



UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Autarquia Municipal de Regime Especial
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP
CNPJ 45.176.153/0001-22

Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi
Taubaté-Sp 12060-440
Tel.: (12) 3625-4190
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

MÁRCIO DE LIMA PORTELA FILHO

Tipos de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica e Acessórios Utilizados

Taubaté - SP
2021

Márcio de Lima Portela Filho

Tipos de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica e Acessórios Utilizados

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Taubaté, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Pedro Peres

Taubaté
2021

Grupo Especial de Tratamento da Informação - GETI
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBi Universidade de
Taubaté - Unitau

P843t Portela Filho, Márcio de Lima
Tipos de linhas de transmissão de energia elétrica e acessórios utilizados
/ -- Márcio de Lima Portela Filho. -- 2021.
51 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de
Engenharia Mecânica e Elétrica, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Mauro Pedro Peres, Departamento de Engenharia
Elétrica.

1. Linhas de transmissão. 2. Energia elétrica. 3. Vibrações eólicas.
4. Amortecedores. 5. Stockbridge. I. Universidade de Taubaté.
Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica. Graduação em
Engenharia Elétrica e Eletrônica. II. Título.

CDD – 621.3



UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Autarquia Municipal de Regime Especial
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP
CNPJ 45.176.153/0001-22

Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi
Taubaté-Sp 12060-440
Tel.: (12) 3625-4190
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

Tipos de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica e Acessórios Utilizados

MÁRCIO DE LIMA PORTELA FILHO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE “**GRADUADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA**”

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Mauro Pedro Peres

Orientador/UNITAU-DEE

Eng. Me. Ramon Moreira Peres

AGC

Prof. Me. Carlos Henrique Silva Moura

Faculdade Anhanguera

Dezembro de 2021

dedico este trabalho à milha família pois sem eles nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecer ao suporte familiar que tenho tido durante todo o processo de graduação.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Mauro Pedro Peres* que foi solícito e dedicado comigo em todos os momentos envolvidos no projeto. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

Às funcionárias da Universidade pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

“Os três grandes fundamentos para se conseguir qualquer coisa são, primeiro, trabalho árduo; segundo, perseverança; terceiro, senso comum.”

Thomas Edison

FILHO, M. L. P. **Tipos de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica e Acessórios Utilizados**. 2021. 51 f. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Taubaté, Taubaté, 2021.

RESUMO

Neste trabalho aborda-se os principais tipos de linhas de transmissão de energia elétrica em corrente alternada e continua discutindo suas características físicas e econômicas. Os modelos envolvidos, suas formas de construção, materiais utilizados na construção. Ressaltam-se o emprego de dispositivos amortecedores de vibração, fenômeno que interfere de maneira direta na qualidade do projeto. A aplicação destes dispositivos torna-se essencial para garantir a eficiência do projeto elétrico envolvido. Tem-se como objetivo ressaltar a importância dos amortecedores nas linhas em especial o amortecedor do tipo Stockbridge, destacando suas características físicas, dinâmicas, vantagens e desvantagens de sua utilização no projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Linhas de transmissão de energia elétrica. Vibrações Eólicas. Amortecedores. Amortecedor do tipo Stockbridge

FILHO, M. L. P. **Types of Electric Power Transmission Lines and Accessories.** 2021. 51 f.
Graduate Work in Electrical Engineering - Departamento de Engenharia Elétrica,
Universidade Taubaté, Taubaté, 2021.

ABSTRACT

This production addresses the main types of alternating current electric power transmission lines and continues to discuss their physical and economic characteristics. The models involved, their forms of construction, materials used in construction. We emphasize the use of vibration damping devices, a phenomenon that directly interferes with the quality of the project. The application of these devices becomes essential to ensure the efficiency of the electrical project involved. The aim is to emphasize the importance of shock absorbers in the lines, especially the Stockbridge shock absorber, highlighting its physical and dynamic characteristics, advantages and disadvantages of its use in the project.

KEYWORDS: Electric Power Transmission. Damping Devices. Wind Vibration. Stockbridge
Dumper

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de uma seção elementar do Circuito Equivalente Linha de Transmissão.....	18
Figura 2 – Amplitude de oscilação do condutor.....	28
Figura 3 – Desprendimento de vórtices no cabo condutor.....	28
Figura 4 – Força resultante da ação do vento.....	30
Figura 5 – Ação do vento sobre o condutor congelado.....	31
Figura 6 – Alterações provenientes da esteira do escoamento num feixe duplo de condutores.....	31
Figura 7 – Amortecedor “Bretelle” tipo I.....	34
Figura 8 – Amortecedor Festão.....	34
Figura 9 – Amortecedor de braço oscilante.....	35
Figura 10 – Amortecedor Helgra.....	35
Figura 11 – Amortecedor Massa-mola.....	36
Figura 12 – Amortecedor Bouche.....	36
Figura 13 – Amortecedor Torsional.....	37
Figura 14 – Amortecedor Linear.....	38
Figura 15 – Amortecedor Stockbridge.....	38
Figura 16 – Amortecedor Dulmison ES-1.....	39
Figura 17 – Amortecedor Dulmison ES-2.....	39
Figura 18 – Amortecedor Varispond Dulmison.....	40
Figura 19 – Amortecedor Haro.....	40
Figura 20 – Amortecedor “Vibeless”.....	40
Figura 21 – Amortecedor Salvi 4-R.....	41
Figura 22 – Amortecedor Stockbridge.....	42
Figura 23 – Constituição cabo mensageiro.....	42
Figura 24 – Utilização do amortecedor Stockbridge em uma LT.....	43
Figura 25 – Modelo conjunto cabo condutor e amortecedor.....	44
Figura 26 – Fases amortecedor Stockbridge.....	45
Figura 27 – Resposta em frequência do cabo.....	45
Figura 28 – Resposta em frequência do amortecedor.....	45
Figura 29 – Frequência em que atua o Stockbridge.....	46
Figura 30 – Excitação do amortecedor Stockbridge.....	47

Figura 31 – Diagrama de corpo livre do cabo e da massa do amortecedor Stockbridge	47
Figura 32 – Amortecedor Stockbridge do tipo simétrico.....	49
Figura 33 – Amortecedor Stockbridge do tipo assimétrico.....	49
Figura 34 – Amortecedor Stockbridge do tipo dogbone.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre os tipos de vibração	26
Tabela 2 – Condições de tempo favoráveis aos movimentos do condutor.	26
Tabela 3 – Danos provenientes das vibrações	26
Tabela 4 – Relação entre os números de Reynolds e Strouhal.....	26
Tabela 4 – Relação entre os números de Reynolds e Strouhal.....	27

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Regime do fluxo do fluido em torno de um cilindro liso circular	29
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SIN	Sistema Interligado Nacional
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
NBR	Norma Brasileira Registrada
LT	Linhas de Transmissão
TEM	<i>Transverse Electric Magnetic</i>
EHV	Extra Alta Tensão
AT	Alta Tensão
MT	Média Tensão
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas

LISTA DE SÍMBOLOS

MW	megawatts
km	quilômetros
kV	quilovolts
R	resistência
L	indutância
C	capacitância
G	condutância
V	volts
t	tempo em segundos
x	comprimento
I	corrente
A	ampère
Z	impedância
Ω	ohms
Re	número de Reynolds
ω	velocidade angular
Y	admitância
mm	milímetros
kg	quilograma
V	velocidade de fluxo do fluido
D	diâmetro do condutor
ν	viscosidade cinemática do fluido
S	número de Strouhal
f_s	frequência de excitação do vento
$F_e(t)$	força de elevação que o desloca
K_{cabo}	Constante de rigidez do cabo
C_{cabo}	Constante de amortecimento viscoso do cabo
M_{cabo}	Massa do cabo
K_a	Constante de rigidez do amortecedor;
C_a	Constante de amortecimento viscoso do amortecedor
M_a	Massa do amortecedor
X_1	Deslocamento do cabo
X_2	Deslocamento do amortecedor
η	fator de perda devido ao amortecimento histerético no cabo mensageiro
c_{ij}	elemento da matriz amortecimento
k_{ij}	elemento da matriz rigidez
ω	frequência de excitação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	15
1.2	Estrutura do Trabalho	16
2	METODOLOGIA	17
3	LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	18
3.1	Cabos condutores	20
3.1.1	Condutores de cobre	20
3.1.2	Condutores de alumínio e alumínio-aço	20
3.1.3	Condutores em ligas de alumínio	21
3.1.4	Condutores copperweld e alumoweld.....	21
3.2	Isoladores	21
3.3	Ferragens e seus acessórios.....	22
3.4	Cadeias de Suspensão	22
3.5	Cadeias de Ancoragem	22
3.6	Estruturas das Linhas de Transmissão	23
3.7	Cabos Para-raios	23
3.8	Esferas de Sinalização	24
4	VIBRAÇÕES	25
4.1	Vibrações Eólicas	27
4.2	Vibrações Galope	30
4.3	Vibrações Esteira.....	31
4.4	Controle de vibração em cabos	32
4.4.1	Amortecimento próprio do condutor	32
4.4.2	Frequência de ressonância	32
4.4.3	Mudança de geometria.....	33
5	AMORTECEDORES DE VIBRAÇÃO	34
5.1	Amortecedor tipo ponte ou “bretelle”.....	34
5.2	Amortecedor Festão.....	34
5.3	Amortecedor de braço oscilante	35
5.4	Amortecedor Helgra	35
5.5	Amortecedor de Impacto (Massa-mola)	36
5.6	Amortecedor Bouche	36

5.7	Amortecedor Haltere ou torcional	37
5.8	Amortecedor Linear	38
5.9	Amortecedor Stockbridge	38
5.10	Amortecedor Dulmison ES-1	39
5.11	Amortecedor Dulmison ES-2	39
5.12	Amortecedor Varispond Dulmison.....	40
5.13	Amortecedor Haro	40
5.14	Amortecedor “Vibless”	40
5.15	Amortecedor Salvi 4-R	41
6	ANÁLISE AMORTECEDOR STOCKBRIDGE	42
6.1	Funcionamento do dispositivo	43
6.2	Modelagem do amortecedor Stockbridge	46
6.3	Tipos de amortecedores Stockbridge.....	48
6.3.1	Amortecedor Stockbridge Simétrico	48
6.3.2	Amortecedor Stockbridge Assimétrico.....	49
6.3.3	Amortecedor Stockbridge Dogbone	50
7	CONCLUSÃO	51
	REFERENCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

A expansão da malha elétrica do País está diretamente relacionada ao desenvolvimento econômico e social da região envolvida. Resultante dessa expansão existe a necessidade de atender e suportar essa demanda gerada. Considerando as dimensões territoriais do Brasil, junto da abundante capacidade de geração devido aos recursos energéticos, torna-se necessário o transporte de energia elétrica para centros mais distantes da origem da geração de energia, emprega-se as linhas de transmissão de energia elétrica em corrente alternada ou contínua.

De acordo com o Sistema de Informações de Geração da Aneel o ano de 2020 representou uma capacidade instalada de 174.412,6 [MW], onde 74,76% dessa potência instalada é impulsionada por fontes renováveis, ou seja, de baixa emissão de gases do efeito estufa.

A composição do Sistema Interligado Nacional (SIN) é responsável por mais de 145 mil [km] de linhas de transmissão de energia elétrica, com diferentes níveis de tensão de operação, podendo atingir tensão de fornecimento entre 69 [kV], 88 a 138 [kV] e igual ou superior a 230 [kV]. As empresas que compõe o SIN são fiscalizadas pela Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), estes agentes tem como função a de controlar, regular e fiscalizar todas as operações ligadas a geração, transmissão e comercialização da energia resultante.

1.1 Objetivos

Esta produção tem como objetivo apresentar os tipos de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica no Brasil e seus principais componentes, tendo ênfase nos amortecedores de vibração que são fundamentais no combate as vibrações as quais as LTs estão sujeitas durante sua atuação.

A produção ainda demonstra uma diversidade de dispositivos e suas características principais, entretanto, possui o foco nos amortecedores tipo Stockbridge, por apresentar vantagens como: a sua facilidade de construção, baixo custo, facilidade de fabricação, livre de manutenção, ações independentes da temperatura e eficiência.

1.2 Estrutura do Trabalho

A organização deste projeto é definida da seguinte maneira. O capítulo dois faz a síntese da metodologia realizada para a obtenção dos dados que serão analisados e discutidos no decorrer do projeto.

No terceiro capítulo apresenta as Linhas de Transmissões de Energia Elétrica, com ênfase nos modelos do tipo aéreas sendo em corrente alternada ou contínua, neste capítulo é possível obter informações de como são constituídas essas LTs e quais materiais e acessórios são empregados nelas.

No quarto capítulo demonstra os distúrbios externos originados pela ação do vento nas linhas, as denominadas vibrações. São apresentadas as vibrações eólicas, vibração de esteira e vibração do tipo galope.

No quinto capítulo introduz os principais mecanismos e dispositivos utilizados para o combate as vibrações presentes nas linhas de transmissão aéreas, de maneira que se conclui que o dispositivo de vibração mais empregado é o do tipo Stockbridge.

No sexto capítulo é analisado o comportamento e as características do dispositivo de amortecimento Stockbridge, neste capítulo é apresentado sua composição física, sua forma de atuação, a modelagem de seu sistema e o comparativo entre seus diferentes tipos de composição.

Por fim, é apresentada a conclusão desse trabalho.

2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste projeto foi realizada uma extensa pesquisa em artigos, livros e outros projetos disponíveis na internet visando o entendimento do comportamento do sistema brasileiro de transmissão elétrica e os principais agentes atuantes em seu funcionamento.

A partir da introdução dos componentes de uma LT é possível analisar os principais distúrbios provenientes do ambiente no qual a linha de transmissão está inserida, dessa maneira, possibilita apresentar as principais formas de combate a esses distúrbios e as soluções necessárias para reduzirem estes efeitos danosos.

Como consequência dessa análise se assume a ênfase nos dispositivos de amortecimento de vibração do tipo Stockbridge, levando em consideração suas características físicas e seu comportamento no combate as vibrações, em especial a vibração eólica.

3 LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Por definição linhas de transmissão de energia elétrica são estruturas guias, longitudinais que através da propagação eletromagnética no condutor tem a atribuição de transportar energia entre centros de produção ao centro de consumo em variados níveis de tensões e distâncias.

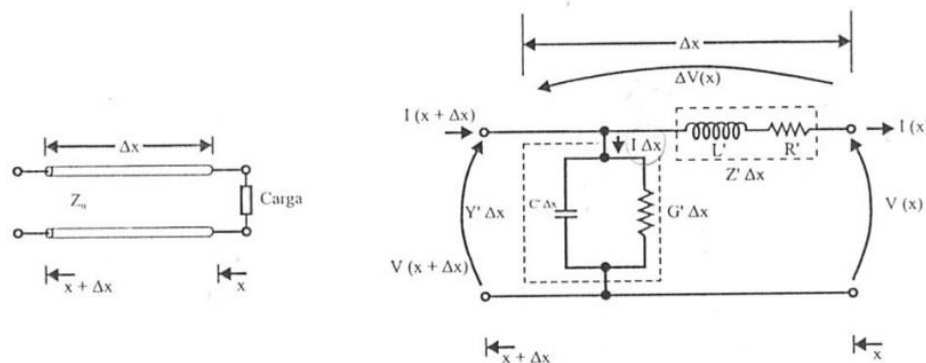
São constituídas por um grupo de condutores metálicos em diferentes composições, fazendo com que, seu comportamento elétrico seja variado de acordo com a disposição apresentada.

Linhas de transmissão são empregadas em aplicações de pequenos valores de potência para o transporte de informação em sistemas de telecomunicações, para o transporte de dados entre diferentes porções de circuitos integrados e processadores, e em caso de sistemas de alta potência, para o transporte de energia em sistemas de alta tensão de energia elétrica.

O comportamento das linhas de transmissões de energia elétrica é descrito pelo chamado “modo principal”, onde, campos elétricos e magnéticos são perpendiculares entre si e a direção de propagação de energia. Considera-se essencialmente o TEM (Transverse Electric Magnetic), usualmente denominado de onda eletromagnética transversa. Baseado em uma determinada frequência, denominada Frequência Máxima de Operação do Modo TEM, outras maneiras de propagação podem se tornar existentes nas linhas de transmissões de energia elétrica como as que ocorrem nos guias de onda, esse evento é consequência de que os valores da frequência são tão altos que o comprimento da onda passa a ser comparável as dimensões da linha que está sendo utilizada, como por exemplo, as distancias entre os condutores.

De maneira geral, um pequeno momento do comportamento de uma linha de transmissão de energia elétrica Figura 1 pode ser representado por um circuito que possua, resistência [R], indutância [L], capacitância [C] e condutância [G].

Figura 1 – Representação de uma seção elementar do Circuito Equivalente Linha de Transmissão.



Fonte: Transmissão de Energia Elétrica Linhas Aéreas.

Disponível em:

<[Acesso: 16 out. 2021.](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4097901/mod_resource/content/1/linhas.pdf#:~:text=1.2%20CIRCUITO%20EQUIVALENTE%20DE%20UMA,e%2C%20sim%2C%20distribu%C3%ADdos%20ao%20longo.>.></p>
</div>
<div data-bbox=)

Analisando o modelo convencional, as tensões usuais de transmissão adotadas no Brasil, em corrente alternada, estão distribuídas desde 138 [kV] até 765 [kV] incluindo as tensões de 230 [kV], 345 [kV], 440 [kV] e 500 [kV].

Os sistemas referentes a subtransmissão contam com menores níveis de tensão, como por exemplo: 34,5 [kV], 69 [kV] ou 88 [kV] e 138 [kV] e alimentam subestações de distribuição, dos quais os alimentadores primários de saída operam normalmente em níveis de tensão de 13,8 [kV]. Na última etapa do processo da transmissão os pequenos consumidores sofrem uma outra redução do nível de tensão para níveis de tensões entre 110 [V] e 440 [V], na qual atuam os alimentadores secundários.

Para a escolha de transmissão entre sistemas de corrente alternada ou corrente contínua são feitos estudos técnicos e econômicos. Sistemas de corrente contínua mostram-se executáveis para distâncias acima de 600 a 800 [km].

No caso de transmissão de energia elétrica em corrente alternada, o sistema elétrico de potência é constituído basicamente pelos:

- Geradores;
- Estações de elevação de tensão;
- Linhas de transmissão;
- Estações seccionadoras e Estações transformadoras abaixadoras.

Na transmissão de energia elétrica em corrente contínua a estrutura é basicamente a mesma, difere-se principalmente pela presença das estações conversoras junto da subestação e da subestação abaixadora e também pela ausência de subestações intermediárias abaixadoras ou de seccionamento.

As linhas de transmissão de energia elétrica em corrente contínua apresentam uma despesa inferior ao de linhas de energia elétrica em corrente alternada enquanto que as estações conversoras ainda apresentam valores relativamente alto, portanto, a transmissão de energia elétrica em corrente contínua demonstra ser vantajosa apenas em aplicações específicas como na interligação de sistemas com frequências diferentes ou para transmissão de energia a grandes distâncias.

As linhas de transmissão de energia elétrica são classificadas de acordo com o seu comprimento, isto significa, em linhas curtas (também denominadas de linhas de distribuição), linhas que consistem em distancias até 80[km]; linhas médias, linhas que consistem em distancias entre 80[km] a 240[km] e linhas longas, linhas que consistem em distancias maiores que 240[km].

As características físicas são determinantes para o desempenho elétrico da linha de transmissão. De maneira que, influem no comportamento da operação em regime normal, definindo seus parâmetros elétricos, assim como, quando submetidas a sobretensões de qualquer natureza. Dessa forma, importante a análise de suas características físicas e os elementos que compõem a LT.

3.1 Cabos Condutores

Compõem os elementos ativos das LTs, desta forma, possui características específicas. A seleção dos cabos representa fundamental importância no dimensionamento do sistema, pois, seu bom desempenho e suas implicações econômicas são de fundamental importância para a operação da transmissão.

No Brasil, a normatização das secções adotadas pela ABNT-EB-293 para cabos de alumínio e alumínio-aço e ABNT-EB-12 para cabos nus de cobre, é baseada na padronização americana AWG (*American Wire Gauge*). Nesse sistema os cabos condutores são numerados em ordem de secção decrescente n.º 0 a n.º 36 e secção crescente 00,000 e 0000, de maneira que se mantém constante a relação entre diâmetro e secções.

3.1.1 Condutores de Cobre

A fabricação de cabos de cobre no Brasil é delimitada nas bitolas de 13,3mm até 645,2mm nas temperas dura e semidura. As classes A e AA de encordoamento são definidos pela norma, de maneira que, os de classe AA são usualmente empregados em condutores para linhas aéreas, já os condutores classe A em linhas aéreas são utilizados quando possuem capa protetora ou quando desejado maior flexibilidade no condutor.

3.1.2 Condutores de alumínio e alumínio-aço

Suas características são definidas pela ABNT através das seguintes normas:

- ABNT-EB-219: Fios de alumínio para fins elétricos;
- ABNT-EB-292: Fios de aço zincado para alma do cabo de alumínio;
- ABNT-EB-193: Cabos de alumínio (CA) e cabos de alumínio com alma de aço (CAA) para fins elétricos.

3.1.3 Condutores em ligas de alumínio

A liga metálica aumenta sua resistência mecânica, sendo assim, aumentando sua resistência a oxidação e corrosão em regiões de atmosfera poluída ou a beira-mar.

3.1.4 Condutores copperweld e alumoweld

Obtidos pela extrusão de uma capa de cobre ou de alumínio sobre um condutor de aço de elevada resistência. Pouco usual sua utilização em LTs como cabos condutores, entretanto, utilizados como cabos para-raios e em linhas de telecomunicações, por vezes, utilizados como condutor neutro em sistemas de distribuição urbano e rural. No Brasil são feitos sob encomenda a partir de barras-fio importadas.

3.2 Isoladores

Os cabos condutores são sustentados por estruturas através dos isoladores, que tem por função, mantê-los eletricamente isolados, resistindo a necessidades mecânicas e elétricas.

Os isoladores estão sujeitos as solicitações mecânicas transmitidas pelos cabos condutores, existem três tipos:

- Forças verticais – estão relacionadas ao próprio peso dos condutores, países de clima frio possuem o acréscimo de peso pelas capas de gelo que são formadas nos condutores;
- Forças horizontais axiais – força presente no sentido dos eixos longitudinais das linhas, indispensável para que os condutores se mantenham suspensos sob o solo;
- Forças horizontais transversais – presente no sentido ortogonal aos eixos longitudinais das linhas, devidas a ação da pressão do vento sobre os próprios cabos.

Os isoladores estão sujeitos as solicitações de natureza elétrica, são as tensões mais elevadas que podem ocorrer nas linhas;

- Tensão normal e sobretensões em frequência industrial;
- Surtos de sobretensão de manobra que são de curta duração, podendo atingir níveis de 3 a 5 vezes a tensão normal entre fase e terra;
- Sobretensões de origem atmosféricas, onde possuem intensidade muito elevada e variada.

A eficiência de um isolador está relacionada em fazer o máximo uso do poder isolante do ar que o envolve. Um isolador pode apresentar falha quando ocorre uma falha interna (perfuração) ou pelo ar que o envolve (descarga externa). Sua configuração deve assegurar uma distribuição balanceada de potenciais e, em sequência, dos gradientes no ar, tendo o objetivo de assegurar tensões de descargas adequadas.

Sua superfície deve resistir a exposição ao tempo, oxido de enxofre e outros reagentes, sendo assim, sua fabricação envolve dois tipos de material:

- Porcelana vitrificada;
- Vidro temperado.

3.3 Ferragens e seus acessórios

Retratados pelo conjunto de peças que devem suportar e ligar os cabos condutores as cadeias de isoladores e estas as estruturas. É de extrema importância o seu desenho pois está exposto a fontes de Corona e importantes fontes de radiointerferencia, dependendo dos níveis de tensões.

3.4 Cadeias de Suspensão

As redes de isoladores devem sustentar os condutores e transmitir aos suportes todo o esforço gerado por eles. Em seu superior devem apresentar uma peça de ligação a estrutura, de forma geral, uma manilha ou um gancho, na parte inferior, terminar em uma pinça ou grampo de suspensão, que tem a função de envolver e fixar o cabo condutor.

- Pinça de Suspensão – as solicitações mecânicas presentes no cabo, sejam elas, verticais ou horizontais, criam no condutor uma tensão que é transmitida aos suportes.
- Dispositivos antivibrantes – a distensão dos cabos de uma LT está submetida a ação dos ventos de intensidades variáveis, sendo assim, vibrando em diversas frequências.

3.5 Cadeias de Ancoragem

Tem como função sustentar além dos esforços das cadeias de suspensão, também devem sustentar os esforços que ocorrem pelo tracionamento dos cabos. São formadas de uma simples coluna de isoladores, ou então, de diversas colunas em paralelo, variando de acordo com a força de tração que estão sendo aplicadas nela. Sua fixação ocorre através do grampo de tensão ou

grampo de ancoragem, que devem estar dimensionados para resistir aos esforços mecânicos que são expostos, e reter o condutor sem a possibilidade de escorregamento.

3.6 Estruturas das Linhas de Transmissão

Estruturas das linhas de transmissão de energia elétrica formam os elementos de sustentação dos cabos das LTs. Possuirão pontos de suspensão quanto forem os cabos condutores e também cabos para-raios a serem sustentados. Seu desenho e tamanho variam de acordo a outros fatores, os principais são:

- Disposições dos condutores;
- Distância entre condutores;
- Dimensões e formas de isolamento;
- Flechas dos condutores;
- Altura de segurança;
- Função mecânica;
- Forma de resistir;
- Materiais estruturais;
- Número de circuitos, entre outros.

3.7 Cabos Para-raios

Presentes no superior das estruturas tem como função a interceptação de descargas elétricas de origem atmosférica e descarrega-las ao solo, sendo assim, evitando o comprometimento e interrupções do sistema. Isola-se as estruturas dos cabos através de isoladores de baixa resistência disruptiva.

Suas dimensões de maneira geral possuem o diâmetro de 3/8” a 1/2”, são empregados com o mesmo grau de eficiência:

- Cabos de aço HS, HSS ou SM galvanizados;
- Cabos *aluminoweld*;
- Cabos *copperweld*;
- Cabos CAA de alta resistência mecânica.

O grau de proteção a estrutura varia de acordo com a colocação que os cabos para-raios são dispostos nas estruturas.

3.8 Esferas de Sinalização

As esferas são geralmente laranja e constituídas feitas em resina polimérica reforçada com fibra de vidro. São colocadas com um espaçamento pré-determinado nas LTs com o intuito de sinalizar a presença dos cabos, evitando acidentes por aeronaves ou outros deslocamentos sobre a área de ação do cabo. Não demandam manutenção, não se deslocam, não giram, não ocorre atrito com o cabo nem causam eletrólise ou ressonância harmônica na vibração.

4 VIBRAÇÕES

A durabilidade de uma linha de transmissão está diretamente relacionada ao cumprimento de diversas condições sendo elas as sobrecargas mecânicas ou elétricas, seus níveis de tensões e o aquecimento dos condutores.

Por estarem sujeitas as ações do vento, chuva e descargas atmosféricas observa-se o maior emprego de estruturas acessórias. A crescente necessidade de ampliação das concessionárias e usuários faz com que aumente o uso de equipamentos mais potentes, de maneira que a operação em altas tensões resulta em correntes menores, gerando, perdas menores por efeito Joule e assim criando um melhor controle das tensões. O aumento de tensão em um momento exige o aumento nas dimensões dos condutores reduzindo as descargas parciais que ocorrem quando o campo elétrico superficial em um cabo energizado ultrapassa seu limiar de ruptura, este fenômeno é chamado de “Efeito Corona”.

A busca por atender essa necessidade gera a adoção de mais de um condutor por fase, dispostos de maneira paralela entre si e unidos a pequenas distancias, são condutores normais, entretanto mantidos separados no meio por espaçadores.

A utilização do espaçador-amortecedor é a forma mais eficiente de aumentar a proteção dos vãos de uma linha de transmissão, visto que é propriedade deste equipamento a dissipação das vibrações causadoras de danos geradas pela ação do vento. Esta tecnologia é empregada quando busca-se construir feixes paralelos de condutores de maneira que reduzam os danos provocados pelos fenômenos da vibração eólica, galope do condutor e oscilação induzida por esteira Tabela 1.

A exposição dos cabos condutores aos diferentes tipos de vibração Tabela 2 pode resultar em danos Tabela 3 que ocorrem de maneira progressiva ou que ocorrem ao mesmo tempo. A ruptura usualmente ocorre nos pontos de fixação devido ao fato de que este local que uma seção vibra e a outra seção é forçada a ser rígida, de maneira que resulte na ruptura do condutor.

Além do comprometimento dos condutores a ação das vibrações estão diretamente relacionadas a danificação nas cadeias de isoladores, acessórios e postes, gerando a ruptura de peças e do afrouxamento de parafusos, gerando diversas folhas nas estruturas.

Tabela 1: Comparação entre os tipos de vibração.
COMPARACAO ENTRE OS TIPOS DE VIBRACAO

	VIBRACAO EOLICA	GALOPE DO CONDUTOR	OSCILACOES DEVIDO A ESTEIRA
TIPO DE LINHA DE TRANSMISSAO AFETADA	TODAS	TODAS	TODAS
FAIXA DE FREQUENCIA (Hz)	3 A 150	0,08 A 3	0,15 A 10
FAIXA DE AMPLITUDE	0,01 A 1	5 A 300	MODO DE CORPO RIGIDO 0,5 A 80 MODO DE SUB-VAO 0,5 A 20

Fonte: Verma,2002.

Tabela 2: Condições de tempo favoráveis aos movimentos do condutor.

CONDICOES DE TEMPO FAVORAVEIS AOS MOVIMENTOS DO CONDUTOR			
CARACTERISTICA DO VENTO	LAMINAR	LAMINAR	LAMINAR
VELOCIDADE DO VENTO (m/s)	1 A 7	7 A 18	4 A 18
SUPERFICIE DO CONDUTOR	DESENCAPADA/CONGELADA UNIFORMEMENTE	CONGELADA ASSIMETRICAMENTE	DESENCAPADA/SECA

Fonte: Verma,2002.

Tabela 3: Danos provenientes das vibrações.

DANOS			
TEMPO ESTIMADO PARA O DESENVOLVIMENTO DE FALHAS	3 MESES A 20 ANOS	1 A 48 HORAS	4 A 18 HORAS
CAUSA DIRETA DO DANO	FADIGA DO METAL DEVIDO A CARREGAMENTO CICLICO	CARGAS DINAMICAS ALTAS	COLISAO DOS CONDUTORES E DESGASTE FISICO ACELERADO
COMPONENTES DE LINHA MAIS AFETADOS PELOS DANOS	CONDUTOR E PARA RAIOS	CONDUTOR, FERRAGENS, ISOLADORES E ESTRUTURAS	ACESSORIOS DE SUSPENSAO, ESPACADORES, AMORTECEDORES

			E FIOS DO CONDUTOR
		A RELACAO ENTRE AS FREQUENCIAS NATURAIS VERTICAIS E AS FREQUENCIAS NATURAIS TORSIONAIS, RAZAO DE DECAIMENTO E AS CONDICÕES DE CONTORNO	SEPARACAO E ARRANJO DE SUB- CONDUTOR, INCLINACAO DO FEIXE E DISTANCIA ENTRE OS ESPACADORES
CONDICOES DE PROJETO QUE AFETAM O MOVIMENTO DO CONDUTOR	TENSAO DA LINHA, AUTO- AMORTECIMENTO DO CONDUTOR, USO DE AMORTECEDORES E PROTETORES		

Fonte: Verma,2002.

4.1 – Vibrações Eólicas

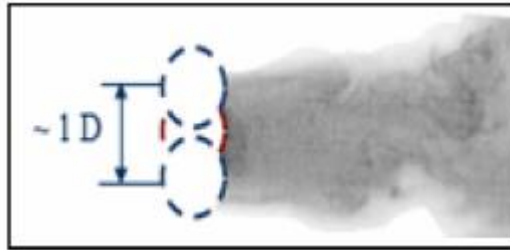
Ao decorrer do tempo, a eficiência mecânica das linhas de transmissões elétricas sofre pequenas alterações por consequências não só elétricas ou mecânicas e sim pela ação constante do vento junto aos pontos de fixação dos cabos. Essa exposição a diferentes condições climáticas (vento) formam-se as denominadas vibrações eólicas que são formados de uma trilha de vórtices a jusante do cabo, originado pela interação do escoamento do ar com um obstáculo em forma de cilindro.

O esgotamento dos condutores é provocado pelos esforços dinâmicos originados do dobramento alternado do condutor nos pontos de restrição de movimento. Os impactos dos esforços dinâmicos Figura 2 são acentuados pela abrasão entre a superfície de contato dos fios, causando a remoção do material que está em contato com ele. A substancia resultante desse contato da superfície com outro material reage com o oxigênio do ar que o envolve, formando o oxido de alumínio, mais rígido que o material do metal, de maneira que, acelera o desgaste dos condutores. As forças dinâmicas resultantes do cabo junto ao grampo de suspensão são proporcionais a amplitude de vibração, da qual a constante de proporcionalidade depende das características materiais do cabo e da tensão de esticamento.

A deterioração mais usual causada pelas vibrações eólicas nas LTs é o rompimento de fios individuais do cabo condutor.

A ruptura de fios ocorre habitualmente no interior ou nas proximidades de grampos de suspensão, porque em outros dispositivos como grampos de ancoragem, espaçadores, emendas e esferas possuem mobilidade vertical.

Figura 2: Amplitude de oscilação do condutor.



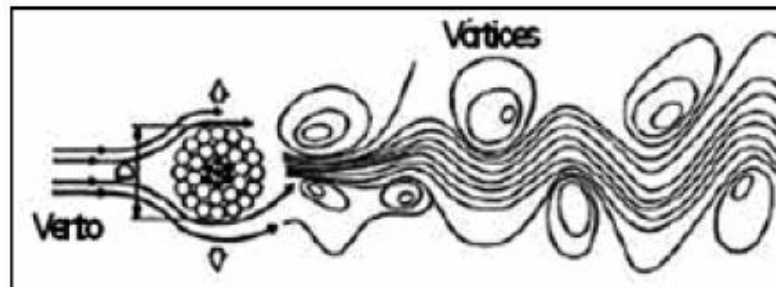
Fonte: Snegovski, 2004.

O desbalanceamento das pressões que forçam o condutor a se mover para cima e para baixo em um ângulo reto com a direção do vento é uma das consequências do desprendimento alternado de vórtices induzidos pelo vento nos extremos do cabo condutor.

O desprendimento de vórtices Figura 3 está relacionado ao acréscimo no número de Reynolds formando uma esteira, esta conhecida como esteira de Von Kármán, definida por Equação 1

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (1)$$


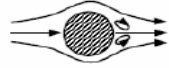


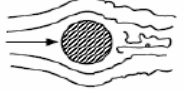

Figura 3: Desprendimento de vórtices no cabo condutor.



Fonte: Snegovski, 2004.

De forma que: V é a velocidade de fluxo do fluido, D o diâmetro do condutor e ν a viscosidade cinemática do fluido Quadro 1. O número de Reynolds é adimensional.

Quadro 1: Regime do fluxo do fluido em torno de um cilindro liso circular.

	$Re < 5$ Regime de fluxo não separado.
	$5 \leq Re < 40$ Um par fixo de vórtices em turbulência.
	$40 \leq Re < 150$ Esteira de vórtices é laminar.
	$150 \leq Re < 300$ Transição para vórtice turbulento. $300 \leq Re < 3 \cdot 10^5$ A esteira de vórtices é totalmente turbulenta.
	$3 \cdot 10^5 \leq Re < 3,5 \cdot 10^6$ A camada limite laminar sofreu transição turbulenta e a esteira é estreita e desorganizada.
	$3,5 \cdot 10^6 \leq Re$ Re-estabelecimento da esteira de vórtices turbulento.

Fonte: Blevins, 1990.

A regularidade do efeito de esteira pode ser descrita pelo número não-dimensional chamado número de Strouhal que é definida por Equação 2:

$$S = \frac{fsD}{V} \quad (2)$$

De maneira que: f_s representa a frequência de excitação do vento, D o diâmetro do condutor e V a velocidade do vento.

A análise do desprendimento do vórtice depende de parâmetros como os números de Reynolds e Strouhal que podem ser relacionados da seguinte maneira Tabela 4:

Tabela 4: Relação entre os números de Reynolds e Strouhal.

RELACAO ENTRE OS NUMEROS DE REYNOLDS E STROUHAL

NÚMERO DE REYNOLDS	NÚMERO DE STROUHAL
<30	0
50	0,13
500	0,20
1000	0,21
10^4	0,20

10^5	0,19
10^6	0,21
10^7	0,23

Fonte: Irvine,2006.

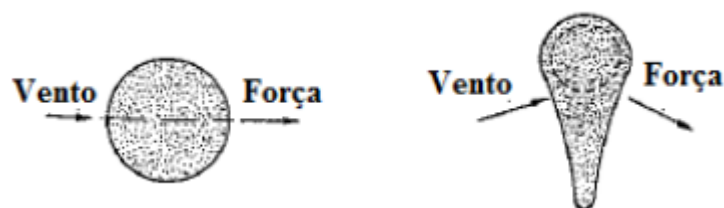
Nas linhas de transmissão de energia elétrica outro parâmetro importante é o número de espaçadores, entretanto sua posição não é levada em conta, porque os valores de comprimento de onda envolvidos na vibração eólica são de apenas alguns metros, dessa forma, as tolerâncias no posicionamento dos espaçadores torna os comprimentos diferentes entre si. Sendo assim, independentemente do espaçamento é impossível que pra qualquer modo de vibração do condutor que todos os espaçadores estejam localizados em nós de deflexão consequentemente não possuem contribuição na dissipação de energia do condutor.

4.2 – Vibração Galope

Este tipo de vibração gera uma oscilação no cabo com uma faixa de frequência entre 0,1 a 3,0 [Hz] e faixa de amplitude cerca de 5 a 300 vezes o diâmetro do cabo condutor, provocando o movimento do ponto de suspensão na direção vertical dos cabos condutores. Essa vibração ocorre normalmente na presença do condutor congelado, expressando uma forma aerodinâmica assimétrica e ao mesmo tempo sobre a ação de ventos cruzados razoavelmente forte de 7 a 18 [m/s].

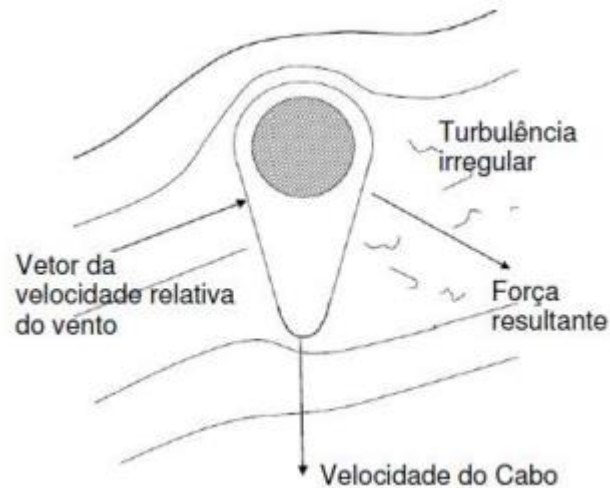
A ação do vento Figura 4 sobre uma seção transversal não circular gera uma componente de força no sentido vertical, gerando a vibração por galope. Após o início das oscilações verticais o vetor soma de velocidade do vento com a velocidade do cabo condutor produzindo assim ângulos abaixo e acima da horizontal, resultando em variações alternadas da porção de gelo em relação ao vento que atua no condutor. O movimento do condutor pra cima e a força de ação contraria ao movimento faz com que ocorra um galope acelerado, caso contrário o movimento não ocorre.

Figura 4: Força resultante da ação do vento.



Fonte: Souza, 2012

Figura 5: Ação do vento sobre o condutor congelado.

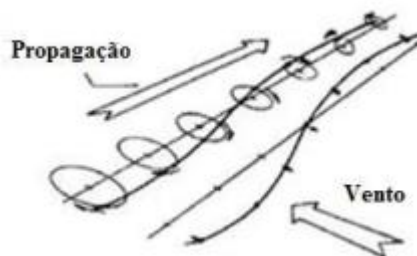


Fonte: Souza, 2012

4.3 – Vibração de esteira

Este fenômeno é apresentado em condutores desencapados e secos, esta vibração proporciona vários tipos de movimentos no feixe dos condutores. Pode ocorrer com condutores em condições de congelamento ou na ocorrência de chuvas. As variações geradas pela esteira do escoamento Figura 6 são atributos de linhas elétricas aéreas com dois ou mais cabos por feixe. A esteira produzida por um cabo onde o vento é soprado pode provocar forças variáveis e complexas sobre o cabo onde sai o vento, este movimento é transferido através de separadores ou de outros equipamentos.

Figura 6: Alterações provenientes da esteira do escoamento num feixe duplo de condutores.



Fonte: Lilien, 2004.

A faixa de frequência em que esta vibração ocorre varia entre 1 e 10 [Hz] e são resultantes de vento moderado para forte com velocidade variando entre 4 a 18 [m/s]. Usualmente ocorrem sobre cabos condutores secos e em terrenos amplos.

4.4 Controle de vibração em cabos

Recomenda-se o controle de movimentos oscilatórios em cabos através do controle passivo de vibração. Diferentes métodos são utilizados para reduzir o efeito resultante das vibrações no cabo, desde aumentar o amortecimento por absorvedores e massas auxiliares acopladas as linhas, evitar frequência de ressonância a mudança na geometria do cabo.

4.4.1 Amortecimento próprio do condutor

Este processo de amortecimento é realizado devido a sua característica física que permite a dissipação de energia interna enquanto realiza vibração.

Essa dispersão de energia pode ocorrer por diferentes processos, sendo possível ocorrerem de forma simultânea. O primeiro processo está relacionado ao atrito entre as superfícies dos condutores em contato e é responsável pela maior parte da dissipação. Este mecanismo de amortecimento tem relação com as deformações dinâmicas que ocorrem nos condutores, estas deformações dependem das deformações do cabo, do atrito e da pressão entre os condutores, que são dependentes da composição dos cabos e da tração instalada. O segundo processo de amortecimento é o atrito interno do material dos condutores. Por fim, o terceiro processo, é o mecanismo relacionado ao atrito do condutor com o ar.

Este mecanismo de amortecimento próprio de condutor se torna fundamental para os condutores que não possuem amortecedores externos, de forma que estes amortecimentos visam atenuar os efeitos das vibrações, entretanto, este mecanismo seja considerado de valores inferiores comparados a amortecedores externos como por exemplo o amortecedor Stockbridge.

4.4.2 Frequência de ressonância

Mecanismo de mitigação da vibração que consiste em alterar a frequência natural dos condutores para valores diferentes das vibrações em que o condutor está exposto. A realização deste processo é feita através da redução da tensão mecânica nos cabos, de forma que o comprimento do cabo entre uma torre e outra aumente, com a expansão do condutor e seu aumento de massa, o amortecimento do cabo se elevará.

A aplicação da alteração de frequência de ressonância gera consequências ineficazes como a necessidade de torres maiores e mais densas que suportem o peso adicional dos condutores e

compensem uma catenária maior, além do mais, a elevação da tensão nos pontos de fixação. Estas consequências geram o aumento nos custos da instalação das linhas elétricas, sendo assim, apresentando maiores desvantagens quando comparadas a aplicações de amortecedores externos como o do tipo Stockbridge.

4.4.3 Mudança de geometria

Visando a redução do efeito de esteira de vórtices de Von Karman este mecanismo apresenta carenar o cabo, de forma que reduza as variações no campo de pressão e diminui a periodicidade do desprendimento dos vórtices, preservando-se dos ciclos alternados de tensão mecânica. Este processo pode tornar os custos de fabricação e instalação muito elevados.

5 AMORTECEDORES DE VIBRAÇÃO

Em vista da redução dos níveis de vibração nos condutores e dispositivos presentes nas linhas de transmissão o desenvolvimento de dispositivos amortecedores mais eficientes se torna cada vez mais necessários, de maneira que, reduzam os efeitos danosos das vibrações eólicas.

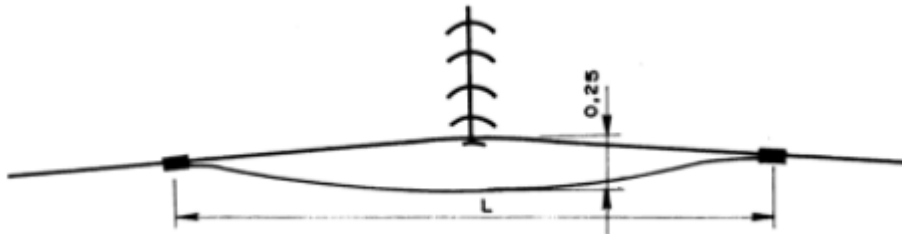
Os equipamentos são conectados no cabo condutor, entretanto, seu posicionamento é de fundamental importância no projeto, seja por questões econômicas ou por questões mecânicas.

5.1 – Amortecedor tipo ponte ou “Bretelle”

Este dispositivo contém um cabo de material similar ao dos condutores e são dispostos de cada lado do grampo de suspensão, de maneira que formam um laço Figura 7.

Seu comportamento é fundamentado na dissipação de energia por fricção que possui um cabo não tensionado, dessa forma, modifica as características da vibração entre os pontos em que está posicionado.

Figura 7: Amortecedor “Bretelle” tipo I.



Fonte: LABEGALINI R. P; LABEGALINI A. J; FUCHS D. R.; ALMEIDA T. M. PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO, 2º ED. 1992.

5.2 – Amortecedor Festão

Uma variação do amortecedor tipo “Bretelle” que é constituído de vários laços de sobra do próprio condutor Figura 8 sendo conectado paralelamente a ele mesmo.

Figura 8: Amortecedor Festão

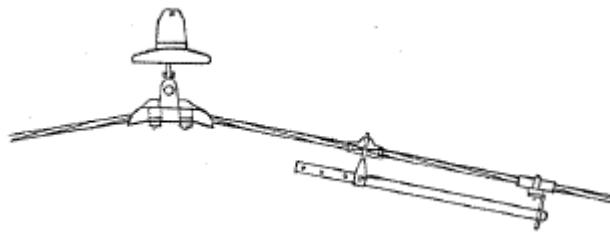


Fonte: LABEGALINI R. P; LABEGALINI A. J; FUCHS D. R.; ALMEIDA T. M. PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO, 2º ED. 1992.

5.3 – Amortecedor de braço oscilante

Dispositivo precursor na redução de vibrações eólicas em linhas de transmissões de energia elétrica, constitui-se de um braço oscilante e um anel de impacto presos ao cabo condutor Figura 9. Seu funcionamento é definido pelo impacto de uma extremidade do braço oscilante com o anel dissipa a energia aplicada no ponto, dessa forma, reduz as amplitudes de vibração no condutor.

Figura 9: Amortecedor de braço oscilante



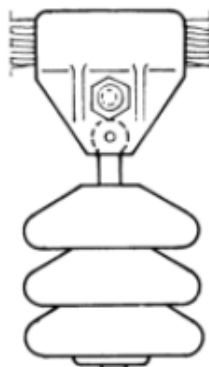
Fonte: LABEGALINI R. P; LABEGALINI A. J; FUCHS D. R.; ALMEIDA T. M. PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO, 2º ED. 1992.

5.4 – Amortecedor Helgra

Este equipamento é formado por discos de ferro e Neoprene, com furos em seu centro, posicionados alternadamente sobre uma haste cilíndrica articulada, sua dissipação de energia ocorre através do impacto entre as massas do disco Figura 10.

Este amortecedor transforma a energia mecânica em calor através da compressão das arruelas de Neoprene, este calor é dissipado no ar, sua aplicação correta resulta em uma eficiência de 90% de absorção das vibrações, sendo assim, menor risco para os cabos condutores. Não apresenta frequência própria, dessa forma, não acrescenta vibração nos condutores e também, não apresenta fadiga, podendo ser utilizado por diversos períodos de tempo.

Figura 10: Amortecedor Helgra



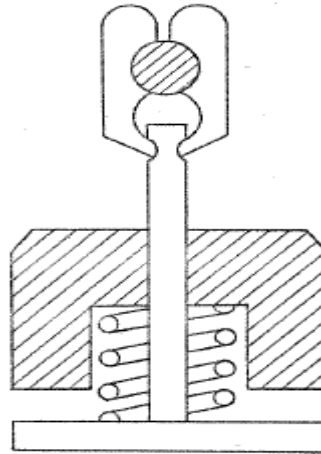
Fonte: LABEGALINI R. P; LABEGALINI A. J; FUCHS D. R.; ALMEIDA T. M. PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO, 2º ED. 1992.

5.5 – Amortecedor de Impacto (Massa-mola)

Como indica o nome é um dispositivo que apresenta uma massa suportada por uma mola que desliza sobre uma barra com uma plataforma de impacto no seu inferior Figura 11.

A vibração da barra com o cabo condutor e a massa comprimem e descomprimem a mola alternadamente, com grandes amplitudes, a dissipação da energia ocorre neste impacto.

Figura 11: Amortecedor Massa-mola

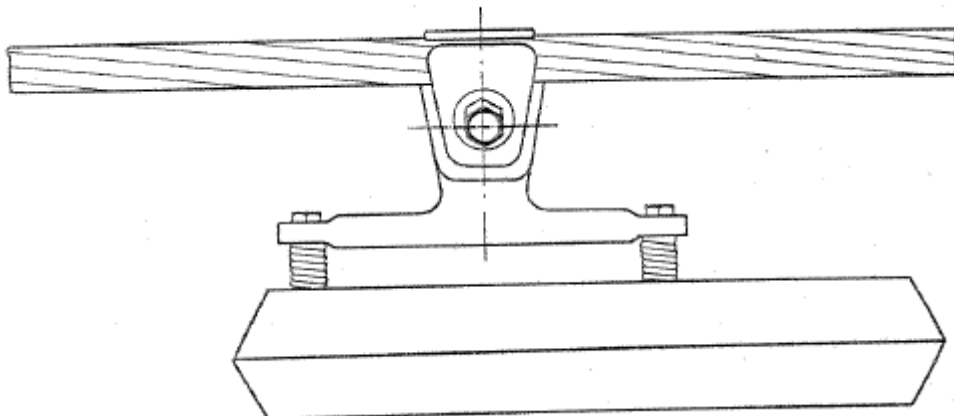


Fonte: LABEGALINI R. P; LABEGALINI A. J; FUCHS D. R.; ALMEIDA T. M. PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO, 2º ED. 1992.

5.6 – Amortecedor Bouche

Equipamento que é formado por uma massa de concreto e duas molas helicoidais Figura 12.

Figura 12: Amortecedor Bouche



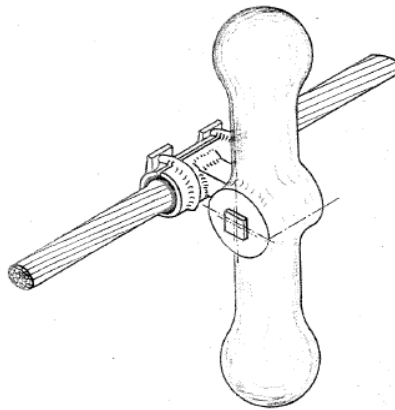
Fonte: LABEGALINI R. P; LABEGALINI A. J; FUCHS D. R.; ALMEIDA T. M. PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO, 2º ED. 1992.

5.7 – Amortecedor Haltere ou torcional

É um dispositivo cujo funcionamento se baseia em a torção do condutor, tendo seu movimento amortecido por discos de fricção Figura 13. A vibração torcional do condutor viabiliza o equipamento introduzir um amortecimento na direção da torção.

As análises realizadas com a disposição desse tipo de amortecedor, indica que, o emprego de dois amortecedores possibilita uma proteção adequada contra falhas por fadiga originadas das vibrações eólicas.

Figura 13: Amortecedor Torsional

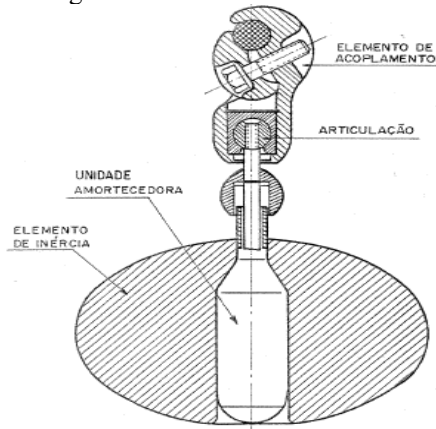


Fonte: LABEGALINI R. P; LABEGALINI A. J; FUCHS D. R.; ALMEIDA T. M. PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO, 2º ED. 1992.

5.8 – Amortecedor Linear

Dispositivo que apresenta um elemento de inércia com uma unidade amortecedora central, fixada ao condutor através de um elemento articulado. O amortecedor é constituído de uma mola, que atua dentro de sua faixa linear e cilindro com pistão e fluido, gerando um amortecimento viscoso Figura 14. Devido aos valores empregados não se encontram mais este tipo de dispositivo fabricados no Brasil.

Figura 14: Amortecedor Linear



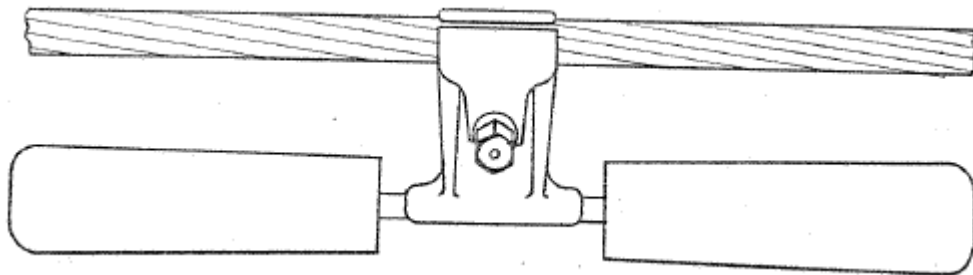
Fonte: LABEGALINI R. P; LABEGALINI A. J; FUCHS D. R.; ALMEIDA T. M. PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO, 2º ED. 1992.

5.9 – Amortecedor Stockbridge

É constituído por duas massas em inércia acopladas nos extremos de um cabo flexível chamado cabo mensageiro, que se encontra fixado a um grampo para fixação no cabo condutor Figura 15.

Sua forma de dissipação de energia ocorre através do amortecimento histerético fornecido pelo material dos fios componentes da cordoalha e coulumbiano, proporcionados pela fricção entre os fios quando ocorre a oscilação da massa do dispositivo.

Figura 15: Amortecedor Stockbridge

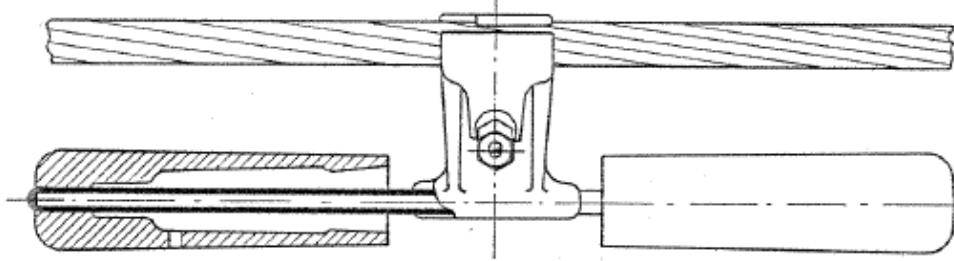


Fonte: LABEGALINI R. P; LABEGALINI A. J; FUCHS D. R.; ALMEIDA T. M. PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO, 2º ED. 1992.

5.10 – Amortecedor Dulmison ES-1

Uma nova disposição do amortecedor Stockbridge, é composto de um completo envolvimento do cabo mensageiro com uma camada de neopreno. O corpo do dispositivo e seu grampo são acoplados ao cabo mensageiro sobre a camada de neopreno, sua diferenciação e de que apresenta uma nova técnica de isolamento e absorção das vibrações no condutor Figura 16.

Figura 16: Amortecedor Dulmison ES-1

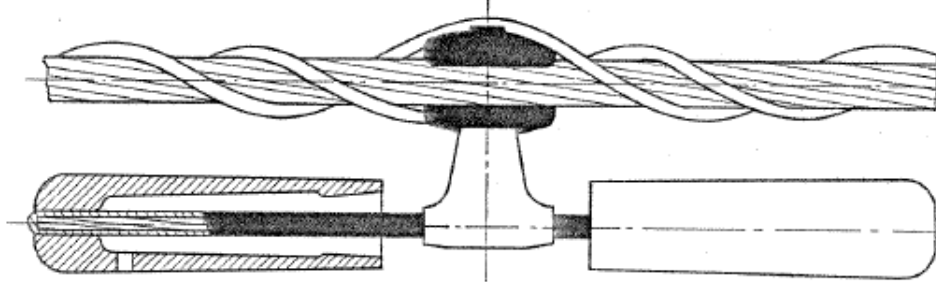


Fonte: LABEGALINI R. P; LABEGALINI A. J; FUCHS D. R.; ALMEIDA T. M. PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO, 2º ED. 1992.

5.11 – Amortecedor Dulmison ES-2

Esta nova disposição apresenta outra composição “sanduiche” de elastômero localizada entre o condutor e a armação pré-formada substituindo a convencional presilha, a dissipação da energia ocorre nos seus dois” sanduiches” através de amortecimento viscoso juntamente ao amortecimento coulombiano, a presença de armaduras pré-formadas diminui as falhas por fadiga do material junto ao ponto de fixação Figura 17.

Figura 17: Amortecedor Dulmison ES-2.

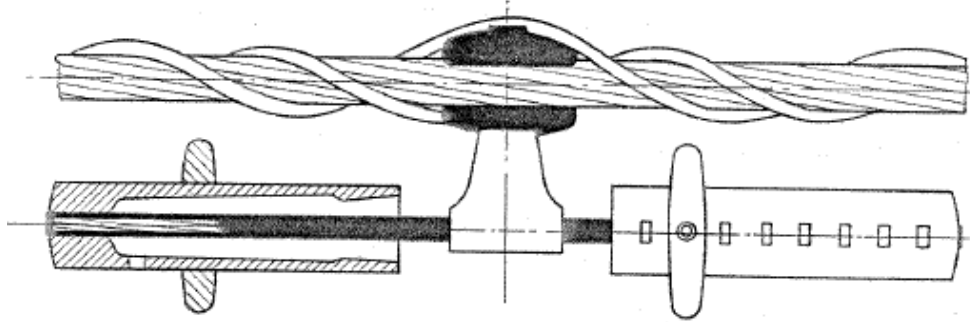


Fonte: LABEGALINI R. P; LABEGALINI A. J; FUCHS D. R.; ALMEIDA T. M. PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO, 2º ED. 1992.

5.12 Amortecedor Varispond Dulmison

Diferencia-se do amortecedor Dulmison ES-2 em apresentar duas massas toroidais, ajustáveis sobre o corpo principal proporcionando a obtenção de mais quatro frequências de ressonância Figura 18, torna-se vantajoso pois consegue atuar em diferentes níveis de frequência de acordo com as características da vibração da linha.

Figura 18: Amortecedor Varispond Dulmison.

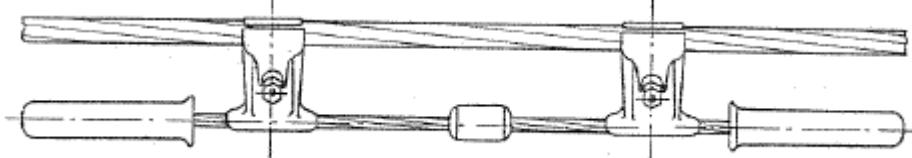


Fonte: LABEGALINI R. P; LABEGALINI A. J; FUCHS D. R.; ALMEIDA T. M. PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO, 2º ED. 1992.

5.13 – Amortecedor Haro

Dispositivo de estruturação variante do amortecedor Stockbridge é constituído de três massas vinculadas por um cabo e conectado ao cabo condutor por duas presilhas Figura 19, tem como característica a presença de cinco frequências de ressonância.

Figura 19: Amortecedor Haro

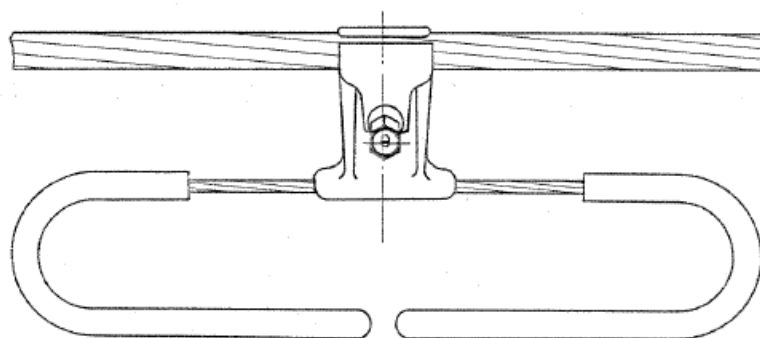


Fonte: LABEGALINI R. P; LABEGALINI A. J; FUCHS D. R.; ALMEIDA T. M. PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO, 2º ED. 1992.

5.14 – Amortecedor “Vibless”

Resultante da modificação do amortecedor Stockbridge, suas massas inerciais são tubos cilíndricos curvados para baixo Figura 20.

Figura 20: Amortecedor “Vibeless”

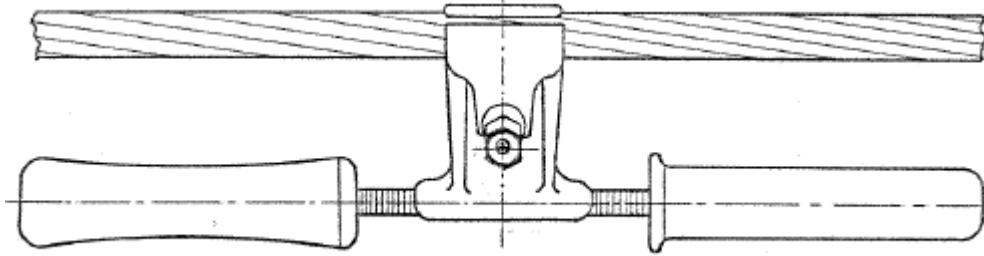


Fonte: LABEGALINI R. P; LABEGALINI A. J; FUCHS D. R.; ALMEIDA T. M. PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO, 2º ED. 1992.

5.15 – Amortecedor Salvi 4-R

Apresenta diversos comprimentos de cabo mensageiro e massas de geometria diferentes em cada extremo do grampo de suporte Figura 21, tem como característica a presença de quatro frequências de ressonância.

Figura 21: Amortecedor Salvi 4-R

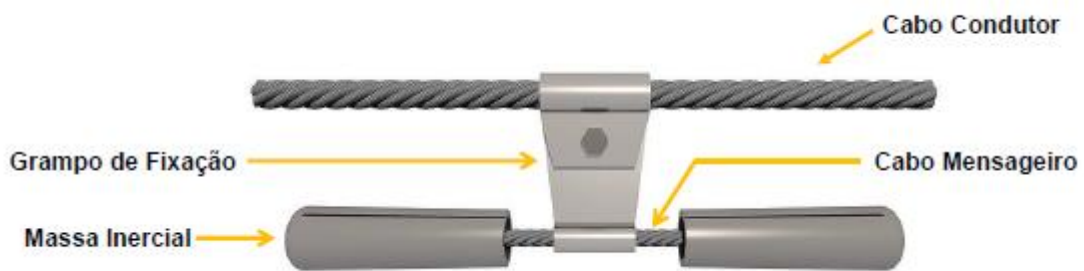


Fonte: LABEGALINI R. P; LABEGALINI A. J; FUCHS D. R.; ALMEIDA T. M. PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO, 2º ED. 1992.

6 ANÁLISE AMORTECEDOR STOCKBRIDGE

O amortecedor Stockbridge possui este nome devido ao seu desenvolvedor George H. Stockbridge, este dispositivo apresenta duas massas inerciais presas por cabo flexível, chamado cabo mensageiro, este fixado a um grampo no cabo condutor Figura 22.

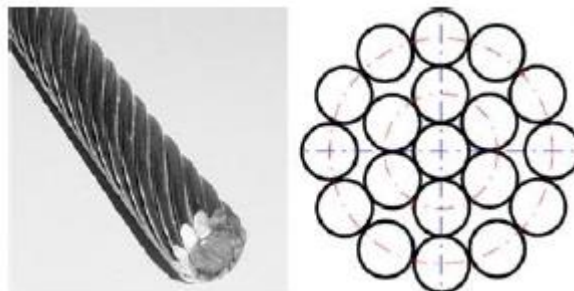
Figura 22: Amortecedor Stockbridge.



Fonte: LABEGALINI R. P; LABEGALINI A. J; FUCHS D. R.; ALMEIDA T. M. PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO, 2º ED. 1992.

As características mecânicas como as massas e o cabo mensageiro normalmente são feitas de aço galvanizado. Onde o cabo mensageiro é constituído de uma alma maciça de aço envolto por fios de aço Figura 23.

Figura 23: Constituição cabo mensageiro.



Fonte: LABEGALINI R. P; LABEGALINI A. J; FUCHS D. R.; ALMEIDA T. M. PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO, 2º ED. 1992.

Sua utilização é habitualmente empregada para o controle das vibrações eólicas (vibrações provocadas pela ação do vento) em LTs Figura 24.

Figura 24: Utilização do amortecedor Stockbridge em uma LT.



Fonte: Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão.

A dissipação de energia mecânica ocorre através dos mecanismos de atrito de Coulomb entre os fios da cordoalha e o atrito gerado pela deformação a flexão.

Este dispositivo se torna vantajoso em relação a outros principalmente por seus fatores de simples construção, o baixo valor de custo, a facilidade de fabricação, sua livre manutenção, ação independente da temperatura e sua eficiência na redução de vibrações eólicas no ponto fixador e na região entre as frequências de ressonância. Sua principal desvantagem em relação a alguns dispositivos empregados é sua curta banda de frequência de ação.

6.1 – Funcionamento do dispositivo

A exposição das linhas de transmissão a ação do vento pode ser representada pela Equação 3 e Equação 4:

$$F_e(t) = \frac{1}{2} c_p v^2 A \sin(\omega t) \quad (3)$$

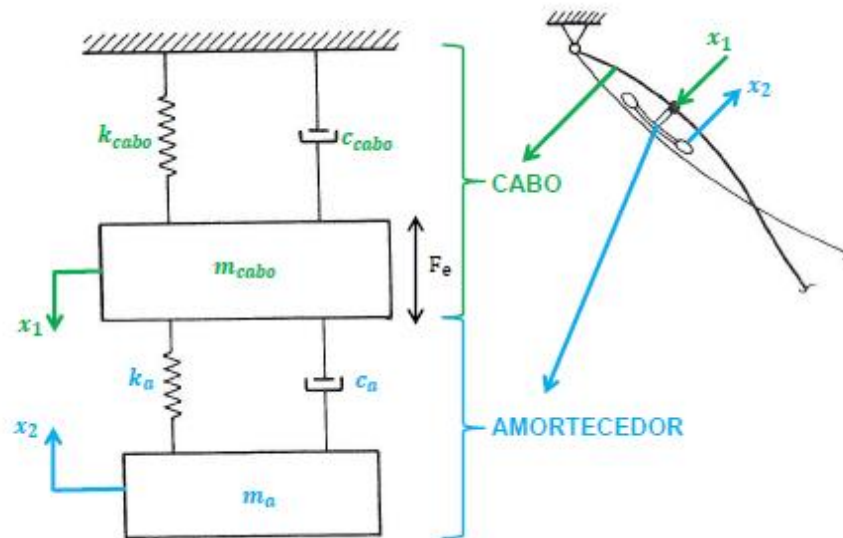
$$F_e(t) = \frac{1}{2} c_p v^2 A \sin(2\pi f_s t) \quad (4)$$

Considerando que: v é a velocidade do vento [m/s]; f_s é a variação na frequência de formação de vórtices [Hz], ω_s é a frequência de excitação no cabo condutor [Hz] e F_e é a força de elevação que o desloca [N/m] em relação ao tempo.

Ao alcançar a frequência natural do cabo, a frequência de excitação faz com que esta frequência entre em ressonância, onde as amplitudes de deslocamento são elevadas Figura 25, dessa maneira, atingindo amplitudes mais críticas. Em longa duração de tempo, essas amplitudes são causadoras de rupturas devido a fadiga por flexão e por abrasão nos pontos de ancoragem da LT Equação 5.

Visando reduzir os efeitos das vibrações eólicas, empregam-se amortecedores do tipo Stockbridge, buscando minimizar as amplitudes de vibração.

Figura 25: Modelo conjunto cabo condutor e amortecedor.



Fonte: LABEGALINI R. P; LABEGALINI A. J; FUCHS D. R.; ALMEIDA T. M. PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO, 2º ED. 1992.

Onde:

K_{cabo} : Constante de rigidez do cabo;

C_{cabo} : Constante de amortecimento viscoso do cabo;

M_{cabo} : Massa do cabo [Kg];

K_a : Constante de rigidez do amortecedor;

C_a : Constante de amortecimento viscoso do amortecedor;

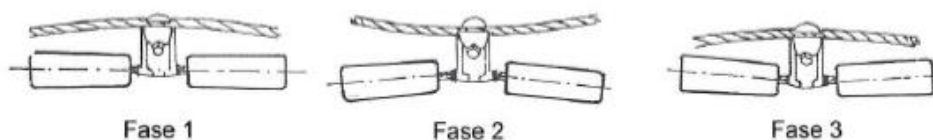
M_a : Massa do amortecedor [Kg];

X_1 : Deslocamento do cabo [m];

X_2 : Deslocamento do amortecedor [m].

Sendo assim, a força de elevação F_e juntamente da frequência de excitação ω_s promovem os deslocamentos no cabo condutor Figura 26 e como consequência também no amortecedor fixado.

Figura 26: Fases amortecedor Stockbridge

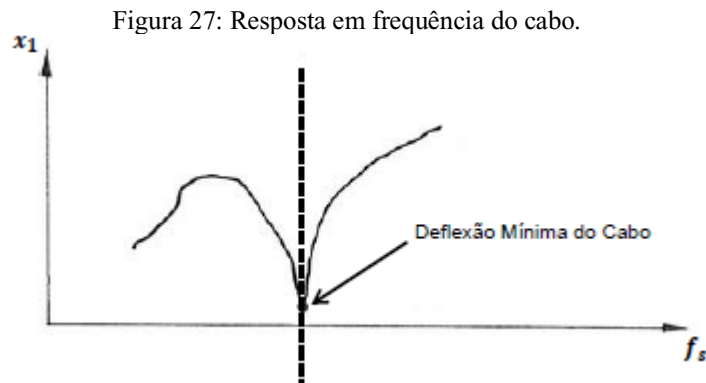


Fonte: LABEGALINI et al, (1992)

Seu funcionamento é obtido pela inercia gravitacional ao movimento, dividindo-se em três fases sequenciais as vibrações:

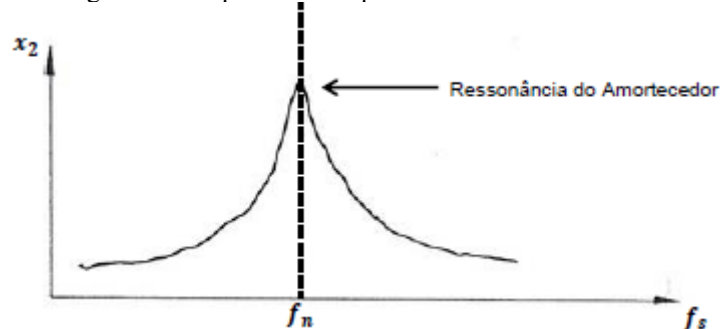
- Primeira fase: o cabo condutor é flexionado para baixo, entretanto, o amortecedor mante sua posição devido a inercia em que esta;
- Segunda fase: o cabo condutor é flexionado para cima e o amortecedor, saindo do seu estado de inercia estática e adquirindo energia cinética, movimenta-se ao sentido contrário;
- Terceira fase: o cabo condutor retorna a posição negativa, entretanto, o amortecedor, devido a energia cinética obtida do condutor, é flexionado para cima.

As frequências geradas pelos deslocamentos do ponto de fixação do cabo e do amortecedor Figura 27:



Fonte: LABEGALINI et al, (1992).

Figura 28: Resposta em frequência do amortecedor.



Fonte: LABEGALINI et al, (1992).

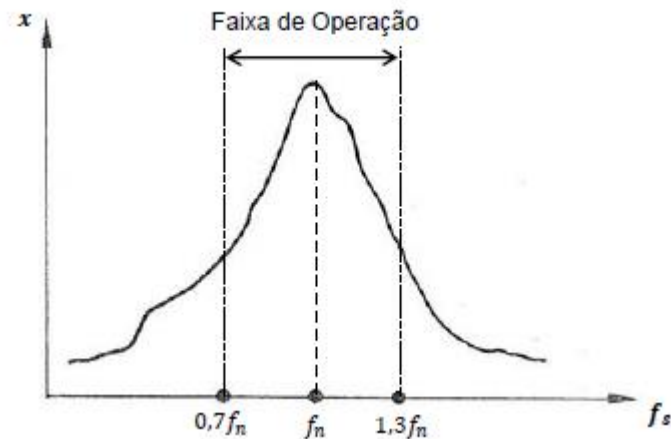
Analisando o ponto de fixação do amortecedor a deflexão atinge o menor nível enquanto que a deflexão do cabo mensageiro atinge seu ponto máximo, este fenômeno é consequência das características de projeto do amortecedor que apresenta sua frequência natural seja igual a frequência de ressonância, desta maneira, na condição de ressonância, o cabo condutor e o amortecedor Stockbridge apresentam amplitudes em seus níveis máximo, entretanto com

sentidos de deslocamento contrário, promovendo a redução das amplitudes de vibração e por consequência minimizando os danos causados pelas vibrações no condutor.

Introduzindo o dispositivo ao cabo condutor são geradas duas novas frequências naturais no sistema, onde o intervalo entre as frequências geradas representa a faixa de operação em que o amortecedor é eficiente, porque é nessa faixa em que as amplitudes do cabo condutor são reduzidas.

A faixa de operação do amortecedor Stockbridge varia entre 70% a 130% da frequência natural do cabo Figura 29.

Figura 29: Frequência em que atua o Stockbridge.



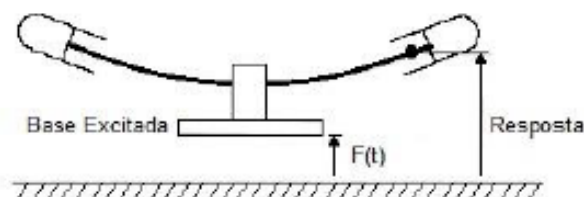
Fonte: LABEGALINI et al, (1992).

6.2 – Modelagem do amortecedor Stockbridge

As modelagens dos dispositivos são realizadas através de ensaios em laboratórios visando obter seu grau de eficiência, estes ensaios levantam as curvas características para a resposta em frequência ou energia absorvida em um ciclo Figura 30.

O objetivo principal desses estudos é a interação entre o dispositivo e a LT, onde a determinação da força total exercida pelo amortecedor sobre a linha e as condições de instalação.

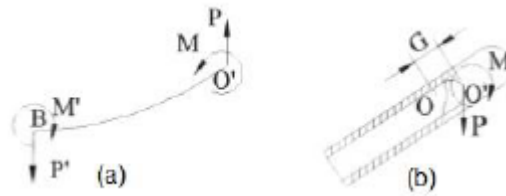
Figura 30: Excitação do amortecedor Stockbridge



Fonte: LÓPEZ; VENEGAS (2001)

As excitações exercidas na base do dispositivo Figura 31 resultam em forças em si.

Figura 31: Diagrama de corpo livre do cabo e da massa do amortecedor Stockbridge



Fonte: LÓPEZ; VENEGAS (2001)

Onde:

B: Extremo do cabo mensageiro conectado a base excitada;

\hat{O} : Extremo do cabo mensageiro conectado a massa suspensa;

O: Centro de gravidade (CG) da massa suspensa;

G: Distância entre o CG e a extremidade \hat{O} [m].

Considerando que as alterações da base e da massa suspensa são de valores pequenos, obtêm-se a seguinte Equação 5:

$$[M] \{\ddot{D}\} + [C] \{\dot{D}\} + [K] \{D\} = \{F(t)\} \quad (5)$$

De maneira que $[M]$, $[C]$ e $[K]$ representam as matrizes de inércia, amortecimento e rigidez, respectivamente, e apresentando também, $\{\ddot{D}\}$ e $\{F(t)\}$ [N/m] determinam os vetores deslocamento e força de excitação harmônica, respectivamente.

A principal forma de dissipação de energia do cabo mensageiro é o amortecimento histerético que é resultante do amortecimento viscoso equivalente. Sendo assim, os componentes das matrizes podem ser descritos como demonstrada na Equação 6:

$$c_{ij} = \frac{\eta}{\omega} k_{ij} \quad (6)$$

Onde η é o fator de perda devido ao amortecimento histerético no cabo mensageiro, c_{ij} representa o elemento da matriz amortecimento, k_{ij} , o elemento da matriz rigidez e ω a frequência de excitação.

A Equação 4 pode ser alterada e reescrita como a Equação 7:

$$[M] \{\ddot{D}\} + (1+\eta i) [K] \{\dot{D}\} = \{F(t)\} \quad (7)$$

A rigidez complexa do sistema $[K]$ pode ser definida pela seguinte Equação 8:

$$[k^*] = (1+\eta i) [K] \quad (8)$$

A relação de proporcionalidade entre rigidez e o modulo de Young pode ser traduzida por Equação 9 e Equação 10:

$$[k] = EI_0[A] \quad (9)$$

$$[k] = EI [A] \quad (10)$$

De forma que EI [N/mm²] representa a rigidez a flexão complexa, EI_0 [N/mm²] a rigidez a flexão e $[A]$ a matriz de elementos de rigidez constantes.

Ao substituir a Equação 8 e Equação 7 na Equação 6, obtêm-se a Equação da rigidez flexão complexa definidas na Equação 11, Equação 12 e Equação 13:

$$[k^*] = (1+\eta i) [K] \quad (11)$$

$$EI [A] = (1+\eta i) EI_0[A] \quad (12)$$

$$EI = (1 + \eta i)EI_0 \quad (13)$$

Realizando as alterações matemáticas de Equação 9 em Equação 8, tem como resultante a seguinte Equação 14:

$$[k^*] = (1+\eta i) EI_0[A] \quad (14)$$

Por fim, ao substituir a Equação 10 na Equação 5 é gerada a seguinte Equação 15:

$$[M]\{\ddot{D}\} + (1+\eta i) EI_0[A]\{\dot{D}\} = \{F(t)\} \quad (15)$$

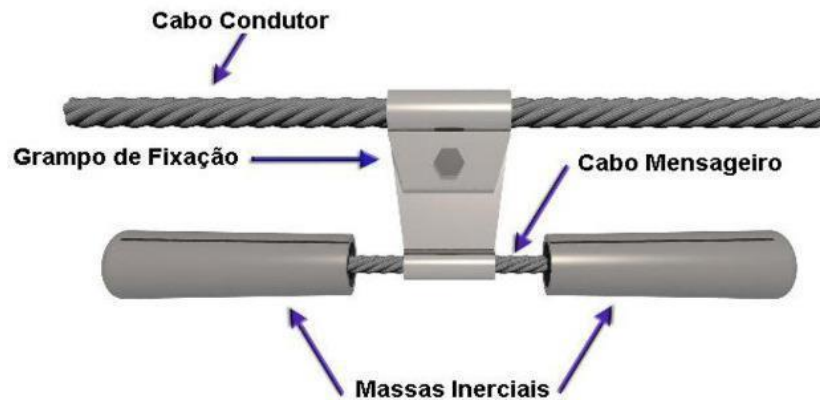
6.3 – Tipos de amortecedores Stockbridge

Os principais tipos de amortecedores Stockbridge são: simétrico, assimétrico e dogbone.

6.3.1. - Amortecedor Stockbridge Simétrico

O dispositivo Stockbridge do tipo simétrico é considerado o mais simples devido a presença de massas inerciais idênticas e seu acoplamento é realizado na região central do cabo mensageiro Figura 32. Apresenta duas frequências naturais de vibração, frequências estas que quando atuando nessa faixa apresenta mais eficiência de absorção de vibração.

Figura 32: Amortecedor Stockbridge do tipo simétrico.



Fonte: LABEGALINI R. P; LABEGALINI A. J; FUCHS D. R.; ALMEIDA T. M. PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO, 2º ED. 1992.

6.3.2. – Amortecedor Stockbridge Assimétrico

Sua composição apresenta duas massas diferentes e seu cabo mensageiro é dividido pelo grampo de fixação de maneira assimétrica Figura 33, como resultado desta fixação este dispositivo atua quatro frequências naturais diferentes de vibração, onde duas frequências estão relacionadas a massa maior e as outras frequências relacionadas as massas menores, por consequência se torna mais vantajoso e eficiente quando comparado ao amortecedor Stockbridge do tipo simétrico pois atua em maior faixa de frequência.

Figura 33: Amortecedor Stockbridge do tipo assimétrico.



Fonte: Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão.

6.3.3. – Amortecedor Stockbridge Dogbone

Este dispositivo tem características semelhantes ao Stockbridge simétrico, devido a simetria das massas em relação ao cabo mensageiro, entretanto suas massas inerciais não estão presentes no eixo axial do amortecedor Figura 34, desta maneira o amortecedor Stockbridge tipo dogbone

apresenta mais uma frequência natural torcional, sendo assim, atuando em três frequências naturais de vibração.

Figura 34: Amortecedor Stockbridge do tipo dogbone.



Fonte: Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão.

7 CONCLUSÃO

A constante expansão do sistema elétrico brasileiro resultou em diversas transformações na realização da distribuição de energia elétrica no País, onde tornou-se essencial o emprego de novas tecnologias para o atendimento da demanda requisitada. É indispensável a análise profunda relacionados a estudos de alocação de recursos e equipamentos que serão empregados nos projetos, de maneira que se torna fundamental o cumprimento de etapas para que se analise previamente os impactos que podem ocorrer no sistema.

Analisando as características físicas destes sistemas de transmissão, observou-se que estão expostos a diversas formas de distúrbios, como por exemplo as vibrações. Ao decorrer do tempo estas ações atmosféricas tornam-se danosas afetando diretamente nas características físicas dos componentes presentes nas linhas de transmissão de energia elétrica, esta fadiga compromete o sistema de transmissão por completo, sendo assim necessário a execução de manutenções constantes, dessa forma elevando os custos do projeto e diminuindo a segurança e confiabilidade do projeto.

Em vista a reduzir os distúrbios presentes nas LTs empregam-se diferentes tipos de dispositivos mecânicos sendo os principais os amortecedores de vibração, aqueles que possuem a função de dissipar os distúrbios presente nos condutores, variando suas formas de dissipação. Este projeto apresenta uma diversidade de dispositivos e suas características principais, entretanto, possui o foco nos amortecedores tipo Stockbridge, por apresentar vantagens como: a sua facilidade de construção, baixo custo, facilidade de fabricação, livre de manutenção, ações independentes da temperatura e eficiência.

REFERÊNCIAS

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA (ANEEL) - BANCO DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO.

A.J.S. SILVA, MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIO DE ENERGIA ELÉTRICA EM MÉDIA TENSÃO DO MUNICÍPIO DE IJUÍ, DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM MODELAGEM MATEMÁTICA, UNIJUÍ, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7270:1988 - CABOS DE ALUMÍNIO (CA) E CABOS DE ALUMÍNIO COM ALMA DE AÇO (CAA) PARA FINS ELÉTRICOS.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5349:1997 - ELECTRICAL CONDUCTOR. ANNEALED COPPER CONDUCTOR. BARE COPPER CONDUCTOR. COPPER CABLE.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6756:1987 - FIOS DE AÇO ZINCADO PARA ALMA DE CABO DE ALUMÍNIO

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5422:1972 - PROJETO DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO E SUB-TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.

CACHUTÉ, R. S.; YAMAMOTO, R. R. CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DE UM STOCKBRIDGE PSEUDOELÁSTICO. PROJETO DE GRADUAÇÃO: UNB, 2009.

D. M. WELTON, TRANSMISSION LINES: THEORY, TYPES AND APPLICATION. ELECTRICAL ENGINEERING DEVELOPMENTS, NOVA SCIENCE PUBLISHERS, 2010.

FUCHS, R. D. TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: LINHAS AÉREAS; TEORIA DAS LINHAS EM REGIME PERMANENTE. RIO DE JANEIRO, LIVROS TÉCNICOS E CIENTÍFICOS; ITAJUBÁ, ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA, 1977.

GLOVER, D. J.; MULUKUTIA, S. S.; OVERBYE, J.T. POWER SYSTEM ANALYSIS AND DESIGN, 5TH EDITION, 2010.

KUMAR, R. A.; SOHN, C. H.; GOWDA, B. H. L. PASSIVE CONTROL OF VORTEX-INDUCED VIBRATIONS: AN OVERVIEW, 2008.

LABEGALINI R. P; LABEGALINI A. J; FUCHS D. R.; ALMEIDA T. M. PROJETOS MECÂNICOS DAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO, 2º ED. 1992.

L.H. RESTREPO, G.C. DELGADO, AND F. CASTRO-ARANDA, MODELOS DE LÍNEA DE TRANSMISSION PARA TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS EN SISTEMAS DE POTÊNCIA, REVISTA ENERGÍA Y COMPUTACIÓN.

MARQUES, R. F. A. ESTUDO TEÓRICO E NUMÉRICO DE ABSORVEDORES DINÂMICOS DE VIBRAÇÃO ATIVOS E ADAPTATIVOS. UBERLÂNDIA, 2000.

RAO, S. VIBRAÇÕES MECÂNICAS. PEARSON PRENTICE, 2008.

ZANETTA, L. C. FUNDAMENTOS DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA. 1º EDIÇÃO. EDITORA LIVRARIA DA FÍSICA. 2006. CAPÍTULO 3.