre os pontos e  $L_c$  o comprimento de correlação.

A Figura 7 apresenta as flutuações de velocidade na direção principal do vento, acrescidas da velocidade média, em quatro pontos distintos de um vão de LT. Os pontos foram escolhidos a cada quatro metros, assim temos as distâncias:

$$d_{p11p12} = d_{p18p19} = 4m; \quad d_{p12p18} = 24m; \quad d_{p11p18} = d_{p12p19} = 28m; \quad d_{p11p19} = 32m$$

Faz-se claramente notável a forte correlação entre os pares de pontos 11-12 e 18-19 e a fraca correlação entre os demais pares (ver Figura 7).

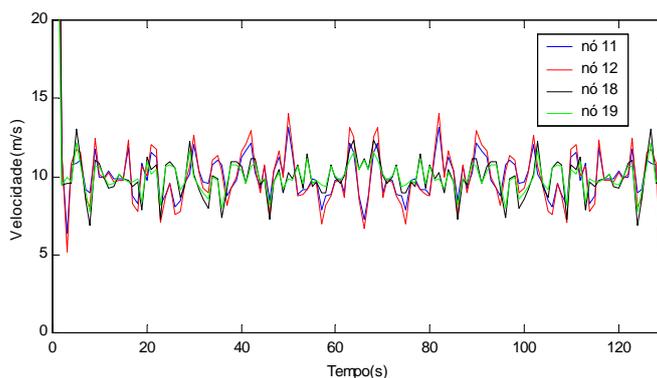


FIGURA 7 - Velocidade do vento na direção principal em 4 diferentes pontos ao longo de um vão

As flutuações nas diferentes direções, direção principal do vento e normal a esta, foram consideradas como não correlacionadas. A relação adotada entre elas é de 0,5, ou seja, a componente na direção normal é 0,5 vezes menor que a outra componente (conforme adotado por grande parte dos pesquisadores, Blessmann, 1995).

Pela proximidade entre os condutores do feixe, foi considerado que as flutuações de velocidade são idênticas nos diferentes cabos.

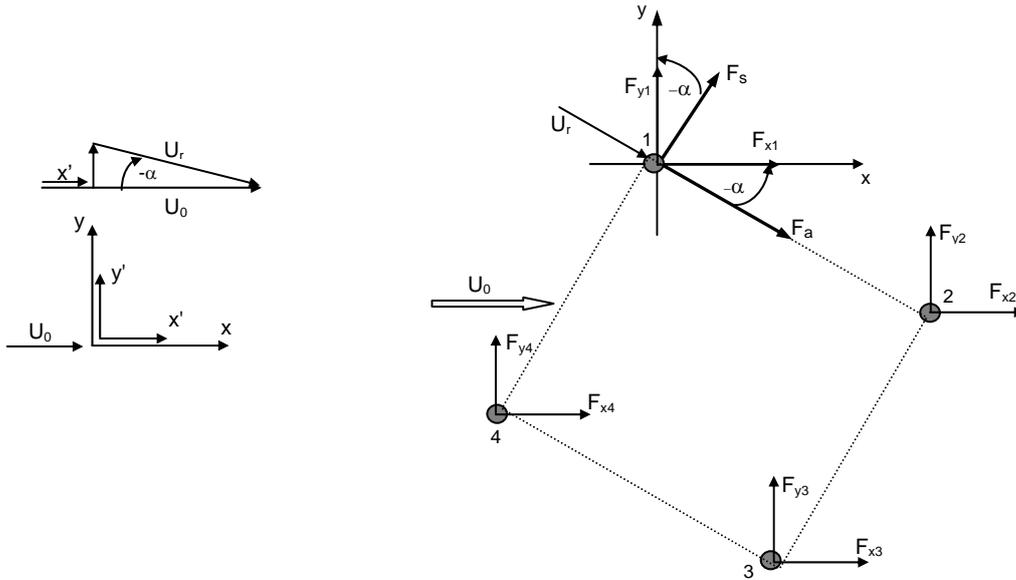
### 4.0 - MODELO DE FORÇAS ATUANTES SOBRE OS CABOS DE UM FEIXE

As forças atuantes nos cabos dependem do campo de velocidades ao redor da localização da estrutura. Se o campo de velocidades é uniforme, não haverá problema de instabilidade da estrutura e a força atuante seria apenas a proveniente da pressão do vento incidindo na área do cabo exposta ao vento. Mas no caso de feixes, a presença dos cabos a barlavento modifica o campo de velocidades nos cabos a sotavento, implicando em um campo de velocidade não uniforme e desconhecido. Nas equações de movimento dos cabos, esse efeito é representado pelos chamados coeficientes de arrasto e sustentação.

As forças também dependem da velocidade de fundo  $U_0$ , que é a velocidade do escoamento. Esse escoamento pode ser turbulento e isso causaria uma influência que deve ser considerada.

A seguir é apresentado o modelo para o caso de um feixe de quatro cabos, mas ele pode ser utilizado para qualquer configuração de feixe. Para um dos cabos:

$$U_r = \left\{ (U_0 + x')^2 + y'^2 \right\}^{\frac{1}{2}}; \quad -\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \frac{y'}{U_0 - x'}; \quad F_x = F_a \cos(-\alpha) + F_s \operatorname{sen}(-\alpha); \quad F_y = -F_a \operatorname{sen}(-\alpha) + F_s \cos(-\alpha)$$



sendo,  $F_a = \frac{1}{2} \rho d U_r^2 C_a$ ;  $F_s = \frac{1}{2} \rho d U_r^2 C_s$ ;  $\cos(-\alpha) = \frac{U_0 - x'}{U_r}$ ;  $\sin(-\alpha) = \frac{y'}{U_r}$

Cada um dos cabos terá diferentes velocidades de deslocamento  $x'$  e  $y'$ , que está relacionada a sua posição no feixe. Sendo assim, para  $i =$  referência do cabo ( $i = 1-4$ ), tem-se:

$$F_{x_i} = \frac{1}{2} \rho d \left[ (U_0 - x_i')^2 + y_i'^2 \right]^{\frac{1}{2}} [C_{ai} (U_0 - x_i') + C_{si} (y_i')]; \quad F_{y_i} = \frac{1}{2} \rho d \left[ (U_0 - x_i')^2 + y_i'^2 \right]^{\frac{1}{2}} [-C_{ai} (y_i') + C_{si} (U_0 - x_i')]$$

Os cabos a barlavento, caso dos cabos 1 e 4 do feixe exemplificado, possuem coeficientes de sustentação médios nulos. Agora, para os cabos a sotavento, no caso os cabos 2 e 3 do feixe da figura acima, a velocidade  $U$  é adicionada de uma flutuação de velocidade devido a esteira dos cabos 1 e 4. Para isso é preciso se conhecer a influência da esteira dos cabos a barlavento na velocidade atuante nos cabos a sotavento. Essa influência é considerada nas equações de forças através dos valores dos coeficientes aerodinâmicos (de arrasto,  $C_{ai}$  e de sustentação,  $C_{si}$ ) individual de cada cabo do feixe. Esses coeficientes poderiam ser determinados através de ensaios experimentais em túnel de vento, desenvolvimento de modelos numéricos e/ou modelos analíticos que consigam reproduzir o campo de velocidades atuante nos diferentes feixes.

#### 4.1 Coeficientes Aerodinâmicos

Através dos resultados apresentados para os coeficientes aerodinâmicos é possível notar a influência exercida pelos cabos a barlavento sobre aqueles a sotavento, devido à esteira gerada pelos primeiros. Esta influência é notada, sobretudo, nos valores de sustentação, fortemente ligados à ação da esteira. Para feixes expandidos (LPNE), ou seja, com espaçamentos na ordem de 40 a 80 diâmetros, é esperada a atenuação dos efeitos de interferência entre condutores que compõe os feixes. Em termos médios, talvez os  $C_s$  alcançados sejam muito pequenos ou até nulos, fazendo com que os condutores do feixe se comportem como condutores singelos. O que se propõe neste estudo é a possibilidade de determinar os coeficientes apenas para feixes de dois cabos, para diversos ângulos de incidência do vento, e por superposição, determinar-se os coeficientes para qualquer feixe. Essa suposição possibilita a obtenção de coeficientes para feixes de três ou mais cabos, permitindo que o árduo trabalho necessário para determinar esses parâmetros seja reduzido a apenas ensaios numéricos ou experimentais de feixes de dois cabos dispostos lado-a-lado, para diversos ângulos de incidência do vento. No trabalho de Cooper & Watts [1975] são determinados experimentalmente os coeficientes para um cabo liso a sotavento de um cabo de iguais características, imersos em escoamento de  $Re=5 \cdot 10^4$ . Fez-se o ajuste de equações algébricas aos resultados apresentados, considerando que os parâmetros  $y/d$  e  $x/d$  representam as distâncias verticais e horizontais entre os dois cabos divididos pelo diâmetro dos cabos (parâmetros adimensionais), obtendo-se as equações e correspondentes curvas apresentadas a seguir.

#### Coeficiente de Arrasto ( $C_a$ )

$$C_a = \frac{a \cdot b + c \cdot \left(\frac{y}{d}\right)^d}{b + \left(\frac{y}{d}\right)^d} \quad \text{sendo:} \quad a = 1,038 - 0,65 \cdot e^{-0,007 \cdot \left(\frac{x}{d}\right)^{1,55}}; \quad b = 35,43 - 34,61 \cdot e^{-0,006 \cdot \left(\frac{x}{d}\right)^{1,71}}$$

$$c = 1,39 - 0,41 \cdot e^{-1,187 \cdot \left(\frac{x}{d}\right)^{-0,067}}; \quad d = 5,51 - 0,095 \cdot \left(\frac{x}{d}\right) + 0,0016 \cdot \left(\frac{x}{d}\right)^2$$

Esses coeficientes alimentaram os modelos empregados nas análises de comportamento de linhas em feixes de diversas configurações, que foram desenvolvidas neste trabalho.

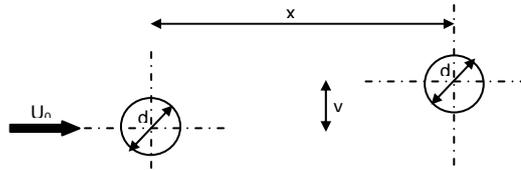


FIGURA 8 - Relações de distâncias entre dois cabos

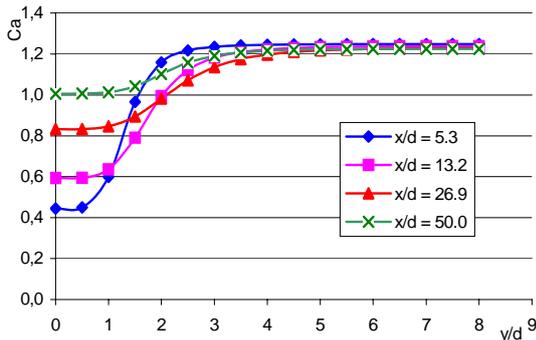


FIGURA 9 - Curvas de  $C_a$  para feixe de 2 cabos em função da variação da distância vertical entre cabos

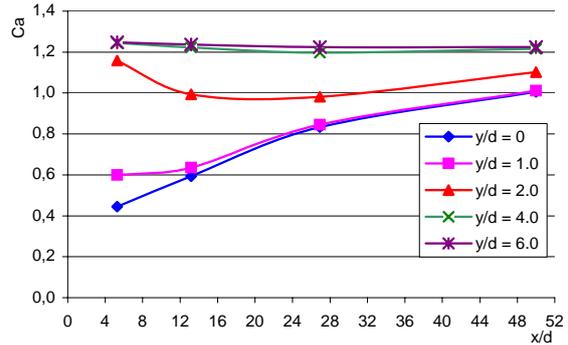


FIGURA 10 - Curvas de  $C_a$  para feixe de 2 cabos em função da variação da distância horizontal entre cabos

Os valores de  $C_a$  do cabo a sotavento tendem a se aproximar dos valores de um cabo isolado conforme há o afastamento horizontal e vertical do cabo a barlavento, conforme podemos observar nas Figura 9 e 10. Para distâncias horizontais entre cabos acima de 60 diâmetros, podemos esperar  $C_a$  constantes de 1,2 para qualquer distância vertical, ou seja, para qualquer ângulo de incidência do vento.

**Coefficiente de Sustentação ( $C_s$ )**

$$C_s = \frac{a + b \cdot \left(\frac{y}{d}\right)}{1 + c \cdot \left(\frac{y}{d}\right) + d \cdot \left(\frac{y}{d}\right)^2}$$

sendo:  $a = -0,101 + 0,0049 \cdot \left(\frac{x}{d}\right) - 6,133E^{-5} \cdot \left(\frac{x}{d}\right)^2$

$$b = 0,0067 - 0,000298 \cdot \left(\frac{x}{d}\right) + 3,921E^{-6} \cdot \left(\frac{x}{d}\right)^2$$

$$c = -1,32 + 0,0315 \cdot \left(\frac{x}{d}\right) - 0,000326 \cdot \left(\frac{x}{d}\right)^2$$

$$d = \frac{-7,975E^{-17} + 3,394E^{10} \cdot \left(\frac{x}{d}\right)}{1 + 5,04E^{10} + 5,822E^9 \cdot \left(\frac{x}{d}\right)^2}$$

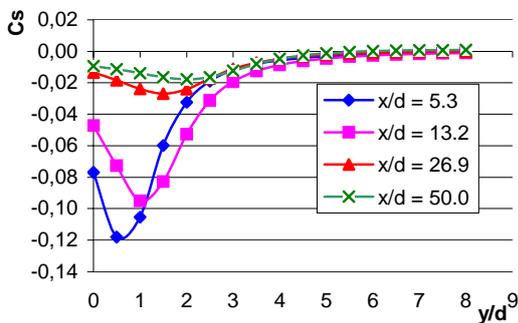


FIGURA 11 - Curvas de  $C_s$  para feixe de 2 cabos em função da variação da distância vertical entre cabos

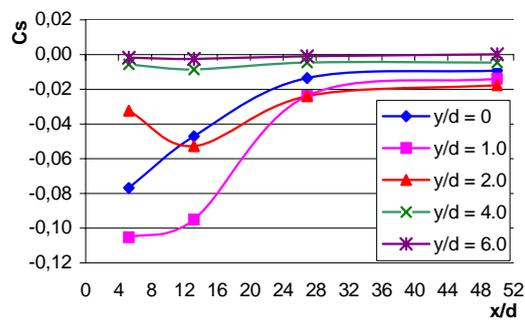


FIGURA 12 - Curvas de  $C_s$  para feixe de 2 cabos em função da variação da distância horizontal entre cabos

As Figuras 9, 10, 11 e 12 apresentam as curvas de  $C_a$  e de  $C_s$ , determinados experimentalmente por Cooper at all Cooper & Watts [1975], ajustadas conforme as equações acima. Os coeficientes são graficados em função das

distâncias vertical e horizontal entre os cabos, o que determina a posição do cabo a sotavento na esteira do cabo a barlavento (ver Figura 8). Da mesma forma que o comportamento dos  $C_a$ , os valores encontrados para os  $C_s$  do cabo a sotavento tendem a se aproximar dos valores de um cabo isolado, conforme há o afastamento horizontal e vertical do cabo a barlavento. Para afastamentos horizontais entre cabos acima de 60 diâmetros, podemos esperar  $C_s$  nulos para qualquer distância vertical, ou seja, para qualquer ângulo de incidência do vento.

### 5.0 - EXEMPLO

Foi simulado um vão de linha de 400m de comprimento, com feixe de dois cabos condutores dispostos lado-a-lado e espaçados de 0,50m. O vão contém dois espaçadores rígidos localizados a 30% e 70% do comprimento do vão (120m e 280m das extremidades). O feixe é submetido a uma tormenta TS com intensidade de turbulência de 30% (coeficiente de variação) sendo transportada por um tormenta EPS com 20m/s de velocidade média e intensidade de turbulência de 20%. O pico da TS é localizado a 25% do vão, ou seja a 100m de uma das extremidades.

A figura a seguir apresenta a variação da distância entre os cabos ao longo dos 130s de simulação em diferentes posições ao longo do vão. Com relação a figura, observa-se que as menores distâncias entre os condutores acontece no trecho entre 15 e 25% do vão, próximo ao pico da TS e entre a extremidade e o primeiro espaçador.

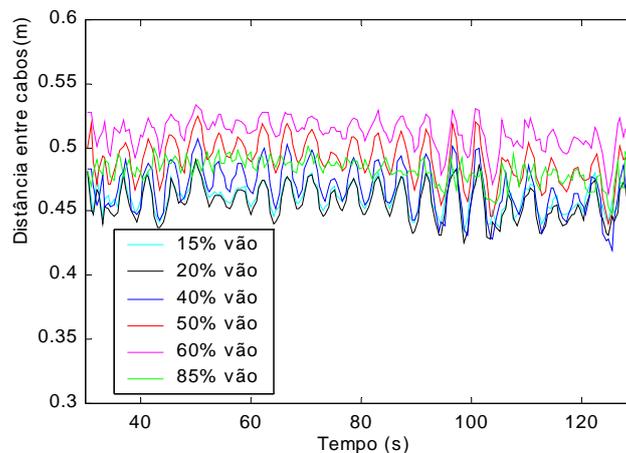


FIGURA 13 – Variação da distância entre condutores em 6 diferentes pontos ao longo do vão

### 6.0 - CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta uma importante ferramenta de modelagem numérica para a avaliação do comportamento dinâmico de feixes de condutores. Para alcançar tal objetivo, faz-se a modelagem da excitação (vento), contemplando diferentes fenômenos meteorológicos, através do tratamento do campo de forças no feixe. O procedimento usa valores experimentalmente obtidos. Com a modelagem numérica da resposta estrutural, que inclui também as características não lineares do sistema, resulta uma ferramenta de extrema utilidade não só para avaliar aspectos ligados à instabilidade (estados limites últimos) mas também aqueles de ocorrência mais freqüente como a possível violação de um estado limite de utilização, que pode ser o caso de uma distância entre sub-condutores, conforme é apresentado no exemplo

### 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BLESSMANN, J. *O vento na engenharia estrutural*. Ed. Universidade/ UFRGS; Porto Alegre, 1995.
- (2) ZHU, S. and ETKIN, B. Model of the wind field in a downburst. *Journal of Aircraft*, V. 22, n. 7, 1985.
- (3) RIERA, J. D. and ROCHA, M. M. Load definition for wind design and reliability assessments in extreme wind climate. *Proceedings of Jubileum Conference on Wind Effects on Structures*; Porto Alegre/ RS, Brasil, 1998.
- (4) HOLMES, J. D; and OLIVER, S. E. An empirical model of downburst. *J. of Engineering Structures*, V.22, 2000.
- (5) PONTE, J. Modelos probabilísticos para o campo de velocidades de ventos. *Seminário de Doutorado*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre/ RS, Brasil, maio 2002.
- (6) COOPER, K. R.; WATTS, J. A.; Wind Tunnel and Analytical Investigations into the Aeroelastic Behaviour of Bundled Conductors, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-94, no. 2, March/ April 1975.
- (7) OLIVEIRA, T. T.; "Estudo da Instabilidade de Feixes de Condutores em Linhas Aéreas de Transmissão", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2002.