
LT 500 kV ESTREITO – FERNÃO DIAS CD

PROJETO BÁSICO

CAPÍTULO 16

VIBRAÇÕES EÓLICAS - SISTEMA DE AMORTECIMENTO

CONTEÚDO

1. OBJETIVOS
2. O FENÔMENO VIBRAÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO
 - Generalidades
 - Origem dos Fenômenos
3. TIPIFICAÇÃO DOS FENÔMENOS
4. DEFINIÇÕES
5. NORMAS APLICÁVEIS
 - Normas Brasileiras
 - Normas ASTM
 - Normas da IEC
6. Requisitos de Projeto
 - 6.1 Níveis de amortecimento para vibrações eólicas
 - 6.2 Vida Útil dos Condutores da Linha de Transmissão
 - 6.3 Requisitos Elétricos
 - 6.3.1 Curto-circuito
 - 6.3.2 Tensão de Rádio Interferência (RIV)
 - 6.4 Proteção Anti-corrosiva
 - 6.5 Instalação e Manutenção
7. ENSAIOS
 - 7.1 Ensaios de Qualificação
 - 7.2 Ensaios de tipo
 - 7.3 Ensaios de rotina ou fabricação
 - 7.4 Ensaios de recebimento
8. ACONDICIONAMENTO E MARCAÇÃO
9. MODELAGEM DA PROTEÇÃO

VIBRAÇÕES EÓLICAS - SISTEMA DE AMORTECIMENTO

1. OBJETIVO

Este estudo preliminar e especificação básica têm por objetivo apresentar os requisitos mínimos aplicáveis à definição do sistema de amortecimento e espaçamento dos cabos condutores e cabos pára-raios da LT 500 kV Estreito – Fernão Dias CD. Tratando-se de linha de transmissão com quatro condutores por fase, será considerada a instalação de espaçadores no feixe de cabos condutores, amortecedores anti-vibratórios nos cabos condutores e amortecedores anti-vibratórios nos cabos pára-raios.

2. O FENÔMENO VIBRAÇÃO EM LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO

2.1 Generalidades

A ação do vento atuante sobre os cabos das linhas de transmissão causa nos mesmos o aparecimento de forças dinâmicas que vão induzir-lhes movimentos de natureza vibratória.

De acordo com o tipo de movimento causado aos cabos, as interferências vibratórias mais usuais podem ser classificadas como:

- Vibrações Eólicas

As vibrações eólicas representam a forma mais crítica de movimentação dos cabos, sendo descritos pelos vórtices de ar (vórtices de Karman) a sotavento do condutor, durante a atuação de frentes uniformes de vento de determinadas velocidades. São caracterizadas por intensidades de vento de baixa a moderada, com velocidades na faixa de 1 a 7 m/s, com frequência variando na faixa de 3 a 100 Hz.

- Oscilação de sub-vãos ou de sub-condutores

As oscilações de sub-vãos ocorrem exclusivamente em casos de condutores múltiplos, devido ao efeito da blindagem aerodinâmica que o primeiro condutor sob vento causa ao outro em seu mesmo nível. Aparece de forma combinada, provocando rolamento, espiralamento, variação de distância entre os cabos e ainda como onda que se desloca ao longo do vão. Este tipo de fenômeno é caracterizado por ventos mais elevados de 4 m/s até aproximadamente 18 m/s, sendo a frequência baixa, na faixa de 0,2 a 10 Hz. Para o caso presente esta situação é aplicável, uma vez que se trata de LTs com quatro cabos por fase.

- Galope

O galope ocorre sobre condutores envolvidos por camadas assimétricas de gelo. Para o caso presente, esta situação não é aplicável, tendo em vista a inexistência de gelo na região da linha.

2.2 Origem dos fenômenos

Os cabos utilizados na linha da transmissão, por serem de seção circular, assemelham-se a um cilindro; esta semelhança permite que se usem as equações de hidrodinâmica como base para os cálculos dos fenômenos vibratórios decorrentes da ação do vento sobre os cabos.

Strouhal define que:

$$F_s = S \frac{V}{D}$$

Onde:

F_s = Frequência de desprendimento de vórtices

S (Número de Strouhal) = aprox. 0,185 (para n° de Reynolds, $400 \leq Re \leq 40.000$)

V = Velocidade do fluido

D = Diâmetro do cilindro

Podemos também definir:

$$U = \sqrt{\frac{T}{M}}$$

onde:

U = velocidade transversal da onda

T = tração do cabo, em N

M = massa do cabo, em kg/m.

Sabendo-se que a inclinação inicial do cabo é função do ângulo de vibração (função de Y/λ), temos de forma aproximada que:

$$\varepsilon = \alpha \cdot d \sqrt{\frac{T}{EI}}$$

onde :

ε = deformação do cabo junto ao grampo

α = ângulo de vibração ou flexão do cabo junto do ponto de fixação (em radianos)

d = diâmetro do fio da coroa externa do cabo, em mm

E = módulo de elasticidade do cabo, em N/mm^2

I = momento de inércia do cabo, em mm^4

O parâmetro α está relacionado aos parâmetros Y e λ pela seguinte expressão:

$$\alpha = \frac{\pi Y}{\lambda}$$

Onde Y e λ são respectivamente a amplitude pico a pico e o comprimento de onda de um ciclo de vibração senoidal.

A frequência de ressonância de um cabo instalado em um vão é calculada partir de parâmetros já definidos anteriormente, sendo a sua expressão apresentada a seguir:

$$Fr = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{T}{M}}$$

Representando a expressão acima em função de λ teremos: $\lambda = \frac{1}{Fr} \sqrt{\frac{T}{M}}$

Substituindo-se as expressões anteriores de λ e de α na equação que define ε teremos:

$$\varepsilon = \pi.Y.Fr.d \sqrt{\frac{M}{EI}}$$

Ou, reescrevendo de outra forma:

$$Y.Fr = \frac{\varepsilon}{\pi.d} \sqrt{\frac{EI}{M}}$$

A medição da amplitude pico a pico Y é feita mais comumente através do método padronizado pelo IEEE 31 TP 65-156 “Standardization of Conductor Vibration Measurements”. O valor dessa amplitude que um cabo pode suportar com segurança ao longo de sua vida útil é usualmente chamado de amplitude de flexão tolerável, sendo que esta depende apenas das características físicas e geométricas do cabo e da tração a que o mesmo está submetido.

3. TIPIFICAÇÃO DOS FENÔMENOS

Os fenômenos vibratórios que ocorrerão na LT 500 kV Estreito – Fernão Dias CD, são definidos e tem seus valores conforme o quadro abaixo:

Vibrações eólicas	
Linhas afetadas	Todas
Frequência Hz	3-100
Amplitude (diam. Cabo)	0,01 a 1
Condições Atmosféricas	Tempo bom
Velocidade do vento	0,85 a 7 m/s
Características do vento	Contínuo e perpendicular
Superfície do cabo	Normal
Tipo de proteção	Armadura pré-formada e amortecedores
Tempo de ocorrência de danos	de 3 meses a 20 anos
Causas de danos	Fadiga dos cabos
Componentes da linha mais afetados.	Cabos

4. Definições

O sistema de amortecimento e espaçamento, objeto desse documento, engloba, em linhas gerais, os seguintes itens:

- Conjunto de amortecedores vibratórios e de espaçadores, a serem aplicados nos condutores da linha de transmissão em pauta, com as quantidades a serem definidas pelo fornecedor, em função das características da linha e do regime meteorológico, especialmente anemométrico, da região por ela atravessada e características do feixe de cabos;
- Amortecedores de vibrações a serem utilizados nos cabos pára-raios, se for o caso;
- A tabela de instalação dos amortecedores e espaçadores para os condutores e de amortecedores para os cabos pára-raios, com o respectivo conjunto de instruções, indicando sua quantidade e posicionamento para cada vão da linha de transmissão;
- Cálculo teórico dos valores acima, relacionando-os com o nível de vibração resultante nos condutores e indicando os esforços nos grampos de suspensão das cadeias e nos grampos de fixação do amortecedor mais solicitado. Para isso, deverão ser usados os perfis de ventos que favorecem vibrações eólicas e os parâmetros do amortecedor obtidos antes e após os ensaios de fadiga realizados em protótipo desse dispositivo.

5. NORMAS APLICÁVEIS

O fornecimento dos amortecedores, que será objeto de especificações técnicas próprias, deverá seguir a versão mais atual das normas indicadas a seguir:

5.1 Normas Brasileiras

NBR 5422 – Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão em Alta Tensão

5.2 Normas ASTM

ASTM D 395-89	Test methods for rubber property – compression set
ASTM D 412-87	Test method for rubber properties in tension
ASTM D 575-88	Test method for rubber properties in compression
ASTM D 624-86	Test methods for rubber property – tear resistance
ASTM D 991-89	Test methods for rubber property – volume resistivity of electrically conductive and antistatic products
ASTM D 1171-86	Test method for rubber deterioration – surface ozone cracking outdoors or chamber (triangular specimens)
ASTM D 1229-87	Test method for rubber property – compression set at lo temperatures
ASTM D 1630-83	Test method for rubber property – abrasion resistance (NBS abrader)
ASTM D 2240-86	Test method for rubber property – durometer hardness

5.3 Normas IEC

IEC 61897	Overhead lines - Requirements and tests for Stockbridge type aeolian vibration dampers
IEC 61284:1997	Overhead lines - Requirements and tests for fittings
IEC 61854:1998	Overhead lines - Requirements and tests for spacers

6. REQUISITOS DE PROJETO

6.1 Níveis de amortecimento para vibrações eólicas

As deformações unitárias máximas correspondentes às flexões vibratórias nas zonas unitárias do último contato dos condutores ACAR com os grampos de suspensão e dos amortecedores ou os cabos pára-raios CAA e aço galvanizado com o grampo de suspensão e garras dos amortecedores não poderão exceder a:

- 150 μ S, pico a pico, durante 100% dos ciclos de vibrações.

6.2 Vida Útil dos Condutores da Linha de Transmissão

A vida útil resultante dos cabos condutores e pára-raios da linha de transmissão, calculada em função dos níveis de vibração residuais obtidos com a instalação dos amortecedores, não poderá ser inferior a 35 anos.

6.3 Requisitos Elétricos

6.3.1 Curto-circuito

Os amortecedores e espaçadores deverão suportar, sem danos permanentes que alterem quaisquer das suas características, esforços provenientes de corrente de curto-circuito fase a terra da LT, cuja intensidade em kA (valor eficaz) e tempo de circulação em milissegundos, serão definidos nas Especificações Técnicas para o fornecimento destes acessórios.

6.3.2 Tensão de Rádio Interferência (RIV)

O nível máximo de rádio-interferência, medido sobre um amortecedor ou sobre um espaçador, será definido nas Especificações Técnicas para o fornecimento destes acessórios.

6.4 Proteção Anti-corrosiva

Todos os materiais deverão ter adequada proteção contra a corrosão.

6.5 Instalação e Manutenção

Os amortecedores e espaçadores deverão ter características tais que permitam sua instalação com técnicas usuais de linha energizada, bem como possibilitar sua remoção e reinstalação sem provocar danos aos cabos condutores.

7. ENSAIOS

São aplicáveis aos amortecedores e espaçadores 4 (quatro) categorias de ensaios, as quais são descritas a seguir.

7.1 Ensaios de Qualificação

São os ensaios que já deverão ter sido realizados com sucesso em modelo idêntico ao proposto, com resultados comprovados mediante Certificados emitidos por laboratório reconhecido internacionalmente, sem os quais o fabricante/proponente não poderá candidatar-se ao fornecimento para a linha de transmissão aqui indicada. Os ensaios aplicáveis são:

- a) Resistência à fadiga
- b) Características elétricas e de amortecimento.

7.2 Ensaios de tipo

Estes ensaios deverão ser realizados em protótipos, pelo Fornecedor, antes do início da fabricação dos amortecedores e espaçadores. A fabricação só será autorizada após se obterem resultados satisfatórios nos ensaios de tipo. Nesta categoria, os ensaios aplicáveis são:

- a) Resistência à fadiga;
- b) Características elásticas e de amortecimento;
- c) Eficiência dos grampos de fixação dos cabos;
- d) Aperto e resistência do grampo;
- e) Tração e compressão;
- f) Corona e rádio-interferência;
- g) Curto-circuito.

7.3 Ensaios de rotina ou fabricação

São os ensaios que deverão ser realizados durante a produção dos materiais. Deverão fazer parte de um Programa de Controle de Qualidade a ser proposto pelo fornecedor, para ser examinado e previamente aprovado pelo Contratante. O Programa de Controle de Qualidade referido deverá incluir, pelo menos, os seguintes ensaios:

- a) Controle da matéria prima;
- b) Controle de peças fundidas e forjadas;
- c) Visual;
- d) Dimensional;
- e) Propriedades mecânicas dos materiais amortecedores.

7.4 Ensaios de recebimento

São os ensaios que deverão ser executados antes da entrega dos materiais (CIF). Resultados satisfatórios permitirão liberar o material para embarque, devidamente documentado pelos Boletins de Inspeção do Contratante. Nesta categoria, os ensaios aplicáveis são:

- a) Deslizamento das garras do amortecedor;
- b) Tração e compressão;
- c) Galvanização;
- d) Visual;
- e) Dimensional.

8. ACONDICIONAMENTO E MARCAÇÃO

Os amortecedores e espaçadores deverão ser acondicionados em caixas reforçadas. Todos os materiais deverão ser preparados e carregados para embarque, de maneira a protegê-los de danos e de corrosão durante o transporte, manuseio e armazenamento ao tempo. Tanto a embalagem final, quanto o acondicionamento parcial deverão ser feitos de modo que o peso e as dimensões sejam mantidos dentro de limites razoáveis.

A embalagem deverá ser apropriada para transporte por caminhão desde a fábrica (ou do porto de destino) até o canteiro de obras, independentemente da condição das estradas (pavimentadas ou não). Quando o material for transportado por via marítima, as caixas usadas deverão possuir proteção apropriada contra a água salgada, sendo que as embalagens individuais não poderão ser com materiais absorventes de umidade.

Todas as peças deverão ser marcadas, em alto ou baixo relevo, com letras que correspondam ao seu código de identificação, cabo aplicável e outras informações consideradas necessárias.

9. MODELAGEM DA PROTEÇÃO

Nesta fase de projeto básico, onde as características reais da região por onde a linha de transmissão irá ser implantada ainda não são de todo conhecidas, bem como não se conhecem os valores de vãos da mesma, só se define a proteção anti-vibratória em termos qualitativos, não sendo, pois, possível definir em termos quantitativos a proteção necessária aos cabos.

No entanto, em linhas gerais, da mesma forma, recomenda-se que a proteção dos condutores seja feita com o uso de amortecedores de vibração eólica (provavelmente tipo “Stockbridge”) em pontos apropriados, sendo que as quantidades e posicionamento de cada dispositivo serão definidas após a locação das estruturas, conforme recomendações e estudos do fabricante.

Porém, pode-se concluir que, nos cabos condutores e pára-raios, deverão ser aplicados amortecedores, provavelmente do tipo “Stockbridge”, que terão suas quantidades por vão e distância de aplicação em relação aos grampos e entre si definidos após a locação das estruturas. No feixe de cabos condutores deverão ser aplicados espaçadores, adequados à configuração e características do feixe e dos vãos.