

CONFÉRENCE INTERNATIONALE
DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES À HAUTE TENSION

INTERNATIONAL CONFERENCE
ON LARGE HIGH VOLTAGE ELECTRIC SYSTEMS



COMITÊ NACIONAL BRASILEIRO

COMITÊ DE ESTUDOS N^o B2 – LINHAS AÉREAS DE ALTA TENSÃO

GT 11 – COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONDUTORES E ACESSÓRIOS

GUIA PARA MEDIÇÕES DE VIBRAÇÃO EM LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO

Belo Horizonte, outubro de 2003.

SUMÁRIO

	Pág.
1- INTRODUÇÃO _____	3
2- ESCOPO _____	3
3- OBJETIVO E FINALIDADES DAS MEDIÇÕES _____	3
4- PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO _____	4
4.1 - Escolha do procedimento de medição _____	4
4.2 – Escolha dos pontos de medição _____	4
4.3 – Influência do sistema de amortecimento nas medições de vibração-4	4
4.4 – Escolha e duração do período de teste _____	5
4.5 – Recomendações para instrumentos de medição de vibração _____	5
4.6 – Fonte de possíveis medições inexatas _____	5
4.7 – Redução dos dados e armazenamento _____	5
5 – AVALIAÇÃO DAS MEDIÇÕES _____	6
5.1 – Conversão de amplitude para tensão dinâmica ou deformação _____	6
5.2 – Os limites de fadiga comumente usados _____	7
5.3 – Avaliação do risco _____	9
6 – MEDIÇÕES DE VIBRAÇÃO EÓLICA NO SETOR ELÉTRICO _____	9
6.1 – Aparelhos comumente utilizados _____	9
6.2 – Método de medição utilizado _____	11
6.3 – Providências preliminares _____	11
7 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS _____	12
8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	14

1 - INTRODUÇÃO

As vibrações devido a ventos das linhas aéreas de transmissão sempre foram um dos principais problemas mecânicos das linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. A fadiga dos cabos, principal efeito das vibrações, leva a enormes prejuízos, não só econômicos, para as empresas transmissoras de energia e para terceiros.

Existe várias maneiras de detectar a fadiga dos cabos das LTs: através de inspeção por termovisão/corona, inspeção manual do cabo abrindo as coroas de espiras, e através das medições das intensidades de vibração. Cada uma destas maneiras tem a sua eficiência, dificuldade e seus custos associados. A medição da intensidade de vibração dos cabos, apesar de não ser a maneira mais eficiente de detectar os problemas relacionados com a vibração, é a mais factível e econômica técnica de análise preditiva de manutenção e fonte de dados para os projetos de LTs, não dispensando os demais métodos, mas sim os complementando.

2 - ESCOPO

Os objetivos deste trabalho são de prover recomendações para os procedimentos de medição, características necessárias aos equipamentos de medição, padronização da aquisição dos dados e apresentação dos resultados.

3 - OBJETIVOS E FINALIDADES DAS MEDIÇÕES DE VIBRAÇÃO EÓLICA

Os objetivos e finalidades das medições de vibração eólica são:

- Obter dados de linhas existentes, para que se possa analisar o risco de falha por fadiga e tomar as devidas providências;
- Criar um banco de dados para facilitar o projeto de LTs;
- Quantificar a evolução do dano causado pela vibração eólica de LTs;
- Teste de aceitação de LTs;
- Avaliar a intensidade da vibração do cabo, dando indicativo do possível dano no cabo;
- Avaliar a intensidade de vibração utilizando os diversos dispositivos de proteção contra vibração (amortecedores, grampos especiais, etc);
- Avaliar a intensidade de vibração de diferentes tipos de cabos, e os vários fatores que influencia nos aspectos econômicos do projeto;
- Obter dados históricos de vibração das LTs para comparação, transformando em conhecimento para outras linhas;
- Prover informações suplementares para avaliação de sistemas de amortecimento em testes de laboratório;
- Validar teorias de vibração;

4 - PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

4.1 - Escolha do procedimento de medição

Para medição em grampos convencionais aparafusados com possibilidade de fadiga, IEEE(3) tem proposto uma padronização da medição de vibração. Ela é baseada no deslocamento diferencial vertical(pico a pico), Y_b , do condutor, em relação ao grampo de suspensão, medido para uma distancia de 89 mm(3,5 in) a partir do último ponto de contato entre o cabo e o grampo. O deslocamento diferencial é conhecido com amplitude de curvatura. Este padrão é normalmente usado para comparar resultados encontrados de diferentes condições de operação.

O parâmetro da amplitude de curvatura foi escolhido para um método padrão, sendo o mais simples o qual pode ser usado para os mais complexos mecanismos de fadiga. Uma alternativa é o uso da amplitude inversa. Ela é possível de executar medições em outros locais diferentes do grampo de suspensão.

4.2 – Escolha dos pontos de medição

Como a intensidade de vibração é geralmente influenciada pelas características dos ventos, terreno, altura cabo-solo, temperatura, etc., as medições deveriam ser feitas para aqueles pontos na linha, onde a experiência mostra que seriam mais susceptíveis à vibração. Estes pontos são normalmente locais de baixa temperatura ambiente, terreno plano, travessias de rios e lagos, campos abertos, etc., e onde a direção do vento é predominantemente perpendicular à linha. Um caso particularmente severo é quando a topografia do terreno orienta o vento numa direção perpendicular à linha, como no caso de travessias de vales e rios.

A probabilidade de falha é avaliada para uma linha, e no caso de alta probabilidade de falha, outros locais devem ser medidos.

A investigação do dano é importante para saber se o dano é devido ao alto nível de vibração eólica. Uma medição pode ser feita no local onde o dano ocorreu e pode ser feito adicionalmente em outros locais recomendados.

4.3 – Influência do sistema de amortecimento nas medições de vibração

O amortecedor de vibração pode reduzir a tensão dinâmica de duas diferentes maneiras:

- Por absorção de parte da energia da onda dissipando-a;
- Por absorção de parte da onda pelo vão.

Para avaliação do nível de tensão para o ponto de suspensão, o equipamento de medição pode ser colocado junto ao ponto de suspensão com o amortecedor instalado. Mas, o possível baixo nível de tensão dinâmica não garante que o nível de tensão dinâmica em outros pontos seja aceitável.

Para avaliar a efetividade do amortecimento, deve ser comparado o resultado de cabos com e sem amortecedor. Para o cabo sem amortecimento, o amortecedor deve ser removido nos dois menores vãos em ambos os lados do ponto de medição. Isto elimina a possibilidade de amortecimento em vãos adjacentes.

4.4 – Escolha e duração do período de teste

Os períodos de testes devem ser preferencialmente nas condições que causam o efeito. De uma maneira geral, um período de tempo de três meses é suficiente para obter resultados estatísticos significativos. Em áreas onde as condições são sazonais, como altas/baixas temperaturas, alteração no solo como plantações, neve/gelo, etc. As medições devem incluir estas diferentes condições.

Para comparar sistemas de amortecimento, ferragens, etc. um período curto de medição é suficiente, em torno de quatro semanas.

A referência (2) afirma que o período de duas semanas normalmente é suficiente para registrar os níveis máximos de vibração. Quanto à duração e frequência dos registros considera-se que o fenômeno da vibração é repetitivo, apresentando picos que se repetem em intervalos regulares normalmente inferiores a 1 segundo.

4.5 – Recomendações para instrumentos de medição de vibração

Vários instrumentos para medição de vibração eólica foram desenvolvidos, tanto digitais como analógicos. Dependendo do objetivo da medição, um diferente instrumento pode ser escolhido. Por exemplo, para uma confirmação de teoria de vibração, os aparelhos analógicos são preferíveis, pois registram todos os dados possíveis. Para avaliar a durabilidade ou a máxima tensão dinâmica, os aparelhos digitais são preferidos onde uma quantidade menor de dados é suficiente.

As seguintes características são recomendadas:

- Os instrumentos devem ser leves e compactos quanto possíveis;
- Os grampos de sustentação devem ser rígidos e leves o quanto possível;
- Medir amplitude pico a pico e frequência de até 200 Hz;
- Frequência de amostragem digital: maior que 10 amostras por ciclo de vibração;
- Duração da seqüência de medições superior a 1 s, preferencialmente 10 s, 4 vezes por hora, 24 horas por dia, com autonomia de 3 meses;
- Registro de número de medições efetuadas;
- Possibilidade de alterar escalas de frequência e amplitude, duração das medições e das pausas;
- Dados apresentados de forma aceitável para processamento.

4.6 – Fonte de possíveis medições inexatas

Imprecisões originadas dos sistemas e repetição de erros dos instrumentos, como defeito no armazenamento dos dados, falhas mecânicas, erros de programação, campos eletromagnéticos etc., deve ser limitado aos valores toleráveis.

A massa e a inércia do medidor podem influenciar nos resultados. A amplificação da amplitude devido à inércia depende da frequência e é menor para baixas frequências. Este fenômeno é mais comum em cabos de menores bitolas.

4.7 – Redução dos dados e armazenamento

Devido a limitações de armazenamento no instrumento, reduções de dados podem ser utilizadas. Para este propósito, o número de ciclos para cada combinação de amplitude/frequência é detectado de um medidor analógico e o sinal de vibração tratado num algoritmo(fig. 2).

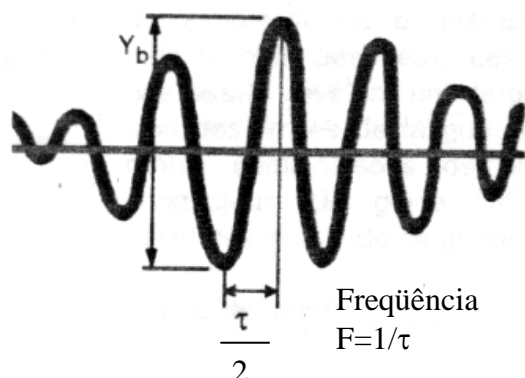


Figura 2-detecção e classificação do sinal de vibração

A armazenagem de dados pode ser feita na matriz de amplitude e freqüência, de acordo com o IEEE, contendo pelo menos 10 por 10 elementos. Muitos instrumentos reduzem os dados automaticamente, mas devido à padronização do aparelho, uma matriz 16 por 16 elementos é freqüentemente usada.

5 – AVALIAÇÃO DAS MEDIÇÕES

A CIGRÉ, EPRI e IEEE propõe diferentes métodos para avaliação dos dados de medições. A metodologia do EPRI e do IEEE tem o mesmo princípio; Consideram que, se a deformação do cabo próxima ao grampo (89 mm da saída do grampo) não superar determinados valores, o cabo não terá problemas decorrentes da vibração eólica. No caso do IEEE este limite é de $150 \mu\xi$ (microstrains). Já no caso do EPRI este valor é de 22,5 MPa para uma camada de fios de alumínio e de 8,5 MPa para mais de uma camada de fios de alumínio. A metodologia da CIGRÉ para avaliação dos dados de medição (5), também chamada teoria de Miner, compara os valores obtidos da medição com valores de curvas de resistência a fadiga (curva SN ou Wöhler) e calcula a probabilidade de dano por fadiga em forma de vida útil em anos. Destas metodologias, a da Cigré é a mais confiável e precisa para avaliação dos resultados de medições, embora não seja possível adotá-la como referência em projetos de linhas, ferragens e cabos. Culturalmente é utilizado o limite do IEEE, apesar de ser bastante antigo (mais de 30 anos) e ser considerado ultrapassado.

5.1 – Conversão de amplitude para tensão dinâmica ou deformação

Como os limites de fadiga são normalmente expressos em termos de tensão ou deformação, o primeiro passo da avaliação é converter a medição da amplitude (Y_b) para tensão dinâmica (σ_b):

$$\sigma_b = K \cdot Y_b$$

$$\sigma_b = E_a \cdot \xi_b$$

O fator de conversão $K(N/mm^3)$ depende da distância do ponto de medição ao grampo, e é calculado usando a fórmula de Pffenberg-Swart:

$$K = \frac{E_a \cdot d \cdot \rho^2}{4 \cdot (e^{-\rho \cdot X} - 1 + \rho \cdot X)}$$

Onde:

Y_b – Amplitude pico a pico

E_a – Módulo de elasticidade dos fios da camada mais externa do cabo (N/mm^2)

ξ_b – Alongamento correspondente (mm/mm)

d – diâmetro do fio das camadas mais externas do cabo (mm)

T – tensão de esticamento para a temperatura média ambiente durante a medição/teste (N)

$E.I$ – Soma da rigidez a flexão dos fios individuais do cabo ($N \cdot mm^2$)

$\rho^2 = T/(E.I)$ ($1/mm^2$)

X – distância entre o grampo (convencional) ao ponto de medição (mm)

A fórmula de Poffenberger-Swart é baseada na suposição de estarem de acordo com resultados experimentais. No caso de grampos de suspensão com inserto de elastômero (AGS), é recomendado que se faça a determinação do fator K através de testes de vibração em laboratório. Entretanto, por razões práticas, é suficiente o uso da fórmula de Poffenberger-Swart. Para estes casos onde as armaduras são usadas para proteger os grampos, para facilitar a instalação, o sensor é localizado fora da área protegida. A dimensão X é então medida a partir da linha de centro da suspensão ao ponto de medição.

5.2 – Os limites de fadiga comumente usados

Os limites de fadiga têm sido determinados para grampos de suspensão convencionais. Há indicação que os grampos de suspensão com elastômeros podem ter mais altos níveis de aceitação.

As curvas S-N representam o número de ciclos N até o rompimento dos fios para diferentes níveis de tensão dinâmica. O critério de rompimento é de 3 fios ou 10% do número de fios prevalecendo o menor (fig 3). Resultado de testes mostram a curva limite de fadiga de diferentes combinações de cabo e grampo.

A safe border line é derivada de várias curvas S-N de várias medições de fadiga em laboratório. Ela representa o menor número de ciclos permitido para várias tensões dinâmicas. Ela é comumente usada em cabos de alumínio, alumínio liga, ACSR de várias camadas e todos os tipos de grampos.

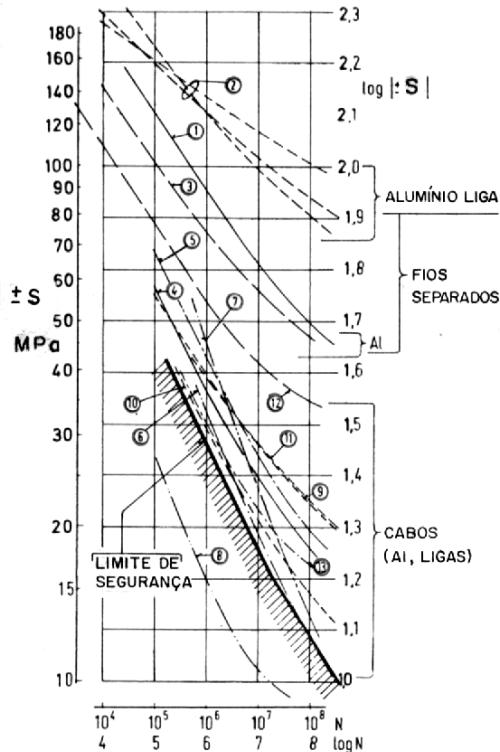


Figura 3-Safe borde line da Cigré e curvas S-N

Esta safe border line é representada pela seguinte equação:

$$\sigma_f = C \cdot N^z$$

σ_f – tensão dinâmica (zero ao pico) (N/mm^2)

N – número de ciclos completos até a falha para a tensão σ_f

$C=450$, $z= -0,2$ para $N \leq 2 \times 10^7$

$C=263$, $z= -0,17$ para $N \geq 2 \times 10^7$

Para explicação completa dos resultados pode ser consultado o report da CIGRÉ CSC 22 WG 04. Esta referência também das curvas menos conservativas para ACSR de camada simples:

$C=730$, $z= -0,2$ para $N \leq 2 \times 10^7$

$C=263$, $z= -0,17$ para $N \geq 2 \times 10^7$

O limite de durabilidade EPRI foi definido para a amplitude e tensão dinâmica que, para uma dada combinação de grampo-cabo, pode ser infinito. Para cabos de alumínio e alumínio liga não limite de fadiga definida claramente.

O limite de resistência a fadiga de cabos ACSR de uma camada é estimado para tensão dinâmica de $22,5 N/mm^2$ para uma camada de fios de alumínio e $8,5 N/mm^2$ para várias camadas. A faixa correspondente de amplitude pico a pico é $0,5$ a $1,0$ mm e $0,2$ a $0,3$ mm.

A IEEE publicou um nível de deformação aceitável para cabos ACSR sem produzir fadiga. É utilizado o valor de $150 \mu\xi$ (pico a pico), ou um valor mais conservativo de

200 $\mu\epsilon$ (pico a pico). Porém o valor de 150 $\mu\epsilon$ não é muito aceito, sendo citado apenas por razões históricas.

5.3 – Avaliação do risco

Os dois seguintes métodos são comumente usados:

- Estimativa da menor vida útil: quando um cabo é submetido a uma tensão dinâmica, ele pode danificar-se ou vir a falhar após certo número de ciclos. Este fenômeno é chamado de fadiga. O tempo antes da falha é às vezes chamado de vida útil mínima. Algumas regras foram desenvolvidas para estimar quanto tempo o cabo resistiria a um espectro de tensão-amplitude, como a teoria de Miner. Esta teoria calcula o tempo em anos de expectativa da vida do cabo.
- Tensão ou deformação máxima de aproximação: outros métodos são comumente usados comparando a máxima tensão dinâmica ou deformação obtida na medição como os limites de durabilidade de EPRI e IEEE. Os riscos de danos podem ser considerados desprezíveis, se estes limites de durabilidade não forem excedidos.

6 – MEDIÇÕES DE VIBRAÇÃO EÓLICA NO SETOR ELÉTRICO

Várias empresas do setor, dentre elas a Cemig, vem desenvolvendo um programa de pesquisas e estudos de vibração eólica em linhas aéreas de transmissão, incluindo neste programa as medições de vibração eólica.

6.1 – Aparelhos comumente utilizados

Existe uma grande variedade de aparelhos usados para medição de vibração eólica em LTs:

- Registradores tipo inércia(ex:Zenit);
- Medidores de aceleração (acelerômetros);
- Medidores de deformação linear (strain gages);
- Medidores de flexão do cabo.

Em linhas de transmissão são mais comuns os medidores de flexão, devido a sua simplicidade, facilidade de instalação e confiabilidade, além de serem desenvolvidos especificamente para uso em linhas de transmissão ao contrário dos demais.

Já foram usados vários tipos e modelos de aparelhos medidores de vibração. Um dos primeiros foi o desenvolvido pela Ontário Hydro(fig. 4). Estes medidores são totalmente mecânicos e registrava o movimento diferencial entre o grampo e ponto de medição no cabo em um filme através de um garfo preso ao cabo, transmitindo o sinal por alavancas até um estilete que registra o sinal. Posteriormente foram usados os aparelhos Zenith, até o desenvolvimento dos aparelhos com microprocessadores digitais e memória RAM, que permitem fornecer dados de vibração já em forma de histogramas de amplitude e frequência. Inicialmente foram usados os vibrógrafos Sefag(fig. 5), que utiliza um sensor de deslocamento semelhante ao do Ontario Hydro e registrava os dados digitalizados em memória

RAM. O atual medidor de vibração utilizado amplamente no setor elétrico é o Pavica (fig. 6). Ao contrário dos demais, o Pavica é fixado no cabo fazendo a medição da amplitude inversa(fig. 7) e o sinal é digitalizado e armazenado em memória RAM.

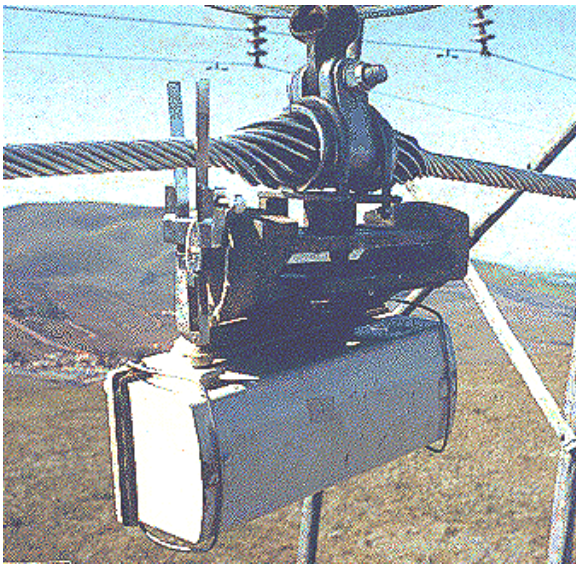


Figura 4 – medidores de vibração(vibrógrafos) Ontário Hydro

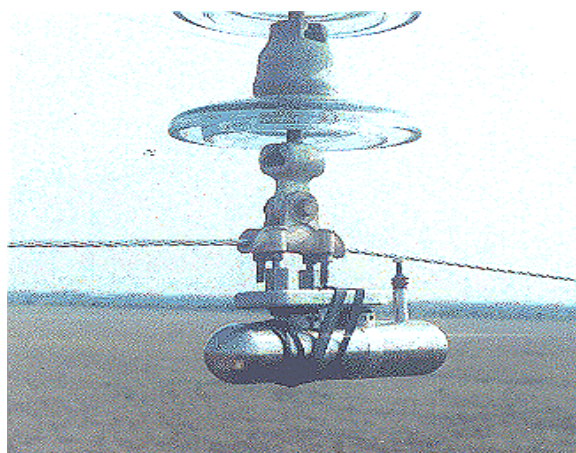


Figura 5 – Medidores de vibração Sefag



Figura 6 – vibrógrafos Pavica

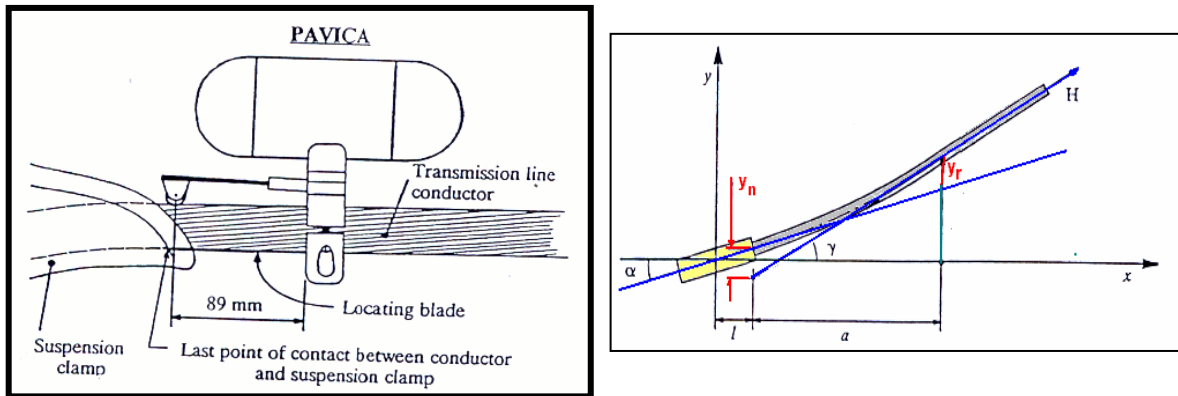


Figura 7 – Medição da amplitude inversa

6.2 – Método de medição utilizado

O método de medição de vibração em cabos utilizado pela Cemig e pela maioria das concessionárias de energia é o do IEEE, descrito no item 5.1. Ele foi inicialmente desenvolvido pela Ontario Hydro para uso em seus vibrógrafos e posteriormente recomendado pelo comitê de transmissão e distribuição do IEEE (Ref. 2).

Os dados são obtidos por amostragem, caracterizando-se os registros pelos seguintes parâmetros:

- Medição da amplitude de flexão a 89 mm do grampo;
- Registro de amplitude pico a pico e frequência;
- Duração: 1 segundo (pelo menos);
- Frequência: 4 registros por hora;
- Duração total da medição: 2 semanas

6.3 – Providências preliminares

As seguintes providências são tomadas antes da medição da vibração propriamente dita:

- a) Seleção do vão: a escolha do vão onde as medições serão realizadas deve ser criteriosa para que os locais mais susceptíveis à vibração sejam identificados, conforme o item 5.2.
- b) Medição da carga mecânica de esticamento do cabo no vão onde vai ser feita a medição deve ser determinada utilizando o método da flecha (preferencialmente) ou o método do pulso.
- c) Instalação de anemógrafo na estrutura (ou em um poste próximo à medição) onde será feita a medição de vibração e registrar os dados dos ventos.

7 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados da avaliação dos dados das medições devem ser apresentados de modo que todos os fatores que afetam as vibrações eólicas possam ser correlacionados.

As informações mínimas devem ser apresentadas após as medições e análise dos dados:

- Comprimento dos vãos medidos;
- Período em que foram feitas as medições;
- Número de subcondutores por fase;
- Carga de esticamento dos cabos;
- Presença ou não de armaduras preformadas;
- Presença ou não de amortecedores;
- Distância do amortecedor a entrada do grampo;
- Tipo e/ou bitola do cabo;
- Tipo de grampo da linha;
- Rumo da linha (direção predominante);
- Topografia e vegetação típica da região;
- Região urbana ou rural;
- Ocorrência de problemas de vibração eólica na linha ou na região.

Os dados das medições devem ser apresentados, preferencialmente, na forma de gráficos (figura 1, 2 e 3) ou na forma de risco de dano em anos.

Observação: caso haja dados de medições anteriores tanto de vento quanto da vibração, é importante que eles sejam citados.

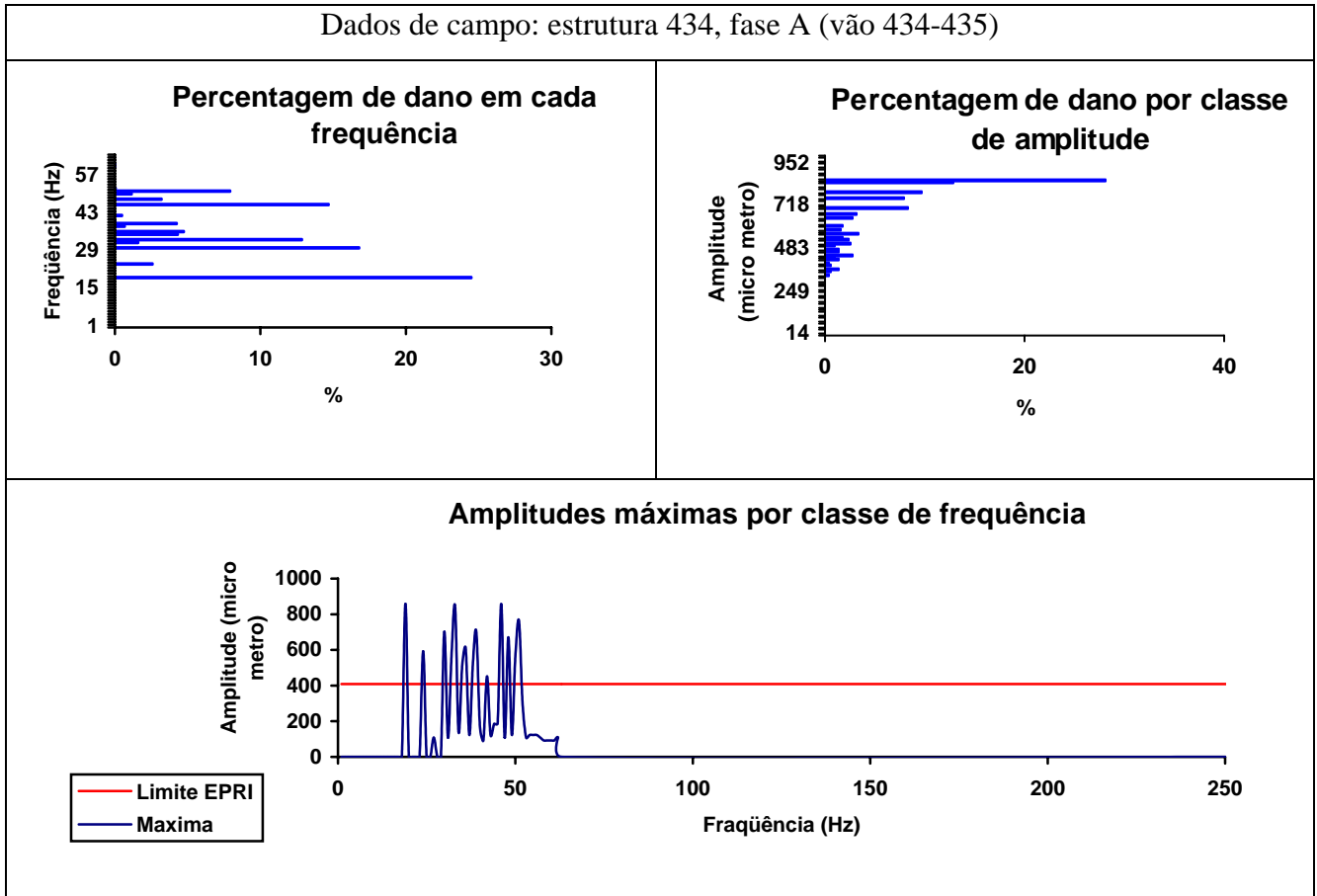


Figura 1 – Gráficos de amplitude e frequência de medição de vibração

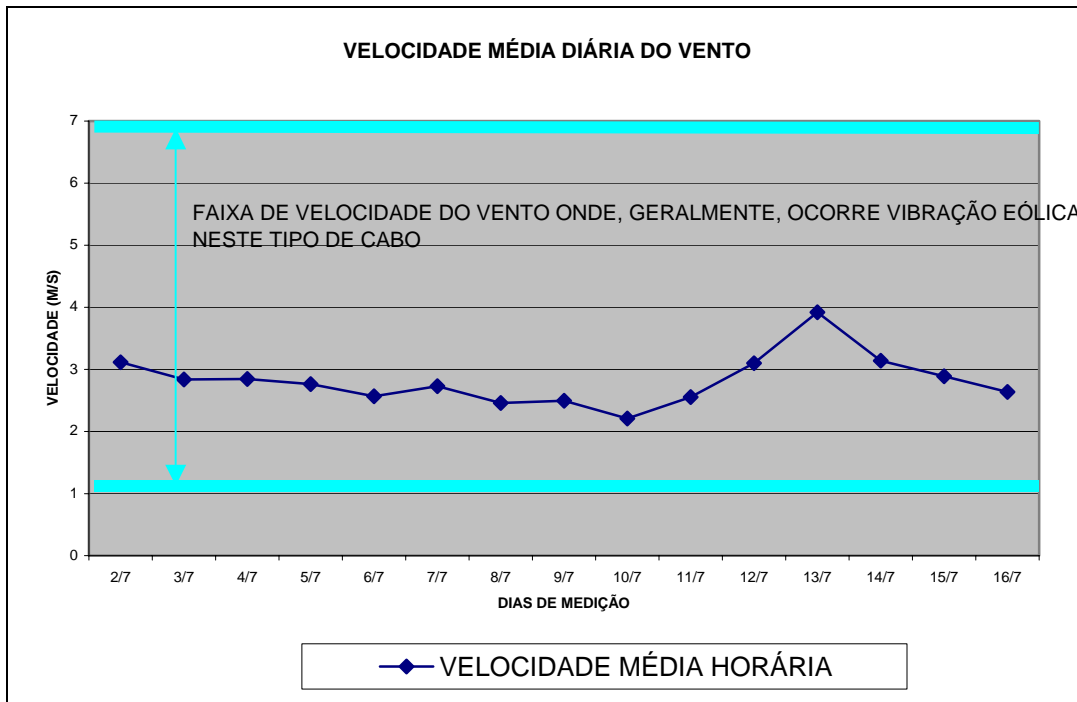


Figura 2 – Dados da velocidade média horária do vento no período

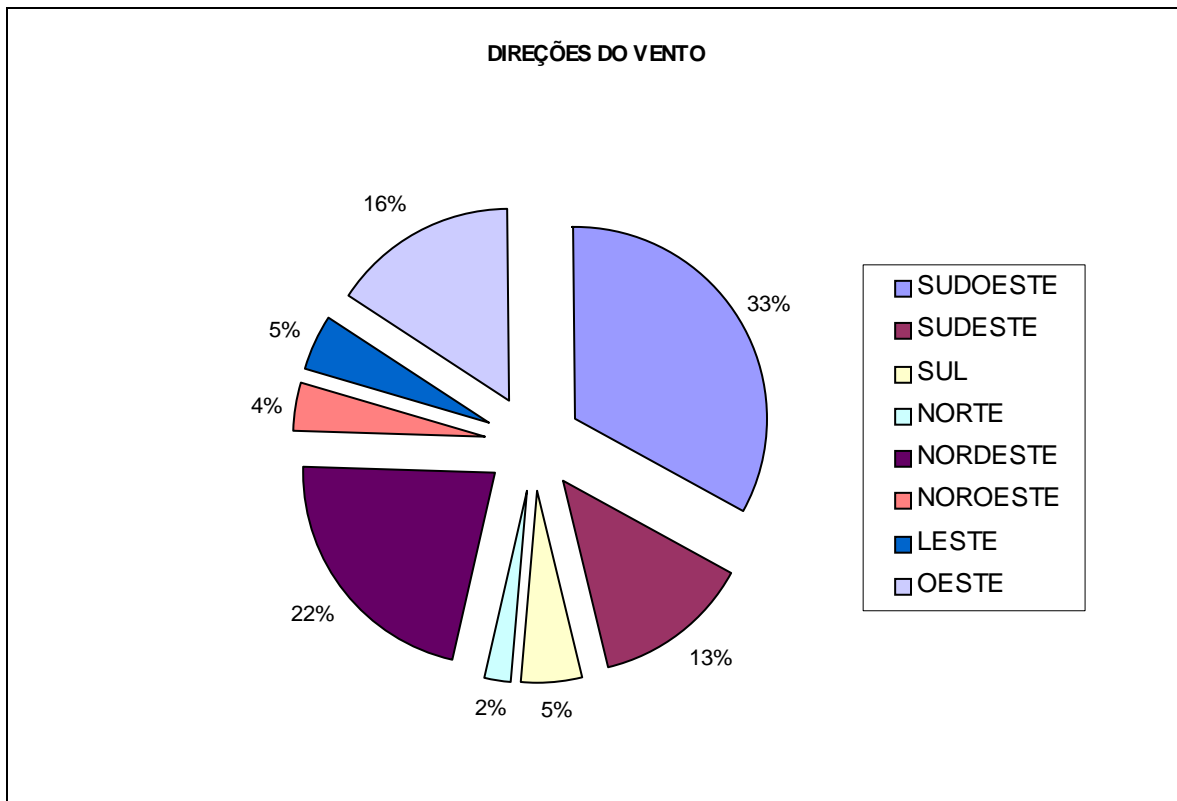


Figura 3 – Dados de direção do vento no período da medição

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CIGRE TF 2 WG 11 SC 22 Guide to Vibration Measurements on Overhead Lines. ELECTRA nº 162 - October 1995.
- (2) IEEE COMMITTEE REPORT: Standardization of conductor vibration measurements. IEEE PAS vol. 85 N°. 1, 1966.
- (3) Companhia Energética de Minas Gerais – Cemig. 30000-TN/NT-0140. Vibrações eólicas em condutores aéreos – Princípios básicos. Belo Horizonte: Cemig, 1988.
- (4) Companhia Energética de Minas Gerais – Cemig. 30000-TN/NT-0141. Vibrações eólicas em condutores aéreos – Guia para medição de vibração e determinação da vida útil de cabos condutores de LT'S. Belo Horizonte: Cemig, 1988.
- (5) CIGRE WG 04 SC 22 – 02: Recommendations for the evaluation of the lifetime of transmission line conductors. ELECTRA 63. March 1979.