



# Projeto Eletromecânico de torres: Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamentos das Estruturas para Linhas de Transmissão

Palestrante: **Rogério Peixoto Guimarães**

# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

## Conteúdo da Apresentação:

### 1- Introdução

### 2- Categorias de Ventos : Ventos Sinóticos Ventos Não-Sinóticos

### 3- Visão geral de provisão de resistência de Projeto a Ventos de Alta Intensidade localizados :

Transener, Argentina  
ENA , Austrália  
Eskom, África do Sul  
ASCE 74  
Hydro One, Canadá  
Revisão NBR 5422

REALIZAÇÃO:



# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

## 4- Brochura Técnica Cigré 350 How Overhead lines respond to Localized High Intensity Winds Hipótese de Ventos localizados de Alta Intensidade

## 5- GT.B2.08 Estudo Aplicação Brochura Técnica Cigré 350



# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

## 1- Introdução:

- Falhas de Estruturas Suportes de LT's configuram-se como um dos principais problemas enfrentados pelas concessionárias de energia no mundo
- Mais de 80% das falhas registradas estão relacionadas a ocorrência de ventos de alta intensidade.
- As mudanças climáticas têm ocasionado o aumento da intensidade e frequência dos eventos climáticos extremos.



# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

- Um estudo da Associação Brasileira das Empresas de Transmissão de Energia (**ABRATE**) levantou o tamanho dos danos causado pelas mudanças climáticas nas LT's. Entre 2000 e 2005, os ventos derrubaram cerca de 20 torres por ano. Entre 2006 e 2012, esse número subiu para 35. E entre 2013 e 2016, caíram 57 torres por ano, quase três vezes mais do que há menos de 20 anos. Nos 11 anos entre 2006 e 2016, os ventos derrubaram 465 torres.
- A compreensão do comportamento, as causas e o modo de falha das estruturas são importantes para estabelecer novos parâ



# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

## 2- Categorias de Ventos:

### > Ventos Sinóticos

Vento forte e constante com propriedades estatísticas estacionárias (média e desvio padrão constante durante um dado tempo) e que usualmente se estende por centenas ou milhares de quilômetros.

### > Ventos Não-Sinóticos

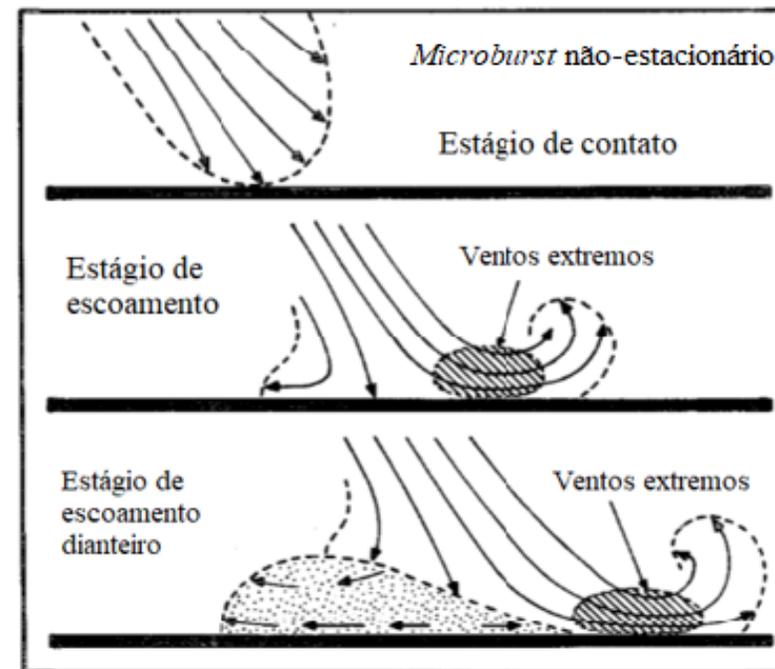
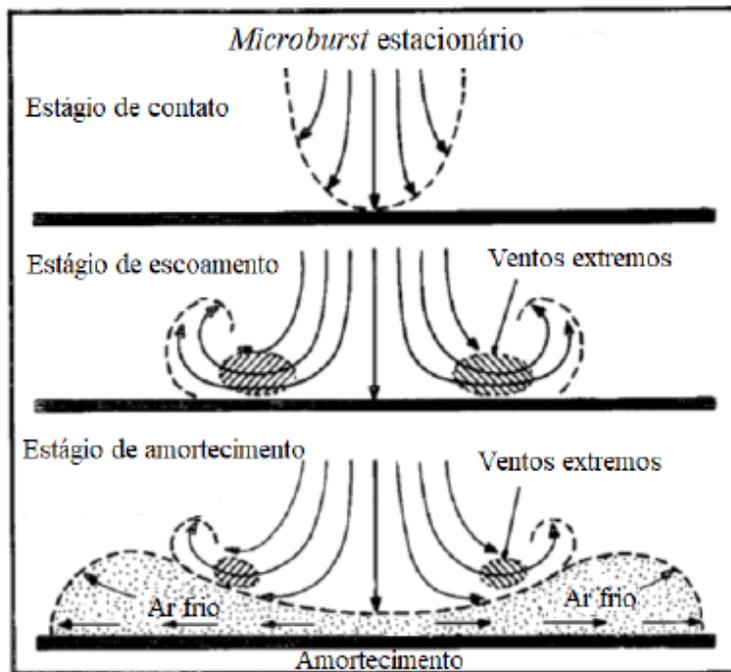
Não atendem aos critérios acima e incluem:

- Grandes Tormentas Tropicais como furacões, tufões e ciclones;
- Tormentas sub-tropicais que podem ter células destrutivas de vento incorporadas. Estas células podem formar severos downdrafts e tornados.

# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

## ➤ Downbursts

Forte corrente descendente de ar que ao chegar ao solo se espalha em várias direções, causando ventos de alta velocidade em baixas altitudes.



REALIZAÇÃO:

# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

## ➤ Downbursts

Quanto à sua extensão horizontal os downbursts são classificados em:

- a) Microbursts : Segundo Fujita os microbursts têm diâmetro menor que 4km e podem atingir velocidades de até 75 m/s.
- b) Macrobursts : Os macrobursts têm diâmetro maior que 4 km, duração de 5 a 30 segundos e podem atingir velocidades de até 60 m/s.

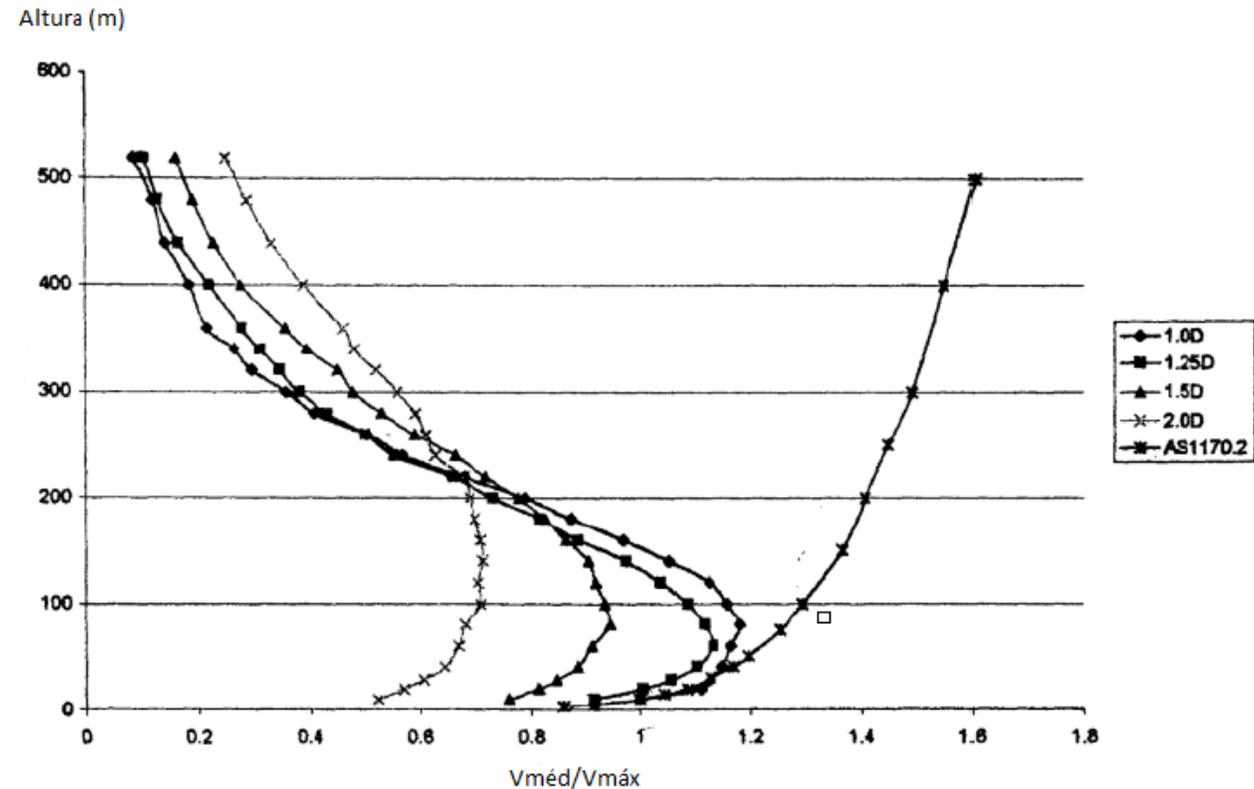


Downburst em Gravatai – RS Fevereiro de

# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

Os perfis de velocidade gerados por downbursts são diferentes daqueles gerados tipicamente na camada limite atmosférica pelos ventos sinóticos, principalmente nas alturas mais elevadas.

A escassez de registros é explicada tanto pela área reduzida afetada quanto pela severidade e natureza localizada dos mesmos.



# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

## ➤ Tornados

Tornado é uma tempestade mais violenta com variados poderes de destruição pelas altas velocidades horizontais dos ventos tangenciais ao movimento rotacional, pela depressão e altas velocidades ascendentes em seu núcleo.



# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

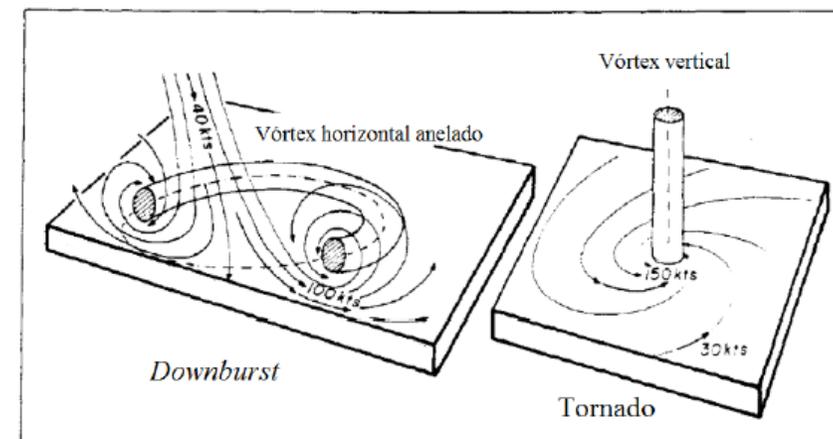
**Table 1 - The Fujita-Pearson tornado scale**

F Scale	Maximum wind speed (m/s)	Path length (km)	Path width (m)	Expected damages	Frequency distribution (%)	Cumulative frequency (%)
0	< 33	< 1.6	< 15	light	22.9	22.9
1	50	1.6-5.0	15-50	moderate	34.7	57.6
2	70	5-16	50-160	considerable	28.5	86.1
3	92	16-50	160-500	severe	10.7	96.8
4	116	50-159	500-1600	devastating	2.7	99.5
5	142	159-507	1600-5000	incredible	0.5	100

REALIZAÇÃO:

# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

Original F Scale	Maximum wind speed (m/s) <sup>1</sup>	New EF Scale	Maximum wind speed (m/s)
0	< 33	0	< 38
1	50	1	49
2	70	2	60
3	92	3	74
4	116	4	89
5	142	5	> 90



# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

## 3- Visão geral de provisão de resistência de projeto a Ventos de Alta Intensidade localizados

### Transener, Argentina

- Hidronor, hoje Transener, foi a primeira concessionária a utilizar carregamento de tornado para projeto de sua LT 500 kV Alicura no ano de 1984;
- Foi concensado mitigar os efeitos dos tornados de categoria F2 com carregamentos de ventos uniformes com velocidades de até 240 km/h;
- Neste projeto e outros mais da Argentina um para-raios fusível é projetado para mitigar o efeito de cascatas transversais.

# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

## Exemplo : Interconexão Brasil –Argentina : LT 500 kV RINCON-GARABI

### **HIPOTESIS 7 :**

**CARGA DE VIENTO CICLONICO**

**COEFICIENTE DE SEGURIDAD K =1.0**

- Peso propio de la torre (P.P) x 1.00 ;
- Viento de 240 km/h sobre la estructura actuando con un ángulo de 90° respecto de la dirección de la línea;
- Viento de 120 km/h actuando sobre ambos semivanos de viento.

REALIZAÇÃO:

# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

## Exemplo : Interconexão Brasil –Argentina : LT 500 kV RINCON-GARABI

### **HIPOTESIS 8**

#### **CARGA DE VIENTO CICLONICO DESCENDENTE**

#### **COEFICIENTE DE SEGURIDAD K =1.0**

- Peso propio de la torre (P.P) x 1.00 ;
- Viento de 210 km/h sobre la estructura actuando con un ángulo de 90° respecto de la dirección de la linea;
- Viento de 120 km/h sobre la estructura actuando sobre el eje vertical en el sentido descendente o ascendente;
- Viento de 120 km/h actuando sobre ambos semivanos de viento.

REALIZAÇÃO:

# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

## 3- Visão geral de provisão de resistência de projeto a Ventos de Alta Intensidade localizados

### ENA, Austrália

- Procedimento de carregamento de vento de microburst muito similar ao carregamento de vento sinótico;
- Dividida em 11 regiões de atividade de microburst com ventos variando de 46m/s a 60m/s (165 km/h a 216km/h) com T= 100 anos;
- Cargas de vento atuando sobre suportes e cabos com redução de vão de 0.9;
- Carregamento de Tornado F2 são previstos apenas para as grandes linhas de transmissão inter-regionais.

Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

### 3- Visão geral de provisão de resistência de projeto a Ventos de Alta Intensidade localizados

#### ASCE Manual 74

- A abordagem para Resistência de projeto a tornados considera um carregamento de vento correspondente a tornado moderado : escala F1 e F2 de Fujita;
- Sugere remover o efeito do peso próprio dos condutores pois a componente de vento vertical dos tornados pode levantá-los;
- Para microburst sugere-se utilizar o mesmo carregamento de tornados.

# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

## 3- Visão geral de provisão de resistência de projeto a Ventos de Alta Intensidade localizados

Eskom, África do Sul

- O carregamento de tornado considerado é mais conservativo do que os prescritos pela ASCE 74;
- Considera-se um carregamento de tornado categoria F2 com vento de 250 km/h aplicado somente sobre a torre além do peso próprio dos condutores.

# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

## 3- Visão geral de provisão de resistência de projeto a Ventos de Alta Intensidade localizados

Revisão NBR 5422 , Brasil

- O vento sinótico está representado pela velocidade de 10 min para projeto =  $V_p$
- Para tornar as características da velocidade média de 10 min compatíveis com o modelo de vento do IEC 60826, a velocidade de referência deve ser majorada pelo fator de turbulência  $K_{tur}$

Região	$K_{tur}$
Sul	1,08
Sudeste e Centro-Oeste	1,12
Norte e Nordeste	1,16

REALIZAÇÃO:

# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

## 3- Visão geral de provisão de resistência de projeto a Ventos de Alta Intensidade localizados

- O vento de tormentas elétricas , tipicamente as microexplosões, é simulado pelo vento de 3 s para projeto :  $V_{P3s}$
- Para efeitos da NBR 5422 :  $V_{P3s} = 1,15 K_{int} V_P$
- $K_{int}$  é o fator de conversão do período de integração de 10 min para 3 s.

Categoria do terreno	$K_{int}$
A	1,31
B	1,41
C	1,58
D	1,88

REALIZAÇÃO:

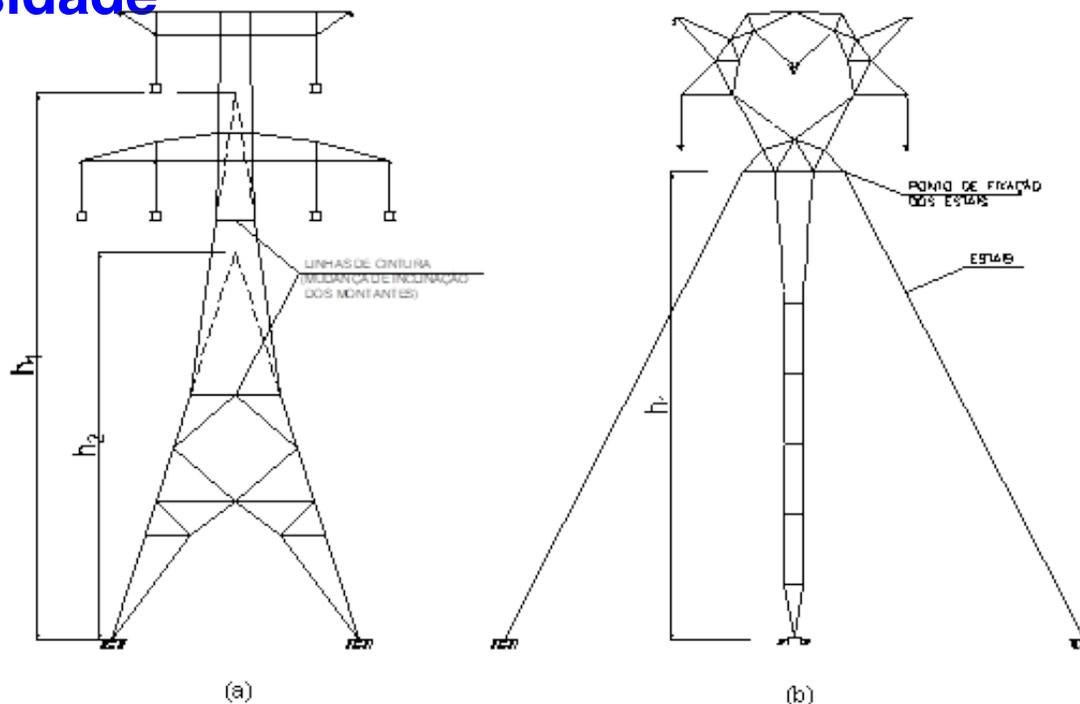
## Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

### 3- Visão geral de provisão de resistência de projeto a Ventos de Alta Intensidade localizados

- Força exercida sobre os cabos ( Vento 3s)  $A_c = q_o \cdot C_x \cdot G_{L3s} \cdot D \cdot L$   
sendo  $G_{L3s}$  ( fator de efetividade para o vento de 3s para projeto)  $\geq 0.3$
- Força de vento exercida sobre um tronco de suporte treliçado seção retangular :  $A_t$   
 $A_t = q_o ( 1 + \text{sen}^2 2\theta ) ( S_{T1} \cdot C_{x1} \cdot \text{cos}^2 \theta + S_{T2} \cdot C_{x2} \cdot \text{sen}^2 \theta ) G_t$   
sendo  $G_t$  ( fator combinado de vento ) = 1.0 para vento de 3s de projeto

# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

## 4- Brochura Cigré 350 : Proposição de Hipóteses de cargas Simplificadas para Ventos de Alta Intensidade



Esquema das estruturas (a) autoportantes e (b) estaiadas para aplicação da hipótese de vento DPB

# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

## 4- Brochura Cigré 350 : Proposição de Hipóteses de Cargas Simplificadas para Ventos de Alta Intensidade

HIPÓTESES DE CARGAS DE PROJETO PARA VENTOS DE ALTA INTENSIDADE LOCALIZADOS : DOWNBURST					
HIP.	CARGA	Direção Horizontal do Vento	Vento atuando		Também desenvolvido ou usado por:
			Condutor	Suporte	
DT	Transversal	Longitudinal	Sim	Altura total: todos os tipos de suporte	ENA Austrália Revisão NBR 5422
DL	Longitudinal				
DO	Oblíquo				
DPB	Transversal e Longitudinal	Longitudinal	Não	Abaixo de $h_i$ para torres treliçadas ( $i = 1, 2, \dots$ )	Exclusivo do Cigré Revisão NBR 5422
				Abaixo de $h_1$ para torres estaiadas	
DPA	Transversal e Longitudinal	Longitudinal	Sim	Acima de $h_1$ para torres estaiadas	ENA Austrália Revisão NBR 5422

REALIZAÇÃO:

# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

## 4- Brochura Cigré 350 : Proposição de Hipóteses de Cargas Simplificadas para Ventos de Alta Intensidade

HIPÓTESES DE CARGAS DE PROJETO PARA VENTOS DE ALTA INTENSIDADE LOCALIZADOS : TORNADOS					
HIP.	CARGA	Direção Horizontal do Vento	Vento atuando		Também desenvolvido ou usado por:
			Condutor	Suporte	
T (φ)		Multidirecional: φ = 0°, 45°, 90°	Não	Altura total: todos os tipos de suporte	Eskom Africa do Sul Transener ( Hidronor) Argentina ASCE Manual 74 & HydroOne Canadá ( sem peso de condutores)

REALIZAÇÃO:

# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

## 5- GT-B2.08 : Aplicação da Brochura Técnica Cigré 350

- Análise comparativa entre os esforços produzidos pelas hipóteses de vento TS e pelas hipóteses de vento DPB ( Downdraft Partially applied Below  $h_1$ ) da Brochura Cigré 350;
- Foram utilizados 26 modelos de estruturas existentes nas tensões de 230 kV , 345 kV e 500 kV: suspensões monomastros estaiadas, suspensões autoportantes e ancoragens em circuito simples e circuitos duplos em diferentes configurações de fases;
- As estruturas receberam uma identificação mnemônica para fins de organização e identificação ao longo do trabalho;
- Justificativa: As falhas de diagonais do tronco inclinado constituem causa importante do colapso de estruturas autoportantes acidentadas atingidas por ventos não-sinóticos , especialmente as microexplosões.

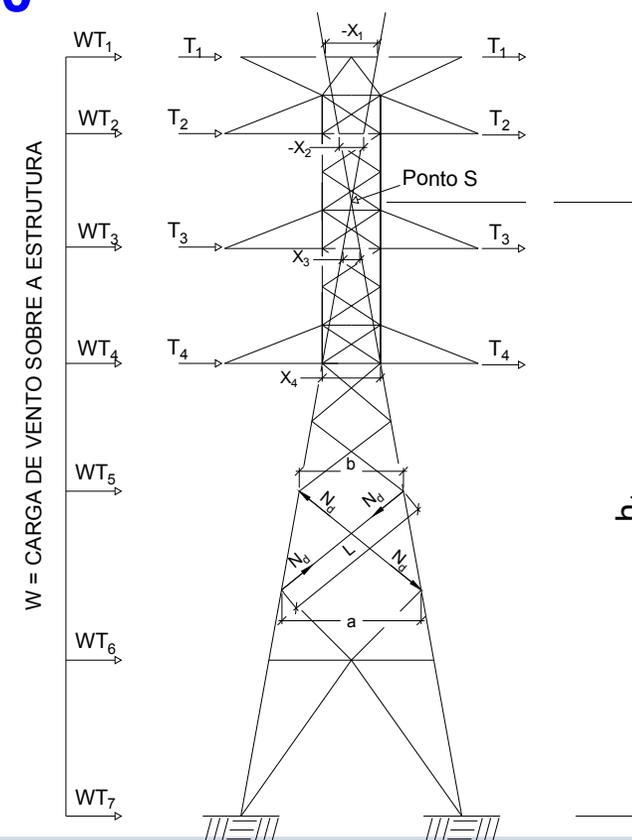
# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

## 5- GT-B2.08 : Aplicação da Brochura Técnica Cigré 350

As parcelas de carga de vento  $T_i$  e  $WT_i$  acima do ponto S de interseção das linhas de projeção dos montantes inclinados contrapõem as parcelas abaixo deste ponto e reduzindo, desta forma, os esforços nas diagonais do tronco inclinado.

Para a hipótese de vento BPB proposta, observa-se que a parcela da carga  $P_i$  acima do ponto S serão nulas e, conseqüentemente, os esforços axiais tenderão a aumentar.

Neste caso é factível que estas barras possam falhar por flambagem antes dos montantes quando atingida por ventos não-sinóticos tipo microexplosões.



# Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

## 5- GT-B2.08 : Aplicação da Brochura Técnica Cigré 350

### ➤ Principais conclusões do Estudo elaborado pelo GT-B2.08 Estruturas:

- A hipótese DPB da Brochura Cigré 350 é mais relevante quanto maior for altura da estrutura analisada e quanto maior a velocidade do vento não-sinótico;
- Torres estaiadas monomastros apresentam maior densidade de barras diagonais dimensionadas pela hipótese DPB no trecho do mastro situado imediatamente abaixo da mísula anti-torsora dos estais;
- Torres autoportantes de suspensão apresentam maior número de barras dimensionadas pela hipótese DPB na parte inferior da estrutura ( bases das extensões e pés ), notadamente na face longitudinal de torres de base retangulares;
- Para as estruturas autoportantes de ancoragem , em circuito simples ou duplo, a hipótese de vento DPB não se mostrou relevante para o projeto destas estruturas.

Aumento das velocidades de vento e seus reflexos nas hipóteses de carregamento de Estruturas p/ LTs

Muito obrigado!

Rogério Peixoto Guimarães  
rogerio.guimaraes@saetowers.com