

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM PROJETO E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO

Área de concentração: Projeto e Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado

DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTO PARA
POSICIONAMENTO E FIXAÇÃO DE SISTEMA DE
VIBRAÇÃO UNIDIRECIONAL EM CHAVE
SECCIONADORA DE ALTA TENSÃO

Juliano Wagner Daronch

Passo Fundo

2023



CIP – Catalogação na Publicação

D224d Daronch, Juliano Wagner
Desenvolvimento de procedimento para
posicionamento e fixação de sistema de vibração
unidirecional em chave seccionadora de alta tensão
[recurso eletrônico] / Juliano Wagner Daronch. – 2023.
4 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Prates Mezzomo.
Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de
Fabricação) – Universidade de Passo Fundo, 2023.

1. Processos de fabricação. 2. Chave seccionadora -
Alta tensão. 3. Circuitos elétricos. 4. Medidores
elétricos.
I. Mezzomo, Gustavo Prates, orientador. II. Título.

CDU: 621.3

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO - MESTRADO PROFISSIONAL**

Juliano Wagner Daronch

**DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTO PARA
POSICIONAMENTO E FIXAÇÃO DE SISTEMA DE VIBRAÇÃO
UNIDIRECIONAL EM CHAVE SECCIONADORA DE ALTA
TENSÃO**

Passo Fundo

2023

Juliano Wagner Daronch

**DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTO PARA
POSICIONAMENTO E FIXAÇÃO DE SISTEMA DE VIBRAÇÃO
UNIDIRECIONAL EM CHAVE SECCIONADORA DE ALTA
TENSÃO**

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Prates Mezzomo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo

2023

Juliano Wagner Daronch

**DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTO PARA
POSICIONAMENTO E FIXAÇÃO DE SISTEMA DE VIBRAÇÃO
UNIDIRECIONAL EM CHAVE SECCIONADORA DE ALTA
TENSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 07 de Junho de 2023.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor Gustavo Prates Mezzomo
Orientador

Professor Doutor Charles Leonardo Israel
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Herbert Martins Gomes
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Professor Doutor Márcio Walber
Universidade de Passo Fundo

RESUMO

Ao executar manobras de abertura e fechamento de chaves seccionadoras de alta tensão, pontos quentes nos contatos das chaves podem ser observados quando as manobras destes equipamentos ocorrem de forma inadequada. Para solucionar tal problema, este trabalho consiste em desenvolver um procedimento para encontrar o ponto ótimo de fixação de um sistema de vibração em chaves seccionadoras de alta tensão de abertura vertical para auxílio nas manobras de abertura e fechamento. O estudo baseia-se na patente BR 10 2013020198 7, que tem a proposta de utilizar a vibração mecânica para o auxílio do acréscimo de eficiência do processo de fechamento/abertura de chaves seccionadoras em conjunto do aumento efetivo de segurança da operação, a fim de aumentar a eficiência na operação das manobras dos seccionadores. Para o desenvolvimento do procedimento, foi testado o sistema de vibração em uma chave seccionadora de alta tensão de abertura vertical, sem a passagem de corrente elétrica, instalada no Parque Tecnológico UPFParque, sendo esta utilizada em linhas de 230 kV. Foram utilizados acelerômetros, LVDTs e outros sensores para a realização de ensaios experimentais, onde foram gerados dados para o desenvolvimento do procedimento. Através de medições experimentais, foi verificado que o ponto ótimo de fixação do motovibrador, para o modelo de seccionador testado, é próximo à coluna de isoladores que segura o contato fixo, sendo sua vibração no sentido de aperto dos contatos fixos. Utilizando o LVDT, foi possível medir tempos necessários para o fechamento correto dos contatos quando exposto a vibração harmônica forçada em diferentes frequências. Com tais dados, foi desenvolvido o procedimento de posicionamento e fixação, que foi validado em uma chave seccionadora de alta tensão de abertura vertical dentro de uma subestação de energia elétrica. Desta forma, a utilização de motovibradores unidirecionais para auxílio de manobras em seccionadoras são uma opção de automação para o setor elétrico, podendo ser utilizado nos demais seccionadoras do mesmo formato construtivo com sua base sendo apoiada sobre estruturas metálicas.

Palavras-chave: Motovibrador, Seccionador, Desenvolvimento Experimental, Instrumentação, Acelerômetros.

ABSTRACT

When performing opening and closing maneuvers of high voltage disconnect switches, hot spots on the switch contacts can be observed when the maneuvers of this equipment occur improperly. To solve this problem, this work consists of developing a procedure to find the optimal point of attachment of a vibration system in vertical opening high voltage disconnect switches to aid in opening and closing maneuvers. The study is based on patent BR 10 2013020198 7, which has the proposal to use mechanical vibration to help increase the efficiency of the closing/opening process of disconnecting switches together with the effective increase in operational safety, in order to increase the efficiency in the operation of the switchgear maneuvers. For the development of the procedure, a vibration system was tested in a vertical opening high voltage disconnect switch, without the passage of electric current, installed in the UFPParque Technological Park, which is used in 230 kV lines. Accelerometers, LVDTs and other sensors were used to carry out experimental tests, where data were generated for the development of the procedure. Through experimental measurements, it was verified that the optimal point of attachment of the vibrator motor, for the disconnect model tested, is close to the column of insulators that holds the fixed contact, with its vibration in the direction of tightening the fixed contacts. Using the LVDT, it was possible to measure the times required for the correct closure of contacts when exposed to forced harmonic vibration at different frequencies. With such data, the positioning and fixation procedure was developed, which was validated in a vertical opening high voltage disconnect switch inside an electric power substation. In this way, the use of unidirectional motovibrators to aid in switching switchgear is an automation option for the electrical sector, and can be used in other switchgears of the same constructive format with its base being supported on metallic structures.

Keywords: Motovibrator, Disconnecter, Experimental Development, Instrumentation, Accelerometers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Matriz energética brasileira	13
Figura 2 - Sistema Interligado Nacional.....	14
Figura 3 - Tipos construtivos de chaves seccionadoras de alta tensão.....	20
Figura 4 - Componentes das chaves seccionadoras.....	21
Figura 5 - Mecanismo de acionamento (armário de comando e conjunto motor-reductor)	22
Figura 6 - Componentes de transmissão de movimento de chaves seccionadoras de alta tensão.....	23
Figura 7 - Contato direto e contato com rotação	24
Figura 8 - Problema de aquecimento no contatos da lâmina principal.....	25
Figura 9 - Sistema de vibração massa, mola e amortecedor.....	26
Figura 10 - Resposta a um sistema subamortecido	28
Figura 11- Variação de M e θ em relação a r para diferentes valores de ζ . (a) Variação do fator de amortecimento. (b) Variação do ângulo de fase.....	30
Figura 12 – Assinatura de corrente e vibração de um transformador, antes e após a ocorrência e deformação.....	31
Figura 13 – Sinal analógico (cinza) e sinal digital (preto)	33
Figura 14 - Medição de grandezas físicas	34
Figura 15 - Relação entre aceleração, velocidade e deslocamento.....	35
Figura 16 - Filtro passa baixas ideal.....	36
Figura 17 - Procedimento de testes adotado	38
Figura 18 - Bancada de testes Lintec.....	39
Figura 19 - Seccionador Lorenzetti 242 kV com seus contatos abertos.....	40
Figura 20 - Planos adotados no estudo	41
Figura 21 - Fluxograma dos ensaios.....	42
Figura 22 - Direções de vibração dos contatos. (a) direção X e (b) direção Y.....	42
Figura 23 - Motovibrador utilizado nos ensaios experimentais	44
Figura 24 - Posicionamento do motovibrador, vista superior	46
Figura 25 - Posicionamento do motovibrador, vista isométrica.....	46

Figura 26 – Acelerômetro NK30 posicionado na haste da lâmina principal. (a) direção X, (b) direção Y.....	48
Figura 27 - Posicionamento dos sensores no seccionador.....	49
Figura 28 - Instalação dos acelerômetros para o teste 4. (a) acelerômetro preso ao motovibrador, (b) acelerômetro preso a base da coluna de isoladores do contato fixo, (c) acelerômetro preso ao contato fixo e (d) acelerômetro preso a lâmina principal do contato móvel	49
Figura 29 - Suporte e LVDT instalados	50
Figura 30 - Chave seccionadora de abertura vertical em subestação	51
Figura 31 - Motovibrador posicionado na chave seccionadora dentro da subestação de energia elétrica.....	52
Figura 32 - Resposta em frequência do contato móvel quando excitado com o motovibrador na posição 1	55
Figura 33 - Motovibrador posicionado na posição 1, com vibração na direção X	56
Figura 34 - Gap de abertura entre contato fixo e contato móvel.....	57
Figura 35 - Resposta do LVDT para excitação harmônica forçada de 28,5 Hz.....	58
Figura 36 - Resposta do LVDT para excitação harmônica forçada de 43 Hz.....	59
Figura 37 - Resposta do LVDT para excitação harmônica forçada Teste 2.....	59
Figura 38 - Resposta do LVDT para excitação harmônica forçada Teste 3.....	60
Figura 39 - Resposta do LVDT para excitação harmônica forçada Teste 4, 25 Hz	61
Figura 40 - Resposta do LVDT para excitação harmônica forçada Teste 4, 33 Hz	61
Figura 41 - Resposta do LVDT para excitação harmônica forçada Teste 4, 43 Hz	62
Figura 42 - Posicionamento dos sensores no Teste 4.	63
Figura 43 - Vibração estrutura e motovibrador 25 Hz. Motovibrador (azul), estrutura (vermelho)	63
Figura 44 - Vibração estrutura e motovibrador 33 Hz. Motovibrador (azul), estrutura (vermelho)	64
Figura 45 - Vibração estrutura e motovibrador 43 Hz. Motovibrador (azul), estrutura (vermelho)	65
Figura 46 - Vibração dos contatos, 25 Hz. Contato Fixo (azul), Contato Móvel (vermelho)	65

Figura 47 - Vibração dos contatos, 33 Hz. Contato Fixo (azul), Contato Móvel (vermelho)	66
Figura 48 - Vibração dos contatos, 43 Hz. Contato Fixo (azul).....	66
Figura 49 - Demonstrativo do deslocamento dos contatos.....	68
Figura 50 - Fluxograma orientativo do procedimento de fixação e posicionamento	70
Figura 51 - Formatos construtivo dos seccionadores	71
Figura 52 - Motovibrador posicionado com a carenagem de proteção	73
Figura 53 - Dados coletados da estrutura utilizando 12,3 Hz e 0,520 kg de massa por eixo, motovibrador (azul) e estrutura em Y (vermelho).....	77
Figura 54 - Sinal do contato fixo quando submetido a 12,3 Hz	78
Figura 55 - Resposta dinâmica para excitação de 32,6 Hz e 0,52 kg de massa, motovibrador (azul) e estrutura em Y (vermelho).....	79
Figura 56 - Resposta dinâmica do contato fixo em 32,6 Hz	79
Figura 57 - Sinal do LVDT do Teste 1 sem o filtro passa baixas para a frequência de 28,5 Hz	87

LISTA DE TABELAS

Quadro 1 - Indicação dos componentes das chaves seccionadoras	21
Quadro 2 - Informações de posição do motovibrador para os ensaios	47
Quadro 3 - Posição e direção dos sensores para os testes	48
Quadro 4 - Força produzida pelo motovibrador	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Computer-Aided Design
3D	Três Dimensões
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica
UPFParque	Parque Tecnológico da Universidade de Passo Fundo
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Normas Brasileiras
LINTEC	Laboratório de Inovação Tecnológica
CV	Cavalo-vapor
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
FUPF	Fundação Universidade de Passo Fundo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Justificativa e relevância do estudo.....	16
1.2 Objetivos.....	16
1.3 Organização do trabalho	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Chaves Seccionadoras de Alta Tensão.....	19
2.1.1 Tipos construtivos de chaves seccionadoras	19
2.1.2 Componentes de um seccionador	20
2.1.3 Acionamento das Chaves Seccionadoras de Alta Tensão.....	22
2.1.4 Problemas em chaves seccionadoras de alta tensão	24
2.2 Vibração Mecânica.....	25
2.2.1 Vibração amortecida em sistemas de um grau de liberdade	26
2.2.2 Frequência natural e ressonância	27
2.2.3 Movimento subamortecido	28
2.2.4 Excitação harmônica de sistemas amortecidos	28
2.3 Instrumentação e medição de vibrações mecânicas	30
2.3.1 Equipamentos utilizados para medir vibrações.....	33
2.4 Conclusões da revisão bibliográfica.....	36
3. METODOLOGIA	38
3.1 Procedimento para a realização dos testes experimentais em laboratório	39
3.2 Equipamentos utilizados e posicionamento	43
3.2.1 Motovibrador unidirecional.....	43
3.2.2 Acelerômetros.....	44
3.2.3 LVDT WA-L500	45
3.2.4 Sistema de aquisição de dados ADS1800	45
3.3 Procedimento operacional dos ensaios	45
3.3.1 Posicionamento do motovibrador	46
3.3.2 Posicionamento dos acelerômetros	47
3.3.3 Posicionamento do LVDT	50
3.4 Procedimento para a realização dos testes experimentais em subestação	51
4. RESULTADOS	54

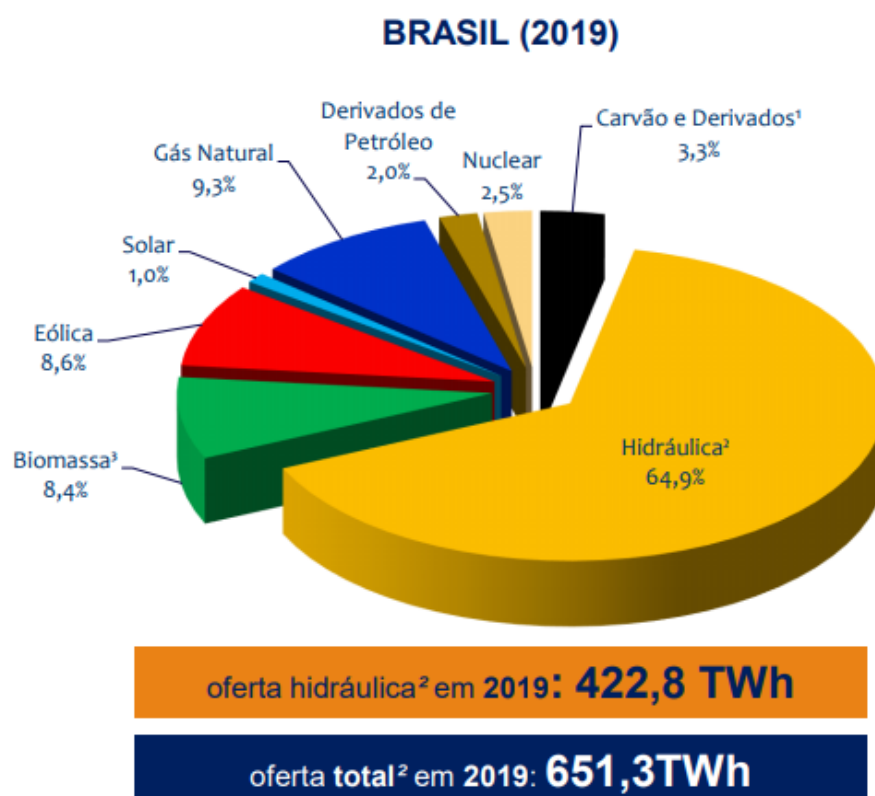
4.1 Resposta em frequência do contato móvel testado em laboratório.....	54
4.2 Resposta do Teste 1 em laboratório	55
4.2.1 Vibração em 28,5 Hz – teste em laboratório	57
4.2.2 Vibração em 43 Hz – teste em laboratório	58
4.3 Resposta do Teste 2 em laboratório	59
4.4 Resposta do Teste 3 em laboratório	60
4.5 Resposta do Teste 4 em laboratório	60
4.6 Acelerações medidas no Teste 4 – testes em laboratório.....	62
4.7 Discussão dos resultados dos ensaios realizados em bancada de testes.....	67
4.8 Procedimento de posicionamento desenvolvido utilizando os ensaios em laboratório.....	69
4.8.1 Fluxograma de instalação do motovibrador linear	69
4.8.2 Passo a passo do procedimento de instalação.....	70
4.8.2.1 Passo 1 - Identificação da chave seccionadora.....	70
4.8.2.2 Passo 2 - Verificação dos desenhos técnicos.....	72
4.8.2.3 Passo 3 - Fixação do suporte do motovibrador.....	72
4.8.2.4 Passo 4 - Posicionamento do motovibrador e fixação.....	73
4.8.2.5 Passo 5 - Instalação da alimentação	74
4.8.2.6 Passo 6 - Verificação das frequências naturais.....	74
4.8.2.7 Passo 7 - Ajustes de massas excêntricas, frequência e temporização	75
4.9 Resultados da validação em um seccionador em funcionamento dentro de uma subestação	76
4.9.1 Ensaio com frequência de 12,3 Hz testado em seccionador energizado	77
4.9.2 Ensaio com frequência de 32,6 Hz testado em seccionador energizado	78
5. CONCLUSÃO.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
AGRADECIMENTOS	86
APÊNDICE A	87

1. INTRODUÇÃO

Avanços tecnológicos proporcionam uma melhora na vida cotidiana das pessoas. Novas tecnologias melhoram processos industriais, aumentando a segurança na execução de tarefas e entregando uma maior agilidade e rapidez na produção. Tais avanços, em grande parte, apenas foram possíveis devido a utilização da energia elétrica.

Para que a energia elétrica chegue até as indústrias, residências e outros, ela inicialmente virá de uma unidade geradora. As unidades geradoras transformam outros tipos de energia em energia elétrica. As mesmas podem vir de fontes renováveis, como a hídrica, eólica, solar, oceânica e biomassa, ou ainda de fontes não renováveis, como combustíveis fósseis, carvão mineral, gás natural e energia nuclear. Na Figura 1, é possível identificar a matriz energética do Brasil no ano de 2019.

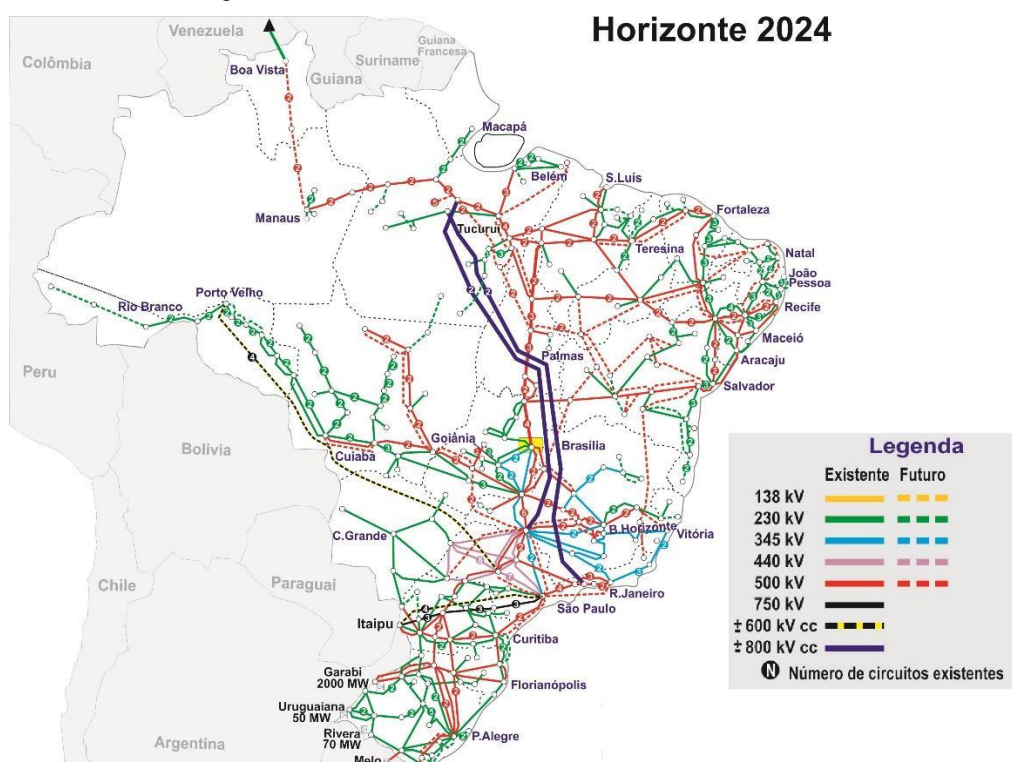
Figura 1 - Matriz energética brasileira



Fonte: EPE, 2020

Após a geração da energia, a mesma passa por diversos equipamentos para adequar os seus níveis, como, por exemplo, os transformadores. Estes podem aumentar ou rebaixar o nível da tensão elétrica. Após a geração, o mesmo tem como finalidade elevar o potencial elétrico para diminuir as perdas nos cabos de eletricidade quando a energia for ser transmitida até as subestações. Na Figura 2, é apresentada a expectativa do Sistema Interligado Nacional para 2024.

Figura 2 - Sistema Interligado Nacional



Fonte: adaptado de Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2022

Após a transmissão, em elevado nível de tensão, a eletricidade é rebaixada para níveis de distribuição dentro das subestações e então distribuídas pelas cidades. Após é rebaixada novamente em pequenos transformadores, para que a eletricidade possa chegar até as residências em níveis comumente utilizáveis.

Durante todo esse trajeto, a eletricidade passa por diversas subestações de energia elétrica, que conta com diversos equipamentos como os transformadores de potencial, transformadores de corrente, para-raios, disjuntores de alta tensão, chaves seccionadoras e outros.

As chaves seccionadoras de alta tensão têm como função interromper ou alterar o fluxo da corrente elétrica, permitindo assim, possíveis manutenções caso ocorra algum problema nas linhas de transmissão e distribuição ou até mesmo em equipamentos dentro das subestações.

As chaves possuem duas posições, sendo elas aberta ou fechada. Na posição aberta, a chave seccionadora interrompe o fluxo da corrente de um de seus contatos ao outro, enquanto na posição fechada, a mesma permite a passagem da corrente. (MAMEDE FILHO, 2022)

O problema presente neste equipamento é visualizado quando as manobras de fechamento ocorrem de forma inadequada, podendo gerar pontos quentes. Tal problema será mais bem retratado na seção de revisão bibliográfica. Para evitar tais problemas Rocha (2014) propôs, em seu estudo, um equipamento auxiliar para os seccionadores, que ao adicionar vibração aos contatos, faz com que a manobra ocorra com mais eficácia, diminuindo a resistência elétrica dos terminais e evitando estes pontos quentes.

Através deste estudo, a Fundação Universidade de Passo Fundo (FUPF) e a Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) obtiveram o direito à exploração da patente BR 10 2013 020198 7. Através da patente, a FUPF junto a CEEE foram contemplados fundos para pesquisa através de recursos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), onde foi desenvolvido um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D). Neste estudo, Setti (2020) avaliou de forma experimental, em uma bancada de testes sem a passagem de eletricidade pelo equipamento, o afrouxamento dos parafusos quando expostos a vibração, as frequências que auxiliavam o fechamento correto do seccionador, a tensão mecânica e a deformação dos componentes do seccionador quando expostos a vibração. Por outro lado, Rech (2019) realizou a engenharia reversa de dois modelos de chaves seccionadoras de alta tensão, analisando pelo método de elementos finitos o comportamento dinâmico do seccionador quando exposto a tal vibração. Com isto, neste trabalho, é dada continuidade a pesquisa de Rocha (2014), Setti (2020) e Rech (2019), onde foi desenvolvido o quesito de posicionamento do sistema motovibrador em uma chave seccionadora de alta tensão de abertura vertical, na qual foram feitos testes experimentais e levantados dados para posteriormente serem testados em uma chave seccionadora de alta tensão, também de abertura vertical, dentro de uma subestação de energia elétrica.

1.1 Justificativa e relevância do estudo

O presente tema proposto consiste no desenvolvimento de um procedimento para posicionamento e fixação de um dispositivo de vibração mecânica, que tem por objetivo mitigar um dos principais problemas em chaves seccionadoras de alta tensão e aumentar a confiabilidade das manobras de abertura e fechamento das chaves, alcançando elevados níveis de segurança operacional.

Por se tratar de um sistema de vibração desenvolvido na Universidade de Passo Fundo em parceria com a Companhia Estadual de Energia Elétrica, o mesmo já foi tema de 6 dissertações de mestrado, onde foram feitas análises da possibilidade de utilizar a vibração neste equipamento. Foram feitas simulações e testes experimentais para verificar a integridade física das chaves seccionadoras quando submetidas à vibração e foram aplicadas metodologias para o desenvolvimento do sistema de vibração. Porém, não foi desenvolvido o quesito de posicionamento do sistema de vibração nas estruturas das chaves seccionadoras de alta tensão, visando um maior aproveitamento das forças geradas pelo sistema de vibração mecânica. Desta forma, o trabalho está focado em apresentar um procedimento para a instalação do sistema motovibrador em chaves seccionadoras de alta tensão de abertura vertical.

Ainda vale ressaltar o apelo econômico, que ao utilizar o sistema de vibração para auxiliar as manobras dos seccionadores, será possível reduzir as equipes de verificação de operação necessárias junto ao seccionador quando o mesmo é manobrado, permitindo que as manobras ocorram de forma desassistida.

1.2 Objetivos

O objetivo geral desse estudo é desenvolver um procedimento padrão de posicionamento para fixar o motovibrador nas estruturas de chaves seccionadoras de forma funcional, para auxiliar no fechamento dos contatos, que tem por base medições experimentais, feitas em seccionadores não energizados.

É também de interesse, desenvolver objetivos específicos, como:

- Realizar ensaios para a validação do correto funcionamento do sistema de vibração proposto por Oliveira (2023), o qual foi fabricado e utilizado para os demais testes;

- Validar uma posição de instalação do sistema de vibração para a realização de testes. Conforme a norma ABNT NBR IEC 60694 (2006), qualquer dispositivo auxiliar deve ser instalado abaixo da cadeia de isoladores de alta tensão;
- Validar a fixação do sistema de vibração na estrutura sem a necessidade de alteração da estrutura, como por exemplo, furação para união parafusada;
- Verificar o comportamento dos contatos quando expostos à vibração harmônica forçada, onde através de acelerômetros será verificada a diferença de aceleração entre os contatos móvel e fixo;
- Realizar ensaios em bancada de testes, para medição de deslocamento linear dos contatos fixo e móvel do seccionador objeto de estudo. Desta forma, verifica-se o encaixe dos contatos quando expostos a vibração;
- Validar o procedimento de fixação do sistema de vibração em chaves seccionadoras de alta tensão de abertura vertical instaladas em subestações de energia elétrica em funcionamento.

1.3 Organização do trabalho

A presente pesquisa encontra-se dividida em cinco capítulos principais, abordando os temas pertinentes para o desenvolvimento do procedimento de posicionamento e fixação do sistema de vibração unidirecional em chaves seccionadoras de alta tensão. A organização da pesquisa é composta pelos capítulos de introdução, revisão bibliográfica, metodologia, resultados e conclusão.

O capítulo 1 adentra a introdução da pesquisa trazendo uma contextualização mais geral sobre o sistema elétrico brasileiro, com as temáticas do problema de pesquisa, justificativa e relevância de estudos e também os objetivos, geral e específicos.

No capítulo 2 são apresentadas as principais fundamentações teóricas utilizadas para a concepção da pesquisa, exibindo conceitos aprofundados dos assuntos de, chaves seccionadoras de alta tensão, vibração mecânica, instrumentação e medição de vibração.

O capítulo 3 apresenta a construção metodológica aplicada para o desenvolvimento do procedimento de fixação e posicionamento do sistema de vibração. O capítulo aponta os equipamentos utilizados na pesquisa e como pretende utilizá-los

para a realização das medições na bancada de testes, que também é apresentada neste capítulo.

No capítulo 4 são apresentados os dados obtidos nos testes executados, onde é apontada a eficiência da utilização da vibração mecânica através dos dados de um LVDT. Também é apresentado o procedimento de posicionamento e fixação do motovibrador na estrutura das chaves seccionadoras de alta tensão. Por fim, são apresentados os resultados da aplicação do procedimento em uma chave seccionadora em funcionamento dentro de uma subestação de energia elétrica.

O capítulo 5 traz a conclusão da pesquisa, validando os passos efetuados para a elaboração do projeto. Também avalia se os objetivos específicos foram atendidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seção de revisão bibliográfica está subdividida nas principais áreas relacionadas ao trabalho. Inicialmente será abordado sobre as chaves seccionadoras de alta tensão. Na sequência, será abordado sobre o conceito de vibração mecânica. Por fim, é feita uma revisão sobre instrumentação, abordando sobre acelerômetros, LVDTs e amplificadores de sinais.

2.1 Chaves Seccionadoras de Alta Tensão

Nesta seção serão abordados sobre os tipos construtivos de chaves seccionadoras de alta tensão. Em seguida são apresentados os componentes presentes nos seccionadores. Na sequência, apresenta-se o mecanismo de acionamento das chaves e como são feitas as manobras de abertura e fechamento. Por fim, são retratados alguns aspectos encontrados na literatura sobre o problema deste equipamento em geral.

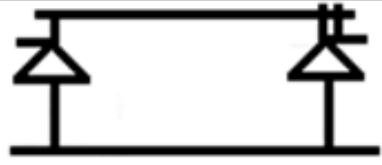

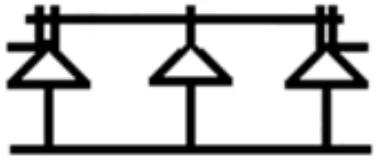
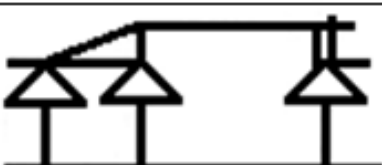
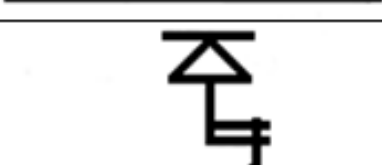

2.1.1 Tipos construtivos de chaves seccionadoras

Chaves seccionadoras de alta tensão, de acordo com a norma ABNT NBR 62271 (2020), são dispositivos mecânicos de manobra, que na posição aberta assegura uma distância de isolamento e na posição fechada mantém a continuidade do circuito elétrico, nas condições especificadas.

As chaves seccionadoras podem ser fabricadas de diversas formas, tendo diferentes tamanhos e formatos, sendo estes dependentes do nível de tensão a transmitir ou isolar, nível de corrente elétrica a conduzir, a disposição do espaço para o seccionador dentro da subestação, entre outros fatores. Na Figura 3, são apresentados os tipos construtivos de seccionadores conforme a norma ABNT NBR 7571.

Como pode ser verificado na imagem, as chaves apresentam diversos formatos, com abertura para cima, abertura horizontal e abertura para os lados. Desta forma, o modelo a ser instalado depende do layout e disposição dos equipamentos dentro de uma subestação de energia elétrica.

Figura 3 - Tipos construtivos de chaves seccionadoras de alta tensão

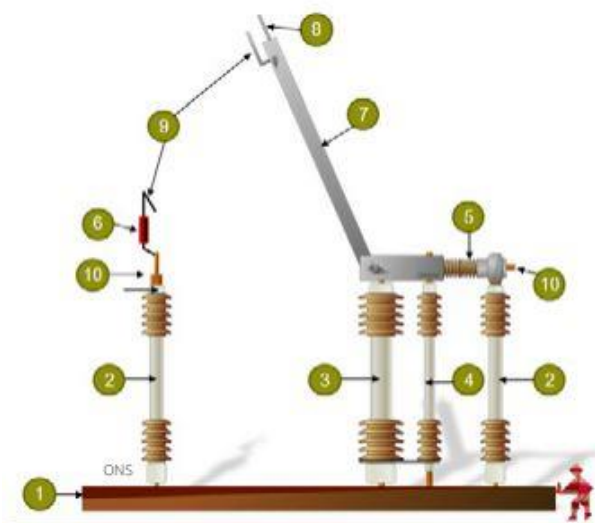
Descrição	Código	Diagrama
Abertura Lateral	AL	
Abertura Central	AC	
Dupla Abertura	DA	
Abertura Vertical	AV	
Vertical Reverso	VR	
Faca	FC	

Fonte: adaptado de ABNT NBR 7571

2.1.2 Componentes de um seccionador

Com o intuito de melhorar o entendimento sobre as partes das chaves seccionadoras de alta tensão e do que elas são formadas, a seguir, são apresentados os componentes construtivos de uma chave seccionadora de alta tensão na Figura 4 e sua nomenclatura é indicada no Quadro 1.

Figura 4 - Componentes das chaves seccionadoras



Fonte: Daronch (2019)

Quadro 1 - Indicação dos componentes das chaves seccionadoras

Número	Componente
1	Base
2	Coluna fixa da porcelana
3	Coluna rotativa da porcelana para acionamento da lâmina principal
4	Coluna rotativa de porcelana para acionamento da unidade de interrupção
5	Unidade de interrupção
6	Resistor de pré-inscrição
7	Lâmina principal
8	Contato principal ou contato móvel
9	Contato auxiliar para pré-inscrição
10	Terminal de conexão ou contato fixo

A base, comumente de metal, é responsável por dar suporte para os componentes da chave seccionadora e são dispostos acima de uma estrutura de suporte, que pode ser de concreto ou de metal.

Frontin (2013) explica que os isoladores cumprem duas funções básicas no funcionamento dos seccionadores: um do ponto de vista mecânico, onde todos os esforços provenientes de curto-circuito, vento, terminais e do próprio acionamento do equipamento devem ser suportados; o outro, e não menos importante, do ponto de vista dielétrico, onde todas as sobretensões, transitórias provenientes de impulsos atmosféricos e de manobra devem ser perfeitamente suportados. Os mesmos garantem

distâncias de isolamento entre a parte viva do equipamento e a base, possibilitando a passagem de operadores por baixo da base do seccionador.

A lâmina principal e os contatos, assim como os terminais de conexão, formam a parte ativa das chaves, sendo comumente fabricado em alumínio, são responsáveis por conduzir a eletricidade, de um terminal ao outro, quando na posição fechada (FRONTIN, 2013).

Os outros componentes, como o resistor de pré-inscrição e o contato auxiliar para pré-inscrição, são responsáveis por aumentar a vida útil dos contatos da chave, pois quando manobrada a chave, o arco elétrico que deveria passar de um contato ao outro, passa por este dispositivo auxiliar, evitando o aquecimento dos contatos.

2.1.3 Acionamento das Chaves Seccionadoras de Alta Tensão

O acionamento das manobras de abertura e fechamento das chaves seccionadoras de alta tensão pode ser feito de forma remota, local, manualmente ou híbrida.

Abaixo da base, é instalado um armário de acionamento, com um conjunto moto redutor. Para o acionamento de forma manual, é acoplada uma alavanca à árvore de manobra. Já a operação motorizada, pode ser feita de um único mecanismo que, através de hastes (tirantes), comanda a operação conjunta dos três polos para uma operação trifásica, ou de um único polo, para a operação monofásica (FRONTIN, 2013). Um armário de acionamento de seccionadores pode ser observado na Figura 5, onde também é apresentado o conjunto moto redutor.

Figura 5 - Mecanismo de acionamento (armário de comando e conjunto motor-redutor)

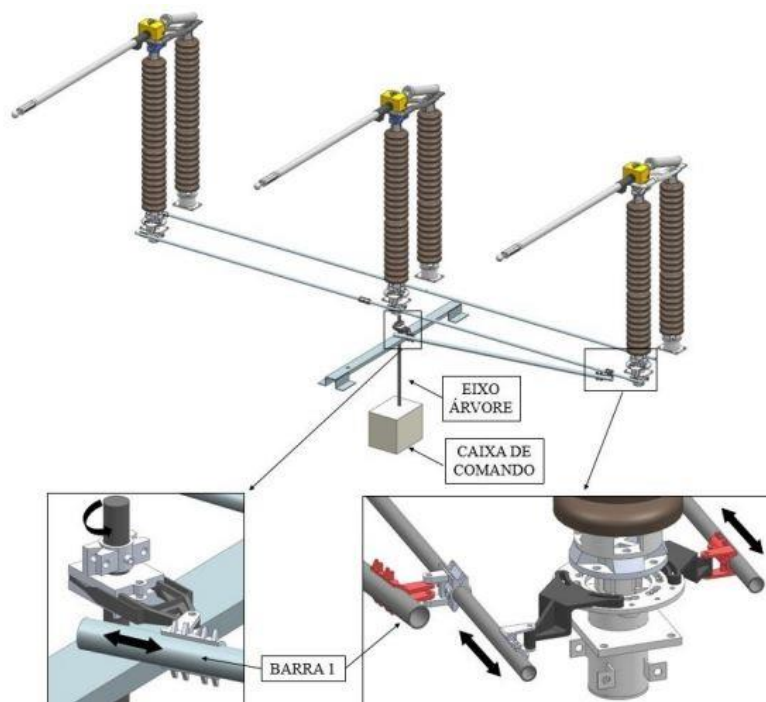


Fonte: Frontin, 2013

Acima do armário de comando, é instalado a árvore de manobra, que interliga o motor ou a alavanca manual, aos tirantes de acionamento, que rotaciona a coluna rotativa da porcelana para acionamento da lâmina principal (RECH, 2019). Tal mecanismo pode ser verificado na Figura 6.

Acima da coluna rotativa da porcelana, as chaves apresentam um componente que altera o movimento de rotação da coluna rotativa em movimento de abertura para cima e para baixo, ou para os lados da lâmina principal.

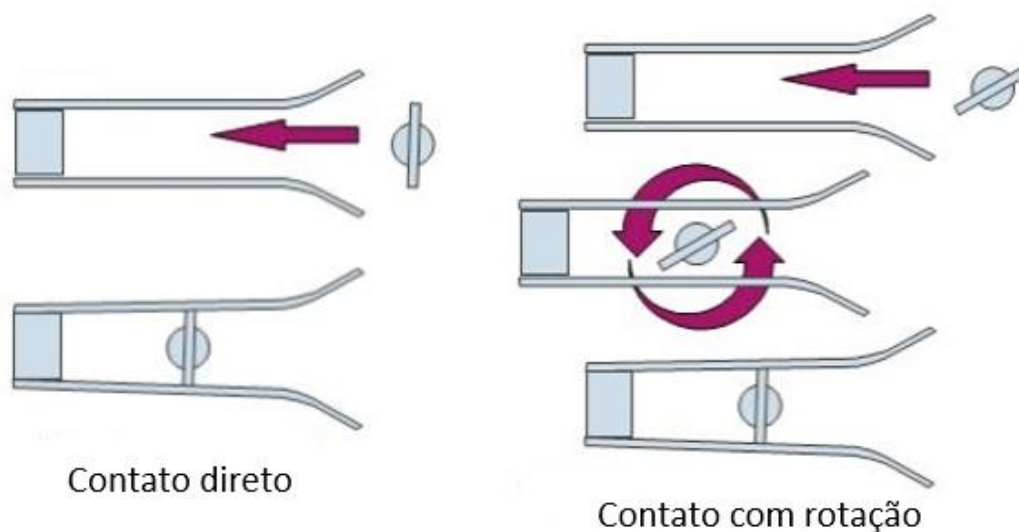
Figura 6 - Componentes de transmissão de movimento de chaves seccionadoras de alta tensão



Fonte: Rech, 2019

Algumas chaves seccionadoras ainda apresentam a abertura e fechamento em dois estágios, que proporcionam um maior travamento mecânico do conjunto de contatos móveis e fixos, além de ser um contato autolimpante. A Figura 7 ilustra o funcionamento destes estágios (Frontin, 2013).

Figura 7 - Contato direto e contato com rotação



Fonte: adaptado de Frontin, 2013

2.1.4 Problemas em chaves seccionadoras de alta tensão

Devido a tantos processos de acionamento, como descrito em 2.1.3 e verificado na Figura 6, qualquer um dos componentes apresentando algum problema, resulta em um incorreto fechamento do seccionador, que conforme Souza (2002), causa um aquecimento nos contatos que diminui sua vida útil. Ainda, em casos mais graves, pode levar ao total derretimento de suas partes condutoras e conseqüentemente desligamento do sistema.

De acordo com Souza (2002), uma chave seccionadora operando em tensões de 500 kV e correntes de 3000 A, apresenta uma resistência ideal de fechamento em torno de $150 \mu\Omega$ o que em si já gera uma potência de até 1,35 kW para uma corrente de 3000 A. No caso de um mal fechamento desta chave a resistência cresce, causando um aquecimento excessivo nos contatos. Com um maior aquecimento, a resistência elétrica aumenta, fazendo com que o contato esquente mais, aumentando a temperatura novamente, podendo derreter e destruir a chave. Devido a este problema, as manobras de chaves seccionadoras de alta tensão necessitam de supervisão no local. Na Figura 8, é possível identificar o problema nos contatos da lâmina principal.

Conforme Cigré (2011), uma pesquisa que contemplou 25 países, que enviaram informações relativas a 935.204 seccionadores e chaves de aterramento/anos de operação. Nesta pesquisa, é indicado que o nível de tensão que mais apresenta falha nos

seccionadores é entre 300 kV e 500 kV, seguido por níveis acima de 500 kV, sendo as falhas mais comumente encontradas em equipamentos isolados a ar.

Foi verificado que os equipamentos que apresentaram a maior taxa de falha eram chaves instaladas antes de 1974, seguido pela faixa de 1974 - 1983, sendo a maior taxa de falha em chaves seccionadoras do tipo joelho.

A causa da falha mais comum, para equipamentos isolados a ar, é “não fecha após comando”, seguido por “perda da integridade mecânica”, “bloqueado em posição aberto ou fechado”, “ruptura dielétrica” e “outros”, sendo 72%, 13%, 7%, 2% e 6% respectivamente. (CIGRÉ, 2011)

Figura 8 - Problema de aquecimento no contatos da lâmina principal



Fonte: O autor

2.2 Vibração Mecânica

A vibração é o estudo do movimento repetitivo de corpos em relação a um sistema de referência estacionário ou posição nominal. A vibração está em todos os lugares e influencia enormemente as características de projetos de engenharia.

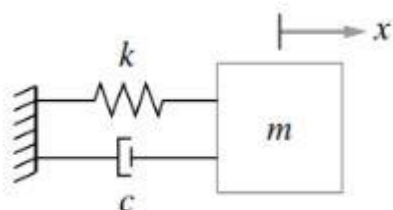
Conforme Inman (2018), a vibração, quando prejudicial, deve ser evitada, porém, também pode ser extremamente útil.

Exemplos típicos de vibração, familiar para a maioria, incluem o movimento de uma corda de guitarra, o movimento vertical de um automóvel ou motocicleta, o balançar de um grande edifício devido ao vento ou a um terremoto (INMAN, 2018).

2.2.1 Vibração amortecida em sistemas de um grau de liberdade

De acordo com Inman (2018), a explicação física dos fenômenos de vibração envolve a interação entre energia potencial e a energia cinética. Um sistema vibratório deve ter um componente que armazena energia potencial (mola ou deformação do material com constante k) e a libera como energia cinética na forma de movimento de uma massa m . Porém, como é observado no cotidiano, nenhum corpo vibra por um tempo indefinido, ou seja, a vibração é amortecida após um período de tempo. Desta forma, enquanto a mola constitui um modelo físico para o armazenamento de energia potencial, o amortecedor viscoso com coeficiente de amortecimento c , constitui o modelo físico para a dissipação de energia, e assim, amortece a resposta de um sistema mecânico. Na Figura 9, é apresentado um modelo de vibração massa, mola e amortecedor, o qual pode ser submetido a uma condição inicial de deslocamento ou velocidade (resultando em uma vibração livre), ou ser excitado por uma força externa (vibração forçada).

Figura 9 - Sistema de vibração massa, mola e amortecedor



Fonte: Kelly, 2017

Ao considerar o elemento de amortecimento, obtém-se a equação geral do movimento, baseada na Segunda Lei de Newton, da seguinte forma:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F(t) \quad (1)$$

onde m é a massa do elemento, c o coeficiente de amortecimento viscoso, k a constante elástica da mola, \ddot{u} a aceleração, \dot{u} a velocidade, u o deslocamento do elemento e $F(t)$ a força externa variável com o tempo. Na vibração livre, $F(t) = 0$ e o sistema vibra de acordo com sua frequência natural. Na presença de força externa, pode ocorrer o fenômeno da ressonância.

2.2.2 Frequência natural e ressonância

De acordo com Kelly (2017), a ressonância é uma condição perigosa em um sistema mecânico ou estrutural e produzirá grandes deslocamentos. Tal fenômeno ocorre quando a frequência de excitação é igual à frequência natural. Como a amplitude da resposta à excitação harmônica é proporcional ao tempo, ela cresce sem limite. Ainda é possível vibrar as estruturas em diversos modos de vibração simultaneamente.

Matematicamente, a primeira frequência natural de um sistema com um grau de liberdade pode ser determinado pela equação 2:

$$\omega_n = \sqrt{\left(\frac{k}{m}\right)} \text{ (rad/s)} \quad (2)$$

Inman destaca soluções para a Equação 1, utilizando o fator de amortecimento ζ descrito pela Equação 3:

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (3)$$

onde ao ser substituído na equação 1, após diversos passos matemáticos, resulta na equação 4:

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = F_0 \cos \omega t \quad (4)$$

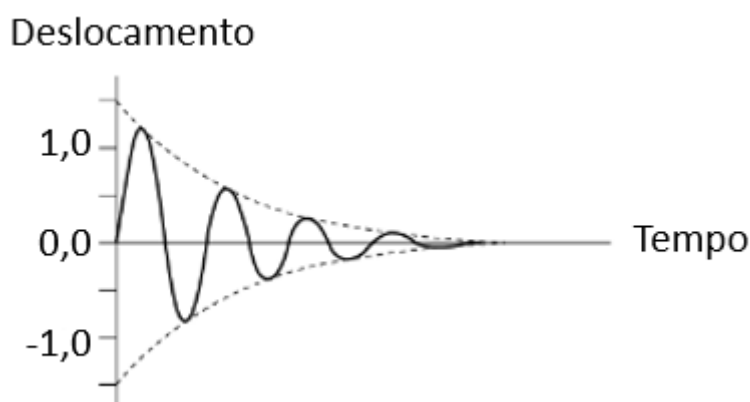
Que pode ser utilizado para destacar os três tipos de soluções da equação característica, onde $0 < \zeta < 1$, $\zeta = 1$ ou $\zeta > 1$.

2.2.3 Movimento subamortecido

Para movimentos subamortecidos, o fator de amortecimento é menor que 1, mas ainda maior que 0, e observe, na Figura 10, que o movimento é oscilatório com amplitude exponencial decrescente. O fator de amortecimento ζ determina a taxa de decaimento da amplitude de deslocamento.

Para o caso superamortecido, o fator de amortecimento é maior que 1 e o movimento não envolve oscilações, mas sim retorna a sua posição de repouso de forma exponencial.

Figura 10 - Resposta a um sistema subamortecido



Fonte: Inman, 2018

Por fim, o movimento criticamente amortecido, que é onde o menor valor de fator de amortecimento resulta em movimento não oscilatório. Inman (2018) ressalta que o movimento criticamente amortecido também pode ser entendido como o caso que separa a não oscilação da oscilação, ou o valor do amortecimento que fornece o retorno mais rápido a zero sem oscilações.

2.2.4 Excitação harmônica de sistemas amortecidos

Algum tipo de amortecimento ou dissipação de energia sempre ocorre. Desta forma, considerando a resposta de um sistema de um grau de liberdade com amortecimento viscoso submetido à excitação harmônica como descrito a seguir:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F_0 \sin(\omega t) \quad (5)$$

onde F_0 representa a amplitude do carregamento e $\text{sen}(\omega t)$ o movimento harmônico. A solução particular para este tipo de carregamento consiste na obtenção de um deslocamento $u_p(t)$, também harmônico, que pode ser descrito pela equação 6:

$$u_p(t) = X \text{sen}(\omega t - \emptyset) \quad (6)$$

onde X corresponde à amplitude de resposta e \emptyset o ângulo de fase entre a excitação e a resposta do sistema.

Ambos X e \emptyset podem ser representados pelas equações 7 e 8 respectivamente:

$$X = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2}} \quad (7)$$

$$\emptyset = \tan^{-1} \left(\frac{c\omega}{k - m\omega^2} \right) \quad (8)$$

Após devidas substituições e deduções matemáticas, obtém-se a equação 9 que é referente ao fator de amplificação dinâmica M :

$$M = \frac{X}{\delta_{st}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (9)$$

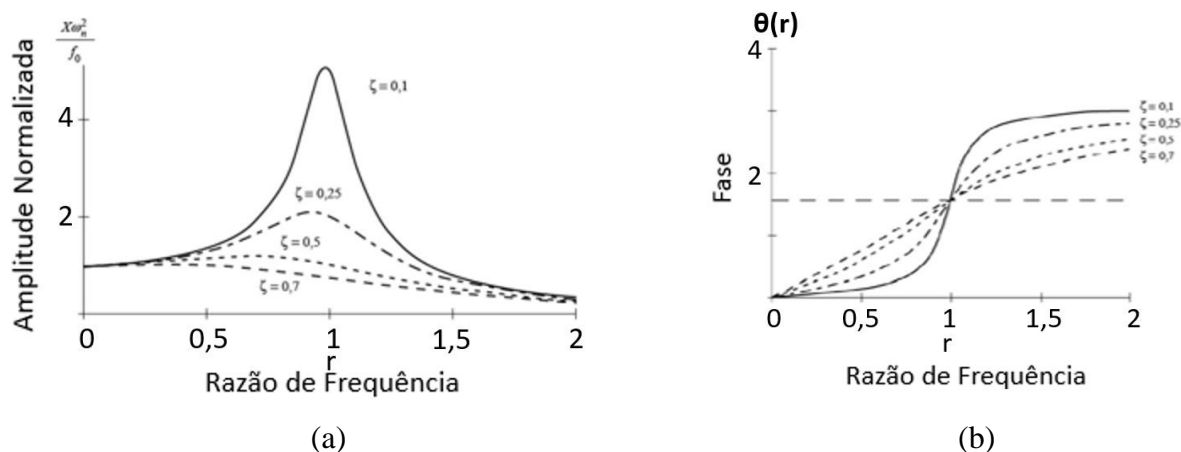
onde $\delta_{st} = F_0/k$, e corresponde à deflexão em relação a força estática F_0 e $r = \omega/\omega_n$ representa a razão de frequências de excitação e natural.

O ângulo de fase também pode ser reescrito conforme a equação 10:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{2\zeta r}{1 - r^2} \right) \quad (10)$$

As relações entre o fator de amplificação e os ângulos de fase, relativo à razão de frequência podem ser observados na Figura 11. O ponto mais interessante destas representações gráficas diz respeito ao instante em que a razão de frequências equivale a 1, ou seja, $r = 1$. Neste momento, como apontado na Figura 11 (a), a amplificação do movimento de resposta do sistema é amplificada, representando portanto a condição conhecida como ressonância.

Figura 11- Variação de M e θ em relação a r para diferentes valores de ζ . (a) Variação do fator de amortecimento. (b) Variação do ângulo de fase.



Fonte: Adaptado de Inman (2018).

Desta forma, neste trabalho busca-se utilizar do fenômeno da ressonância para encontrar frequências de amplificação da vibração, utilizando pouca energia de entrada no sistema e obtendo uma energia na saída igual ou superior ao necessário.

2.3 Instrumentação e medição de vibrações mecânicas

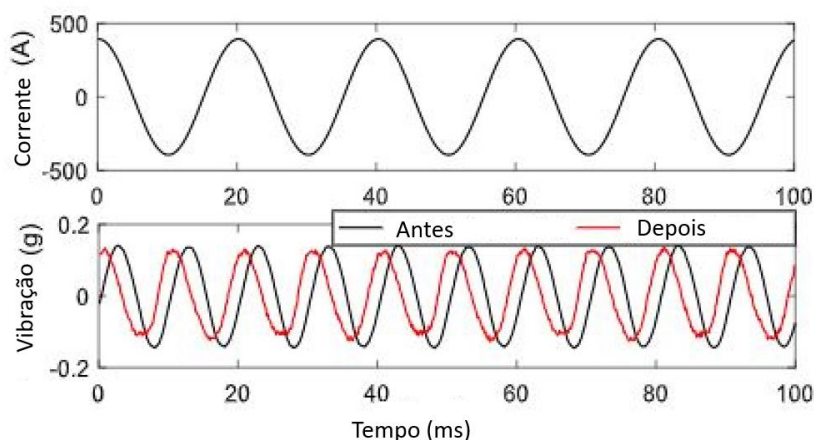
A vibração está em todos os lugares e influencia enormemente as características de projeto de engenharia, sendo que a mesma pode ser prejudicial para componentes de máquinas, ou ainda aplicável para solução de problemas da própria engenharia.

No presente trabalho, a vibração é utilizada para auxiliar as manobras de abertura e fechamento de chaves seccionadoras de alta tensão. Desta maneira, é necessário conhecer sua amplitude, garantindo níveis aceitáveis de vibração para não prejudicar os componentes dos seccionadores, e sua frequência, que próxima à frequência natural da estrutura, é possível amplificar o sinal de entrada para o ponto de interesse.

A medição de vibração já está bem difundida, sendo esta utilizada na manutenção preventiva e preditiva de máquinas e equipamentos. No setor elétrico, trabalhos são encontrados para diagnosticar a vibração em diversos equipamentos, sendo que normalmente a vibração tende a ser reduzida para evitar problemas relativos a afrouxamento, desgaste e até mesmo reduzir o som produzido devido a vibração como:

- Zheng et al (2022) verificaram o comportamento da vibração no enrolamento de transformadores de alta tensão quando apertados ou soltos contra o núcleo do transformador, indicando possíveis falhas no enrolamento devido à mudança de ângulo de vibração e corrente nas três fases do transformador. Tal mudança de fase é verificada na Figura 12, na cor vermelha, apresentando uma mudança de fase de aproximadamente 45 graus. Da mesma forma, no presente trabalho, será avaliada a diferença de fase entre a vibração presente nos pontos de medição.

Figura 12 – Assinatura de corrente e vibração de um transformador, antes e após a ocorrência e deformação.



Fonte: adaptado de Zheng et al, 2022

- Yao e Wang (2020) analisaram a vibração em disjuntores, onde foi verificado que o equipamento apresenta uma “assinatura” de vibração, que pode ser comparada com medições anteriores, ou com um padrão para este modelo de disjuntores. Caso a curva apresente diferenças significativas, é possível identificar problemas no equipamento.
- Yan et al. (2022) mediram a vibração no rotor de um gerador de alta tensão, onde verificaram parâmetros que são úteis para a fabricação, operação e estudo de estabilidade dos geradores.
- Rocha (2014) fez testes em uma chave seccionadora de alta tensão do tipo DA, onde verificou que ao utilizar vibração harmônica forçada no seccionador, a solicitação de torque do motor elétrico utilizado nas manobras era menor.

Também foi observado que a resistência elétrica dos contatos era menor após desligar a vibração que foi utilizada para facilitar a manobra.

- Setti (2020) avaliou de forma experimental, em uma bancada de testes, a utilização de vibração harmônica forçada em dois modelos de chaves seccionadoras de alta tensão, uma do tipo AV e outro do tipo VR, ambas utilizadas em linhas de 230 kV. Neste estudo, foi verificado o afrouxamento dos parafusos quando expostos a vibração, as frequências que auxiliavam o fechamento correto do seccionador, a tensão mecânica e a deformação dos componentes do seccionador quando expostos a vibração. Para a realização dos ensaios, o mesmo utilizou um torquímetro digital para verificar o afrouxamento dos parafusos, acelerômetros para verificar o comportamento da vibração e strain gauges para medir as tensões e deformações. O mesmo concluiu que os parafusos da estrutura não afrouxavam quando submetidos a vibração, que a tensão e deformação mecânica dos componentes quando submetidos a vibração estavam dentro do regime elástico dos materiais e que as manobras de abertura e fechamento apresentavam melhor qualidade quando estava sob excitação de vibração.
- Rech (2019) realizou a engenharia reversa dos mesmos dois seccionadores citados acima, onde realizou testes para análise dinâmica dos dois seccionadores através do método dos elementos finitos. Os dois modelos computacionais das chaves seccionadoras de alta tensão foram calibrados por meio de dados experimentais, obtidos por meio de impactos e vibração harmônica forçada. Para a realização das medições experimentais, o mesmo utilizou acelerômetros nos pontos de interesse. Seu estudo concluiu que os valores de tensões das chaves sob efeitos de vibrações e salvo algumas exceções, permaneceram em níveis aceitáveis, estando em sua grande parte abaixo dos limites de escoamento dos materiais considerados para os componentes mecânicos.

2.3.1 Equipamentos utilizados para medir vibrações

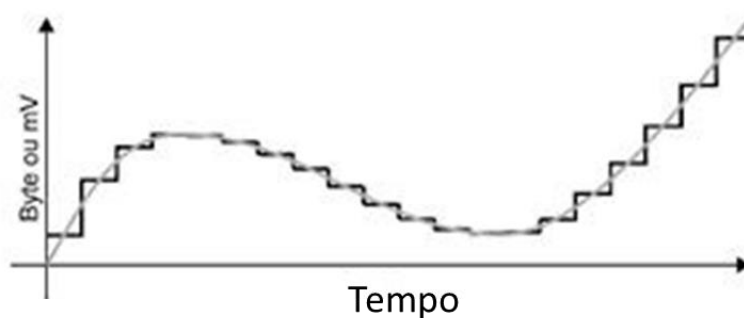
Atualmente, existem diversos meios para medição de vibrações, onde é possível medir através de contato ou sem contato do sensor a parte vibrante de interesse.

De acordo com Thomazini (2020), o termo “sensor” é empregado para designar dispositivos sensíveis a alguma forma de energia, que pode ser luminosa, térmica ou cinética. O objetivo é relacionar informações sobre uma grandeza que precisa ser medida, como a aceleração. Porém, um sensor nem sempre tem as características elétricas necessárias para ser utilizado em um sistema de controle. Desta forma, o sinal de saída deve ser manipulado, e isso é geralmente realizado com um circuito de interface para produção de um sinal que possa ser lido.

Para isto, são então utilizados os amplificadores de sinais, que são capazes de elevar os níveis de tensão da saída dos sensores a um nível que possa ser utilizado e medido.

Para a realização das medições, são utilizados os conversores analógico/digital (AD), que convertem o sinal analógico em sinal digital, que posteriormente pode ser armazenado. Porém, quando uma conversão do sinal analógico é feita para o sinal digital, parte do sinal é perdida e pequenas distorções (erros) são introduzidos no valor da grandeza realmente medida. Tal distorção é visualizada na Figura 13, onde é verificado o digital em forma de níveis.

Figura 13 – Sinal analógico (cinza) e sinal digital (preto)



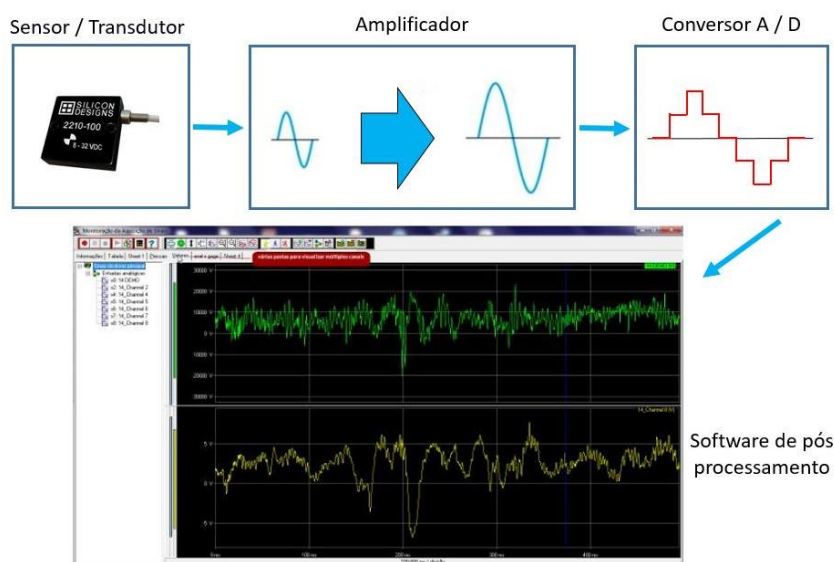
Fonte: adaptado de Thomazini, 2020

Desta forma, é de interesse utilizar um número de bits adequado para não obter valores falsos da grandeza física a ser medida, destaca Thomazini (2020).

Por fim, são utilizados os softwares de tratamento de sinais, onde é possível visualizar tais sinais de forma gráfica e ainda aplicar cálculos matemáticos sobre os valores medidos. Para facilitar o entendimento, a Figura 14 apresenta o conjunto utilizado nas medições.

Os sensores de aceleração (acelerômetros) fornecem um sinal elétrico proporcional à aceleração do sistema. Esses componentes são do tipo inercial e dão indicação sobre o movimento do sistema com relação a uma prefixada variável do eixo inercial, sendo este uma configuração de diversos componentes que convertem aceleração em uma tensão elétrica analógica.

Figura 14 - Medição de grandezas físicas



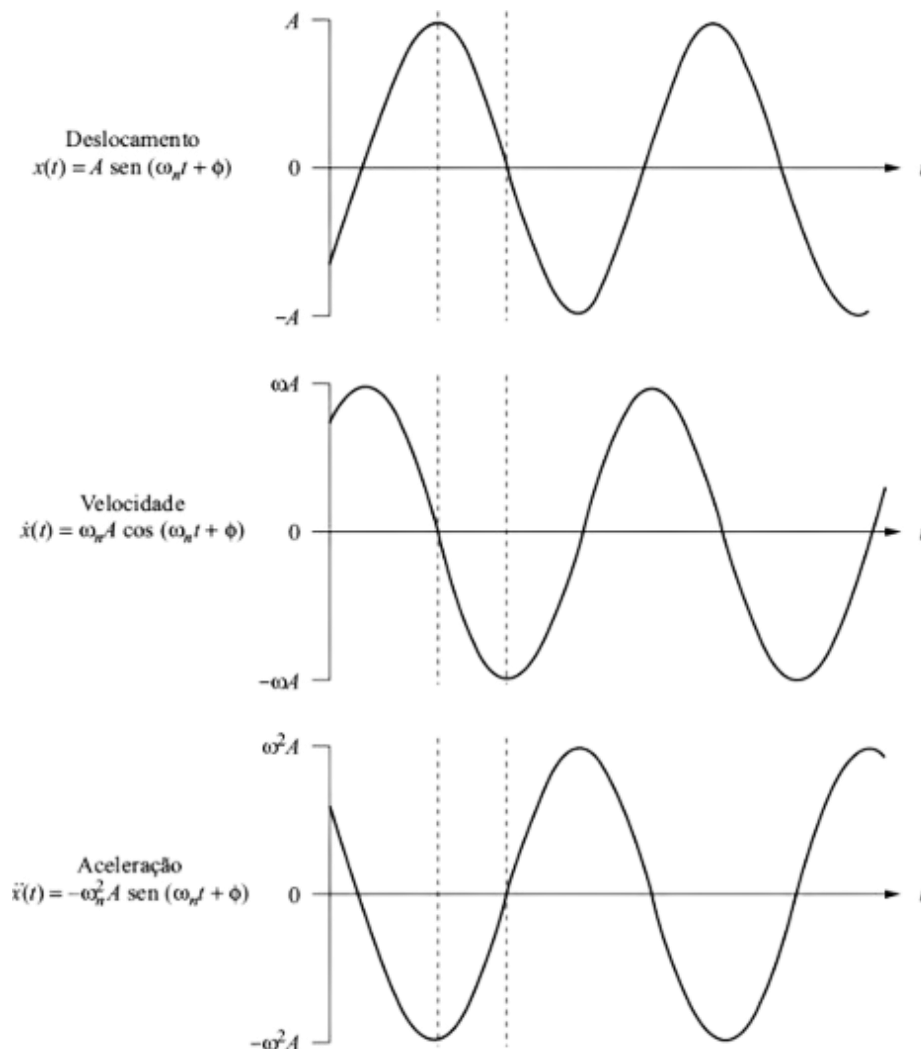
Fonte: O autor

O invólucro dos acelerômetros é tornado fixo ao objeto cuja aceleração se quer medir, tendo o acelerômetro uma massa desprezível em relação ao objeto vibrante. Para obter a medida completa de uma aceleração qualquer, é necessário dispor de três acelerômetros em direções mutuamente ortogonais, de modo a medir os três componentes da aceleração. (Thomazini, 2020)

Com uma integração da variável de saída dos acelerômetros, o resultado será uma tensão proporcional à velocidade de deslocamento e com uma posterior integração o resultado será uma nova saída proporcional ao deslocamento, como é verificado na

Figura 15. Tais fenômenos são de interesse, pois mesmo medindo a aceleração, é possível saber o deslocamento total do objeto onde o acelerômetro está preso.

Figura 15 - Relação entre aceleração, velocidade e deslocamento



Fonte: adaptado de Inman, 2018

Para a medição de deslocamento linear, podem ser utilizados os LVDTs, que são pequenos transformadores. Consistem em um núcleo de material magnético móvel e três bobinas que compreendem o transformador estático. (Thomazini, 2020)

Conforme a haste com seu núcleo de ferrite desliza pelo transformador, um certo número de voltas da bobina é afetado pela proximidade do núcleo e assim gera uma única tensão de saída.

Com isto, é possível fixar a haste com seu núcleo de ferrite ao objeto que se quer conhecer o deslocamento, e seu involucro com as bobinas a um objeto estático ou de referência.

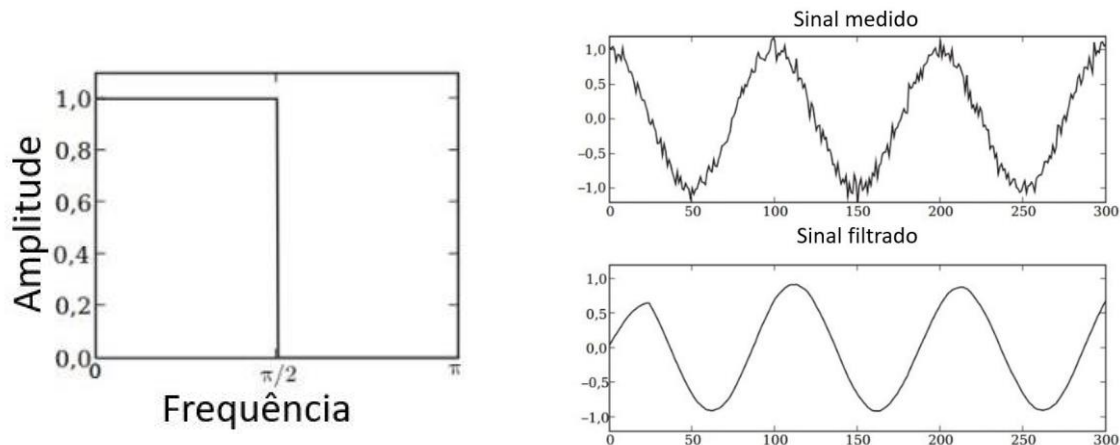
Ainda é possível aplicar fórmulas matemáticas ao sinal medido sendo que, algumas destas formulas, fazem a filtragem de sinais, removendo certas frequências do sinal.

Conforme Nalon (2013), filtros são normalmente especificados no domínio da frequência exatamente porque sua utilidade é selecionar do sinal de entrada as frequências que devem estar presentes no sinal de saída. A seleção é feita por faixas de frequência e o filtro é especificado a partir da escolha das faixas que devem ser aceitas ou rejeitadas.

Um filtro passa baixas é um filtro em que o sinal de saída apresenta as componentes de baixas frequências do sinal de entrada, rejeitando o sinal das componentes de alta frequência (Nalon, 2013)

A Figura 16 apresenta a resposta em frequência de um filtro passa baixas ideal.

Figura 16 - Filtro passa baixas ideal



Fonte: adaptado de Nalon, 2013

2.4 Conclusões da revisão bibliográfica

Diversos itens foram revisados neste capítulo, onde foram apresentadas informações sobre as chaves seccionadoras, que é o equipamento de estudo do presente

trabalho. São indicados os nomes de seus componentes, como são acionadas as chaves e qual o problema caso as manobras ocorram de forma inadequada.

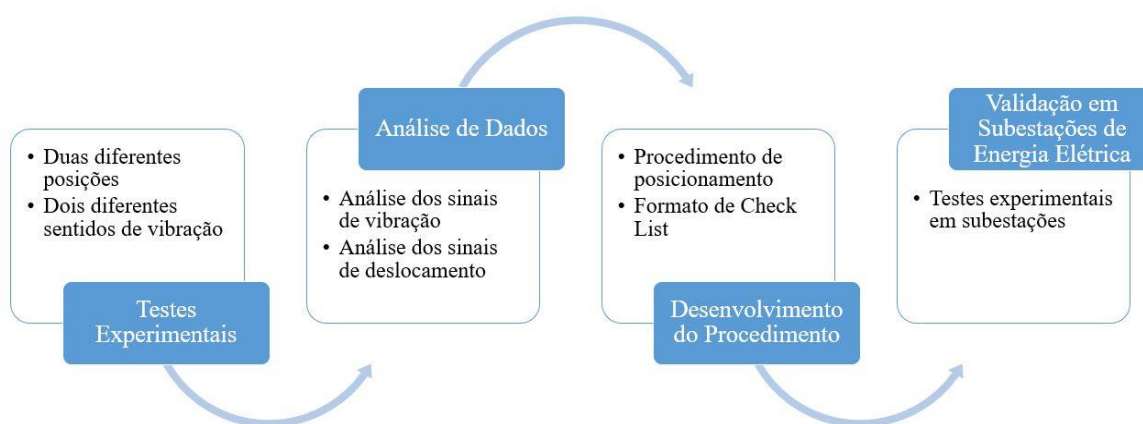
Desta forma, como a solução proposta para o problema baseia-se na utilização de vibração mecânica, foi realizada uma revisão sobre o comportamento da vibração mecânica e também de como medi-la utilizando os sensores comumente utilizados. Também foi apresentado o funcionamento de filtros passa baixas, que foram aplicados sobre os sinais medidos pelos sensores durante o trabalho.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho tem foco no desenvolvimento de um procedimento para a fixação correta do sistema de vibração na estrutura das chaves seccionadoras de alta tensão de abertura vertical, visando o maior aproveitamento da energia transferida para a estrutura em forma de vibração mecânica.

Para isto, testes experimentais foram realizados em laboratório, onde estão instaladas duas chaves seccionadoras de alta tensão sem a passagem de energia elétrica, sendo uma de abertura vertical e a outra vertical reversa, onde foram levantados dados de vibração e deslocamento, que posteriormente, foram utilizados em análises para o desenvolvimento do procedimento correto. Por fim, tal procedimento foi testado em chaves seccionadoras de abertura vertical instaladas dentro de subestações de energia elétrica, com o intuito de validação do mesmo. O fluxograma da Figura 17, indica o procedimento adotado.

Figura 17 - Procedimento de testes adotado



Fonte: O autor

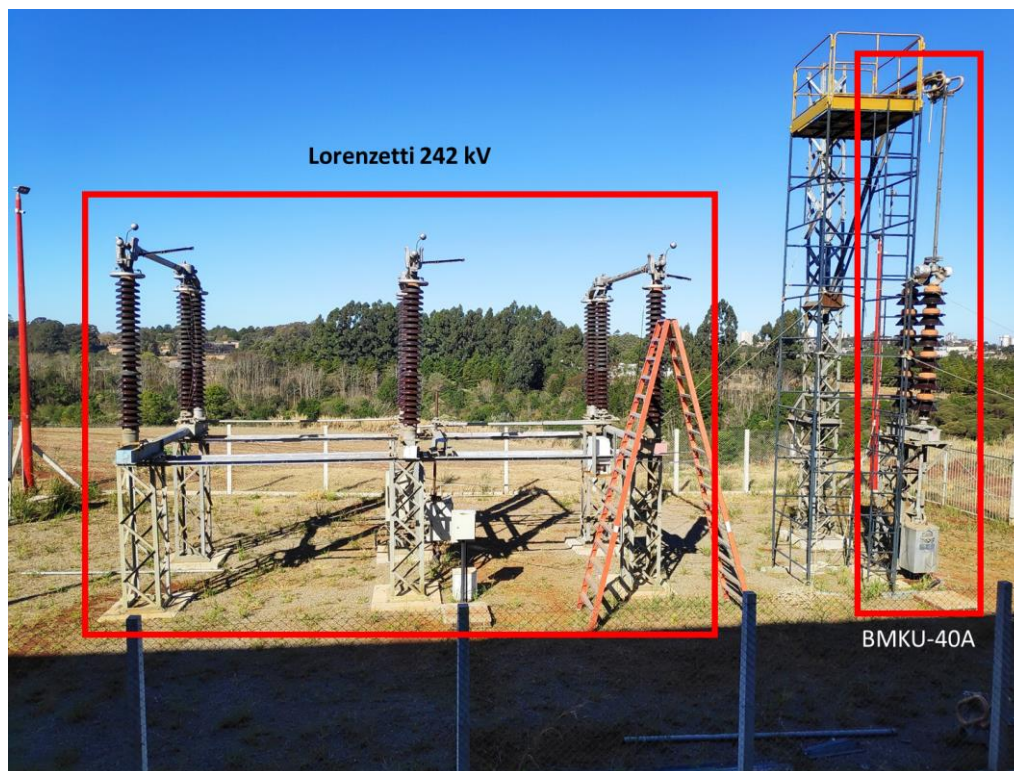
Vale ressaltar alguns dos pontos que podem variar de acordo com diferentes chaves seccionadoras com o mesmo formato construtivo, como a estrutura que suporta a base do seccionador, podendo ser de concreto ou uma estrutura metálica, que mesmo sendo uma estrutura metálica ainda pode variar o perfil dos componentes metálicos, gerando uma maior ou menor rigidez. Outro ponto é o nível de tensão nominal do seccionador, que influencia no tamanho dos componentes, podendo variar

comprimentos na ordem de metros. Também é possível variar o aperto dos contatos fixos, onde um aperto mais solto, facilita o encaixe dos contatos, porém pode aumentar a resistência devido a um contato muito solto, ou ainda um contato muito apertado, onde dificulta o contato móvel a adentrar ao contato fixo. Outros pontos ainda podem ser a regulagem da altura de um contato em relação ao outro, folgas no sistema de acionamento, lubrificação dos contatos, regulagem do fim de curso do acionamento elétrico, entre outros. Desta forma, estes são alguns dos parâmetros que podem influenciar no procedimento proposto.

3.1 Procedimento para a realização dos testes experimentais em laboratório

Testes experimentais foram realizados em laboratório, a fim de adquirir dados para análise. Na Figura 18, é apresentada a bancada de testes com as duas chaves seccionadoras de alta tensão instaladas.

Figura 18 - Bancada de testes Lintec

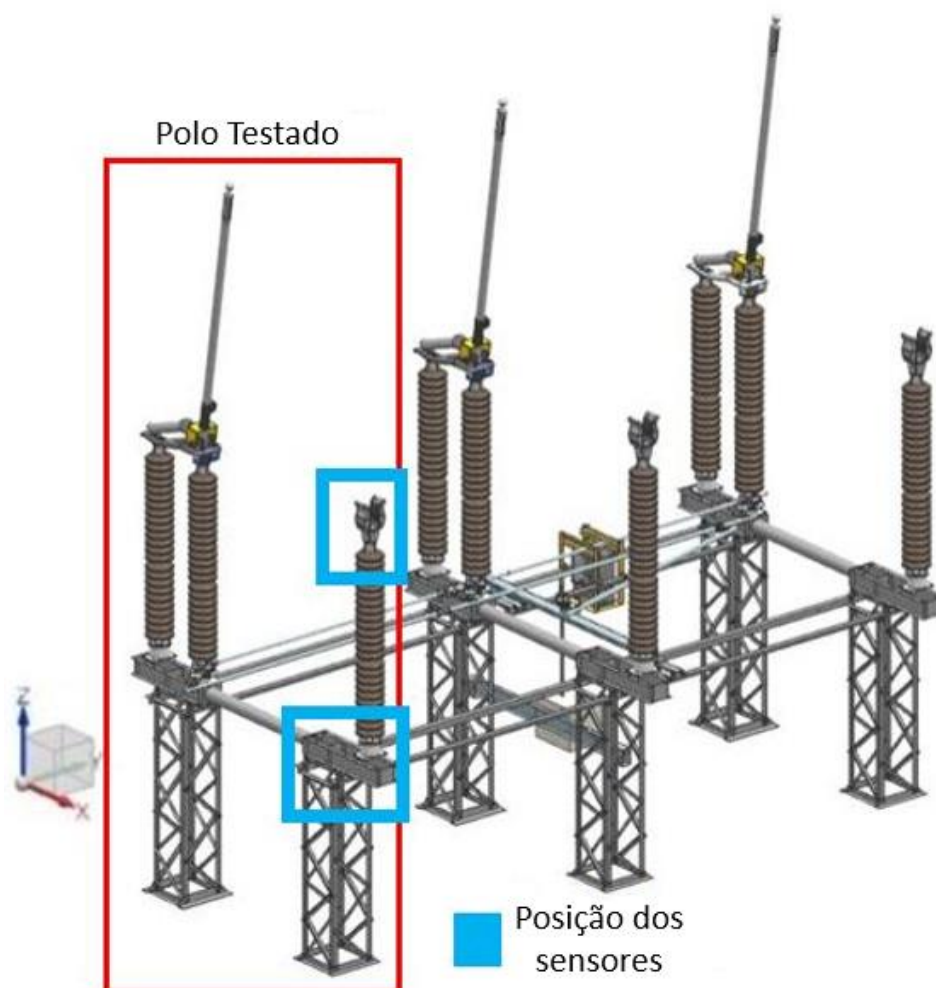


Fonte: O autor

À esquerda é visualizada a chave seccionadora Lorenzetti, uma chave trifásica para linhas de 230 kV que suporta corrente nominal de 1600 A. Sua abertura é vertical, e apresenta manobra em dois estágios, ou seja, após fechar, rotaciona a sua lâmina principal, conforme a Figura 7. A Figura 19 indica o seu posicionamento quando seus contatos estão completamente abertos, ou seja, quando o seccionador interrompe o fluxo de eletricidade de um polo ao outro.

Para a realização dos ensaios neste seccionador, todos os testes foram concentrados em apenas um polo da chave, visto que o objetivo é validar o procedimento de instalação que, posteriormente, pode ser implementado nos demais polos da chave seccionadora.

Figura 19 - Seccionador Lorenzetti 242 kV com seus contatos abertos



Fonte: O autor

Para facilitar o entendimento das informações indicadas neste trabalho, um sistema de coordenadas cartesianas é adotado, onde:

Eixo X: Sentido transversal

Eixo Y: Sentido longitudinal

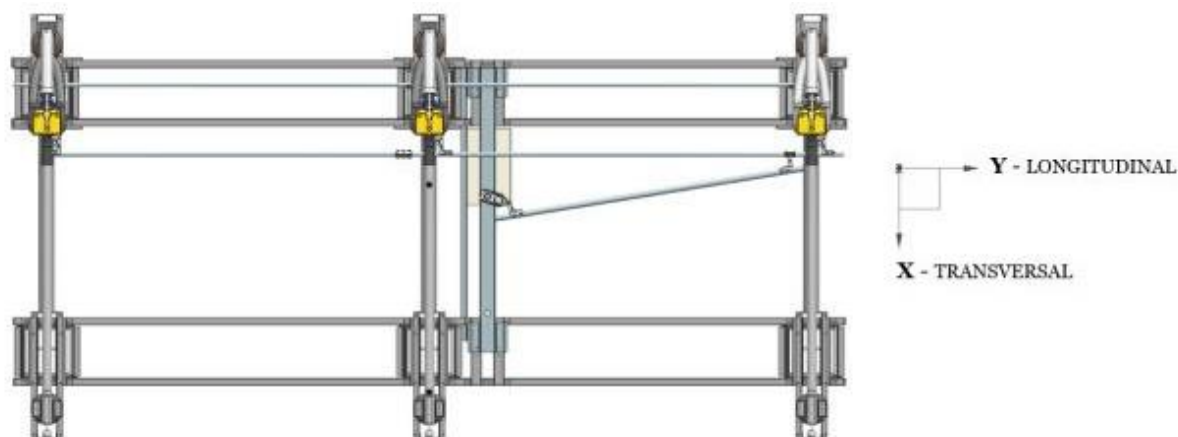
Eixo Z: Sentido Vertical

Na Figura 20, são apresentados os eixos X e Y em uma vista superior de um modelo CAD da estrutura do seccionador.

Para a realização dos ensaios na chave seccionadora de alta tensão Lorenzetti 242 kV, 5 etapas foram definidas conforme o fluxograma da Figura 21.

Inicialmente, foram feitos ajustes na chave seccionadora, alinhando os três polos do seccionador para um fechamento mútuo das três fases. Desta forma, a carga sobre o motor de acionamento dos três polos se encontrará o mais próximo possível da uma condição real dentro de uma subestação de energia elétrica. Ainda foi feito um aperto nos contatos do seccionador pois os mesmos estavam folgados, sendo que tal folga facilitaria a manobra, fazendo com que a resistência elétrica dos contatos ficasse muito alta.

Figura 20 - Planos adotados no estudo

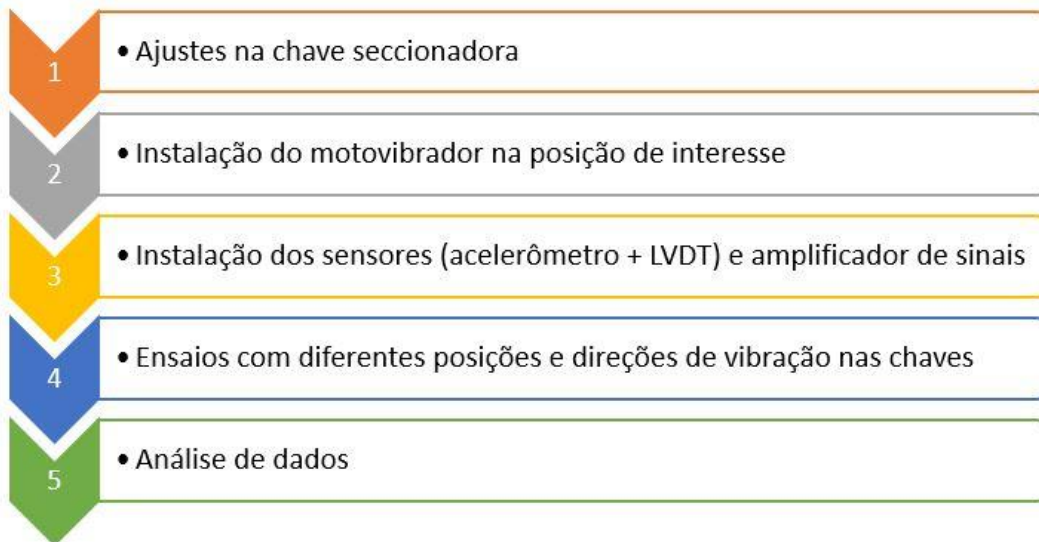


Fonte: Adaptado de Rech, 2019.

Após a manutenção do seccionador, foi instalado o motovibrador em duas posições diferentes, tendo cada posição duas direções de vibração (vibração no eixo X e vibração no eixo Y), totalizando 4 ensaios diferentes. As direções de vibração podem

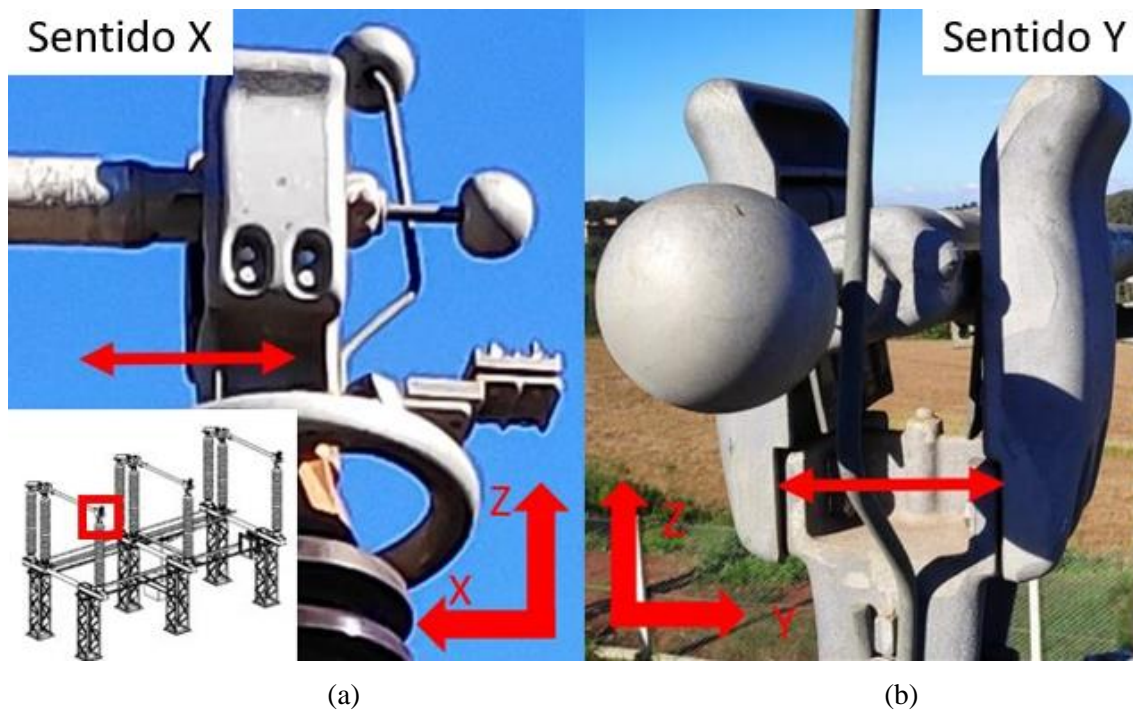
ser visualizados na Figura 22, sendo que na Figura 22 (b), é verificado o gap de abertura.

Figura 21 - Fluxograma dos ensaios



Fonte: O autor.

Figura 22 - Direções de vibração dos contatos. (a) direção X e (b) direção Y



Fonte: O autor

A instalação dos acelerômetros foi feita de forma a verificar qual a amplitude de aceleração nos contatos quando expostos a vibração harmônica forçada. Para a sua fixação foi utilizado fita adesiva. A validação do correto fechamento foi feita através de um LVDT preso ao contato fixo do seccionador. O LVDT mediu quanto falta o contato móvel da lâmina principal adentrar ao contato fixo, chegando ao batente, ou seja, mediu o deslocamento da haste na direção de Z adentrando ao contato fixo, enquanto os acelerômetros mediram a direção X ou Y dependendo do teste.

Na sequência foram realizados os ensaios, que têm como base de tempo 1 minuto, onde foram feitos ensaios de fechamento do seccionador com vibração para cada uma das posições e direções de vibração do motovibrador na estrutura. Porém, para a realização destes ensaios, era necessário conhecer as frequências de excitação que causavam uma maior resposta no ponto de interesse. Desta forma, foi utilizado um equipamento que mede a vibração, onde foram levantados dados sobre as frequências de excitação e a resposta da chave seccionadora no ponto de interesse antes da realização dos ensaios com os acelerômetros.

Por fim, foi feita a análise dos dados coletados nos ensaios, onde foram verificados parâmetros de interesse, como tempo para o correto fechamento dos contatos, amplitude de vibração na haste da lâmina principal e nos contatos fixos, a diferença entre estas duas amplitudes, entre outros.

Estes dados foram relevantes para o desenvolvimento do procedimento de fixação e indicação da direção de vibração para este modelo de chave seccionadora de alta tensão.

3.2 Equipamentos utilizados e posicionamento

Nesta seção, são indicados os equipamentos utilizados na realização dos ensaios.

3.2.1 Motovibrador unidirecional

O motovibrador unidirecional utilizado para os ensaios foi proposto por Oliveira (2023). O mesmo tem um peso de aproximadamente 15 kg, com *slot* para 4 pares de massas excêntricas, sendo cada par responsável por uma força centrífuga de aproximadamente 1900 N em uma frequência de 38 Hz.

O motovibrador apresenta um motor de 0,5 cv, sendo a maioria dos componentes de chapas de alumínio de 0,6 mm, engrenagens e espaçadores feitos em impressão 3D utilizando o polímero Tritan para as engrenagens e PETG para os espaçadores. O motovibrador construído pode ser visualizado na Figura 23.

Para a realização dos ensaios, foram utilizados 2 pares de massas excêntricas, totalizando aproximadamente 3800 N a uma frequência de 38 Hz.

Figura 23 - Motovibrador utilizado nos ensaios experimentais



Fonte: O autor

A fixação do motovibrador na estrutura é feita através de 4 barras roscadas presas a 4 extremidades do motovibrador. As barras passam pela estrutura da chave seccionadora e são parafusadas a 2 cantoneiras na outra extremidade das barras roscadas, prendendo o motovibrador à estrutura por pressão.

3.2.2 Acelerômetros

Para a realização dos ensaios, dois tipos de acelerômetros serão utilizados: 4 acelerômetros MEMS, que podem realizar medições ao longo do tempo gerando gráficos de vibração e 1 acelerômetro responsável por medições instantâneas.

O acelerômetro utilizado para as medições instantâneas é o NK30, que tem uma sensibilidade de $100 \text{ mV/g} \pm 10\%$, resolução de $0,01 \text{ m/s}^2$ e uma faixa de frequência de 0,5 à 10 kHz. O mesmo é fabricado pela Teknikao e é medido pelo coletor de vibrações e balanceador dinâmico NK620, também produzido pela Teknikao.

Os outros 4 acelerômetros MEMS, são fabricados pela Silicon Design, sendo eles: 2210-400, 2210-100, 2220-50, 2210-25, tendo um range de medição de 400, 100, 50 e 25 gravidades respectivamente.

Para a medição dos acelerômetros MEMS, um módulo de aquisição de dados é necessário, também precisam de uma excitação de 8 a 32 V em corrente contínua. Tal tensão é fornecida pelo módulo de aquisição de dados.

A diferença entre o modelo 2210 para o modelo 2220 do acelerômetro 2220-50 é a resposta à temperatura, que não apresenta diferença significativa para a utilização deste trabalho.

3.2.3 LVDT WA-L500

O LVDT utilizado na pesquisa é o WA-L500 fabricado pela HBM. O mesmo é um LVDT com comprimento de 500 mm, apresenta uma tolerância de 1%, e um desvio de linearidade de 0,2 % do início ao fim de seu comprimento.

O mesmo precisa de uma excitação de 2,5 V em corrente alternada que também é fornecida pelo módulo de aquisição de dados e é medido pelo canal analógico/digital do módulo de aquisição de dados. Para isso, foi utilizado uma frequência de amostragem de 24 kHz e 24 bits de resolução.

3.2.4 Sistema de aquisição de dados ADS1800

O módulo de aquisição de dados utilizado é o ADS1800 com fabricação nacional da Lynx Tecnologia.

Apresenta 8 canais analógicos com frequência de amostragem de 24 kHz por canal e um conversor analógico/digital de 24 bits de resolução por canal.

O ADS1800 é configurado através do software Lynx AqDados 7.5 também da Lynx Tecnologia, que permite configurar os canais do módulo ADS1800 conforme o sensor que será medido no canal.

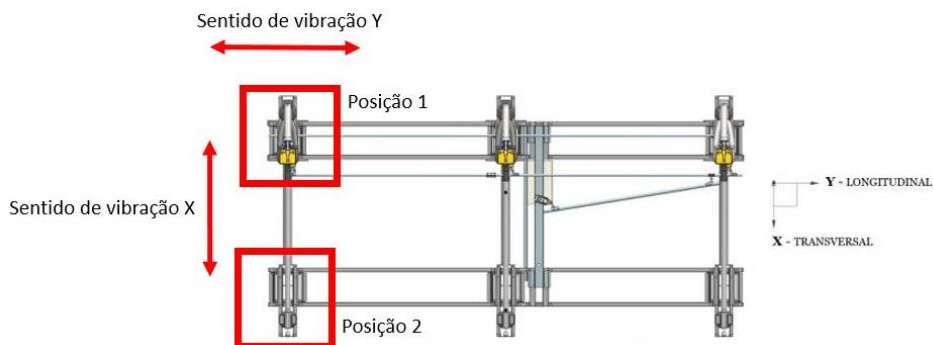
3.3 Procedimento operacional dos ensaios

A seguir é apresentada à disposição dos equipamentos e sensores instalados na chave seccionadora para a realização dos ensaios.

3.3.1 Posicionamento do motovibrador

O motovibrador foi instalado em duas posições, onde foram feitos dois testes por posição, alterando a direção de excitação. A Figura 24 apresenta uma vista superior com o local de instalação do motovibrador, a Figura 25 apresenta uma vista isométrica e o Quadro 2 apresenta demais informações.

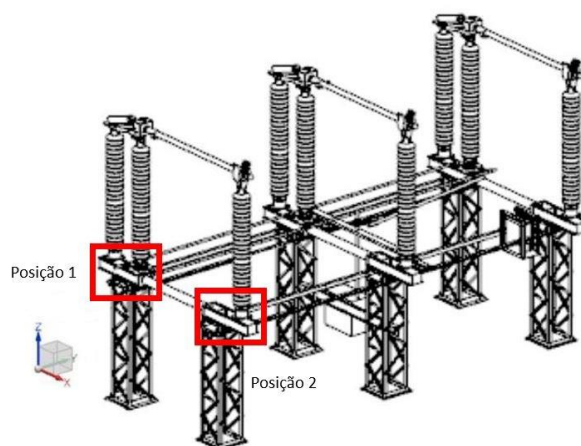
Figura 24 - Posicionamento do motovibrador, vista superior



Fonte: O autor

A diferença entre as posições 1 e 2 é de devido interesse, pois todo sistema de vibração apresenta um grau de amortecimento estrutural. Desta forma, na posição 1, a vibração é transferida para a haste da lâmina principal, que irá vibrar mais que os contatos fixos. Já na posição 2, a vibração é transmitida para os contatos fixos, onde é possível vibrar o contato fixo em um modo de vibração, com amplitude maior que a do contato móvel na lâmina principal.

Figura 25 - Posicionamento do motovibrador, vista isométrica



Fonte: O autor

Quadro 2 - Informações de posição do motovibrador para os ensaios

Teste	Posição	Direção
Teste 1	Posição 1	Vibração no eixo X
Teste 2	Posição 1	Vibração no eixo Y
Teste 3	Posição 2	Vibração no eixo X
Teste 4	Posição 2	Vibração no eixo Y

A direção de vibração também precisa ser levada em conta, pois na direção *X*, a haste desliza pelos contatos, enquanto que na direção *Y*, a vibração será transferida no sentido de aperto dos contatos.

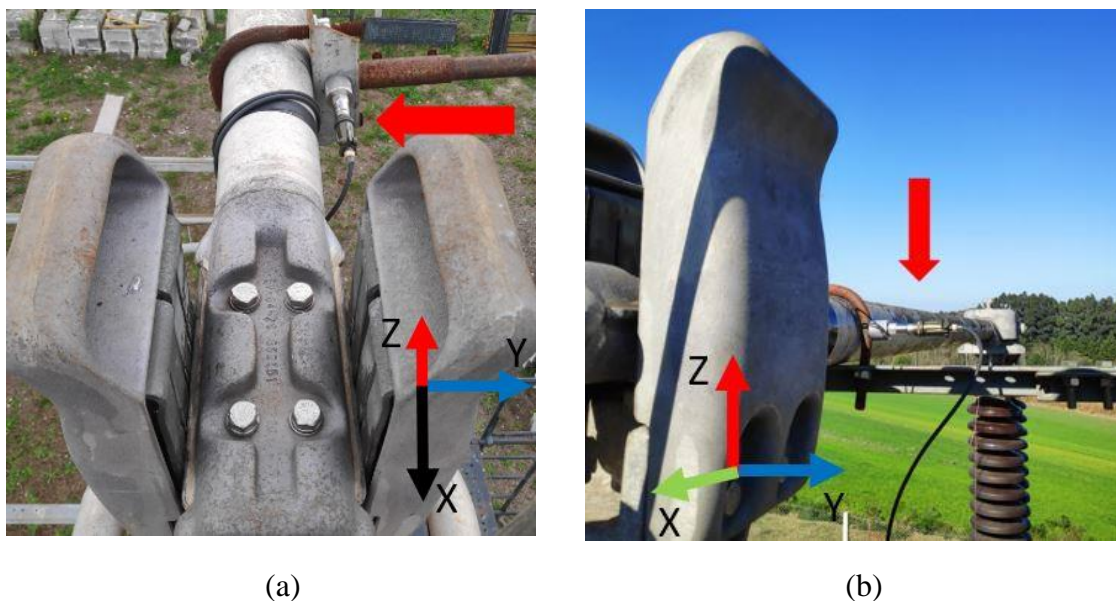
3.3.2 Posicionamento dos acelerômetros

Inicialmente, é posicionado o acelerômetro NK30 na haste da lâmina principal, próximo à conexão dos contatos, sendo realizada a medição na direção *X* e após na direção *Y*. Sua base de fixação é magnética, desta forma, foi instalada uma abraçadeira de aço carbono na lâmina principal, pois a lâmina é de alumínio, material não magnético. Na Figura 26, o acelerômetro instalado é verificado nas duas direções de aplicação (e conseqüentemente de medição) da vibração.

Após a sua instalação é feita a varredura das frequências de vibração de 15 Hz a 43 Hz com variação de 0,5 Hz, sendo tal variação feita através de um inversor de frequência, dispositivo utilizado para variar a velocidade de giro de motores trifásicos, no caso deste trabalho, o motovibrador.

Após a realização da varredura das frequências que causam maiores amplitudes de vibração nos contatos da chave seccionadora de alta tensão, são instalados os acelerômetros MEMS para verificar o comportamento da vibração ao longo do tempo.

Figura 26 – Acelerômetro NK30 posicionado na haste da lâmina principal. (a) direção X, (b) direção Y



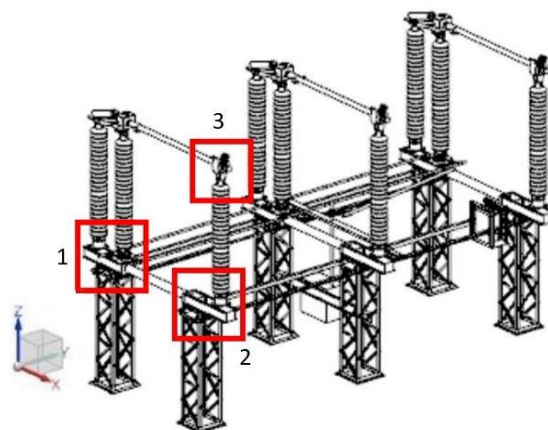
Fonte: O autor

As posições de instalação dos sensores são sempre na mesma direção da vibração, ou seja, para os testes com vibração em X , foi medido o eixo X , e para os testes com vibração em Y , foi medido o eixo Y . Dois acelerômetros são dispostos nos contatos, um no contato fixo e outro no contato móvel, enquanto os outros dois acelerômetros são instalados na base da chave seccionadora e no motovibrador. A Figura 27 indica a posição dos sensores utilizados na chave seccionadora para os quatro testes, enquanto o Quadro 3 indica qual a direção que os sensores estavam medindo em cada teste, sua posição e em qual componente estava instalado.

Quadro 3 - Posição e direção dos sensores para os testes

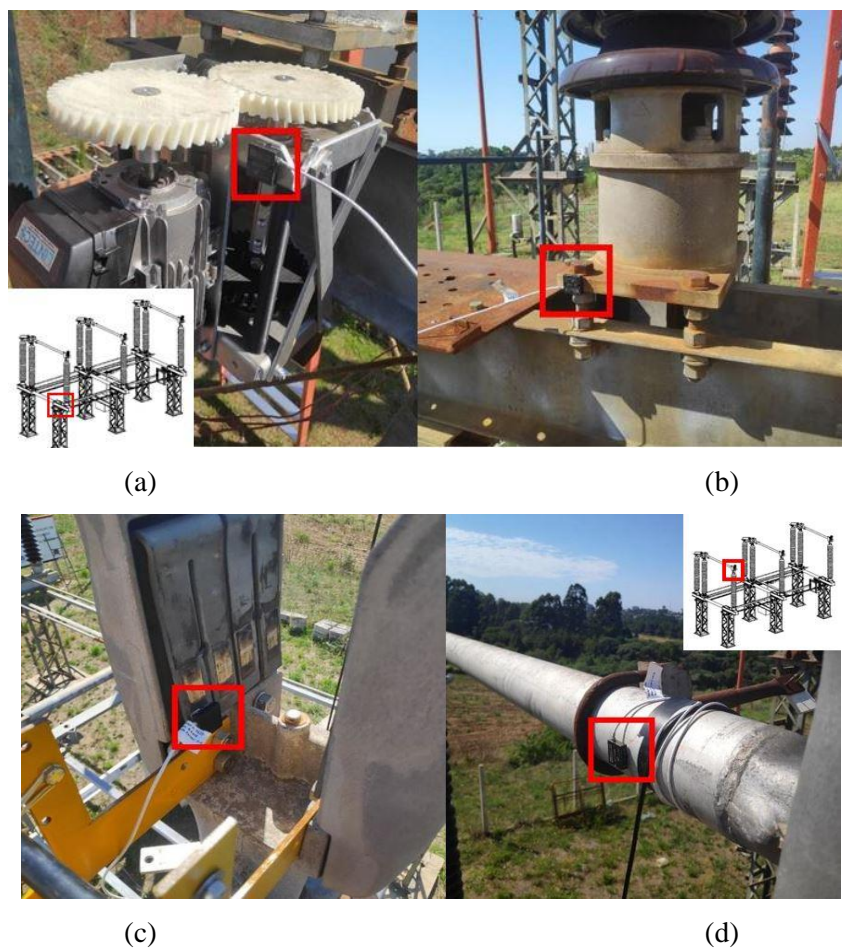
Ensaio	LVDT	Acelerômetro 1	Acelerômetro 2	Acelerômetro 3	Acelerômetro 4
	Posição 3	Posição 3		Posição 1	
		Haste	Contato Fixo	Motovibrador	Base Isoladores
Teste 1	Direção Z	Direção X			
Teste 3					
Teste 2		Direção Y			
Teste 4					

Figura 27 - Posicionamento dos sensores no seccionador



Fonte: O autor

Figura 28 - Instalação dos acelerômetros para o teste 4. (a) acelerômetro preso ao motovibrador, (b) acelerômetro preso a base da coluna de isoladores do contato fixo, (c) acelerômetro preso ao contato fixo e (d) acelerômetro preso a lâmina principal do contato móvel



Fonte: O autor

A partir dos dois acelerômetros presos, um à base da chave seccionadora e outro ao motovibrador, é possível verificar a transferência de energia do motovibrador para a estrutura, o que auxilia na validação da fixação do motovibrador.

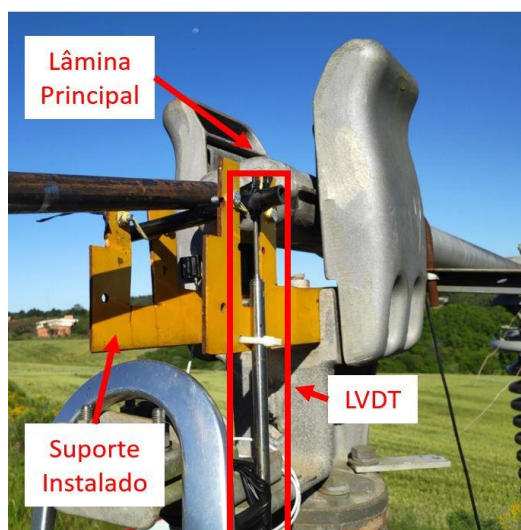
Por outro lado, a instalação dos acelerômetros presos aos contatos do seccionador auxilia na verificação da vibração de um contato em relação ao outro. Com isto, é possível identificar se os dois contatos estavam vibrando em fase (apenas se deslocando juntos), ou ainda se a vibração estava defasada (um contato vibrando em relação ao outro).

Na Figura 28, é possível verificar a instalação dos acelerômetros para o teste 4.

3.3.3 Posicionamento do LVDT

O LVDT foi instalado para medir a distância de um contato em relação ao outro (direção do eixo Z). Para isto, foram desenvolvidos dois suportes que são instalados junto ao contato fixo do seccionador. Como o LVDT não apresenta uma mola para mantê-lo aberto, foram utilizados elásticos de borracha para manter uma posição inicial da haste do LVDT para todos os ensaios. Este método não apresenta precisão, porém, não é de interesse verificar pequenos movimentos, e sim, se a haste da lâmina principal adentra ao contato fixo até o seu fim de curso. O suporte desenvolvido é verificado na Figura 29.

Figura 29 - Suporte e LVDT instalados



Fonte: O autor

Ainda é instalado um tubo de polímero preso ao núcleo do LVDT para deslocá-lo de forma vertical, evitando problemas devido à rotação da lâmina principal.

3.4 Procedimento para a realização dos testes experimentais em subestação

Após a realização dos ensaios experimentais e o desenvolvimento do procedimento para posicionamento e fixação do motovibrador nas chaves seccionadoras de alta tensão de abertura vertical, foram realizados ensaios dentro de uma subestações de energia elétrica em uma chave seccionadora de abertura vertical em funcionamento. A chave seccionadora utilizada para os ensaios de validação é apresentada na Figura 30.

Figura 30 - Chave seccionadora de abertura vertical em subestação



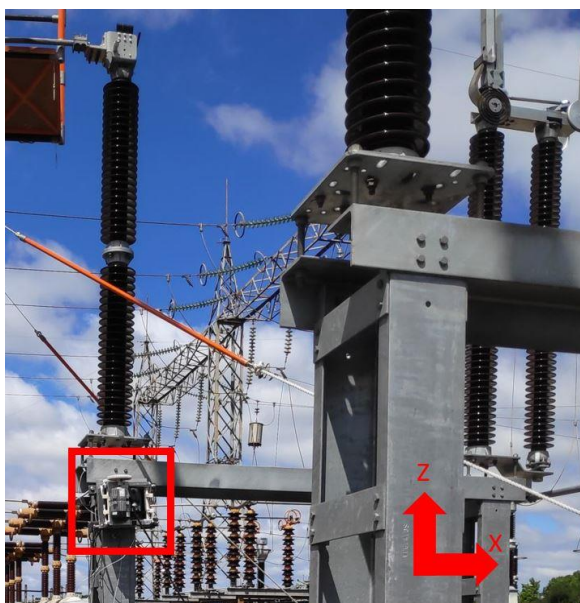
Fonte: O autor

Esta chave seccionadora de alta tensão é utilizada em linhas de 230 kV. Seu acionamento é trifásico, ou seja, as três fases são acionadas simultaneamente, tanto na operação manual, local ou remota, sendo que sua operação é em apenas um estágio, ou seja, sua lâmina principal não rotaciona dentro dos contatos, como é indicado na Figura 7. Seus isoladores estão presos a uma chapa de metal, sendo esta nivelada através de 4 parafusos presos a duas cantoneiras, que por sua vez estão fixadas a uma estrutura feita de perfis U que estão dispostos sobre uma fundação de concreto.

O motovibrador utilizado no ensaio é o mesmo utilizado nos ensaios realizados na bancada de testes. O mesmo foi instalado na chave seccionadora através de 4 barras roscadas presas a quatro extremidades do motovibrador e apertado contra a estrutura de perfil U através de duas cantoneiras presas ao outro lado das barras roscadas. Tal posicionamento, abaixo das colunas de isoladores e afastado das partes condutoras, é

devido a norma ABNT NBR 60694, que impossibilita a instalação de sistemas auxiliares acima de onde iniciam-se as colunas isoladoras (devido à alta tensão que poderia abrir arco voltaico no equipamento, pondo em risco pessoas próximas ao seccionador, ou até mesmo ativar os sistemas de proteção, desativando a linha). O motovibrador instalado pode ser visualizado preso à estrutura na Figura 31, sem a carenagem de proteção.

Figura 31 - Motovibrador posicionado na chave seccionadora dentro da subestação de energia elétrica



Fonte: O autor

O motovibrador foi instalado nesta posição pois, nos estudos desenvolvidos em laboratório, foi verificado que, para este formato de seccionador com abertura vertical, a vibração é mais bem aproveitada quando excitando os contatos fixos do seccionador no seu sentido de aperto, ou seja, na direção de Y , que durante um semiciclo da vibração, precisa forçar o contato fixo do seccionador contra o contato móvel da lâmina principal, aliviando a força normal à superfície do outro lado do contato fixo, o que reduz o atrito.

A frequência de excitação do motovibrador foi variada utilizando um inversor de frequência, onde foram verificados quais são os modos de vibração dos contatos do seccionador com deslocamento desejado. Após, foram feitos testes de abertura e fechamento do seccionador e quando o mesmo fechava incorretamente, era ligada a vibração harmônica forçada para verificar se a mesma conseguia fechar o seccionador.

Para a realização das medições na base da coluna de isoladores e do motovibrador, foram utilizados acelerômetros MEMS fabricados pela Silicon Design, modelo 2210, aliado a um amplificador de sinais ADS1800 fabricado pela Lynx Tecnologia. Os dados foram coletados com uma frequência de amostragem de 24 kHz e 24 bits de resolução. Para a coleta de dados nos contatos do seccionador, como o mesmo estava energizado, foi utilizado um acelerômetro, sem cabo, preso ao contato fixo do seccionador. Este acelerômetro transfere seus dados através de bluetooth para o gateway de monitoramento Hermes 1000, fabricado pela Hottec. Para todos os ensaios, a vibração harmônica forçada ficou ligada por 1 minuto.

Os testes na direção de X não foram realizados, pois conforme os ensaios realizados em laboratório, esta direção não apresentava resultados satisfatórios. Também não foram instalados os acelerômetros no contato móvel da lâmina principal pois a alta tensão não possibilita sua instalação.

Alguns componentes da estrutura também eram diferentes, como a estrutura metálica que suporta a chave seccionadora não ser treliçada como a chave seccionadora testada em laboratório. Os seus isoladores também eram menos robustos, com um volume e massa menor que os da chave seccionadora testada em laboratório.

4. RESULTADOS

Neste tópico, são apresentados os resultados verificados na pesquisa através de medições experimentais de vibração e deslocamento ao utilizar vibração harmônica forçada em chaves seccionadoras de alta tensão.

Inicialmente são apresentados os dados relativos a medições experimentais em laboratório, onde é apresentada a resposta em frequência do contato móvel quando excitado na direção dos eixos X e Y, posteriormente são apresentados os gráficos do LVDT, indicando a posição do contato móvel em relação ao contato fixo e, por fim, caso acontecesse o fechamento adequado dos contatos, são analisados os sinais de vibração dos demais acelerômetros.

Na sequência é demonstrado o procedimento desenvolvido, que é composto de 7 itens, entre eles a identificação do seccionador e o levantamento dos seus desenhos técnicos para a verificação de medidas, até a instalação do motovibrador e a identificação de alguns parâmetros para o seu correto funcionamento.

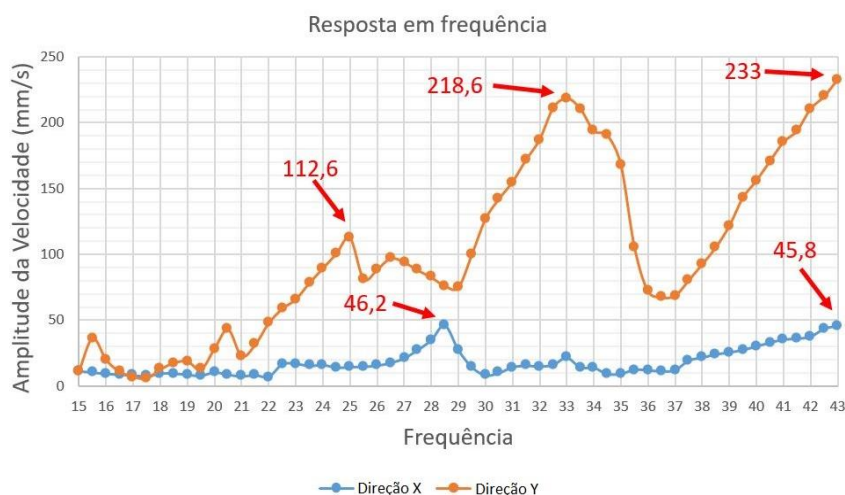
Por último, os resultados obtidos ao utilizar o procedimento proposto em uma chave seccionadora de abertura vertical dentro de uma subestação de energia elétrica, onde são apresentados os gráficos medidos através dos acelerômetros.

4.1 Resposta em frequência do contato móvel testado em laboratório

Neste ensaio, o acelerômetro NK30 foi fixado magneticamente à abraçadeira de aço carbono instalada a haste do contato móvel, e medindo a velocidade de deslocamento do contato quando exposto à vibração, tanto para direção de vibração X quanto para Y. Ambos os testes foram realizados com o motovibrador posicionado na Posição 1.

O gráfico da Figura 32 apresenta a resposta em frequência para uma variação de 0,5 Hz em 0,5 Hz. O valor máximo de medição foi 43 Hz, pois em 43,5 Hz o sensor NK30 saturou, impedindo de se obter dados para maiores frequências. O valor mínimo foi de 15 Hz, pois, abaixo disso, a vibração dos contatos era muito pequena.

Figura 32 - Resposta em frequência do contato móvel quando excitado com o motovibrador na posição 1



Fonte: O autor

Ao observar o gráfico da Figura 32, é possível verificar uma diferença elevada na amplitude de vibração para a direção de vibração no eixo X e eixo Y. Também é possível observar que certas frequências causam picos de velocidade maiores no contato móvel da chave seccionadora em relação às frequências adjacentes.

Para a direção de vibração X, as duas frequências que causaram maiores valores de velocidade são 28,5 Hz e 43 Hz, com valores de 46,2 mm/s e 45,8 mm/s respectivamente.

Para a direção de vibração Y, as frequências que causaram maior resposta em velocidade do contato móvel são 25 Hz, 33 Hz e 43 Hz, com valores de 112,6 mm/s, 218,6 mm/s e 233 mm/s respectivamente.

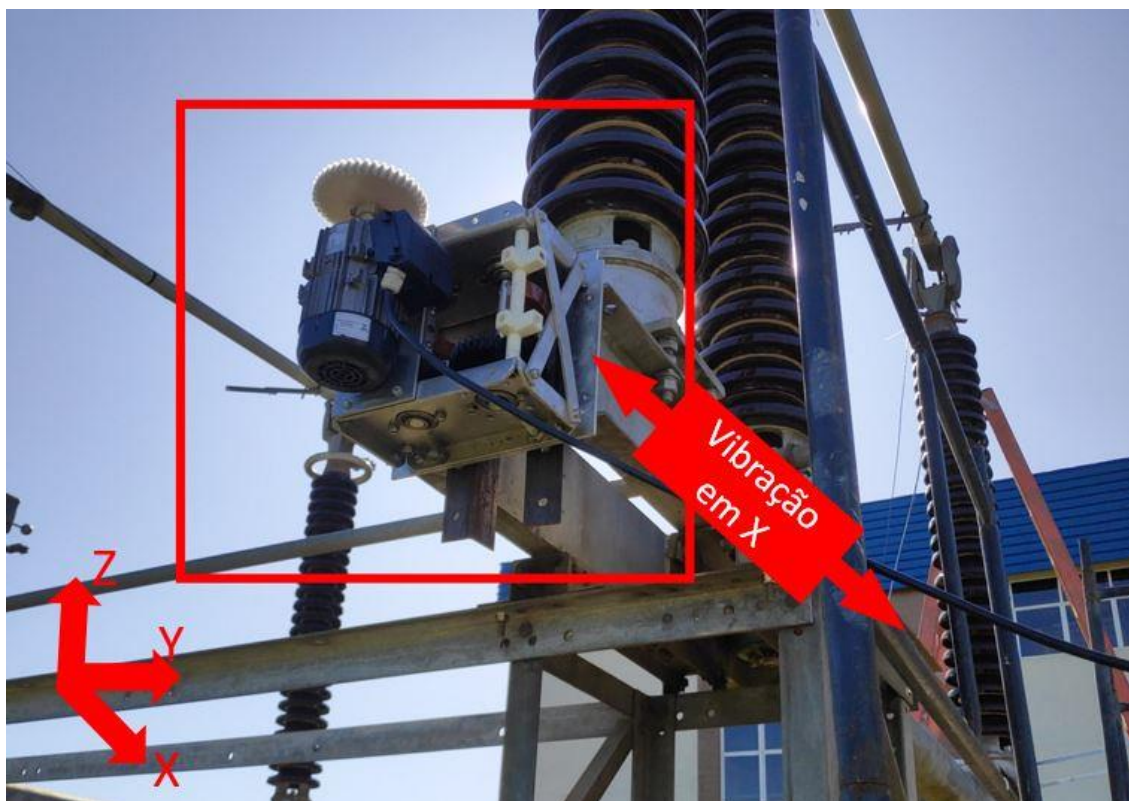
Desta forma, os testes utilizando os acelerômetros MEMS foram realizados nestas frequências de excitação do motovibrador.

4.2 Resposta do Teste 1 em laboratório

Para a realização do Teste 1, o motovibrador foi posicionado na posição 1, com vibração na direção X, onde foram realizados testes nas frequências de 28,5 Hz e 43 Hz.

O motovibrador fixado a estrutura pode ser verificado na Figura 33.

Figura 33 - Motovibrador posicionado na posição 1, com vibração na direção X

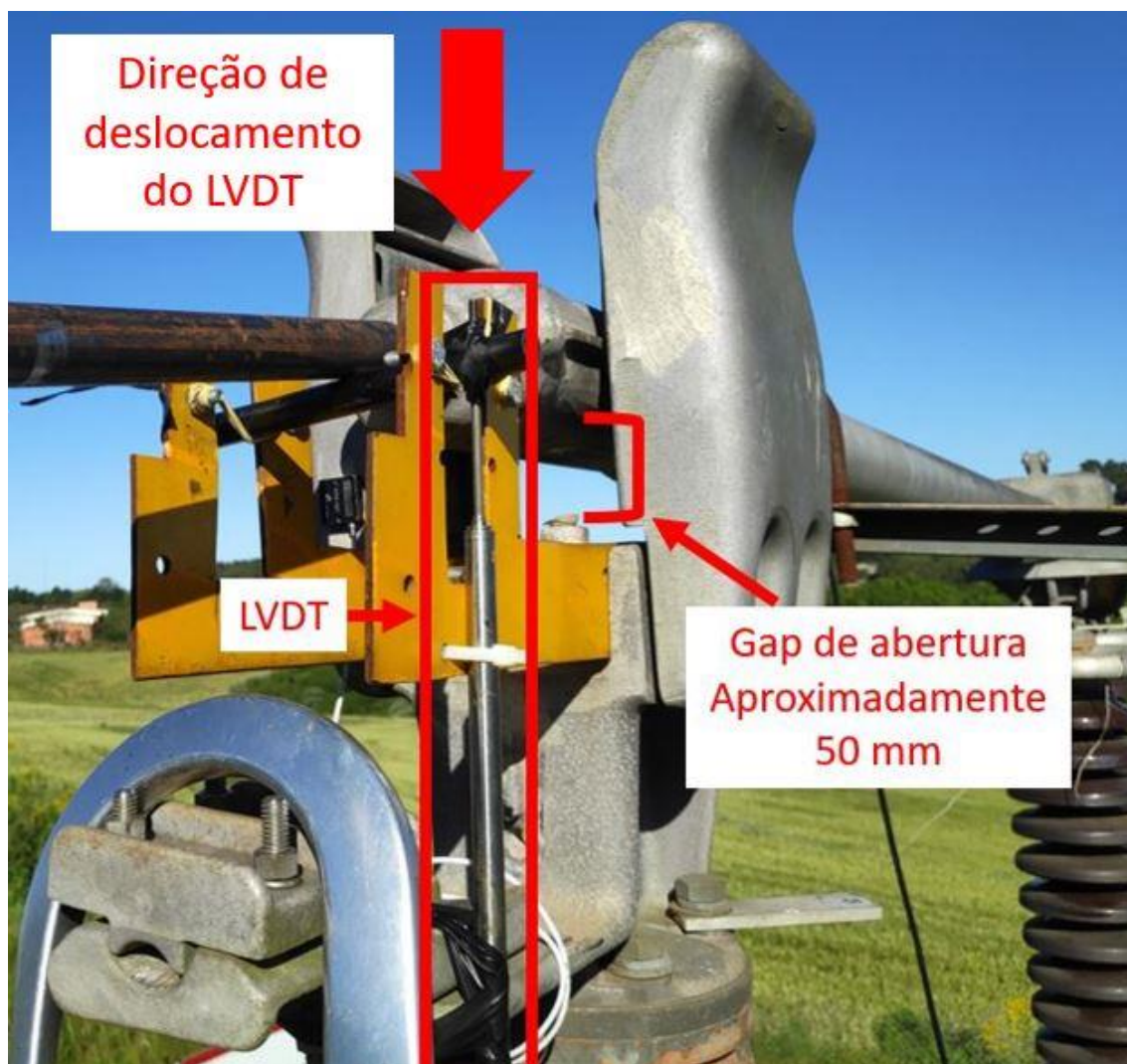


Fonte: O autor

Como o teste necessitava de uma manobra onde o contato móvel não adentre completamente ao contato fixo, os contatos do seccionador também foram apertados, onde para a realização de todos os ensaios, um gap de aproximadamente 50 mm de abertura foi verificado. Tal gap de abertura é a própria distância que o LVDT mede de um contato em relação ao outro e quando a haste do contato móvel não chega ao seu fim de curso, a manobra é considerada como mal executada, que aumenta a resistência elétrica dos contatos, promovendo o aquecimento. A Figura 34 apresenta tal abertura.

A abertura de 50 mm foi considerada como ideal para simular uma condição de mal encaixe dos contatos, pois quando um operador for verificar a qualidade do encaixe, valores acima de 50 mm são facilmente identificados de forma visual, porém quando o encaixe está com um gap menor, o operador já tem problemas para identificar a qualidade do encaixe, devido as dimensões do equipamento.

Figura 34 - Gap de abertura entre contato fixo e contato móvel



Fonte: O autor

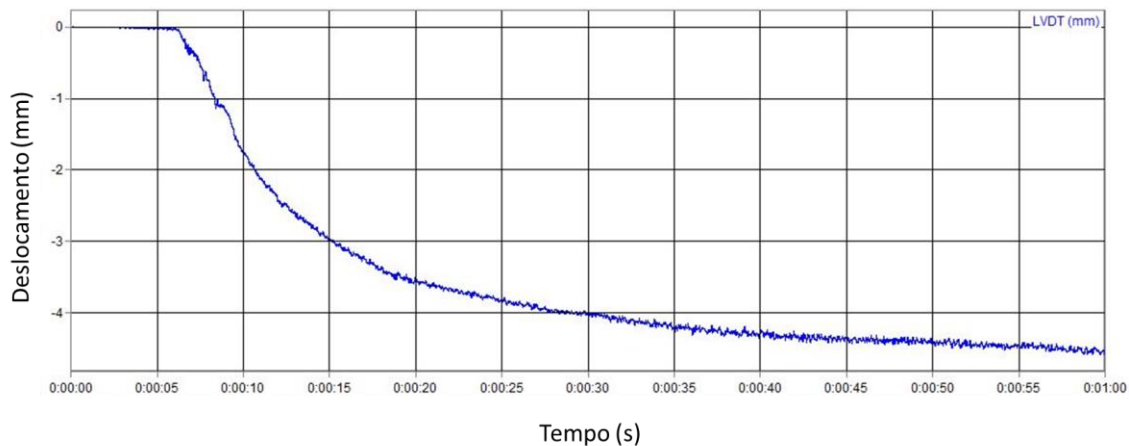
4.2.1 Vibração em 28,5 Hz – teste em laboratório

Após manobrar o seccionador e verificar a abertura dos contatos, foi iniciada a coleta de dados do LVDT e dos acelerômetros MEMS. Com 5 segundos de coleta, a vibração era ligada de forma manual. Tal atraso no início da vibração foi para possibilitar manipular mais facilmente os dados do LVDT em um pós processamento.

A Figura 35 apresenta o gráfico gerado do LVDT para a frequência de 28,5 Hz. Vale ressaltar que para todos os gráficos do sinal adquirido pelo LVDT, um filtro passa baixas com frequência de 15 Hz foi aplicado. Os dados também foram manipulados com o zeramento do valor médio dos primeiros 4 segundos de ensaio, o que facilita a

análise dos dados ao longo do tempo. No apêndice A, é apresentado um sinal sem a realização do procedimento de filtragem.

Figura 35 - Resposta do LVDT para excitação harmônica forçada de 28,5 Hz



Fonte: O autor

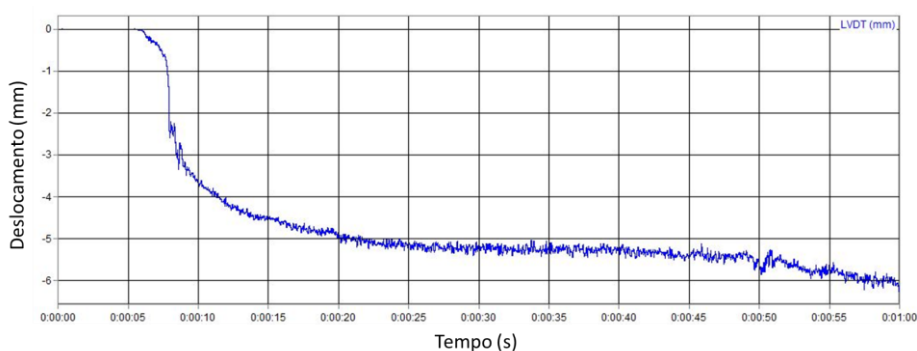
Para este ensaio, foi verificado um deslocamento de 4,5 mm ao longo de 54 segundos de exposição à vibração, o que é muito inferior aos 50 mm de abertura dos contatos. Desta forma, tal frequência de excitação foi caracterizada como não funcional para a quantidade de massa instalada no motovibrador.

4.2.2 Vibração em 43 Hz – teste em laboratório

Como para o teste utilizando 28,5 Hz, as mesmas condições iniciais foram respeitadas para o teste em 43 Hz, onde foram adquiridos os dados que podem ser verificados na Figura 36.

Neste ensaio, pode-se verificar um deslocamento maior que para o ensaio anterior ao longo de 1 minuto de duração (4 para 6 mm), porém os contatos do seccionador ainda apresentaram uma abertura ao fim do ensaio, pois o LVDT não atingiu os 50 mm. Desta forma, a posição 1 com vibração na direção X foi caracterizada como não funcional.

Figura 36 - Resposta do LVDT para excitação harmônica forçada de 43 Hz



Fonte: O autor

4.3 Resposta do Teste 2 em laboratório

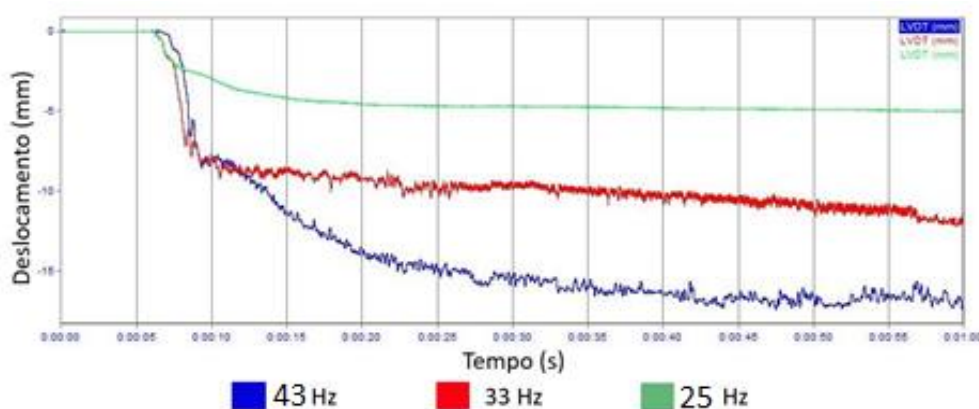
Para a realização do Teste 2, o motovibrador foi posicionado na posição 1, como na Figura 33, com vibração na direção Y, onde foram realizados testes nas frequências de 25 Hz, 33 Hz e 43 Hz.

O procedimento para a realização do ensaio foi o mesmo do Teste 1, porém, com a alteração da direção de vibração.

Neste ensaio as respostas obtidas pelo LVDT apresentaram um deslocamento maior que para o Teste 1 nas frequências de 33 Hz e 43 Hz, sendo 10 mm e 17 mm respectivamente. O gráfico com os dados é observado na Figura 37.

Como é verificado neste ensaio, o deslocamento da haste em relação ao contato fixo é maior, porém ainda insatisfatório. Desta forma, tal posicionamento do motovibrador na estrutura também foi caracterizado como não funcional para a quantidade de massa excêntrica instalada.

Figura 37 - Resposta do LVDT para excitação harmônica forçada Teste 2



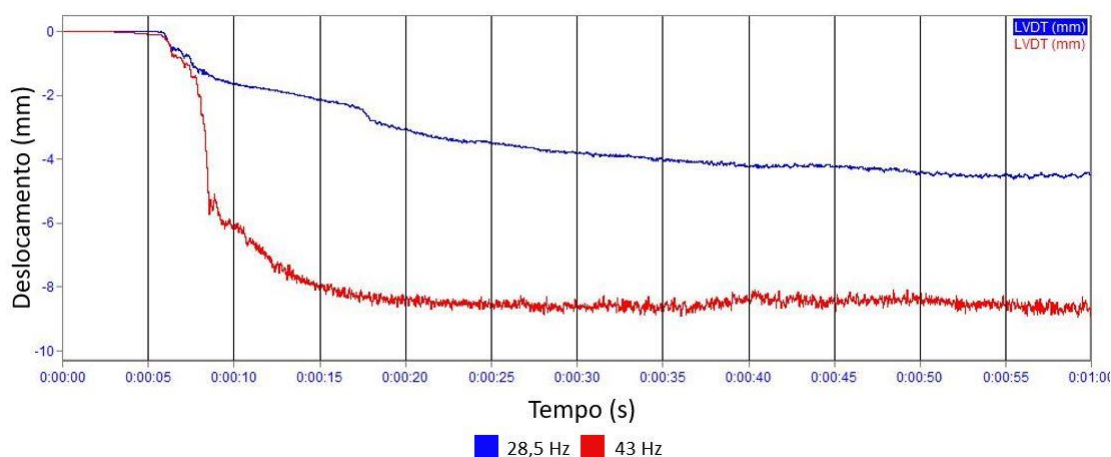
Fonte: O autor

4.4 Resposta do Teste 3 em laboratório

Para a realização do Teste 3, o motovibrador foi posicionado na posição 2, com vibração na direção X, onde foram realizados testes nas frequências de 28,5 Hz e 43 Hz.

Este teste não apresentou diferença em relação ao Teste 1, onde pouco deslocamento foi verificado nos gráficos gerados pelos dados do LVDT, que podem ser verificados na Figura 38.

Figura 38 - Resposta do LVDT para excitação harmônica forçada Teste 3



Fonte: O autor

No ensaio, foi verificado um deslocamento de 4 mm para a frequência de 28,5 Hz e 8,7 mm para a frequência de 43 Hz.

4.5 Resposta do Teste 4 em laboratório

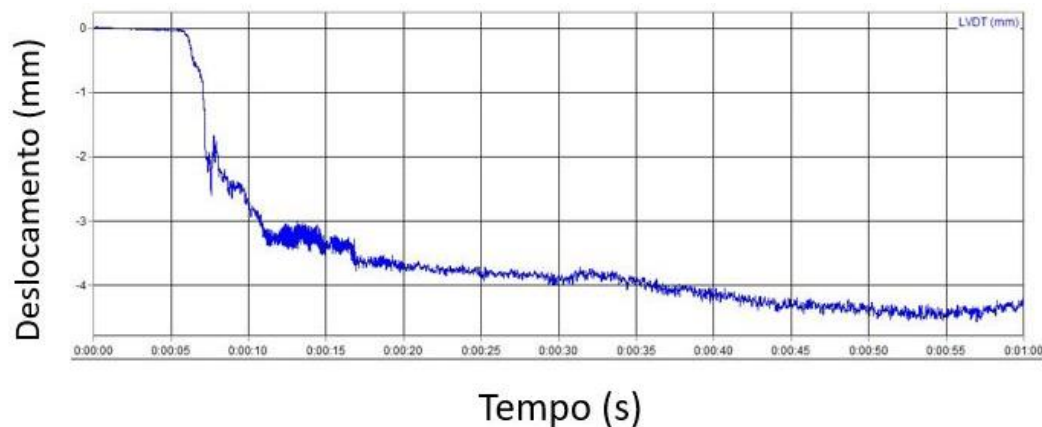
Para a realização do Teste 4, o motovibrador foi posicionado na posição 2, com vibração na direção Y, onde foram realizados testes nas frequências de 25 Hz, 33 Hz e 43 Hz.

Inicialmente, são apresentados os dados do LVDT para a frequência de 25 Hz, na Figura 39.

Neste ensaio foi verificado um deslocamento de 3,4 mm nos primeiros 10 segundos de ensaio e mais 1 mm para o restante do ensaio. Como para os demais ensaios, é possível visualizar que o LVDT não apresentou o deslocamento de 50 mm, o

que indica o não funcionamento da frequência de excitação para a quantidade de massas instaladas no motovibrador.

Figura 39 - Resposta do LVDT para excitação harmônica forçada Teste 4, 25 Hz

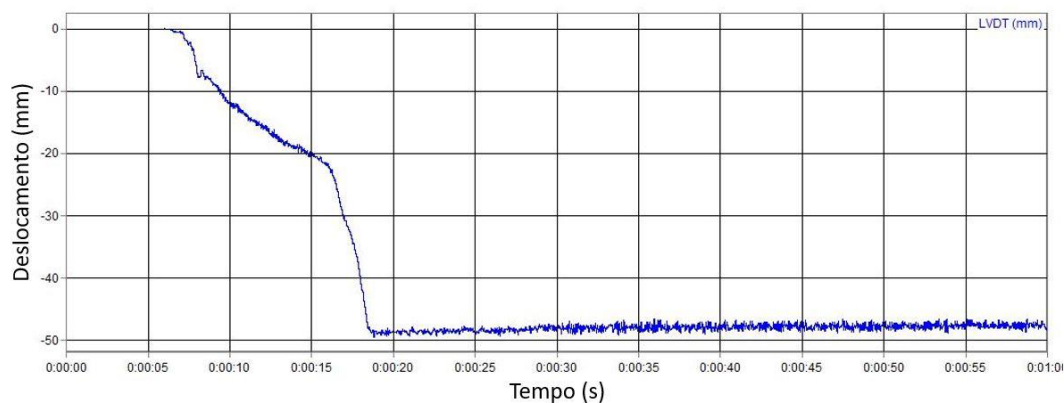


Fonte: O autor

Na sequência, é apresentada a resposta à vibração harmônica forçada do LVDT para a frequência de 33 Hz, onde é verificado o deslocamento total do contato móvel adentrando ao contato fixo. Tal resposta é apresentada na Figura 40.

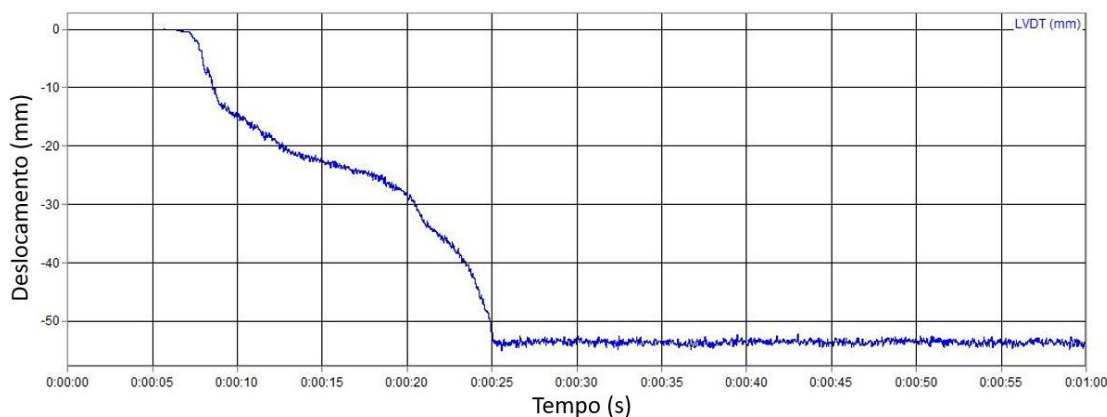
Por fim, a verificação da resposta do LVDT para a frequência de 43 Hz. Na Figura 41, a resposta do LVDT para o Teste 4, vibração na direção de aperto dos contatos, é observado o fechamento completo dos contatos do seccionador, como para a frequência de 33 Hz.

Figura 40 - Resposta do LVDT para excitação harmônica forçada Teste 4, 33 Hz



Fonte: O autor

Figura 41 - Resposta do LVDT para excitação harmônica forçada Teste 4, 43 Hz



Fonte: O autor

4.6 Acelerações medidas no Teste 4 – testes em laboratório

Na sequência, é verificado o comportamento dos sinais obtidos pelos acelerômetros presos à estrutura e ao motovibrador.

Os acelerômetros foram comparados em pares, ou seja, a excitação produzida pelo motovibrador e a vibração da estrutura no mesmo gráfico.

Os dados gerados foram comparados entre 25 Hz com 33 Hz e 43 Hz devido ao fato da frequência de 25 Hz não apresentar uma resposta satisfatória como as frequências de 33 Hz e 43 Hz, o que possibilita verificar parâmetros que indicam o que funciona e o que não funciona.

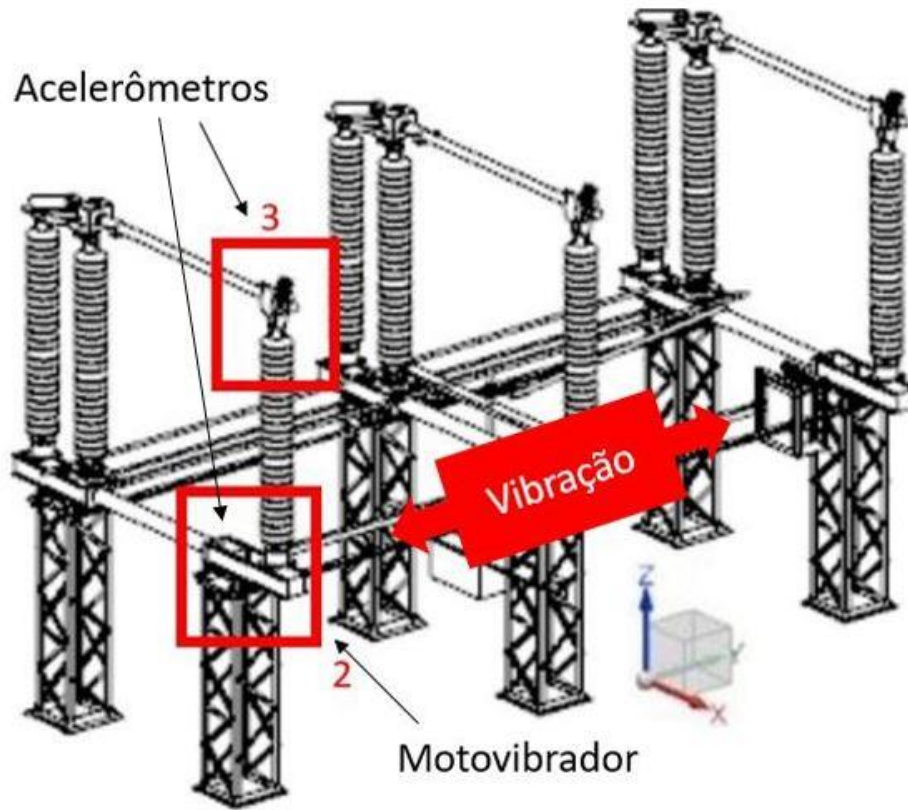
Todos os sinais de aceleração foram filtrados com um filtro passa baixas de 150 Hz, devido ao fato do motovibrador ser alimentado por um inversor de frequência, dispositivo este que gera ruído nas medições.

O posicionamento dos sensores, é indicado pela Figura 42, sendo 2 a posição do motovibrador, com sentido de vibração em Y, e 3 a posição dos acelerômetros presos aos contatos.

Primeiramente, para a análise de vibração da estrutura e do motovibrador, é verificado o comportamento da vibração em 25 Hz, frequência em que o fechamento adequado não foi verificado, que apresentou uma amplificação da vibração do motovibrador para a estrutura, sendo esta 0,44g maior para o pico positivo e 0,9g maior para o pico negativo nos mesmos instantes. Também é possível verificar que os sinais

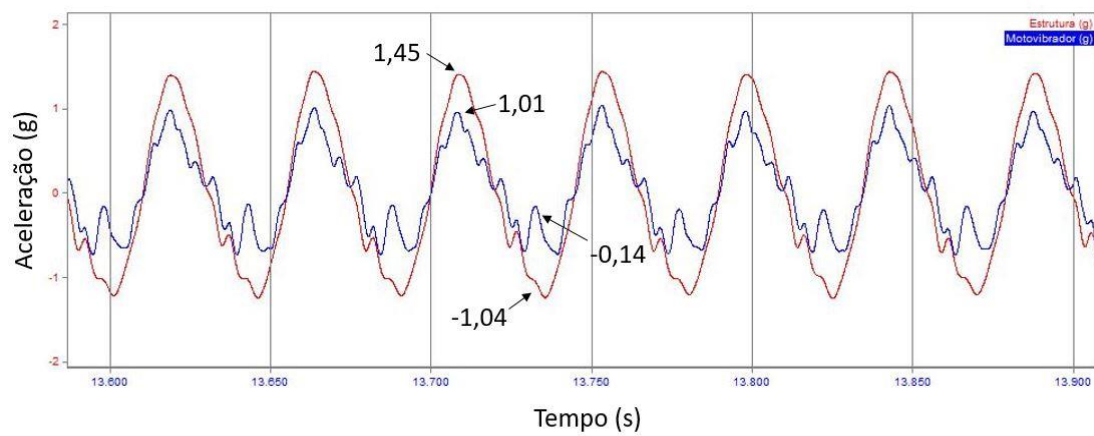
estão em fase, ou seja, os picos acontecem nos mesmos instantes. O gráfico da medição é apresentado na Figura 43.

Figura 42 - Posicionamento dos sensores no Teste 4.



Fonte: O autor

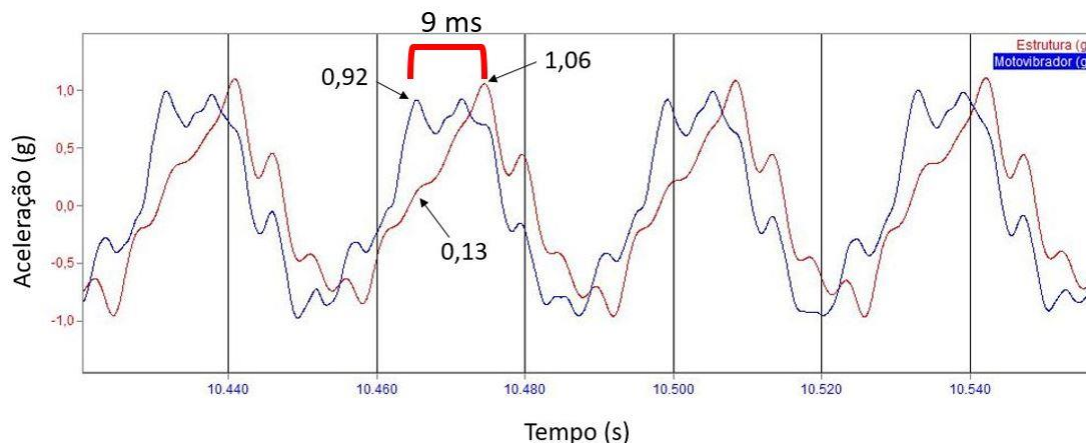
Figura 43 - Vibração estrutura e motorvibrador 25 Hz. Motorvibrador (azul), estrutura (vermelho)



Fonte: O autor (2022)

Na sequência, a resposta a excitação de 33 Hz é apresentada na Figura 44. Neste gráfico, é verificada uma amplificação do sinal da fonte de vibração (motovibrador) menor do que para a frequência de 25 Hz, sendo as suas amplitudes positivas máximas de 0,92g e 1,06g respectivamente. Outro ponto interessante é a defasagem entre os sinais, chegando a 9 ms para os dois picos indicados.

Figura 44 - Vibração estrutura e motovibrador 33 Hz. Motovibrador (azul), estrutura (vermelho)

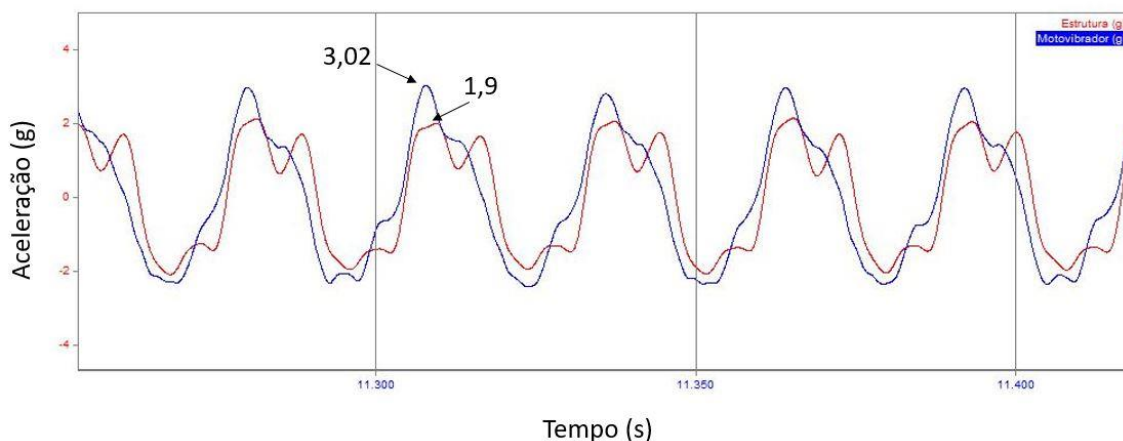


Fonte: O autor

Dando continuidade, a resposta para a excitação de 43 Hz é apresentada na Figura 45. Desta vez, a resposta a vibração harmônica forçada do motovibrador foi maior que da estrutura, sendo 3,02g e 1,9g respectivamente, totalizando uma diferença de 1,12g para o instante. Neste teste foi observada uma perda de energia, sendo que a vibração do motovibrador é maior que a vibração da estrutura, o que indica perda da energia produzida pelo motovibrador nas barras roscadas de fixação do motovibrador.

Por fim, é feita a análise da vibração nos contatos fixos e móvel da chave seccionadora de alta tensão. Estes dados também foram comparados aos pares, onde é feita a comparação da vibração entre o contato fixo e o contato móvel e comparada a diferença de amplitudes entre as frequências de 25 Hz, 33 Hz e 43 Hz. Um filtro passa baixas de 150 Hz também foi aplicado para remover parte do ruído dos sinais.

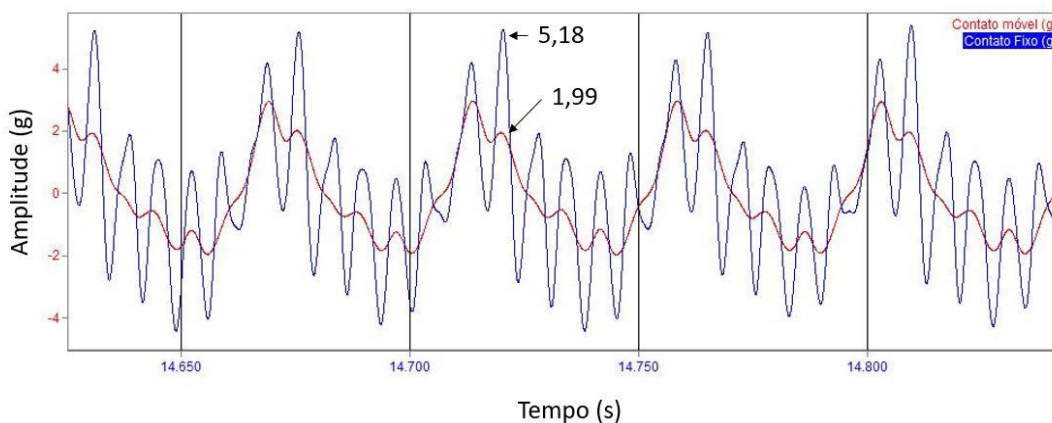
Figura 45 - Vibração estrutura e motovibrador 43 Hz. Motovibrador (azul), estrutura (vermelho)



Fonte: O autor

Ao verificar o comportamento dos contatos quando expostos a 25 Hz de excitação harmônica forçada, Figura 46, é observada uma diferença maior que 3g em diversos pontos ao longo do ensaio. Também é verificado que o contato fixo apresenta vibrações em frequências maiores que o contato móvel.

Figura 46 - Vibração dos contatos, 25 Hz. Contato Fixo (azul), Contato Móvel (vermelho)

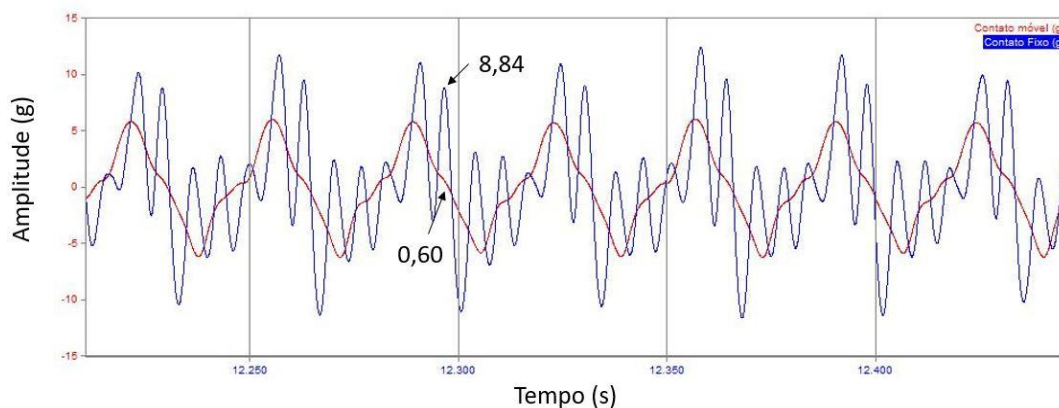


Fonte: O autor

Na sequência, são verificados os dados obtidos na medição com 33 Hz, onde é observado o mesmo comportamento que para o ensaio de 25 Hz. O contato fixo vibra com maior amplitude e frequência que o contato móvel, porém, com uma diferença de

amplitudes maior que para o ensaio anterior, sendo esta maior que 8g em diversos pontos. Tal gráfico é apresentado na Figura 47.

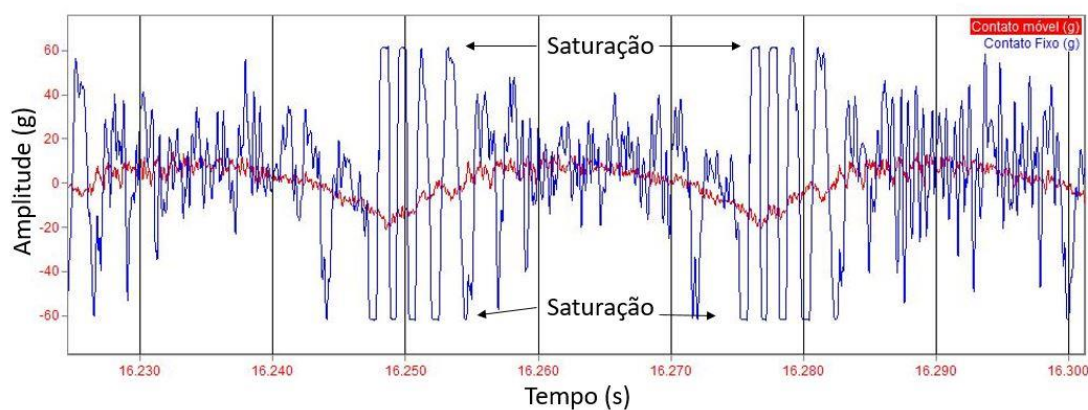
Figura 47 - Vibração dos contatos, 33 Hz. Contato Fixo (azul), Contato Móvel (vermelho)



Fonte: O autor

Por último, o ensaio em 43 Hz é verificado, onde não foi possível observar a diferença das amplitudes devido à saturação do sensor utilizado. O gráfico da Figura 48 apresenta esta saturação em 60g, que é muito maior que para os dois ensaios anteriores, o que implica em uma diferença maior que 50g na aceleração dos contatos. Tal saturação ocorreu devido ao sensor não ter um fundo de escala suficiente para medir o sinal produzido.

Figura 48 - Vibração dos contatos, 43 Hz. Contato Fixo (azul)



Fonte: O autor (2022)

4.7 Discussão dos resultados dos ensaios realizados em bancada de testes

A seguir, são levantados os pontos verificados como importantes para a definição do procedimento de posicionamento e fixação do motovibrador em chaves seccionadoras de alta tensão de abertura vertical:

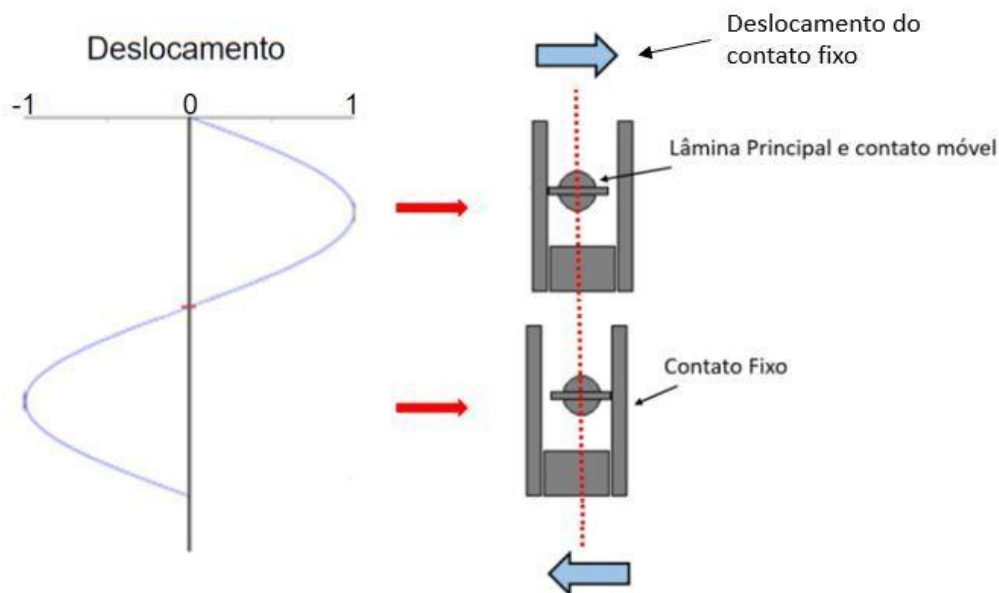
- Ao verificar a resposta em frequência dos contatos, é observada grande diferença entre as amplitudes de velocidade quando alterado a direção de vibração. Tal diferença é verificada, pois a chave seccionadora é muito mais rígida em uma das direções, o que implica amplitudes muito menores para a direção de vibração *X*. Tal observação apenas é válida para este formato de seccionador.
- Também é verificado que o motovibrador precisa ser instalado próximo ao contato fixo da chave seccionadora, sendo esta a posição 2 dos ensaio experimentais, pois ao vibrar a estrutura na direção de *Y*, com o motovibrador na posição 1, o LVDT indicou que a chave seccionadora não fechou seus contatos em nenhuma das frequências ensaiadas.
- Ao comparar a vibração na estrutura para as frequências de 33 Hz e 43 Hz com o ensaio de 25 Hz para o Teste 4, é possível afirmar que o suporte de fixação do motovibrador na estrutura não consegue mantê-lo rígido a estrutura, e com isto, é possível verificar frequências de interesse para a utilização da vibração sem a necessidade de medição das partes energizadas da chave seccionadora de alta tensão. Este comportamento é de mais alto interesse para a pesquisa, pois não é possível medir tal comportamento dos contatos, devido à alta tensão das chaves seccionadoras de alta tensão, que iria abrir arco voltaico aos equipamentos de medição instalados.
- Quando comparada a vibração entre os contatos da chave seccionadora, é possível afirmar que mesmo vibrando em uma posição adequada, existe um valor mínimo que um contato necessita vibrar em relação ao outro, desta forma, frequências mais baixas necessitam de mais massa excêntrica instalada aos eixos girantes do motovibrador e frequências mais altas necessitam de menos massa excêntrica.
- Os gráficos do LVDT apresentaram o fechamento dos contatos em tempos inferiores a 20 segundos. Desta forma, é possível afirmar que a chave seccionadora não necessita ficar exposta à vibração por tempos da ordem de

minutos. Desta forma, evita-se criar alguma possível falha em algum componente devido à fadiga, afrouxamento ou outro fenômeno relativo à vibração. Ainda vale ressaltar que seccionadores instalados no setor de transmissão não são solicitados com frequência, o que garante a vida do seccionador contra uma possível falha devido fadiga dos componentes.

- Ainda vale ressaltar que o ideal para garantir o funcionamento da vibração seria a medição da resistência elétrica entre os contatos. Tal procedimento não foi realizado no presente trabalho devido a falta do equipamento para a realização de tal medição.

Uma possível explicação para o funcionamento da vibração harmônica forçada auxiliar o fechamento dos contatos, é que quando um dos contatos se desloca para um lado em relação ao outro contato, a força normal entre as superfícies de um dos dois lados é reduzida. Devido à força de atrito ser proporcional a força normal à superfície, tal atrito é reduzido e com isto, facilita-se o encaixe dos contatos. A Figura 49 representa os deslocamentos para facilitar o entendimento.

Figura 49 - Demonstrativo do deslocamento dos contatos



Fonte: O autor

Em outras palavras, durante o semiciclo de vibração para um lado, o contato fixo se move para um lado, e devido a inércia, a haste da lâmina principal se mantém parada,

e com isso, um lado do contato é apertado, enquanto o outro lado é afrouxado, sendo que deste lado que é afrouxado, a força normal a superfície reduz, resultando em um atrito menor.

Ainda vale ressaltar a influência de parâmetros que podem fazer com que os contatos do seccionador não fechem, como por exemplo, a estrutura que suporta o seccionador, que pode ser de concreto ou de metal, tendo diversos formatos. O aperto dos contatos, que podem estar apertados a um nível que não possibilite o encaixe. O alinhamento entre os contatos, que também pode fazer com que force muito um lado do contato, não conseguindo encaixar. O tamanho do seccionador, que pode acontecer de amortecer a vibração, não chegando aos contatos, ou ainda, não amplificar o sinal de vibração o suficiente para o ponto de interesse, entre outros fatores.

4.8 Procedimento de posicionamento desenvolvido utilizando os ensaios em laboratório

A seguir, é apresentado o procedimento detalhado que deve ser utilizado para a realização da instalação de motovibradores unidirecionais em chaves seccionadoras de alta tensão de abertura vertical, facilitando o entendimento da posição e sentido de vibração que deve ser utilizado.

Desta forma, para a apresentação das informações, inicialmente um fluxograma com os passos que auxiliam na identificação de pontos que devem ser seguidos e posteriormente, cada item do fluxograma é apresentado individualmente.

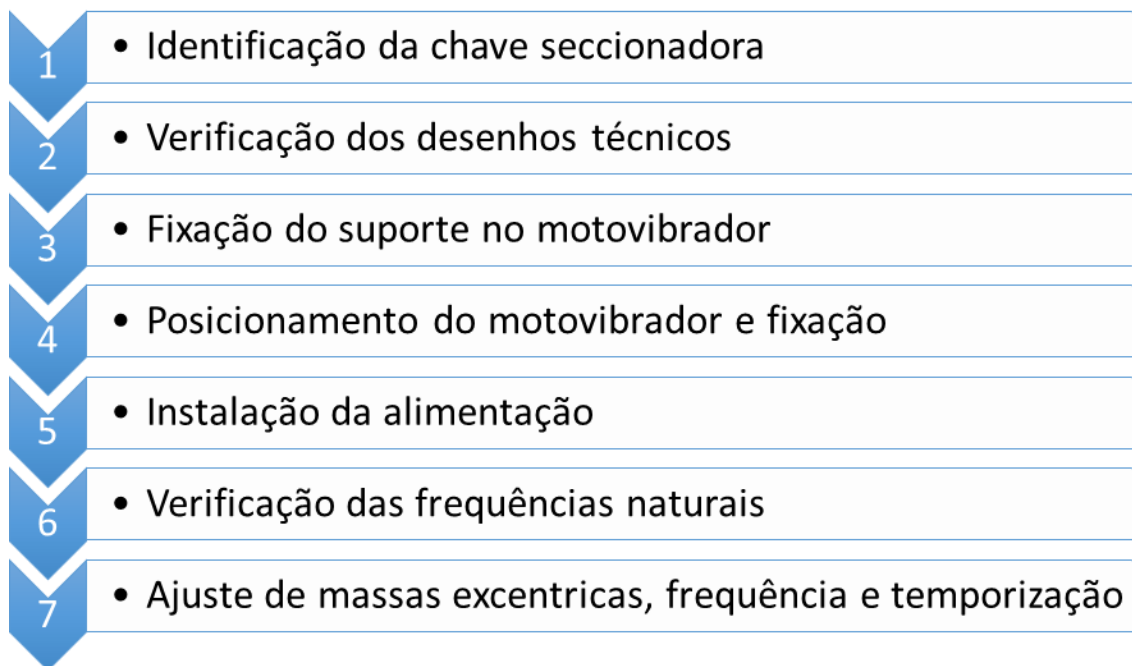
Observações necessitam ser feitas relativas ao procedimento como o formato do seccionador, o aperto dos contatos, a estrutura suporte do seccionador, folgas em componentes principais, entre outros fatos, influenciam diretamente no funcionamento do procedimento proposto.

4.8.1 Fluxograma de instalação do motovibrador linear

Para uma orientação de como instalar o motovibrador de forma adequada, 7 passos são necessários para o correto funcionamento do equipamento. A seguir, na Figura 50, é apresentado um fluxograma com estes 7 passos.

Após a realização dos passos, é possível utilizar a vibração harmônica forçada produzida pelo motovibrador para o auxílio do fechamento adequado dos contatos elétricos dos seccionadores de alta tensão.

Figura 50 - Fluxograma orientativo do procedimento de fixação e posicionamento



Fonte: O autor

4.8.2 Passo a passo do procedimento de instalação

A seguir, é apresentado o passo a passo de forma detalhada, onde cada item do fluxograma da Figura 50 é explicado.

4.8.2.1 Passo 1 - Identificação da chave seccionadora

O primeiro passo para a realização da instalação do motovibrador a uma chave seccionadora é a verificação de qual chave seccionadora irá receber o equipamento auxiliar.

Após identificar o seccionador, dados como o formato construtivo e o nível de tensão nominal necessitam ser identificados. A norma ABNT NBR 7571 Seccionadores, chaves de terra e aterramento rápido auxilia na identificação do formato construtivo das chaves, conforme a Figura 51.

Figura 51 - Formatos construtivo dos seccionadores

Descrição	Código	Diagrama
Abertura Lateral	AL	
Abertura Central	AC	
Dupla Abertura	DA	
Abertura Vertical	AV	
Vertical Reverso	VR	
Faca	FC	

Fonte: adaptado de ABNT NBR 7571 (2011)

Sabendo do formato construtivo, é possível identificar em qual parte do seccionador será instalado o motovibrador, e com isto, é possível identificar nos desenhos técnicos, quais as dimensões do componente onde o seccionador será fixado.

Tendo ciência do nível de tensão, também é possível ter uma ideia das dimensões físicas da chave seccionadora, sendo que para chaves seccionadoras maiores, uma maior amplitude de vibração necessita ser aplicada, e com isto, pode-se verificar quanta massa excêntrica será instalada ao motovibrador.

4.8.2.2 Passo 2 - Verificação dos desenhos técnicos

Um levantamento dos desenhos técnicos do seccionador que irá receber o motovibrador é de grande ajuda, pois avaliando os desenhos técnicos é possível verificar as dimensões da base do seccionador.

Seguindo orientações da norma técnica ABNT NBR IEC 60694 – Especificações comuns para normas de equipamento de manobra de alta-tensão e mecanismo de comando, todos os equipamentos auxiliares devem ser instalados abaixo das colunas de isoladores. Desta forma, o ponto de melhor instalação para o motovibrador é na base do seccionador, sendo sua localização e sentido distinto para cada formato construtivo de seccionadores.

Para os seccionadores de abertura vertical, vertical reversa e faca, verificou-se através de ensaios experimentais, que o melhor posicionamento para instalação do motovibrador é alinhado ao contato fixo do seccionador, sendo o sentido de vibração ideal, na direção de aperto dos contatos fixos.

A Figura 49 ilustra o deslocamento esperado para os contatos dos seccionadores de abertura vertical quando expostos a vibração.

Neste cenário, espera-se que os contatos fixos vibrem em relação lâmina principal e contato móvel. O inverso é esperado para os seccionadores de abertura vertical reversa, sendo o deslocamento do contato móvel maior que o contato fixo.

Tendo ciência da posição que se irá instalar o motovibrador, é possível adquirir as medidas do ponto de interesse e então fazer a furação no motovibrador, ou até mesmo na estrutura do seccionador.

4.8.2.3 Passo 3 - Fixação do suporte do motovibrador

Tendo realizado a furação nas quatro extremidades do motovibrador, é possível cortar as barras roscadas e posicioná-las no motovibrador. Também é ideal realizar a furação nas cantoneiras que sustentam o motovibrador, servindo de apoio para pressionar o motovibrador contra a estrutura.

Com o suporte fixado ao motovibrador, é possível posicioná-lo e fixar o mesmo contra a estrutura da base do seccionador.

Caso haja a possibilidade de realizar a furação na base do seccionador, também é possível utilizar parafusos para prender o motovibrador a estrutura, não necessitando das barras roscadas.

4.8.2.4 Passo 4 - Posicionamento do motovibrador e fixação

Após a fixação do suporte no motovibrador, o mesmo pode ser posicionado na chave seccionadora de alta tensão. Lembrando que a posição de instalação do motovibrador, para chaves seccionadoras do tipo construtivo de abertura vertical, vertical reversa e faca, é alinhado ao contato fixo do seccionador, sendo o sentido de vibração ideal, o sentido de aperto dos contatos fixos.

O mesmo deve ser fixado na base dos isoladores, sendo a vibração transferida através das colunas de isoladores para os contatos fixo e móvel

Após a instalação na posição, é possível instalar a carenagem de proteção, que permite a proteção dos componentes do motovibrador contra intempéries.

A Figura 52, apresenta um demonstrativo do motovibrador instalado com a sua carenagem de proteção.

Figura 52 - Motovibrador posicionado com a carenagem de proteção



Fonte: O autor

O quadro de comando do motovibrador pode ser instalado próximo ao quadro de comando da chave seccionadora, sendo o mesmo, necessariamente, instalado entre 0,4 m e 2 m do nível de serviço, conforme orientação normativa.

4.8.2.5 Passo 5 - Instalação da alimentação

Após a instalação do motovibrador e do seu quadro de comando na posição, é possível conectar os cabos de alimentação do motovibrador ao seu quadro de comando e também do quadro de comando do motovibrador a energia elétrica. Para a alimentação do quadro de comando, é utilizada alimentação monofásica com 220 VCA.

Também é possível instalar os cabos que fazem a interface entre o acionamento do seccionador ao quadro de comando do motovibrador. Desta forma, quando uma manobra for acionada, o motovibrador também será acionado. Os sinais de acionamento aceitam corrente alternada ou contínua de 24 V a 240 V.

4.8.2.6 Passo 6 - Verificação das frequências naturais

Após instalar o motovibrador em sua posição, é necessário a realização de ensaios para a verificação das frequências naturais dos contatos do seccionador, onde necessariamente, o contato fixo necessita vibrar em um modo de vibração que apresente amplitudes maiores que a do contato móvel.

Para isto, duas técnicas podem ser utilizadas, sendo uma delas a utilização de um coletor de vibrações, que necessita a desenergização do equipamento, e o outro método, menos preciso, que não necessita da desenergização do seccionador.

O primeiro procedimento utiliza um acelerômetro preso aos contatos do seccionador, medindo no sentido em que a vibração é aplicada. Com isto, é variada a frequência do motovibrador através do inversor de frequência que o alimenta e coletado os valores de velocidade dos contatos em mm/s RMS. Ao realizar a coleta destes dados, serão verificados picos de velocidade em relação as frequências próximas. Desta forma, é verificado que as frequências em que estes picos acontecem, são frequências naturais da estrutura e, portanto, frequências de interesse. Um exemplo pode ser verificado na Figura 32, onde pode ser observado as frequências de 25 Hz, 33 Hz e 43 Hz na direção Y.

O segundo método, menos preciso, utiliza de dois acelerômetros e um amplificador de sinais, sendo um dos acelerômetros preso ao motovibrador e o outro preso à estrutura onde o motovibrador está instalado, sendo os dois instalados de forma a medir a vibração no sentido que a vibração é aplicada. Com isto, é posta uma frequência no inversor de frequência e são coletados os dados dos acelerômetros através

do amplificador de sinais e, após isto, é aplicado um filtro passa baixas de 150 Hz ao sinal. Ao verificar defasagem entre os sinais dos acelerômetros, ou uma diferença de amplitude, onde o motovibrador apresente uma amplitude da ordem de 1,5 vezes, maior que a vibração da estrutura, são verificadas as frequências naturais da estrutura. Tal diferença é estipulada devido aos ensaios experimentais, onde foi verificado a diferença de 3,02g para 1,9g, que pode ser verificado na Figura 45.

Para ambos os ensaios é possível realizar a Transformada Rápida de Fourier, que como dado de saída já é a amplitude versus a frequência de excitação.

Para ambos os ensaios, é recomendável a utilização do mínimo de massa excêntrica possível instalada ao motovibrador, ou seja, uma massa excêntrica por eixo girante.

Vale ressaltar, que a força produzida pelo motovibrador é maior conforme o aumento da frequência de rotação. Com isto, é orientada a utilização de frequências entre a faixa de 25 Hz e 45 Hz.

4.8.2.7 Passo 7 - Ajustes de massas excêntricas, frequência e temporização

Após a coleta das frequências naturais, é necessário adequar alguns parâmetros, como a temporização dos relés temporizadores dentro do quadro de comando do motovibrador, frequência de excitação e a quantidade de massas excêntricas.

A frequência de excitação do motovibrador é ajustada pelo parâmetro 02 do inversor de frequência. Para a sua alteração, utilizar a interface homem máquina do próprio inversor de frequência. Utilizar a frequência encontrada no item anterior: Verificação das frequências naturais.

O tempo em que o motovibrador fica ligado é setado através dos relés temporizadores dentro do quadro de comando do motovibrador. Os temporizadores apresentam uma faixa de tempo de 30 s a 300 s. Conforme os ensaios experimentais, o motovibrador não necessita ficar ligado por muito tempo, então é orientativo alterar o dial de temporização para algo próximo a 40 s.

Por fim, é feita a instalação das massas excêntricas no motovibrador, que foi verificada a necessidade de duas massas excêntricas instaladas por eixo para uma chave seccionadora de alta tensão de 230 kV de abertura vertical. Desta forma, é necessário a

realização de testes experimentais para chaves de outros níveis de tensão e outros formatos construtivos.

4.9 Resultados da validação em um seccionador em funcionamento dentro de uma subestação

A seguir, neste subtópico, são apresentados os resultados da aplicação da metodologia de posicionamento e fixação do motovibrador em uma chave seccionadora de abertura vertical energizada dentro de uma subestação de energia elétrica.

Inicialmente foi verificada qual a chave seccionadora de alta tensão a ser ensaiada, conforme o item número 1 do fluxograma de instalação e verificado o formato construtivo da estrutura que sustenta através dos desenhos técnicos. Tal verificação possibilitou a furação adequada do motovibrador para posicionamento do suporte.

Os itens 3, 4 e 5 do procedimento são referentes ao posicionamento e fixação do motovibrador na estrutura, onde o motovibrador foi posicionado alinhado ao contato fixo, com vibração na direção de *Y*. Os demais detalhes da instalação podem ser verificados no item 3.4.

Após a realização da instalação dos equipamentos, foi iniciada a coleta de dados através dos ensaios experimentais, onde foi verificado que as frequências de 12,3 Hz e 32,6 Hz causavam picos de vibração. Tal verificação foi feita através de medições de aceleração no motovibrador e na estrutura de suporte do seccionador, pois a medição dos contatos é impossibilitada devido à alta tensão.

O Quadro 4 indica a quantidade de massas excêntricas utilizadas e a força produzida por elas nas frequências de excitação.

Quadro 4 - Força produzida pelo motovibrador

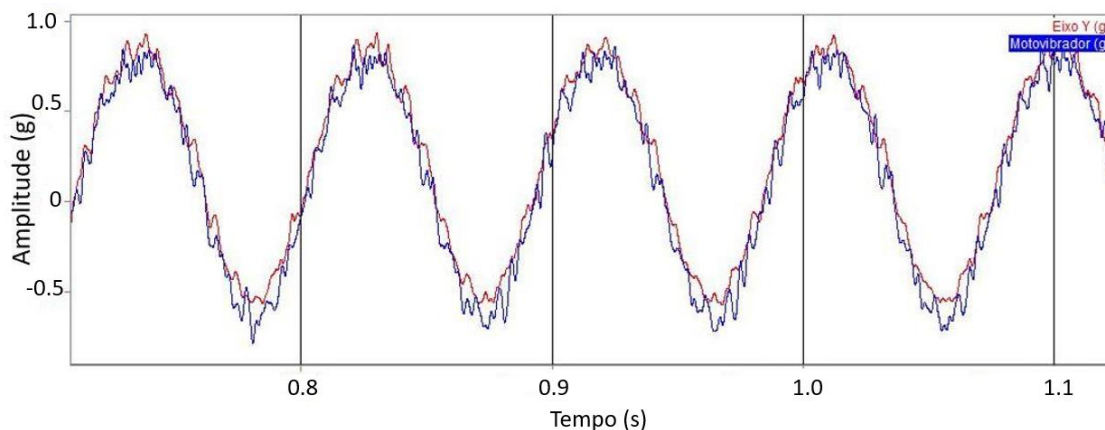
Frequência (Hz)	Massa (kg) por eixo	Força centrífuga (N)
12,3	0,520	196
32,6	0,520	1376

Percebe-se que para a frequência de 32,6 Hz a força produzida é muito maior que para a frequência de 12,3 Hz, e isto se dá devido a força centrífuga ser proporcional ao quadrado do movimento angular.

4.9.1 Ensaio com frequência de 12,3 Hz testado em seccionador energizado

Para o primeiro teste, foram realizadas as medições utilizando o sistema de aquisição de dados ADS1800, onde foram coletadas informações sobre a vibração da estrutura que suporta o seccionador. Os acelerômetros mediram a vibração nos três eixos cartesianos propostos, onde foi verificado que para o eixo X e Z , a resposta da estrutura era muito pequena, o que indica que havia pouca aceleração sendo transferida para a estrutura nestas direções. Por outro lado, um comportamento cíclico da vibração pode ser verificado no eixo Y e no motovibrador, o que indica que a vibração estava sendo transferida para a estrutura. O sinal do eixo Y e do motovibrador pode ser verificados na Figura 53, sendo estes sinais filtrados com um filtro passa baixas de 150 Hz.

Figura 53 - Dados coletados da estrutura utilizando 12,3 Hz e 0,520 kg de massa por eixo, motovibrador (azul) e estrutura em Y (vermelho)

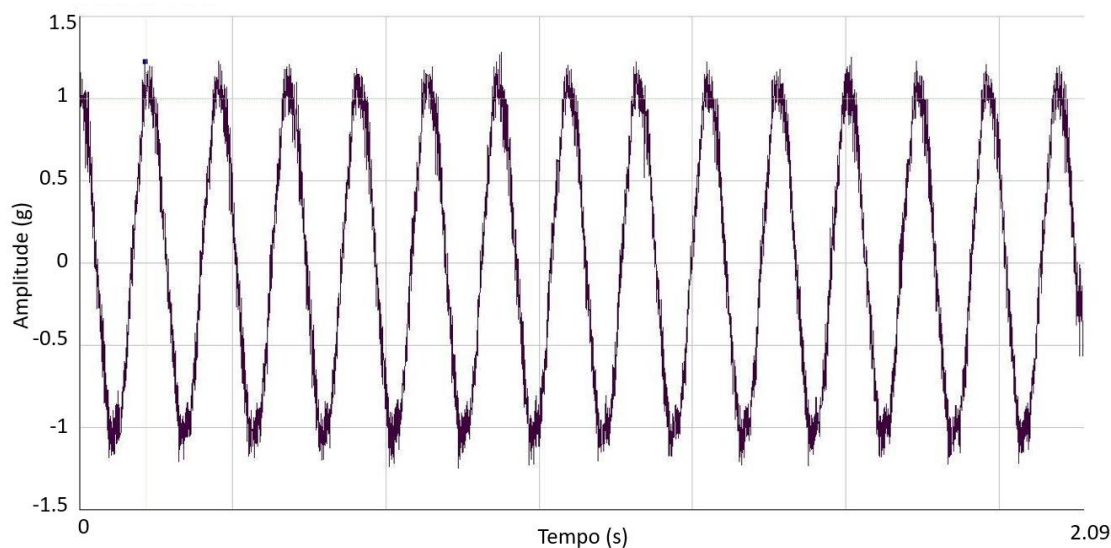


Fonte: O autor

Na sequência, foi verificado o comportamento do acelerômetro preso ao contato fixo do seccionador, que indicou uma amplitude de 1,2g neste componente e pode ser visualizado na Figura 54. Não foi verificada a diferença de aceleração entre os contatos, pois o equipamento de medição, que utiliza sensores medidos por bluetooth, não mede dois sensores ao mesmo tempo, o que não possibilitaria casar os sinais devido a fase entre os sinais. A alta tensão sobre as chaves seccionadoras também impossibilitou a instalação de sensores cabeados.

Nos ensaios realizados em laboratório, foi verificado que para um seccionador um pouco maior, era necessário uma diferença de 5g a 6g de vibração entre o contato fixo e o contato móvel. Como para este experimento só foi possível medir um único acelerômetro, não foi possível medir esta diferença. Porém, como a amplitude foi muito baixa, é possível afirmar que não havia tal diferença entre a vibração nos dois contatos.

Figura 54 - Sinal do contato fixo quando submetido a 12,3 Hz

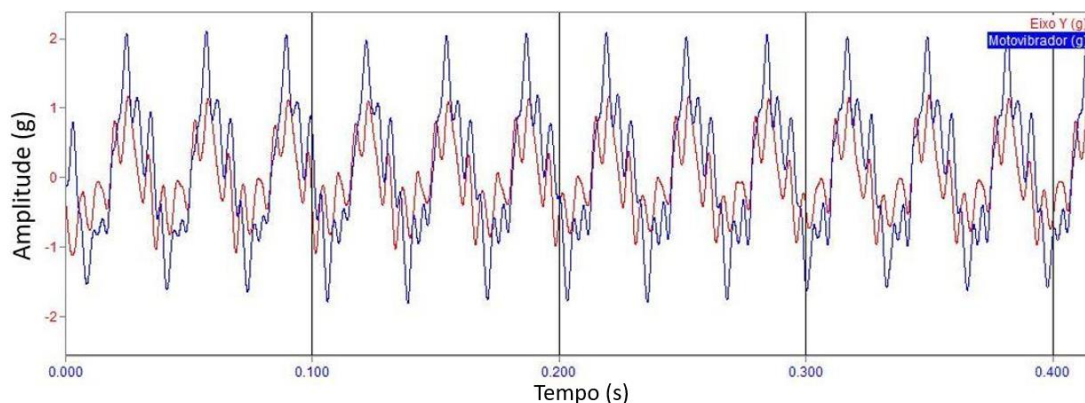


Fonte: O autor

4.9.2 Ensaio com frequência de 32,6 Hz testado em seccionador energizado

Neste ensaio, foi verificado o comportamento do seccionador quando exposto à vibração de 32,6 Hz. Na estrutura, é verificada uma amplitude maior de aceleração que para o ensaio anterior, sendo esta 1g maior que para o ensaio de 12,3 Hz, como é observado na Figura 55. No motovibrador a amplitude aumentou de 1g para níveis próximos a 2g em alguns instantes. Nota-se que esta amplitude apresenta diferença de valores em relação a estrutura, e isto acontece devido à transmissibilidade de vibração produzida no sistema de fixação do motovibrador. Conforme o procedimento proposto, uma diferença maior que 1,5 vezes a amplitude do sinal da estrutura foi medido no motovibrador, o que indicaria uma frequência possivelmente funcional, com uma quantidade de massa excêntrica acima do necessário.

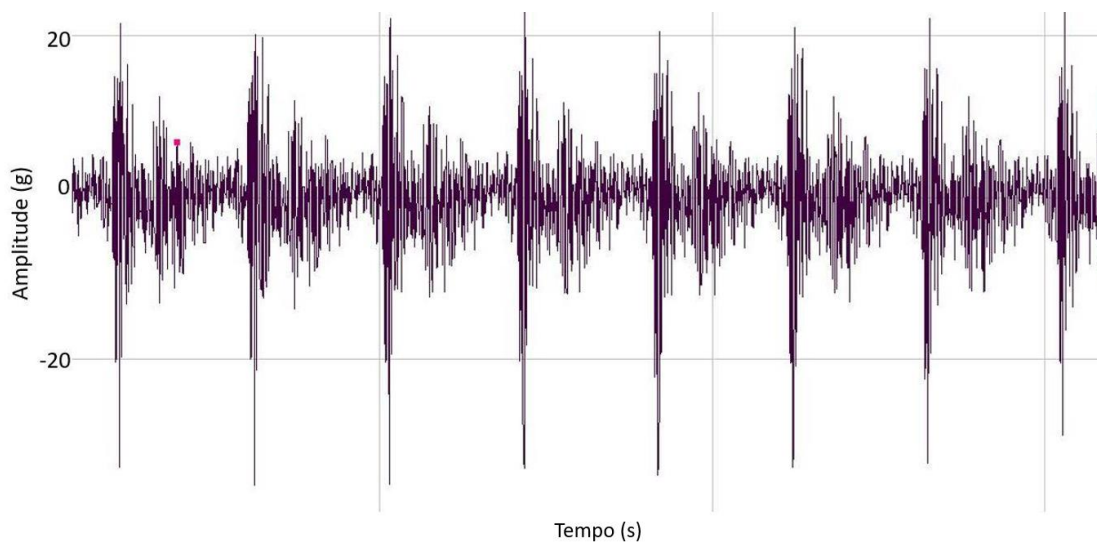
Figura 55 - Resposta dinâmica para excitação de 32,6 Hz e 0,52 kg de massa, motovibrador (azul) e estrutura em Y (vermelho)



Fonte: O autor

Para a validação da amplitude 1,5 vezes maior, foi verificado o comportamento do contato fixo, que para este ensaio, não apresentou um comportamento senoidal. Este fenômeno ocorreu devido a leves impactos da lâmina do contato móvel contra o contato fixo, o que causa picos de aceleração. Este comportamento pode ser verificado na Figura 56, sendo que a amplitude máxima registrada pelo acelerômetro foi de -35,6 g.

Figura 56 - Resposta dinâmica do contato fixo em 32,6 Hz



Fonte: O autor

Através deste experimento, três observações puderam ser constatadas. Primeiramente, em relação à amplitude de vibração da base onde está instalado o

motovibrador unidirecional. Para o ensaio em 32,6 Hz, uma diferença de 1g foi verificada entre o motovibrador e a estrutura, o que é próximo à diferença observada para as frequências de 33 Hz e 43 Hz do Teste 4 realizado em laboratório.

Por segundo, foi verificada a amplitude de aceleração dos contatos, que foi mais elevada que para o ensaio com 33 Hz do Teste 4, mesmo utilizando a metade da quantidade de massa excêntrica. Outro ponto é que as acelerações de -35,6g aconteceram devido a leves impactos entre a lâmina do contato móvel e o contato fixo. Para estes impactos acontecerem, necessariamente um contato necessita se desencostar do outro, ou seja, a vibração se tornou funcional, pois se não há contato, não há atrito, o que facilita o encaixe dos contatos.

Por fim, a comparação das frequências, que em laboratório foi de 33 Hz, enquanto que para o seccionador também de abertura vertical dentro de uma subestação foi de 32,6 Hz, o que talvez implique em um padrão de frequências.

Com isto, é validado o posicionamento do motovibrador em relação a estrutura da chave seccionadora de abertura vertical, bem como o sentido de vibração proposto para este modelo de chave.

Não foram feitos ensaios com menos massa excêntrica para a frequência de 32,6 Hz, pois a quantidade utilizada é o mínimo que pode ser instalado ao motovibrador. O item 7 do procedimento também não foi executado, pois a massa excêntrica já estava no mínimo e os relés temporizadores, bem como o quadro de alimentação, não foram instalados, pois o motovibrador ia ser removido da estrutura após a realização dos ensaios.

5. CONCLUSÃO

Diversos pontos importantes foram verificados durante a pesquisa, sendo que tais informações são pertinentes para o desenvolvimento do procedimento correto de posicionamento e fixação do sistema de vibração unidirecional em chaves seccionadoras de alta tensão.

- Avaliou-se a funcionalidade do motovibrador, onde foi verificado que ao utilizar o mesmo com dois pares de massas excêntricas, é gerada energia suficiente para influenciar o correto fechamento dos contatos da chave seccionadora estudada em laboratório.
- A fixação por pressão indicou que, em baixas frequências, a vibração é transferida para a estrutura da chave seccionadora com poucas defasagem. Porém, ao aumentar a energia produzida pelo motovibrador, o sinal das acelerações começa a apresentar defasagem o que pode ser utilizado para encontrar uma frequência de interesse.
- Testes apontaram que o melhor posicionamento do motovibrador, para o modelo de chaves seccionadoras com abertura vertical, é próximo à coluna fixa da porcelana, onde é verificado que o contato fixo precisa vibrar em relação ao contato móvel.
- Foi verificado que a vibração unidirecional precisa ser aplicada na direção de aperto dos contatos fixos da chave seccionadora de alta tensão. Ainda foi verificado que existe uma amplitude mínima de deslocamento de um contato em relação ao outro para que o correto fechamento da chave seccionadora aconteça.
- Através dos dados obtidos do LVDT, foi visualizado que nem todas as frequências de excitação mecânica são funcionais. Mesmo vibrando uma posição funcional, na direção de aperto dos contatos, existe uma quantidade mínima de aceleração que precisa ser superada para que o encaixe dos contatos ocorra quando uma manobra for executada de forma inadequada.
- Também foi verificado que ao observar a defasagem ou alteração da amplitude das acelerações nos acelerômetros presos ao motovibrador e à estrutura onde o motovibrador está posicionado, é possível identificar as frequências de interesse para a aplicação da vibração harmônica forçada nos contatos do seccionador,

sem a necessidade das medições acima do início dos isoladores, garantindo a possibilidade de medição, mesmo com o seccionador energizado.

Com estes dados, foi possível desenvolver o procedimento de posicionamento e fixação do motovibrador unidirecional para chaves seccionadoras de alta tensão de abertura vertical, que posteriormente foi testado em subestação.

Nas medições em uma chave seccionadora de alta tensão de abertura vertical, dentro de uma subestação de energia elétrica, foi possível validar o procedimento desenvolvido, onde ao verificar diferença de amplitude entre o motovibrador e a estrutura, foram encontradas as frequências naturais dos contatos do seccionador, onde ao medir a aceleração do contato fixo, foi verificada acelerações de $-35,6 \text{ g}$, o que indica impactos de um contato contra o outro. Desta forma, é validado o funcionamento da vibração nesta direção e nesta frequência, pois para a ocorrência de um impacto, necessariamente, um contato necessita se desencostar do outro, o que garante a diminuição do atrito entre as partes.

Ainda é possível apontar sugestões de diversos trabalhos futuros, sendo algumas delas citadas a seguir:

- Aprimoramento do suporte de fixação do motovibrador nas estruturas. No trabalho a fixação foi realizada através de quatro barras roscadas que possibilitaram a fixação do motovibrador por pressão contra a estrutura. Com o aprimoramento do suporte, talvez possa ser necessária uma menor quantidade de massa excêntrica que a utilizada no trabalho.
- Verificação da influência de estruturas de concreto para suporte do seccionador. Todos os ensaios deste trabalho foram realizados em seccionadores com estruturas metálicas para suporte do seccionador. Desta forma, é necessária a validação em formatos diferentes de estruturas de suporte.
- Verificação do procedimento em outros formatos construtivos de seccionador. No trabalho apenas seccionadores de abertura vertical foram testados. Desta forma, necessita-se a verificação do funcionamento em outros formatos de seccionador.
- Verificação da influência de parâmetros como o nível dos contatos e aperto. Neste trabalho apenas uma mesma quantidade de aperto dos contatos foi

verificada, onde os contatos foram alinhados antes do início dos ensaios. Desta forma, é possível verificar a influência de desalinhamento dos contatos, tanto no sentido de aperto, quanto à altura dos contatos em relação ao solo. A questão da altura pode influenciar, pois ao fechar um seccionador de abertura vertical, que seu contato fixo esteja mais alto que o contato móvel, a haste terá uma tensão sobre a sua base quando a mesma tiver terminado o seu movimento, o que pode auxiliar o fechamento, que ao aplicar vibração, faz mais força para dentro dos contatos.

- Realizar a medição da resistência elétrica dos contatos antes e após a aplicação de vibração mecânica. Tal medição possibilitaria uma melhor avaliação da influência da vibração harmônica forçada sobre o encaixe dos contatos, indicando se a resistência elétrica diminui quando a haste está posicionada no seu fim de curso mecânico. Desta forma, é possível avaliar qualitativamente a manobra com a aplicação de vibração.
- Avaliar a fadiga nos diversos componentes das chaves seccionadora de alta tensão quando submetidas as cargas cíclicas da vibração harmônica forçada. Tal fenômeno pode comprometer os componentes, desta forma, necessita-se de uma avaliação mais aprofundada sobre o tema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 62271. Manobra e comando de alta tensão – Parte 1: Especificações comuns para equipamentos de manobra e comando em corrente alternada. Brasil, Janeiro de 2020.
- ABNT NBR 7571. Seccionadores – Características técnicas e dimensionais. Brasil, Janeiro de 2011.
- ABNT NBR IEC 60694. Especificações Comuns para Normas de Equipamentos de Manobra de Alta-Tensão e Mecanismos de Comando. 1 ed. ABNT: Abril, 2006.
- CIGRÉ WG A3.06: Final Report of the 2004 - 2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment. Part 3: Disconnectors and Earthing Switches SG6. CIGRÉ Technical Brochure n. 511, 2011.
- EPE. Relatório de Síntese: Matriz Elétrica Brasileira. Rio de Janeiro: BEN, 2020.
- FRONTIN, S. O. Equipamentos de Alta Tensão: Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas. Brasil, Brasília, 2013.
- INMAN, D. J. Vibrações Mecânicas. - 4 ed. - Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.
- KELLY, S. G. Vibrações mecânicas: teoria e aplicações. São Paulo, SP: Cengage, 2017.
- MAMEDE FILHO, J. Manual de equipamentos elétricos. - 5. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2022.
- NALON, J. A. Introdução ao processamento digital de sinais. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- OLIVEIRA, L. C. Projeto e Concepção de Motovibrador Linear para Aplicação em Manobras de Chaves Seccionadoras de Alta Tensão. Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2022.
- ONS. Mapa dinâmico do SIN. Disponível em:<<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Acesso em: 17 de maio de 2022, 16:01.
- RECH, M. Estudo Numérico-experimental de Chaves Seccionadoras de Alta Tensão Submetidas à Vibração Mecânica para Auxílio em Manobras de Fechamento. Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2019.

ROCHA, L. F., Implementação de um Sistema para Manobra de Seccionadores de Alta Tensão Visando seu Processo de Automação. Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2014.

ROCHA, Luciano Favretto da; ISRAEL, Charles Leonardo. Dispositivo de Automação de Seccionador de Alta Tensão. Titular: Fundação Universidade de Passo Fundo; Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica - CEEE - GT. Procurador: Milton Leão Barcellos & CIA LTDA. BR 10 2013 020198 7. Depósito: 08 ago. 2013. Concessão: 09 fev. 2021.

SETTI, A. et al. Analysis of Harmonic Vibration Applied as Assistance to Maneuvering High Voltage Switches. American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences. vol. 66. pp. 184-201. 2020.

SOUZA, A. F. Sistema para Monitoramento da Operação de Chaves Seccionadoras de Alta Tensão Baseado na Análise das Correntes do Motor de Acionamento. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Elétrica. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica (Mestrado Profissional). Florianópolis: Dezembro, 2002.

THOMAZINI, D. Sensores industriais: fundamentos e aplicações. -9. ed. São Paulo: Érica, 2020.

YAO, Y. WANG. N. Fault diagnosis model of adaptive miniature circuit breaker based on fractal theory and probabilistic neural network. vol. 142. 2020.

YAN, D. et al. Interval uncertainty analysis of vibration response of hydroelectric generating unit based on Chebyshev polynomial. vol. 155. 2022.

ZHENG. J. et al. Feature extraction of mechanical faults from phase variation in transformer vibration. vol. 185. 2022.

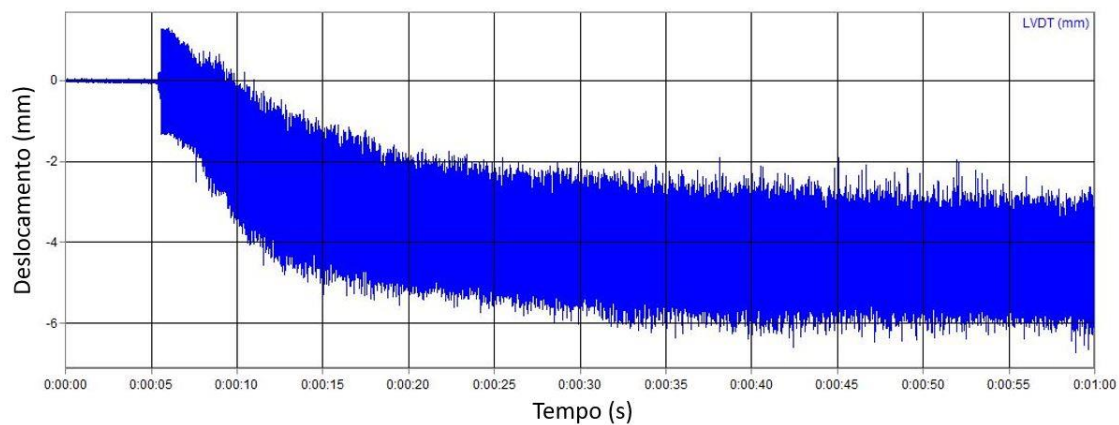
AGRADECIMENTOS

O autor agradece o suporte financeiro da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL – Transmissão) através do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) sob o contrato nº CEEE-GT/5000004927, bem como o apoio institucional da Fundação Universidade de Passo Fundo (FUPF).

APÊNDICE A

A seguir, é apresentado um dos dados gerados pelos sinais do LVDT, onde é ilustrado o sinal sem a utilização do filtro passa baixas com uma frequência de corte superior de 15 Hz.

Figura 57 - Sinal do LVDT do Teste 1 sem o filtro passa baixas para a frequência de 28,5 Hz



Fonte:

O

autor



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br