

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

ESTUDO EXPERIMENTAL DA APLICAÇÃO DE VIBRAÇÃO
MECÂNICA NO PROCESSO DE MANOBRA DE CHAVES
SECCIONADORAS

Ademilson Setti

Passo Fundo

2019



Ademilson Setti

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA APLICAÇÃO DE VIBRAÇÃO
MECÂNICA NO PROCESSO DE MANOBRA DE CHAVES
SECCIONADORAS**

Orientador: Prof. Dr. Charles Leonardo Israel

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
2019

CIP – Catalogação na Publicação

S495e Setti, Ademilson
Estudo experimental da aplicação de vibração mecânica no processo de manobra de chaves seccionadoras [recurso eletrônico] / Ademilson Setti. – 2019.
4.6 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Charles Leonardo Israel.
Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação) – Universidade de Passo Fundo, 2019.

1. Processos de fabricação. 2. Dispositivos eletromecânicos – Vibração. 3. Alta voltagem. 4. Subestações elétricas.
I. Israel, Charles Leonardo, orientador. II. Título.

CDU: 621.7

Catalogação: Bibliotecária Juliana Langaro Silveira - CRB 10/2427

Ademilson Setti

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA APLICAÇÃO DE VIBRAÇÃO
MECÂNICA NO PROCESSO DE MANOBRA DE CHAVES
SECCIONADORAS**

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.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor Charles Leonardo Israel
Orientador

Professor Doutor Gustavo Prates Mezzomo
UPF - PPGPPF

Professor Doutor Agenor Dias de Meira Junior
UPF – PPGPPF

Professor Doutor Herbert Martins Gomes
UFRGS - PROMEC

RESUMO

Chaves seccionadoras são equipamentos que abrem ou fecham circuitos permitindo a passagem de energia elétrica de um ponto para outro. Este trabalho apresenta cunho experimental voltado a análise da utilização de vibração mecânica no processo de manobra de chaves seccionadoras de alta tensão. Neste estudo foram comparados o processo de manobra das seccionadoras da forma como é executado atualmente, ou seja, com vibração livre e a proposta de utilização da vibração forçada sob excitação harmônica como uma alternativa de auxílio para aumento da eficiência do processo de manobra, utilizando o sistema proposto na patente BR 10 2013 020198 7. Para tal foram monitorados alguns parâmetros tais como: Frequência de alívio de torque na caixa de comando para manobra de abertura/fechamento, qualidade de fechamento/abertura, torque no eixo da caixa de comando, torque nos parafusos, tensão mecânica e deformação. No presente trabalho, pode-se obter dados que atestam que a vibração forçada sob excitação harmônica pode proporcionar avanços tecnológicos para o sistema de manobra de seccionadores. Tais avanços possibilitaram um aumento da confiabilidade das manobras de abertura e fechamento dos mesmos. Verificou-se também que a vibração mecânica não causa deformações plásticas nos componentes dos seccionadores estudados, para os critérios de vibração adotados durante a pesquisa. Deste modo a qualidade do fechamento apresentou avanços positivos com a utilização da vibração forçada sob excitação harmônica validando a solução proposta na patente BR 10 2013 020198 7.

Palavras-chave: Seccionador. Estudo experimental. Alta tensão. Durabilidade mecânica. Análise estatística.

ABSTRACT

High voltage switches are equipment that allow or block the electricity flow from one point to another. This paper presents an experimental approach, focused on the analysis of mechanical vibration applied in the maneuvering process of the switches. In this study, a maneuvering process was reproduced as it is done in industry, that is, free from vibration; then, the proposal to use mechanical vibration as an alternative aid to increase maneuvering process was tested, using the system proposed by patent BR 10 2013 020198 7. The quantitative parameters analyzed in this study are: vibration frequencies that provides torque relief for opening / closing maneuver, camshaft torque in the maneuvers, bolt torque, mechanical stress and deformation from different parts of the switch structure. In the present work, the obtained data suggests that harmonic mechanical vibration provides technological advances for the disconnecting switch system, such as, the increase of opening and closing maneuvering capabilities. It was also found that mechanical vibration does not affect the structure for the vibration requirements adopted during a survey. Thus, the quality of closure presents positive advances with the use of harmonic mechanical vibration, validating a solution proposed in the patent BR 10 2013 020198 7.

Keywords: High voltage switches, experimental study, mechanical durability, harmonic vibration, vibration frequency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de Chaves Seccionadoras	17
Figura 2 – Nível de tensão para chaves isoladas a ar	21
Figura 3 – Frequência de falhas por níveis de tensão.....	22
Figura 4 – Frequência de falhas em função do tipo construtivo.....	23
Figura 5 – Frequência de falhas em função da causa	23
Figura 6 – Sistema massa/mola/amortecedor	27
Figura 7 – Sistema submetido a vibração livre	29
Figura 8 – Fluxograma de execução dos testes para aquisição de dados de todos os pontos... 35	
Figura 9 – Terraplanagem para a bancada de testes	37
Figura 10 – Fundações da bancada de testes	38
Figura 11 – Coluna metálica para suporte	39
Figura 12 – Conjuntos principais BMKU - 40A	41
Figura 13 – Conjuntos principais chave Lorenzetti de 242 kV	42
Figura 14 – Montagem da chave seccionadora BMKU - 40A	44
Figura 15 – Montagem chave seccionadora Lorenzetti 242 kV	45
Figura 16 – Posicionamento do motovibrador nos seccionadores	46
Figura 17 – Sensores de posição.....	48
Figura 18 – Posicionamento acelerômetros nos seccionadores.....	50
Figura 19 – Posicionamento <i>strain gages</i> seccionador BMKU – 40A	52
Figura 20 – Posicionamento <i>strain gages</i> seccionador Lorenzetti 242 kV	53
Figura 21 – Ação do seccionador ao longo do tempo	54
Figura 22 – Quadro de comando equipamentos auxiliares.....	57
Figura 23 – Bancada de testes finalizada	64
Figura 24 – Procedimento operacional para vibração livre.....	65
Figura 25 – Procedimento operacional padrão utilizando vibração harmônica forçada	67
Figura 26 – Deformações chave seccionadora BMKU – 40A	69
Figura 27 – Sistema de coordenadas	70
Figura 28 – Deformação meio da haste vibração livre seccionador BMKU – 40A.....	71
Figura 29 – Acelerações vibração livre incidentes seccionador BMKU – 40 A.....	72
Figura 30 – Deformação meio da haste vibração forçada seccionador BMKU – 40A	74
Figura 31 – Acelerações incidentes da vibração forçada seccionador BMKU – 40 A	75
Figura 32 – Deformação chave seccionadora Lorenzetti 242 kV	76
Figura 33 – Deformação tubo de transmissão vibração livre seccionador Lorenzetti 242 kV .	77
Figura 34 – Acelerações incidentes da vibração livre seccionador Lorenzetti 242 kV.....	78
Figura 35 – Deformação tubo de transmissão vibração forçada sob excitação harmônica seccionador Lorenzetti 242 kV	79
Figura 36 – Acelerações incidentes da vibração forçada sob excitação harmônica seccionador Lorenzetti 242 kV	80
Figura 37 – Velocidades de vibração para 1 par de massas seccionador BMKU – 40A	84
Figura 38 – Velocidades de vibração para 2 pares de massas seccionador BMKU – 40A	85
Figura 39 – Velocidades de vibração para 3 pares de massas seccionador BMKU – 40A	86
Figura 40 – Comparação de velocidades para seccionador BMKU – 40A	87
Figura 41 – Velocidades de vibração para 1 par de massas seccionador Lorenzetti 242 kV ...	88
Figura 42 – Velocidades de vibração para 2 pares de massas seccionador Lorenzetti 242 kV	89

Figura 43 – Velocidades de vibração para 3 pares de massas seccionador Lorenzetti 242 kV	90
Figura 44 – Comparação de velocidades para seccionador Lorenzetti 242 kV.....	90
Quadro 1 – Classificação das chaves seccionadoras estudadas.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Posicionamento <i>strain gages</i> seccionador BMKU – 40 A	51
Tabela 2 – Posicionamento <i>strain gages</i> seccionador Lorenzetti 242 kV	53
Tabela 3 – Classificação das chaves seccionadoras em relação ao número de ciclos	60
Tabela 4 – Resultados do teste de hipótese para seccionador BMKU – 40A	82
Tabela 5 – Resultados do teste de hipótese para seccionador Lorenzetti 242 kV	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica – Rio Grande do Sul
NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CIGRÉ	<i>International Council on Large Electric System</i>
AIS	<i>Air Insulated Substation</i>
GIS	<i>Gas Insulated Substation</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FUPF	Fundação Universidade de Passo Fundo
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
CLP	Controlador Lógico Programável
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
ERIAC	<i>Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

m	Massa, kg
c	Constante de amortecimento, Ns/m
k	Rigidez da mola, N/m
f	Força, N
ω_n	Frequência Natural
t	Tempo, s
g	Gravidade, ms ²
T	Torque, N
p	Probabilidade de significância

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo Geral	15
1.2	Objetivos Específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Subestações	16
2.1.1	Chaves Seccionadoras	16
2.1.2	Classificação	18
2.1.3	Mecanismos de Acionamento para Chaves Seccionadoras	19
2.1.4	Falhas em Chaves Seccionadoras	20
2.1.5	Multas e Penalidades	24
2.2	Vibração Mecânica	26
2.2.1	Vibração Livre	28
2.2.2	Vibração Forçada sob Excitação Harmônica	29
2.3	Aplicação de Vibração	30
2.4	Inovação no acionamento de chaves seccionadoras	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	Bancada de testes	36
3.1.1	Localização das fundações	36
3.1.2	Estrutura de suporte	38
3.1.3	Chaves seccionadoras utilizadas	40
3.1.4	Montagem das chaves seccionadoras	43
3.1.5	Motovibrador	45
3.1.6	Confirmação de Fechamento e Abertura	47
3.1.7	Aquisição de Dados	48
3.1.8	Teste de Alívio de Torque nas Manobras de Abertura e Fechamento	54
3.1.9	Demais Equipamentos	55
3.2	Planejamento Experimental	58
3.2.1	Orientações baseadas em Normas	58
3.3	Torque nos Parafusos da Estrutura de Suporte	61
3.4	Análise de eficiência de frequência e massas	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1	Bancada de testes	63
4.2	Procedimento operacional padrão para ensaio	64
4.3	Torque nos Parafusos da Estrutura de Suporte	68
4.4	Secionador BMKU – 40A	69

4.4.1	Ensaaios com vibração livre.....	70
4.4.2	Ensaio com Vibração Forçada sob Excitação Harmônica	73
4.5	Seccionador Lorenzetti 242 kV	75
4.5.1	Ensaaios com vibração livre.....	76
4.5.2	Ensaio com Vibração Forçada sob Excitação Harmônica	78
4.6	Teste de hipótese para vibração livre e vibração sob excitação harmônica	81
4.6.1	Chave Seccionadora BMKU – 40A	81
4.6.2	Chave Seccionadora Lorenzetti 242 kV	82
4.7	Combinação de frequências e massas excêntricas	83
4.7.1	Chave Seccionadora BMKU – 40A	83
4.7.2	Chave Seccionadora Lorenzetti 242 kV	87
5	CONCLUSÃO	92

1 INTRODUÇÃO

As subestações de energia elétrica são pontes de convergência entre a entrada e a saída de linhas de distribuição, na qual transformadores realizam a alteração de tensão, aumentado ou diminuindo a mesma, conforme a necessidade. Assim, a operação dos componentes do sistema elétrico torna-se mais segura, auxiliando na eliminação ou redução de quedas de energia.

As subestações possuem dispositivos denominados chaves seccionadoras. Esses equipamentos mecânicos são utilizados em manobras de seccionar, processo responsável pelo isolamento de circuitos elétricos. Ao ser executada a manobra de abertura, o circuito é desenergizado e bloqueado para passagem de energia, tornando assim o trabalho de engenheiros e técnicos do setor mais seguro.

Em condições normais as chaves seccionadoras estão dispostas na posição fechada, possibilitando assim a passagem de corrente elétrica das subestações para as linhas de transmissão.

Os processos de abertura e fechamento da chave seccionadora são executados através de uma sala de controle. A manobra de abertura causa a interrupção da passagem de energia, fazendo com que a haste da chave se afaste do contato fixo, interrompendo o fluxo de energia. Por outro lado, o processo de fechamento faz com que a haste da chave seccionadora se posicione dentro do contato fixo. Assim, a chave fecha e o circuito é restabelecido.

Convém apontar que este processo de fechamento demanda a presença de técnicos nas subestações para acompanhar a manobra, a fim de evitar que a passagem de energia seja restabelecida sem que a conexão entre a chave e seu contato seja satisfatória.

A condição insatisfatória do fechamento pode causar o chamado ponto quente, caracterizado pelo aumento da temperatura na região de contato entre a lâmina do contato principal e o contato fixo, devido a área de contato reduzida entre as partes. Assim, Rocha (2014) desenvolveu um estudo sobre chaves seccionadoras, tendo como objetivo a mitigação do mau funcionamento de chaves seccionadoras.

Rocha (2014) propõe a utilização de uma fonte externa de excitação da chave seccionadora para redução do atrito existente entre os contatos fixo e a haste do contato móvel, nas manobras de abertura e fechamento da chave seccionadora.

Dessa forma, o objetivo deste estudo foi investigar, através de dois modelos de chaves seccionadoras, a possibilidade do uso da vibração mecânica da haste do contato móvel para facilitar as manobras de abertura e fechamento das chaves seccionadoras, comparar o processo atual com o processo de vibração forçada proposta por Rocha (2014), bem como analisar diversos parâmetros mecânicos, tais como a qualidade do fechamento, tensões mecânicas, deformações, aceleração, torque no eixo árvore e torque nos parafusos da estrutura de suporte.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar experimentalmente a influência da vibração mecânica nas manobras de abertura e fechamento de chaves seccionadoras.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste estudo são:

- Projeto e construção da bancada de testes em escala real para estudo;
- Investigar as variáveis influentes na qualidade de abertura e fechamento.
- Realizar os ensaios experimentais das manobras de abertura e fechamento com vibração livre, e com vibração forçada sob excitação harmônica;
- Identificar a melhor condição de acoplamento para as condições estudadas.
- Avaliar as diferentes configurações de massa excêntrica e frequência para o motovibrador nas chaves seccionadoras estudadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se a seguir a fundamentação teórica sobre os principais conceitos utilizados no decorrer deste estudo.

2.1 Subestações

Subestações são instalações que auxiliam na distribuição de energia elétrica para todos os usuários, são consideradas estruturas complexas devido à diversidade de equipamentos presentes em sua composição.

Galeano *et al.* (2017) definem subestações como sendo as estruturas responsáveis pela conexão entre as linhas de transmissão e as plantas de geração, podendo alterar a voltagem em diferentes níveis. Subestações fazem a interface entre as linhas de distribuição e o cliente final, desse modo uma subestação deve garantir um elevado nível de confiabilidade em seus serviços. Visando o atendimento dessa confiabilidade a ANEEL criou algumas resoluções normativas que procuram manter o nível do serviço prestado com alta confiabilidade criando-se para isso, multas, penalidades, e outros mecanismos visando elevar a confiabilidade dos serviços. Dada a importância das subestações no sistema, Proudford (1999) aponta que as subestações devem incorporar a capacidade de fazer automação, reduzindo ao máximo a intervenção de usuários.

2.1.1 Chaves Seccionadoras

Chaves seccionadoras são os dispositivos mecânicos de manobra responsáveis pelas ações de abrir, fechar ou então transferir as ligações de um circuito. Com o intuito de regulamentar este dispositivo algumas normas foram criadas, como a Norma Brasileira (NBR) 6935 e NBR 7571 pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

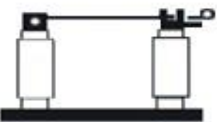

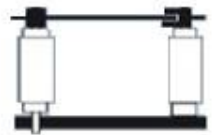

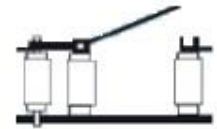

As chaves seccionadoras são extremamente importantes para o sistema das subestações, senão o equipamento mais importante em uma subestação, isso porque operam com ou sem carga, tendo como finalidade abrir ou fechar os circuitos. Para Silva *et al.* (2010), chaves seccionadoras permitem controlar a interrupção do fornecimento de energia, bem como para obras de expansão e manutenção em componentes. Assim que a variação da corrente é interrompida ou restabelecida, ou então quando a variação de tensão é desprezível nos terminais

dos polos do seccionador, pode conduzir também correntes sob condições normais de circuito e por um tempo característico correntes sob circunstância anormais, como curto-circuito, segundo a NBR 60694 (2006).

Nota-se que, ao longo do tempo, este dispositivo não apresentou o mesmo avanço tecnológico apresentado por outros dispositivos do sistema, podendo ser essa uma das variáveis responsáveis pelos problemas decorrentes no seu desempenho e, conseqüentemente afetando a confiabilidade do sistema como um todo.

Na Figura 1, Querino (2015) ilustra a representação esquemática de alguns modelos de chaves seccionadoras e uma descrição.

Figura 1 – Tipos de Chaves Seccionadoras

REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA	DESCRIÇÃO
	Secionador Monopolar Tipo Faca
	Secionador Monopolar Tipo Faca em Tandem (GB + 2TD)
	Secionador de Abertura Lateral
	Secionador de Dupla Abertura Lateral
	Secionador de Abertura Vertical
	Secionador Abertura Vertical Reversa

Fonte: Adaptado de QUERINO (2015).

A NBR 7571 (2011) apresenta particularidades das chaves seccionadoras, seguindo características relacionadas ao tipo de abertura ou modo de operação e meio de movimentação do contato móvel. As características relacionadas ao tipo de abertura estão apresentadas na Figura 1.

As características relacionadas ao modo de operação são descritas abaixo:

- **Operação em Grupo:** Os polos da seccionadora são interligados mecanicamente através de tubos metálicos e são operados simultaneamente;
- **Operação Monopolar:** Os polos são acionados individualmente, sem interligação mecânica entre eles;
- **Comando Manual:** Realizado com ou sem auxílio de redutores;
- **Comando Motorizado:** Podem ser acionados por motores elétricos, acionadores hidráulicos, pneumáticos, dentre outros.

Um assunto extensamente debatido na área elétrica é a manutenção para estes tipos de equipamento. Silva, Brasil e Teixeira (2015) atestam que entre 2002 e 2012 a manutenção preventiva não foi um fator determinante para o declínio do número de ações corretivas. Sabe-se que o princípio básico por trás da teoria da manutenção preventiva está na relação entre a periodicidade de manutenção e a confiabilidade operacional do ativo, quanto menor a periodicidade maior a confiabilidade, conforme a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) (2008). Uma das razões que fazem da manutenção ser amplamente estudada se deve ao tempo de depreciação contábil, 30 anos, de acordo com a ANEEL.

2.1.2 Classificação

As subestações podem ser classificadas de acordo com Muzy (2012) em diversas formas. Abaixo apresentam-se as mesmas.

- **Quanto ao Nível de Tensão:** Baixa tensão, média tensão, alta tensão, extra-alta tensão.
- **Quanto à Relação entre Tensão de Entrada e Tensão de Saída:** De manobra elevadora e abaixadora.
- **Quanto à Função no Sistema Elétrico Global:** Transmissão, subtransmissão e distribuição.
- **Quanto ao Tipo de Instalação:** Externas ou internas.

- **Quanto ao Tipo Construtivo do Equipamento:** Convencionas (Instaladas ao tempo, AIS) ou blindadas (Abrigadas do tempo, GIS).
- **Quanto a Modalidade de Comando:** Com operador, semi automatizadas e automatizadas.

Ainda abordando o assunto de subestações torna-se oportuno apresentar alguns componentes que compõem as subestações. Nesse contexto podem ser citados os seguintes equipamentos: disjuntores, chaves seccionadoras, transformadores, relés, isoladores, para-raios.

2.1.3 Mecanismos de Acionamento para Chaves Seccionadoras

Os mecanismos de acionamento de chave seccionadoras, segundo Souza (2002) podem ser de natureza manual ou motorizada, tendo os sistemas necessários projetados para ficarem em uma caixa de metal, protegidos dos efeitos da natureza, tal como: chuva, neve, vento, umidade, depósito de poeira, dentre outros. Tendo como função principal a movimentação das partes mecânicas de seccionadores assim que solicitado.

Geralmente os mecanismos de acionamento podem ser classificados de acordo com 4 grandes grupos.

- **Elétrico:** Acionamento efetuado por meio de energia proveniente de fonte elétrica;
- **Pneumático:** Fonte de ar comprimido é responsável pelo acionamento deste grupo;
- **Hidráulico:** O acionamento é oriundo de uma fonte de energia hidráulica;
- **Manual:** Energia obtida para este tipo de acionamento é apenas manual, sendo esta energia variável, conforme esforço do operador, e aplicada diretamente no mecanismo de operação da chave seccionadora.

Neste estudo serão utilizadas chave seccionadoras com ambas as opções, manual e motorizada. Souza (2002) caracteriza o princípio de funcionamento das chaves seccionadoras através do acionamento de botoeiras localizadas na caixa de comando para que o motor seja energizado e então comece a girar seu eixo, este acoplado a um sistema de engrenagens que estão conectados ao eixo árvore da chave seccionadora, responsável pela transmissão do movimento oriundo do motor para o contato móvel, possibilitando assim a abertura e ou fechamento dos contatos fixos e móveis.

2.1.4 Falhas em Chaves Seccionadoras

Antes de iniciar a exploração dos meios que levam as chaves seccionadoras a falhar, admite-se que seja introduzida a definição para falha. Conforme NBR 5462 (1994) a falha é o fim da capacidade de um componente desempenhar a função para qual foi concebido.

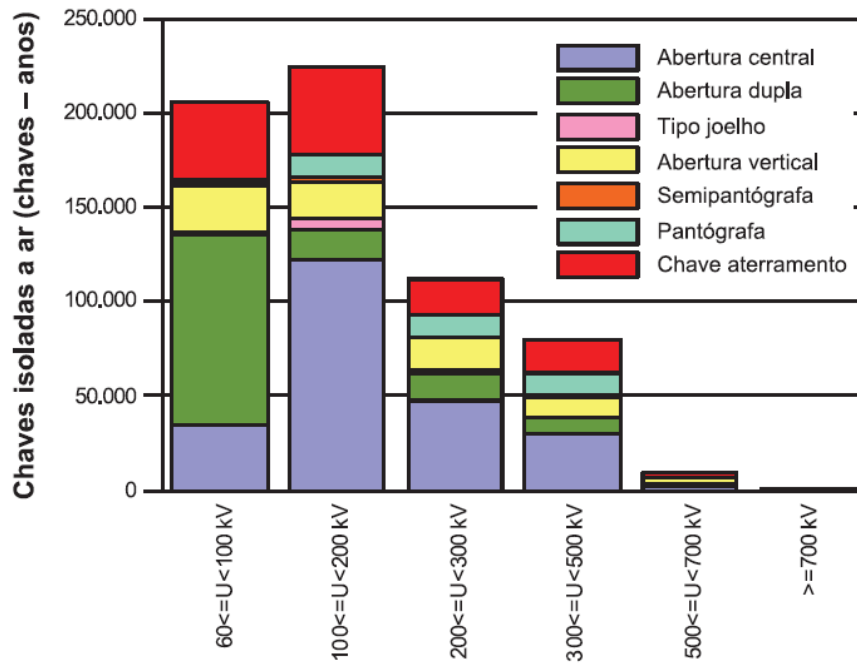
Para Querino (2015) as chaves seccionadoras podem apresentar as seguintes falhas:

- Junção incongruente entre lâmina móvel e contatos fixos;
- Aquecimento desmoderado de alguns elementos das chaves seccionadoras, como contatos, conexões e mecanismos de articulação;
- Alteração da resistência mecânica de segmentos que compõem a chave, causando quebra/ruptura em molas e ganchos por exemplo.

A relação existente entre o aquecimento de elementos das chaves seccionadoras está profundamente ligada com a região de interface do contato fixo da chave e sua lâmina. Rocha (2014) sugere que esse aquecimento ocorre devido à pequena área de contato entre a lâmina da chave (contato móvel e o contato fixo), sujidade no contato, dentre outros corpos estranhos e imprevisíveis. Além dessa anomalia estar relacionada com a força de atrito no contato, resultante da força imposta pela lâmina nos contatos fixos podendo resultar em deformação plástica na lâmina, bem como possíveis desalinhamentos sofridos pelas peças ao longo de sua vida útil.

Frontin (2013) compilou dados de falha de seccionadores de diversos países, que enviaram dados de mais de 900.000 seccionadoras e chaves de aterramento, sendo destes 77% dos dados referentes a chaves seccionadoras. Com estes dados tratados e organizados apresentam-se na Figura 2 algumas características das falhas.

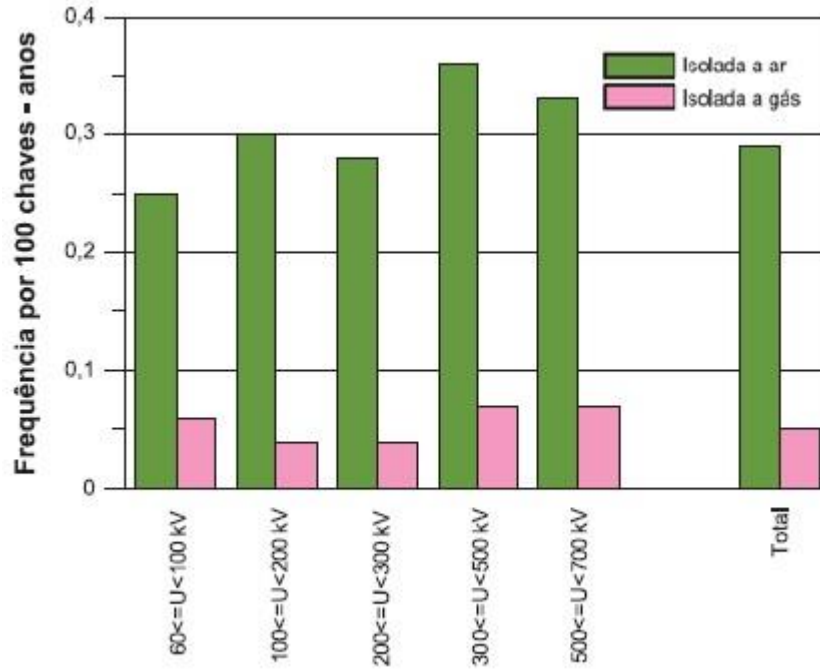
Figura 2 – Nível de tensão para chaves isoladas a ar



Fonte: Frontin (2013).

- **Com relação ao nível de tensão:** A Figura 2 ilustra as falhas através dos níveis de tensão, para subestações isoladas a ar (AIS).
- **Frequência de falhas por níveis de tensão:** Na Figura 3, é importante destacar que as colunas em verde, representam as subestações isoladas a ar e rosa representam as subestações isoladas a gás (GIS). Outro dado importante que se nota através do gráfico é que a taxa de falha calculada para as subestações AIS é de 0,29% das chaves que falharam no ano.

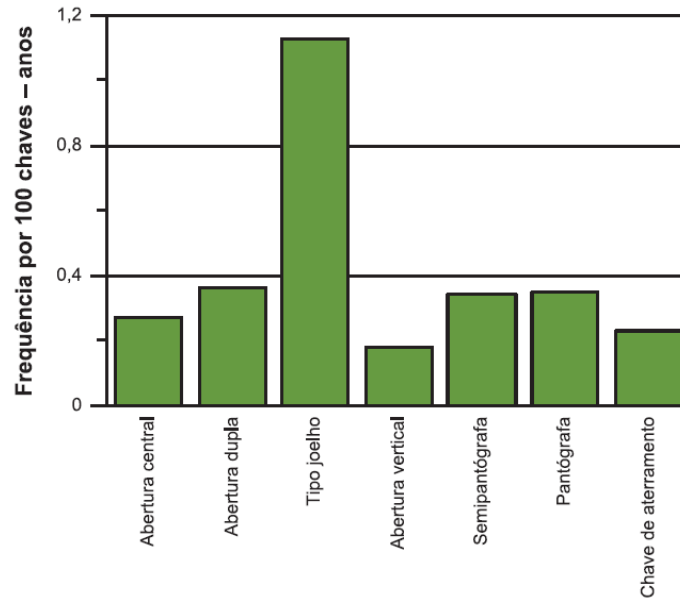
Figura 3 – Frequência de falhas por níveis de tensão



Fonte: Frontin (2013).

- Frequência da falha em função do tipo construtivo:** A Figura 4 apresenta a frequência de falhas relacionadas ao tipo construtivo de seccionadores. O pico de falhas para o modelo cuja a tipologia construtiva é denominada joelho, pode ser explicado devido ao baixo número de amostra para a tipologia em questão. Relevante também destacar que o estudo das chaves seccionadoras da presente dissertação se dará para o modelo de tipologia construtiva de abertura vertical.

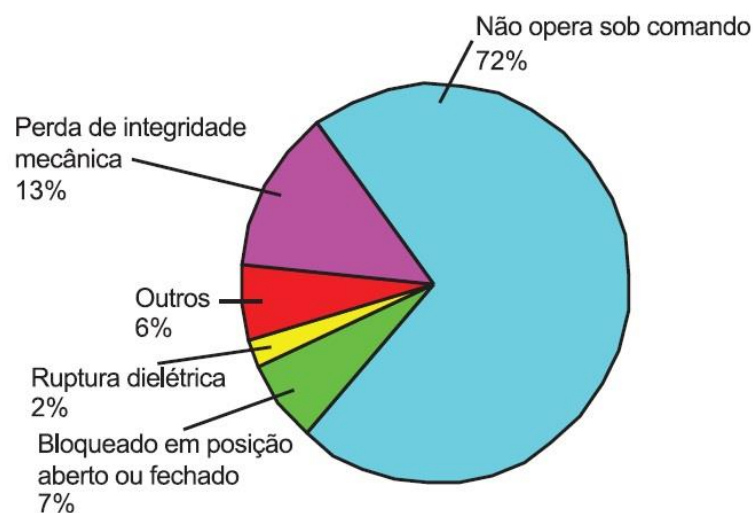
Figura 4 – Frequência de falhas em função do tipo construtivo



Fonte: Frontin (2013).

- Frequência da falha em função da causa:** A Figura 5, retrata os dados do deste tópico. É de imprescindível importância apontar que o estudo da presente dissertação estará voltada para chaves seccionadoras isoladas a ar (AIS) e por essa questão todos os dados das subestações isoladas a gás (GIS) não serão apresentados.

Figura 5 – Frequência de falhas em função da causa



Fonte: Frontin (2013).

2.1.5 Multas e Penalidades

Convém fazer uma breve explanação sobre a ANEEL, agências reguladoras são em sua maioria pessoas jurídicas de direito público sendo produto de lei. Segundo Mello (2010) são autarquias sob regime especial constituída com o objetivo de disciplinar e controlar certas atividades.

Originando-se de uma de suas atribuições, compete a ANEEL a aplicação de multas e penalidades para os concessionários, permissionários e demais agentes do setor elétrico, também ficando sob sua responsabilidade a fiscalização e o apuramento de infrações.

As buscas por documentos referentes ao tema desta seção seguiram algumas orientações apresentadas por Marins e Moreno (2017), onde a normas pesquisadas geralmente aparecem na última página de resultados haja vista que o sistema de biblioteca da ANEEL apresenta os resultados por data em ordem decrescente.

A inobservância no segmento das instruções apresentadas na Resolução Normativa N° 63 (2004) sujeita a transgressora às seguintes penalidades:

- Advertência;
- Multa;
- Embargo de obras;
- Interdição de instalações;
- Intervenção administrativa;
- Dentre outras.

Ainda conforme Resolução Normativa N° 63 (2004), seção 2, artigo este que apresenta explanações sobre multas, tendo em seu Art. 4ª, no parágrafo V, o descumprimento de aviso prévio pela interrupção ou suspensão do fornecimento, é apontado como uma das situações em que a concessionária sofrerá penalidades.

Fundamentada nas informações presentes na seção 2.2.4, tem-se ciência que a falha das chaves seccionadoras causará falha no fornecimento de energia, portanto tal falha é enquadrada no artigo presente no parágrafo anterior, desse modo a Resolução Normativa N° 63 (2004) classifica tal infração dentro do Grupo I.

Através da classificação como Grupo I, considera-se que tal infração possa receber uma multa de até 0,01% do faturamento, deduzidos ICMS e ISS para concessionárias ou então sobre o valor estimado de energia produzida para produção independente.

No Brasil o código de defesa do consumidor (1990), estabelece em seu artigo 6º, inciso X, que a energia elétrica por se tratar de um bem essencial a vida humana deve ter seu provimento contínuo e adequado. No inciso IV do mesmo artigo, o código de defesa do consumidor (1990) garante reparação dos danos causados pela interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Segundo a Norma Regulamentadora 479 (2012) falhas no fornecimento de energia podem ser compensados para o cliente final através de descontos na fatura da conta de luz, todavia existe um limite que a ANEEL tolera em relação à quantidade de falhas antes de ser repassado o desconto ao cliente, conforme Anexo III da Norma Regulamentadora 414 (2010).

Os descontos podem ser concedidos quando não houver o cumprimento dos prazos regulares para o padrão de atendimento comercial (vide Anexo III, Norma Regulamentadora 414 (2010)) ou então para os casos de suspensão indevida do fornecimento de energia elétrica.

A Equação (1), refere-se aos créditos obtidos pelo não cumprimento dos prazos regulares.

$$Crédito = \left(\frac{EUSD}{730} \right) \left(\frac{P_v}{P_p} \right) 100 \quad (1)$$

Onde:

EUSD: Encargo do uso do sistema de distribuição relativo ao mês de apuração;

P_v: Prazo verificado do atendimento comercial;

P_p: Prazo normativo do padrão de atendimento comercial;

730: Número de horas no mês.

Na Equação (2), tem-se o cálculo de créditos referente a suspensão indevida do fornecimento.

$$Crédito = \left(\frac{EUSD}{730} \right) T 100 \quad (2)$$

Onde:

EUSD: Encargo do uso do sistema de distribuição relativo ao mês de apuração;

T: Tempo compreendido entre o início da suspensão indevida e o restabelecimento do fornecimento;

730: Número de horas no mês.

De acordo com o artigo 176 da Norma Regulamentadora 414 (2010), a empresa de distribuição de energia deve ter seu fornecimento restaurado da seguinte forma:

- 48 horas para religação em área rural;
- 24 horas para religação em área urbana;
- 8 horas para religação de urgência em área rural;
- 4 horas para religação de urgência em área rural.

2.2 Vibração Mecânica

Vibrações mecânicas estão presentes no dia a dia em diversas situações, onde um sistema exhibe oscilação quando submetido a uma excitação. Ritwegger (2010) apresenta o conceito de vibração como sendo as oscilações mecânicas em que um corpo é submetido.

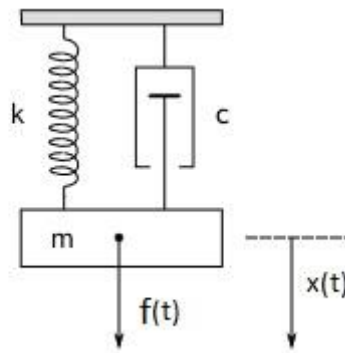
O estudo sobre vibrações inicia-se com a concepção de que o movimento que se repete em um intervalo de tempo de modo regular ou irregular denomina-se vibração. De acordo com a NBR 7497 (1982), vibração é a variação no tempo de uma grandeza a qual descreve o movimento ou posição de um sistema mecânico, quando o valor é alternadamente maior ou menor do que seu valor médio de referência. Mecanismos de vibração são compostos por um sistema mecânico contendo um meio que absorve a energia da excitação causada pela vibração denominado amortecedor. Há necessidade também da transformação de energia potencial em cinética.

Ainda em conformidade com a NBR 7497 (1982) a vibração é um conteúdo extensivamente estudado tendo como uma de suas principais intenções a omissão e atenuação de vibrações por ser uma das principais causas da redução da vida útil de materiais e equipamentos.

A vibração é determinada por sua amplitude e frequência. Assim a frequência pode ser estabelecida pelo número de ciclos por unidade de tempo e a amplitude pela extensão do movimento oscilatório (LUO, MACNAMARA; MORAN, 2005; CARDINALE; WAKELING, 2005).

Diversos sistemas de vibração podem ser simplificados utilizando a equivalência de sistemas, conforme apresentado por Rao (2011) na Figura 6. Essa simplificação pode ser utilizada inclusive para sistemas mais complexos utilizando massas e rigidez equivalentes.

Figura 6 – Sistema massa/mola/amortecedor



Fonte: Adaptado de Rao (2011).

A equação (3) representa o movimento do sistema da Figura 7 em equilíbrio.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f_0(t) \quad (3)$$

Onde:

m : Massa [kg];

c : Constante de Amortecimento [Ns/m];

k : Rigidez da Mola [N/m];

f : Força [N].

Ao retirar o sistema da Figura 7 de seu equilíbrio, o sistema estará submetido a vibrações livres de acordo com HE e FU (2001), podendo ser descrita de acordo com a equação (4).

$$\ddot{x}(t) + \frac{k}{m}x(t) = 0 \quad (4)$$

Com o desdobramento do estudo sobre vibração mecânica, chega-se ao tema da frequência natural do sistema (ω_n). Para Piersol e Paez (2010) a frequência natural é definida como sendo a razão da rigidez pela massa, conforme descrito na equação (5), que segue:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

Para Rao (2011) as vibrações podem ser classificadas, além do seu grau de liberdade, da seguinte forma:

- Vibração livre ou forçada;
- Vibração com ou sem amortecimento;
- Vibração linear;
- Vibração determinística.

Arnov *et al.* (1984) e Krishna *et al.* (1997) verificaram que a vibração induzida em contatos oriundos do atrito depende da combinação de materiais em contato e de alguns parâmetros, como carga, velocidade e principalmente frequência natural e inércia dos equipamentos e componentes.

Camargo (2012) apresenta em seu estudo que o coeficiente de amplificação da vibração tende ao infinito quando tem-se a frequência de excitação próxima a frequência natural e o coeficiente de amortecimento é baixo, portanto a amplificação do movimento pode levar ao colapso do sistema.

2.2.1 Vibração Livre

Vibração livre pode ser caracterizada pela manutenção do movimento de perturbação que inicia o movimento correspondendo a uma força ou deslocamento aplicado no sistema. Nesta situação não há forças externas aplicadas ao sistema, conforme Harris e Piersol (2002). Neste estudo a vibração livre teve como característica o seu amortecimento oriundo do atrito existente nas chaves seccionadoras.

De acordo com Sinha (2015), a equação para o sistema amortecido que sofre vibração livre quando perturbada a partir de uma posição inicial de equilíbrio no momento t é agora escrita conforme equação (6):

$$F_i(t) + F_c(t) + F_s(t) = 0 \quad (6)$$

Onde:

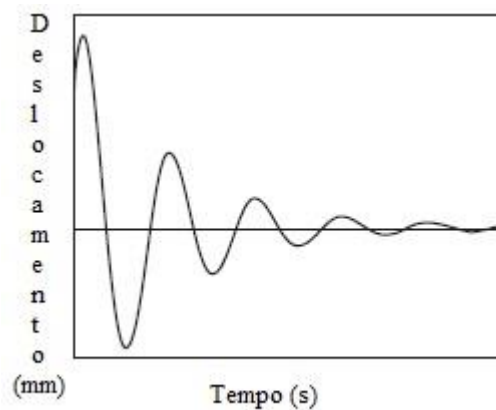
F_i : Força de inércia;

F_c : Força de amortecimento;

F_s : Força de rigidez.

Na Figura 6, que segue, apresenta-se o comportamento de um corpo submetido a vibração livre.

Figura 7 – Sistema submetido a vibração livre



Fonte: Adaptado de Sinha (2015).

Ainda conforme Sinha (2015), a parcela representada por F_c é dependente da velocidade de vibração do sistema, podendo ser definida com a constante de amortecimento do sistema. Logo pode-se reescrever a equação (6) (acima) conforme equação (7) que segue:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (7)$$

2.2.2 Vibração Forçada sob Excitação Harmônica

Vibração harmônica forçada pode ser caracterizada por uma força externa atuar sobre o sistema. Para Harris e Piersol (2002) vibração forçada pode ser uma força aplicada ao sistema ou então um movimento nas fundações que suporta o sistema.

Para Silva (2005) a equação do movimento para esta configuração de vibração pode ser expressada conforme a equação (3), apresentada anteriormente. Supondo que $f(t)$ seja senoidal, tem-se a equação (8), a seguir:

$$f(t) = f_0 \cos \omega \quad (8)$$

Onde:

f_0 : Amplitude da força de excitação;

ω : Frequência de excitação.

Portanto para um sistema submetido a excitação forçada, sabe-se que a resposta total do sistema é a soma das parcelas referente a resposta da vibração livre mais a resposta da excitação forçada.

Em um sistema real ao se trabalhar com frequências muito próximas a frequência natural quando há ausência de amortecimento pode sofrer o fenômeno a ressonância. Esse fenômeno acontece pois a frequência de excitação coincide com a frequência natural da estrutura.

2.3 Aplicação de Vibração

Nesta seção são apresentadas algumas situações onde a aplicação de vibração mecânica é de suma importância.

Nível de ruído ou vibração excessiva em sistemas mecânicos podem acarretar em anomalias indesejadas em componentes mecânicos, como por exemplo a usinagem inadequada de peças e falhas estruturais, conforme Kelly (2017), como também prejudicar o conforto humano. Nesse contexto as análises vibro-acústicas são empregadas no desenvolvimento de máquinas, automóveis e aeronaves, dentre outros. Em automóveis têm-se duas situações que a análise vibro-acústica é importante, na determinação da frequência natural da estrutura do carro e a vibração causada pelo motor, pois deseja-se que a frequência de ambas seja diferente para evitar o efeito de ressonância.

Vibração também pode ser aplicada na manutenção preditiva de máquinas, muito empregado no monitoramento de rolamentos, que apresentam comportamento vibratório causado por desalinhamento, desbalanceamento. Outras aplicações importantes à vibrações se

dá ao analisar a integridade estrutural e a obtenção dinâmica de dados de pontes, fuselagem de aviões, estruturas *offshore*, barragens e também na identificação de falhas em planos de manutenção (HOLANDA, 2016).

Alguns estudos relacionados na ciência da medicina estão avançando na utilização da vibração, dentre eles pode-se elencar a contribuição causada pela vibração ao treinamento de força, o desempenho da força muscular e o desempenho esportivo. Drummond (2012) sugere que pode haver um estímulo diferenciado e potencializador do rendimento, porém mais estudos devem ser efetuados.

A aplicação de vibração mecânica também pode ser utilizada para reduzir o atrito entre superfícies, facilitando uma tarefa ou processo.

Atrito pode ser definido como sendo a força de reação existente entre uma superfície composta por dois componentes quando submetidos a alguma força nos mesmos, ou seja, é a força atuante em dois corpos que dificulta o movimento de um sobre o outro.

Tercheci *et al.* (1995) desenvolveram um estudo sobre atrito onde constatou-se alguns fenômenos decorrentes do atrito, como: aderência, delaminação, deformações plásticas e elásticas, quebras, dentre outros. Para Abeid e Tort (2014), o atrito é uma função do coeficiente de deslizamento.

O atrito é então classificado de duas formas:

- **Estático:** Neste caso é a força contrária à força normal do movimento, ela mantém as superfícies em contato impossibilitando que haja movimento entre os dois objetos;
- **Dinâmico ou cinético:** Essa é a força que surge na superfície entre os dois componentes que apresentam um movimento de deslizamento entre si.

Sabe-se que o atrito estático e o cinético possuem o sentido de força contrário ao sentido do movimento, atuando assim esta força sempre no intuito de impedir o movimento contrário dos componentes do sistema. Xiao, Yin e Bao (2016), sugerem que o comportamento do atrito é afetado pela característica do material, condições de superfície do par tribológico e parâmetros estruturais.

2.4 Inovação no acionamento de chaves seccionadoras

A patente compartilhada entre a FUPF e a CEEE foi motivada após a dissertação de mestrado desenvolvida por Rocha (2014), na qual estudaram-se formas de tornar o processo de manobra mais eficiente, buscando reduzir custos de operação e melhorar o serviço prestado na distribuição de energia elétrica.

Em seu trabalho, Rocha (2014) avançou realizando ensaios em escala real de um seccionador do tipo dupla abertura lateral (DA), simulando o funcionamento de chaves seccionadoras expondo algumas sugestões de melhoria para este processo. Foi executado uma série de ensaios experimentais para corroborar a validade da solução, na qual através de vibrações avaliaram-se forças de atrito presentes nos contatos principais da chave seccionadora. Testes com sistema de laser reflexivo foram executados para que o fechamento dos contatos fosse monitorado, apresentando respostas mais satisfatórias para esta verificação de fechamento quando comparado a forma em que este procedimento operacional é executado atualmente, sem o auxílio da vibração forçada sob excitação harmônica.

Com o *insight* da melhora no processo de fechamento das chaves seccionadoras obtidas em sua dissertação, Rocha (2014) tornou-se o inventor da patente depositada no Brasil pela CEEE e FUPF com o número BR 10 2013 020198 7 (2013).

Tendo como base seu campo de aplicação, Rocha (2013) desenvolveu a solução da supracitada patente, para utilização no sistema de redes elétricas de alta tensão, sendo instalado em dispositivos de seccionadores de alta tensão onde auxiliará no fechamento dos contatos principais em redes de distribuição e transmissão de energia elétrica, mais especificamente em subestações.

Durante estudo para entendimento do estado da arte conhecido, constatou-se que há um intervalo entre as chaves seccionadoras disponíveis no mercado e os estudos e patentes efetuados durante os anos que pode ser explorado para melhorar a funcionalidade deste dispositivo, podendo ser exploradas funções e atribuições das chaves seccionadoras, como por exemplo a fidedignidade das resoluções apresentadas. Interessante destacar é a importância que a operação de fechamento seja bem executada, pois como Souza (2002) afirma, este certamente tem sido um gargalo para o telecontrole e a automação das subestações necessitando assim de supervisão local, sendo necessário o deslocamento de equipes de técnicos para verificação do

pleno fechamento dos contatos, bem como preenchendo os *check lists* para uma correta operação, para que então em seguida seja restabelecido o circuito elétrico.

Ao se tratar da contribuição tecnológica da referida patente, percebe-se na mesma o anseio que a solução proposta possa ser intercambiável, portanto utilizável em qualquer modelo de chave seccionadora convencional, que operem em ambiente aberto, tendo como enfoque principal a automação do processo de fechamento de contatos principais de chaves seccionadoras de alta tensão. Como consequência desse processo, haverá um aumento da confiabilidade do processo, além de torná-lo mais eficiente e seguro, ao se fazer a comparação entre as soluções empregadas atualmente e esta nova abordagem presente na patente BR 10 2013 020198 7 (2013), depositada no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI).

Para tornar real a proposta de automação presente na patente, Rocha (2013) procurou reduzir a força de atrito presente nos contatos fixos e móveis, quando o processo de fechamento do circuito é feito pela chave seccionadora. Para isso utilizou-se um sistema de moto-vibração controlada, para que possa ser ajustada a intensidade da frequência e a intensidade da força de modo que a força de atrito no processo tenda a menor força possível. Outro ponto importante para a automação da manobra em chaves seccionadoras refere-se à área de contato resultante dos contatos fixos e móveis. Para tal, pretende-se utilizar um sistema de laser reflexivo, no qual poderá ser monitorado a área de contato em função da posição relativa da haste móvel.

Outros pontos distintos desta patente, BR 10 2013 020198 7 (2013), que podem ser elencados são o fato de poder ser instalada em qualquer chave seccionadora, sem a necessidade de execução de *as-built* (como construído) nos projetos, facilidade de instalação do dispositivo, além de poder proporcionar que o fechamento do circuito seja acompanhado pela central de operação, sem a necessidade de alocar uma equipe até o seccionador para verificar o correto fechamento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente para a execução do procedimento experimental, se torna importante apresentar um panorama mais abrangente da forma que será conduzido esta seção. Para tal, parte-se do objetivo geral do estudo que é avaliar a influência da vibração mecânica no processo de manobra de abertura e fechamento de chaves seccionadoras.

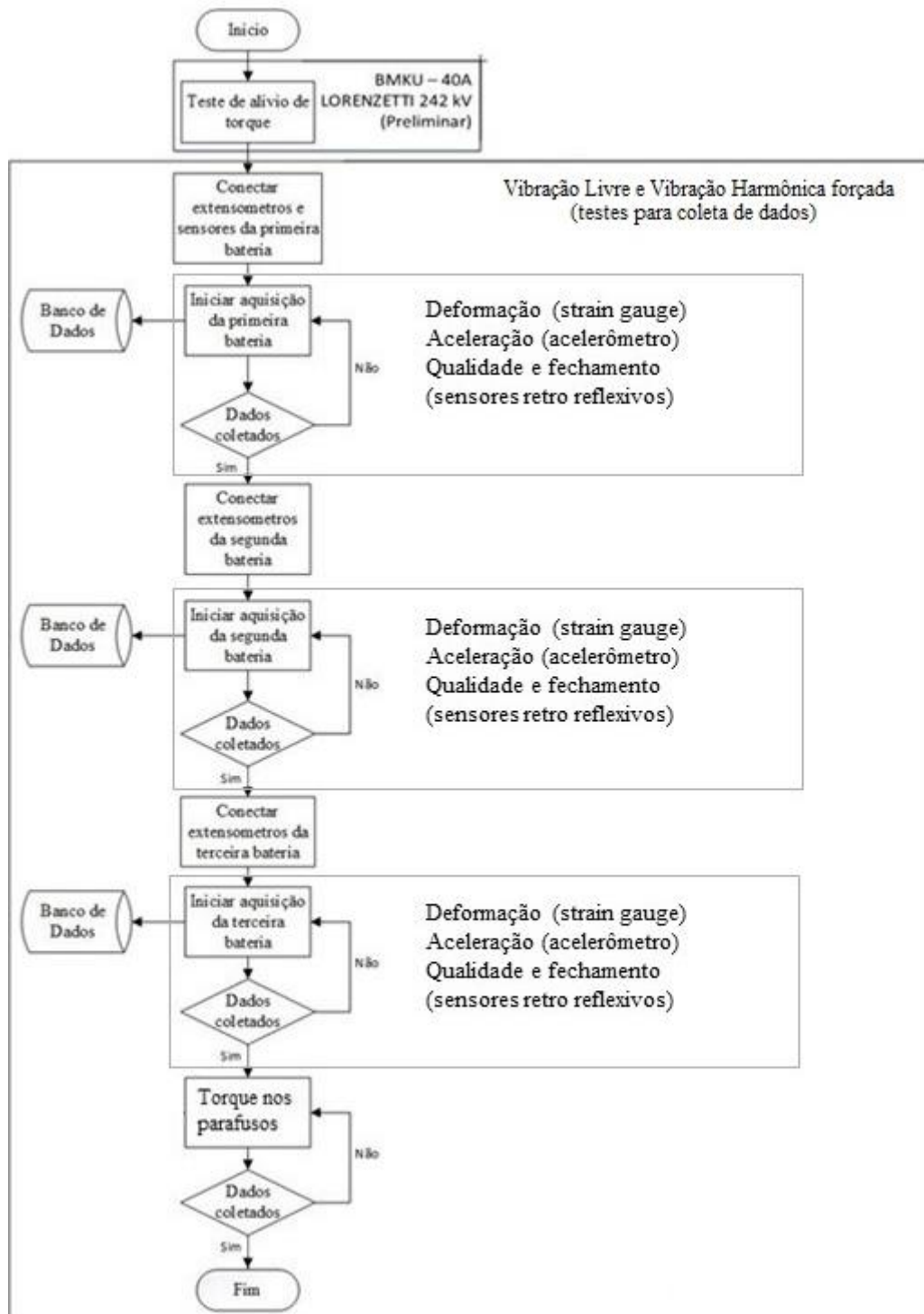
Serão utilizados dois modelos de chaves seccionadores, um BMKU – 40A e o outro Lorenzetti 242 kV. A vibração livre se dará apenas na repetição do processo de manobra executado atualmente, já o processo de vibração harmônica forçada se dará com a energia gerada por um motovibrador unidirecional.

O motovibrador unidirecional possibilita que a energia gerada pelo mesmo seja transmitida para apenas uma direção. Portanto a vibração harmônica forçada foi obtida através de um conjunto de massas excêntricas fixadas em eixos e conduzidas por engrenagens conectadas a um motor. O movimento unidirecional é dado pelo posicionamento das massas excêntricas.

Os ensaios começam com a verificação da frequência e das massas necessárias para que o torque necessário no eixo árvore para a movimentação das hastes da lâmina principal fosse reduzido. Em seguida, os ensaios de 100 ciclos de manobra para abertura e fechamento do seccionador foram executados, utilizando-se da vibração livre e vibração harmônica forçada monitorando parâmetros como tensão mecânica, deformação, frequência, torque no eixo árvore, qualidade da abertura e do fechamento, torque nos parafusos.

Na Figura 8, apresenta-se o fluxograma de como ocorrerá os ensaios para os modelos de seccionadores estudados, haja vista a limitação de portas que o sistema de aquisição possui e as quantidades de pontos a serem monitorados.

Figura 8 – Fluxograma de execução dos testes para aquisição de dados de todos os pontos



Fonte: Autor (2019).

A primeira seção 3.1 é dedicada a bancada de testes, iniciando-se com os modelos de chaves seccionadoras, escolha do local para construção da bancada, posicionamento das bases

para sustentação das chaves, seguindo pelo projeto e fabricação de estruturas necessárias para fixação de componentes, além da montagem das chaves, inversor de frequência, controlador lógico programável, como também o sistema de aquisição de dados.

Já na segunda parte será tratado sobre o procedimento utilizado para execução dos testes e quais as normas estudadas para formulação da metodologia. Nesta seção busca-se apresentar uma espécie de procedimento operacional padrão que possa ser utilizado em outros modelos de chaves seccionadoras além das testadas no presente estudo.

Por fim, na última seção serão apresentadas as variáveis que serão monitoradas como tensão e deformação para análise se os materiais permanecem ou não dentro do seu regime elástico, para que, em seguida, os dados obtidos sejam tratados, na sequência submetidos à análise de variância para que sejam comparados de forma correta e então comprovado ou não a melhora na eficiência na utilização de vibração para fechamento e abertura de chaves seccionadoras. Acelerações na estrutura para que as amplitudes pudessem ser monitoradas, qualidade de abertura e fechamento entre contato fixo e móvel, análise da melhor combinação de frequência e massas excêntricas para obtenção de uma maior velocidade no acoplamento do contato móvel com o contato fixo. O torque nos parafusos da estrutura de suporte também será analisado tendo como objetivo verificar se os fixadores permanecerão íntegros após os ensaios com vibração forçada.

É importante observar que o estudo será elaborado para dois modelos distintos de chave seccionadora, ou seja, na concepção da bancada considerou-se este detalhe em sua elaboração.

3.1 Bancada de testes

Para o desenvolvimento deste estudo experimental, a bancada de testes é fundamental haja vista a impossibilidade para efetuar testes em subestações de energia, uma vez que para esses testes a interrupção de energia elétrica seria necessária.

3.1.1 Localização das fundações

O primeiro passo para construção da bancada de testes foi a definição do local onde a mesma seria instalada. Como este projeto de pesquisa está sendo desenvolvido entre a FUPF e a CEEE, o projeto conseguiu junto à coordenação do Parque Científico e Tecnológico UPF

Planalto Médio a disponibilização de uma sala para que Laboratório de Inovação e Tecnologia (LINTEC – UPF) pudesse executar suas atividades e também uma área externa para que a bancada pudesse ser construída.

Segundo Ribeiro (2008) existem diferentes níveis de energia de compactação de solo, variando de acordo com seu tipo. Com a premissa apontada na frase anterior e a topografia do terreno, bem como a aplicação de vibração nos testes, solicitou-se ao engenheiro civil responsável pela UPF que apontasse o melhor local para instalação da bancada.

Outro critério importante para definição da localização da bancada de testes foi a possibilidade de que a instalação fosse o mais perto possível da sala do projeto, a fim de que a bancada de testes pudesse ter certo nível de automação nos acionamentos e que a metragem de cabo utilizadas nos aparelhos para tal função e os cabos utilizados na extensometria e aquisição de dados não apresentassem possíveis anomalias nos dados coletados e também o custo mais baixo devido a metragem utilizada.

Na Figura 9, exhibe-se a área da bancada de testes, logo após a sua terraplanagem.

Figura 9 – Terraplanagem para a bancada de testes



Fonte: Autor (2018).

Com a conclusão da terraplanagem possibilitou-se o início do esquadrejamento para delimitação da área da bancada de testes.

Na Figura 10, tem-se a bancada em estágio de construção correspondente às tarefas de construção civil da mesma.

Figura 10 – Fundações da bancada de testes



Fonte: Autor (2018).

Para o andamento da construção, necessitou-se elaborar o projeto das locações das fundações para as chaves. Para este item utilizaram-se projetos básicos fornecidos pelos fabricantes das chaves seccionadoras para a CEEE.

Cabe destacar para este tópico alguns detalhes importantes oriundos dos dois modelos de chaves seccionadoras que serão testados. Em relação aos modelos de chaves seccionadoras que foram testados, o modelo de chave BMKU - 40A possui três fases, mas cada fase possui operação independente, portanto foi testado em apenas uma fase. No modelo Lorenzetti de 242 kV que também é trifásica, as três fases foram interligadas e desse modo todas elas foram testadas simultaneamente.

3.1.2 Estrutura de suporte

Em seguida houve a instalação das estruturas responsáveis por suportar as chaves seccionadoras. Foram utilizadas estruturas de colunas metálicas em forma de treliça, fornecida pelo fabricante da chave, sendo elas fixadas nas fundações de concreto por chumbadores metálicos com diâmetro de 12,7 mm.

Para o desenvolvimento e finalização das estruturas utilizadas para suportar as chaves seccionadoras, necessitou-se projetar e construir uma coluna metálica para fixação do contato

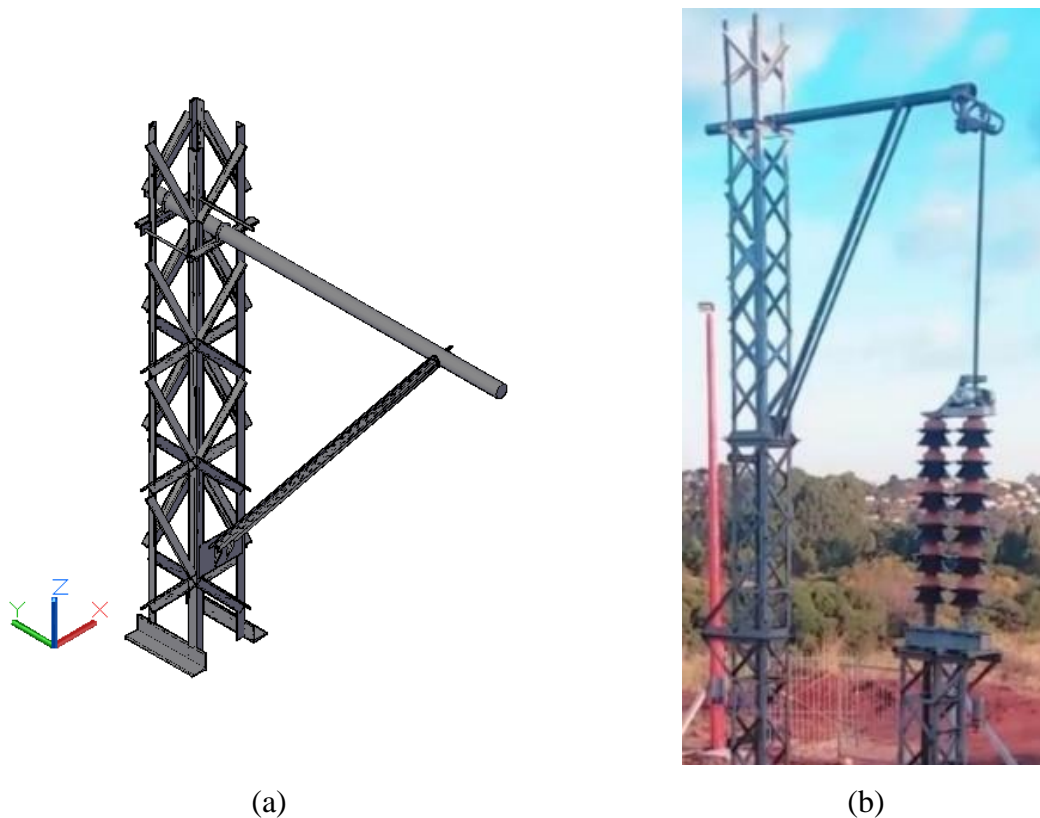
fixo. O elemento estrutural conhecido como coluna é definido como sendo estruturas posicionadas verticalmente que transferem a carga para a base da estrutura.

Na fase de projeto da coluna metálica foram feitas as análises pertinentes seguindo as determinações das normas brasileiras de perfis conformados a frio, segundo a NBR 14762 (2010).

A utilização de cantoneiras como elemento estrutural da coluna de suporte se deu pelo fato da estrutura de suporte das chaves ser fornecida com este tipo de perfil. Todavia uma breve análise foi executada, sendo constatado em Leal (2011) que a simplicidade da forma da cantoneira contrasta com um complexo comportamento estrutural quando submetida a cargas de compressão de cantoneiras formadas a frio, pois apresentam paredes muito delgadas.

Na Figura 11 (a), apresenta-se o projeto da estrutura de suporte projetada para fixação do contato fixo da chave BMKU – 40A em três dimensões, já a Figura 11 (b) está a caracterização da estrutura construída e montada na bancada de testes, sendo posicionada na estrutura fornecida pela CEEE.

Figura 11 – Coluna metálica para suporte



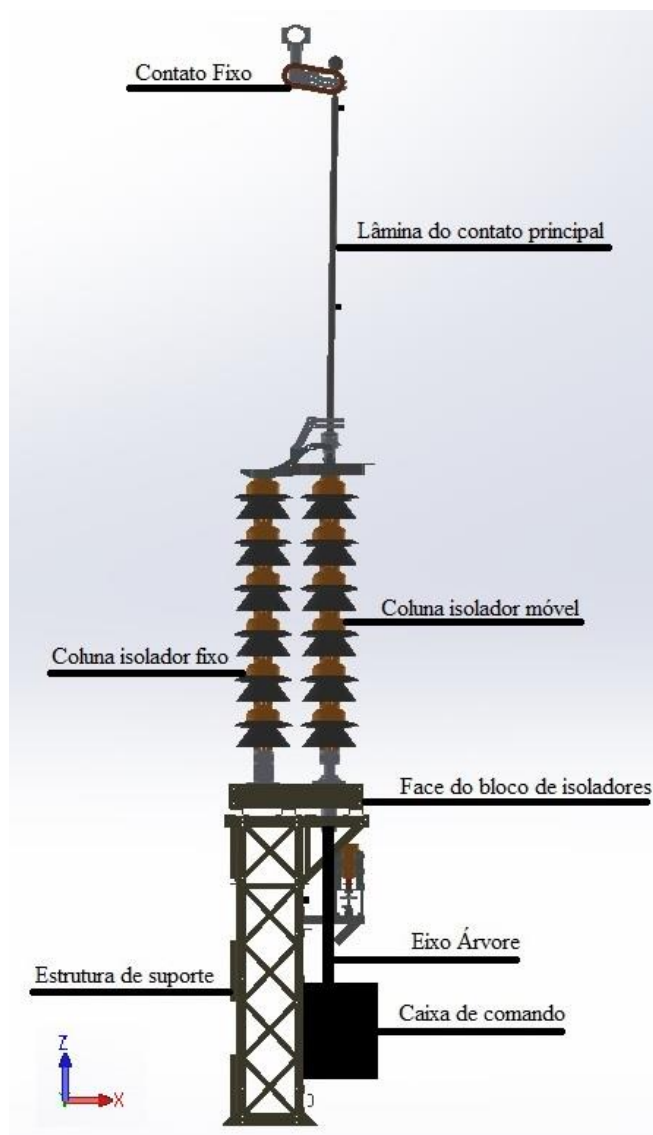
Fonte: Autor (2019).

3.1.3 Chaves seccionadoras utilizadas

O modelo da chave BMKU - 40A é composto por cinco conjuntos principais, colunas de suporte, caixa de comando, isoladores, contato móvel e contato fixo. Estes conjuntos são apresentados na Figura 12, bem como outros conjuntos necessários para a correta operação do seccionador em questão.

A Figura 12 retrata o seccionador na posição fechada, modo em que o mesmo está ativo e interligando circuitos elétricos, este modelo de seccionador possui tipologia construtiva de abertura vertical reversa, deste modo a abertura do mesmo, se dará com a lâmina do contato principal na posição horizontal, ou seja, paralela ao eixo x, indicado na Figura. Para este seccionador o sentido em que será aplicada a excitação externa se dará com a energia cinética movimentando a lâmina do conato principal no sentido do eixo x da Figura 12.

Figura 12 – Conjuntos principais BMKU - 40A



Fonte: Autor (2019).

O modelo Lorenzetti 242 kV possui as três fases interligadas por hastes metálicas que ao serem acionadas por apenas uma caixa de comando movimentam simultaneamente os três contatos móveis, na direção do contato fixo (fechamento) ou na direção contrária ao contato fixo (abertura).

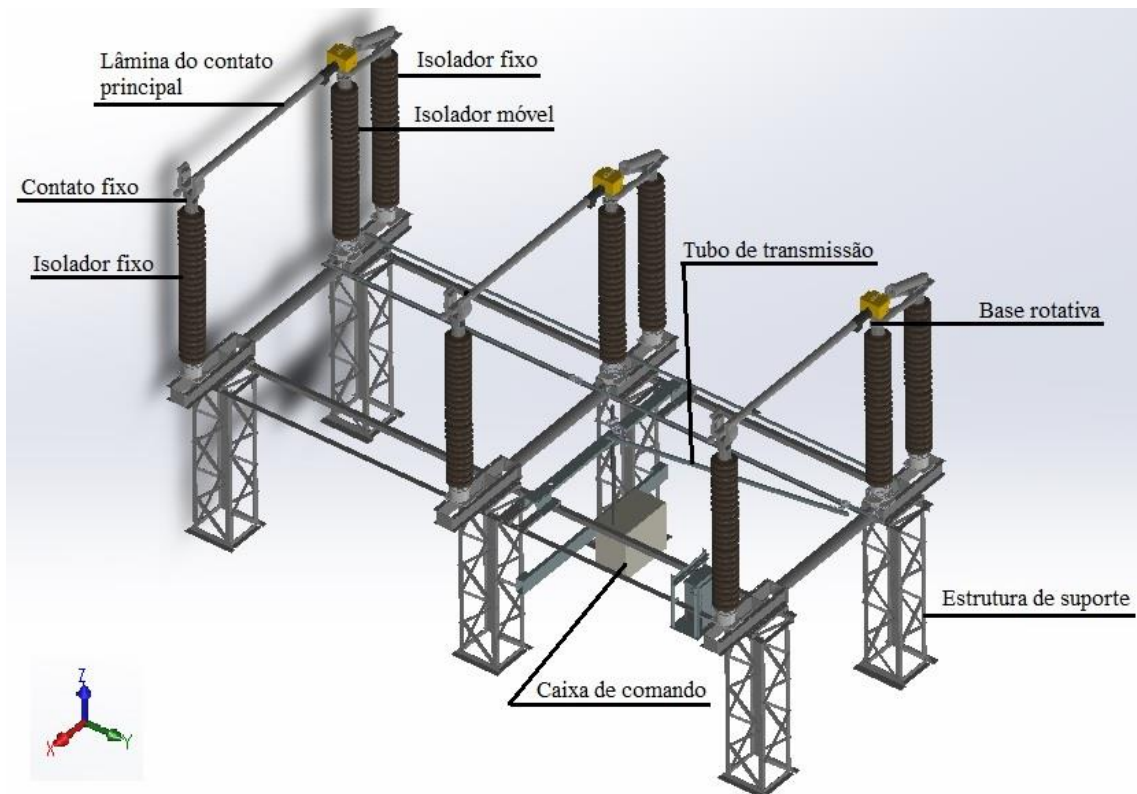
Este seccionador modelo Lorenzetti 242 kV possui tipologia construtiva de abertura vertical, ou seja, na posição fechada a lâmina do contato móvel encontra-se paralela ao eixo x, da Figura 13, e quando encontra-se na posição aberta a lâmina do contato principal estará na posição paralela ao eixo Z da Figura 13.

O acionamento é efetuado através do motor acoplado dentro da caixa de comando do seccionador que movimenta o eixo arvore e transmite o movimento para o tubo de transmissão que movimenta os varões conectados as três fases do seccionador simultaneamente movimentando os isoladores móveis e por fim suas respectivas lâminas de contato principal.

Neste seccionador o sentido de vibração aplicado para o estudo se deu na direção paralela ao eixo x.

Na Figura 13 está identificada o modelo de chave Lorenzetti de 242 kV.

Figura 13 – Conjuntos principais chave Lorenzetti de 242 kV



Fonte: Autor (2019).

Nota-se, dessa forma, que a chave seccionadora Lorenzetti de 242 kV também é composta por uma estrutura de apoio, isoladores, contato móvel e contato fixo, tendo como principais desigualdades a movimentação através de uma caixa de comando das hastes, bem como algumas alterações estruturais dos componentes, haja vista a distinção nas empresas fabricantes dos dois modelos de chaves seccionadoras.

No Quadro 1, apresenta-se a classificação das duas chaves estudadas.

Quadro 1 – Classificação das chaves seccionadoras estudadas

Modelo da Chave	Tipo Construtivo	Tipo de Comando	Rotação	Redução
BMKU - 40A	Abertura Vertical Reversa	Monopolar	950 RPM	450/1
Lorenzetti 242 kV	Abertura Vertical	Em grupo	1750 RPM	1200/1

Fonte: Autor, 2018

Ambos os modelos estudados possuem em suas respectivas caixas de comando mecanismos que permitem que o acionamento seja feito de forma manual, remota ou através da caixa de comando (acionamento executado pelos botões da própria caixa de comando).

3.1.4 Montagem das chaves seccionadoras

Para a continuação da construção da bancada, tornou-se necessária a montagem das chaves seccionadoras. Para esta fase do projeto, seguiu-se a norma NBR 62271-102 (2006), a qual descreve que a chave seccionadora deve ser instalada com seu próprio mecanismo de operação específico.

Na Figura 14, exibe-se a montagem da chave seccionadora BMKU - 40A.

Figura 14 – Montagem da chave seccionadora BMKU - 40A



Fonte: Autor (2019).

Ambos os modelos de chaves testados (BMKU - 40A e Lorenzetti de 242 kV) possuem sistema de acionamento motorizado, sendo acionados através da caixa de comando.

A montagem da chave seccionadora Lorenzetti, conforme apresentado na Figura 15, mostrou alguns desafios que não foram visualizados na montagem da chave BMKU - 40A, como por exemplo a montagem do sistema de acionamento das fases da chave, conectadas por tubos metálicos que vão da caixa de acionamento até a base do contato móvel.

Figura 15 – Montagem chave seccionadora Lorenzetti 242 kV



Fonte: Autor (2019).

A instalação do sistema de acionamento da chave Lorenzetti é extremamente importante pois se necessita que o mesmo esteja conectado com o contato móvel e a caixa de comando. Para o posicionamento correto da caixa de comando na estrutura de suporte, a montagem foi iniciada na base da estrutura de suporte em direção à caixa de acionamento.

Por fim, todo o processo de montagem das chaves foi executado por equipes qualificadas, sendo elas pertencentes ao corpo técnico da CEEE, seguindo procedimentos operacionais de instalação internos da própria empresa.

3.1.5 Motovibrador

A utilização da energia gerada pelo motovibrador visa a reduzir os efeitos indesejáveis causado pelo atrito no fechamento/abertura dos contatos principais (contato fixo e contato móvel) da chave seccionadora.

A alternativa mais conhecida para redução de atrito é a utilização de lubrificantes, porém a necessidade de que os mesmos apresentem propriedades condutivas reduz consideravelmente a disponibilidade de lubrificantes disponíveis para utilização. Todavia a aplicação do lubrificante no equipamento, tendo em vista o local desabrigado, causa um ressecamento,

tornando-se assim indesejável para a aplicação nos contatos, conforme descrito por Rocha (2014).

Neste estudo, o motovibrador utilizado foi um modelo direcional baseado no princípio de oscilação de energia, direcionando assim a energia no sentido do movimento. O modelo e outras informações referentes ao motovibrador utilizado encontram-se na patente US6889820 B2 (2001).

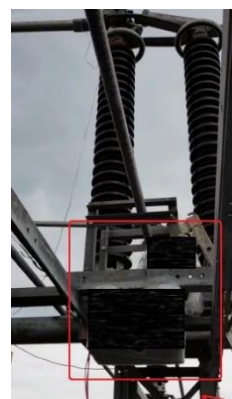
A oscilação de energia é gerada por duas ou mais massas excêntricas que possuem sentidos opostos de rotação com uma velocidade angular constante, causando assim a excitação da massa total, fazendo com que a haja vibração.

Na Figura 16 (a) apresenta-se o motovibrador posicionado na chave seccionadora BMKU – 40 A e na Figura 16 (b) o mesmo motovibrador posicionado na chave Lorenzetti 242 kV, ambos destacados em vermelho. Para isso foram projetados e produzidos suportes diferentes específicos para cada modelo de seccionador.

Figura 16 – Posicionamento do motovibrador nos seccionadores



(a)



(b)

Fonte: Autor (2019).

Para a instalação do motovibrador algumas características semelhantes para as duas chaves foram consideradas, tais como a facilidade de instalação do motovibrador e o posicionamento que pudesse gerar maior amplitude de vibração. A definição da posição do

motovibrador para a chave BMKU - 40A ficou limitada à haste entre a caixa de comando e a bases dos isoladores.

Reconhecendo a necessidade de fixação do motovibrador na estrutura das chaves seccionadoras, tornou-se fundamental o desenvolvimento de um projeto de suporte para o motovibrador. Neste projeto, duas condições de contorno foram consideradas. A primeira diz respeito a fixação do suporte da estrutura, de tal modo que pudesse ser alocado em outras posições. Já a segunda o objetivo foi excitar diretamente a haste de acionamento.

3.1.6 Confirmação de Fechamento e Abertura

Para a comprovação do fechamento e abertura das chaves seccionadoras foram utilizados dois sensores com um sistema retro reflexivo instalado e calibrado de modo a verificar a posição da chave seccionadora. Essa solução é baseada no princípio de emissão e recepção da luz emitida pelo laser.

Os sensores retro reflexivos possuem a característica de receberem a luz emitida pelo próprio sensor, ou seja, há a necessidade de um espelho prismático para que a luz seja emitida de volta ao sensor.

A utilização deste dispositivo para verificação de posição se deu pelo baixo custo do componente, bem como a facilidade de instalação e a inviabilidade de instalação de outros tipos de equipamentos que necessitaria estar posicionados próximos da região do contato.

Durante a manobra de abertura e fechamento da chave seccionadora, o sensor de posição utilizado para confirmação da manobra também é composto pelo mesmo princípio de funcionamento, sensor retro reflexivo utilizado para verificação do fechamento. A seguir é descrita a caracterização do sensor utilizado.

- Tensão de alimentação: 12 V;
- Distância de detecção: 8 m;
- Tempo de resposta: 1 ms.

O sensor retro reflexivo adotado para verificação de fechamento o estudo foi o modelo O6P700 da marca IFM, produzido na Alemanha.

Para a colocação dos espelhos prismáticos nas chaves seccionadoras, desenvolveu-se e construiu-se um suporte, de modo que o comprimento do braço fosse ajustável, visando uma maior acurácia do dado coletado.

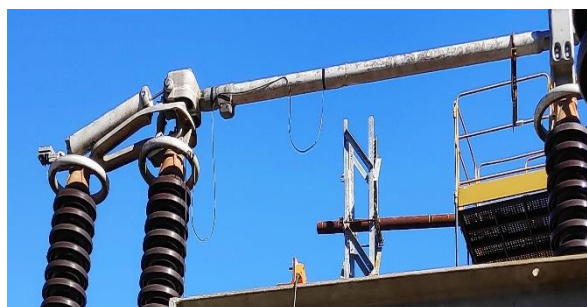
O receptor do laser (espelho prismático) foi instalado em uma posição ativa, ou seja, energizada.

Na Figura 17, apresentam-se os sensores de posição utilizados para o monitoramento da qualidade da manobra de abertura e fechamento do seccionador. Na Figura 17 (a), apresenta-se a chave BMKU – 40A e na Figura 17 (b) a chave Lorenzetti 242 kV. Ambos os sensores retroreflexivos estão posicionados na estrutura da base dos isoladores.

Figura 17 – Sensores de posição



(a)



(b)

Fonte: Autor (2019).

As individualidades existentes entre os modelos de chaves seccionadoras afetam também a padronização referente a forma em que será monitorado a confirmação de fechamento dos contatos.

3.1.7 Aquisição de Dados

Sabe-se que a automatização de processos vem ganhando espaço nas mais diversas áreas do conhecimento, portanto processos que antes eram desempenhados por pessoas, passaram a ser desempenhados por máquinas e computadores, de modo a otimizar recursos, como tempo, dinheiro e pessoas (MASCARENHAS e ZAMBALDI, 2009).

Com esse pressuposto em mente, buscou-se um sistema que fizesse o monitoramento de algumas métricas, tais como tensão mecânica, deformação, frequência, qualidade de abertura/fechamento e torque no eixo da caixa de comando medidas durante o estudo.

Nesta fase, utilizaram-se algumas ferramentas visando uma coleta primária de dados fosse executada para que então alguns componentes necessários pudessem ser definidos.

Para que então alguns dados necessários para o estudo pudessem ser definidos, o sistema de aquisição de dados foi alimentado por *strain gages* e acelerômetros.

Para a definição do tipo de *strain gage* utilizado partiu-se de algumas premissas básicas relacionadas ao tipo de medição, tais como: deformação axial, deformação por flexão, sensibilidade transversal, temperatura, número de *strain gages* utilizados, posição de montagem, número de fios e resistores de complemento de ponte.

Cuidados também foram tomados no momento da instrumentação das chaves estudadas. Para a instalação do *strain gages*, alguns cuidados foram adotados, conforme National Instrumets (2018):

- Preparação da superfície;
- Colagem do *strain gage*;
- Fios de ligação estarem bem soldados;
- Proteção com revestimento.

A variação da resistência elétrica capturada pelo *strain gage* é processada através do sistema de aquisição de dados, onde essa variação na resistência elétrica é transformada em um valor numérico que representa a deformação do corpo de prova analisado.

Com a utilização dos *strain gages* será possível adquirir e processar dados importantes para esta pesquisa, tais como a tensão mecânica, deformação, torque no eixo árvore utilizados para análise da integridade mecânica dos componentes monitorados, verificando assim se os materiais mesmo quando submetidos a vibração forçada permanecem dentro do regime elástico de cada material.

Abaixo segue algumas informações importantes sobre o modelo utilizado:

- Marca: Lynx;
- Modelo: ADS1800;
- Resolução: 24 bits;
- Taxa de amostragem: 24.000 Hz.

Após a análise das hipóteses citadas acima, iniciou-se o processo de instrumentação das chaves para posterior aquisição de dados.

Outro fator existente nesta seção, trata-se dos cabos de conexão entre os *strain gages* e acelerômetro junto ao sistema de aquisição de dados. Para isso levou-se em consideração a metragem de cabos necessária para instrumentação da chave e optou-se pela instalação de um

quadro de comando na bancada de testes onde pudesse ser instalado o sistema de aquisição de dados de forma segura e eficiente.

A presente pesquisa apresentou a necessidade de monitoramento e análise das acelerações nas chaves seccionadoras. Esse monitoramento demonstrou-se pertinente na análise da vibração livre como também na análise da vibração harmônica forçada. Para esta análise, utilizaram-se acelerômetros descritos a seguir:

- Fabricante: Silicon Designs;
- Código fabricante: 2210-025, 2210-050, 2210-100 e 2210-400.

Os acelerômetros foram utilizados para coletar os dados de aceleração da estrutura, em pontos específicos para que possibilitassem o acompanhamento das amplitudes de aceleração incidentes no seccionadores e possível validação entre modelo experimental e numérico.

Na Figura 18 (a) pode-se observar os locais onde foram instalados os acelerômetros para o seccionador BMKU – 40A e na Figura 18 (b), tem-se o posicionamento dos acelerômetros para o seccionador Lorenzetti 242 kV.

Figura 18 – Posicionamento acelerômetros nos seccionadores



(a)



(b)

Fonte: Autor (2019).

Utilizaram-se de dois modelos de *strain gages*, conforme descrição abaixo.

- Fabricante: HBM;

- Código fabricante: K-CLY4-0060-1-120-3-050-N.

Modelo este utilizado na haste de contato móvel, estrutura de suporte dentre outros, buscando coletar a deformação da estrutura para que em seguida tornar os cálculos de tensão mecânica dos pontos monitorados.

O segundo modelo de *strain gages* foi utilizado para monitorar o torque no eixo da caixa de comando das chaves seccionadoras, por se tratar de um *strain gage* de 45°.

- Fabricante: HBM
- Código fabricante: K-CXY4-0060-1-120-3-050

Na Tabela 1, tem-se a nomenclatura das posições onde instrumentou-se o seccionador.

Tabela 1 – Posicionamento *strain gages* seccionador BMKU – 40 A

Ponto	Descrição
1	Contato principal
2	Meio da haste da lâmina principal
3	Base da lâmina principal
4	Coluna de porcelana móvel
5	Coluna de porcelana fixa
6	Face do bloco de isoladores
7	Eixo árvore
8	Coluna do suporte

Fonte: Autor, 2019

É importante apontar que as deformações coletadas através de *strain gages* para os oito pontos foram coletadas no sentido do eixo y, indicado na própria figura.

Para este seccionador os acelerômetros foram posicionados no ponto 1, para as três direções do plano cartesiano (x,y,z) tendo uma amostra de 50 ciclos coletados no ponto. A Figura 19 apresenta os locais onde foram posicionados os *strain gages* na chave BMKU – 40 A.

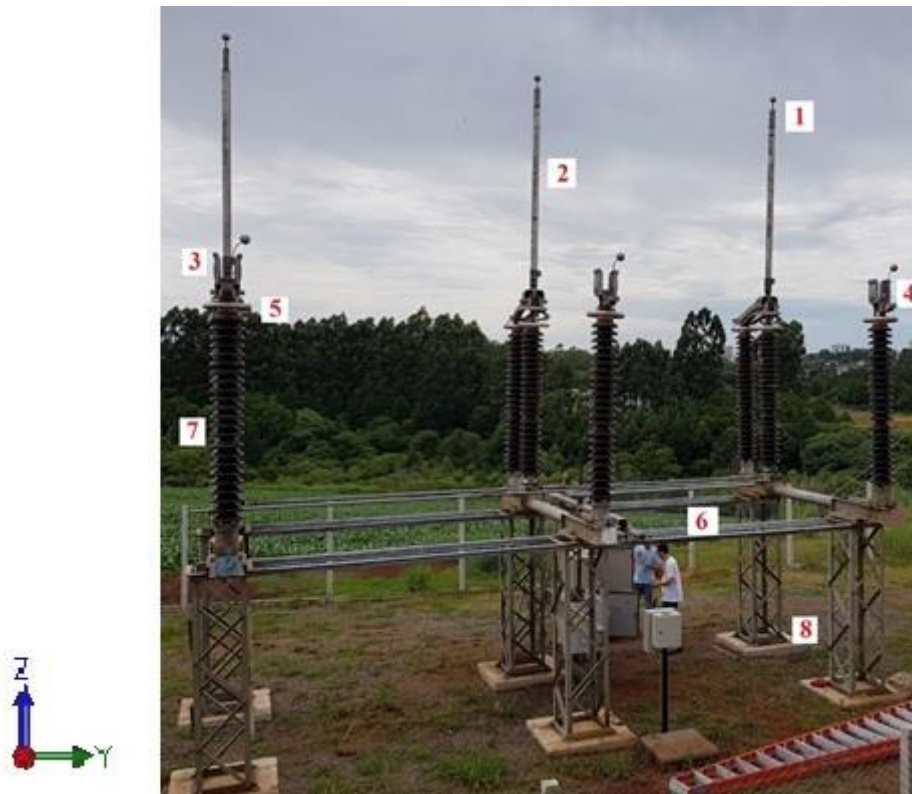
Figura 19 – Posicionamento *strain gages* seccionador BMKU – 40A



Fonte: Autor (2019).

Já para o seccionador Lorenzetti 242 kV, a Figura 20, apresenta o posicionamento dos *strain gages*.

Figura 20 – Posicionamento *strain gages* seccionador Lorenzetti 242 kV



Fonte: Autor (2019).

Abaixo na Tabela 2, encontra-se a descrição de cada ponto instrumentado.

Tabela 2 – Posicionamento *strain gages* seccionador Lorenzetti 242 kV

Ponto	Descrição
1	Contato principal
2	Meio da haste da lâmina principal
3	Base da lâmina principal
4	Contato fixo
5	Base rotativa da lâmina principal
6	Tubo de transmissão
7	Isolador fixo
8	Base da coluna da estrutura de suporte

Fonte: Autor, 2019

Para as coletas oriundas dos *strain gages* o sentido de direção das coletas das deformações se deu da seguinte forma: os pontos 1, 2, 3, 5, 6, 7 e 8 instrumentarem-se estes

pontos para que o sentido de coleta dos da deformação fosse no sentido do eixo y, apresentado na figura. O ponto 4 foi instrumentado de modo que o sentido de coleta da deformação se desse no sentido do eixo z.

Na chave seccionadora Lorenzetti 242 kV os acelerômetros foram posicionados no ponto 1, nos três sentidos do plano cartesiano contido na figura e também para uma amostragem de 50 ciclos.

Com os dados coletados através da extensometria para os pontos monitorados o comportamento dos materiais em relação ao respectivo regime elástico podendo assim ser verificado o comportamento dos materiais com a incidência de vibração forçada nos seccionadores.

No processo de aquisição dos dados, elaborou-se um gráfico que represente as ações das chaves ao longo do tempo. Para isto, apresenta-se na Figura 21, indicando a ação dos seccionadores ao longo do tempo.

Figura 21 – Ação do seccionador ao longo do tempo



Fonte: Autor (2019).

Nota-se através da Figura 21 que a vibração está presente em todo o tempo das manobras, tanto para a de abertura quanto a de fechamento do seccionador.

3.1.8 Teste de Alívio de Torque nas Manobras de Abertura e Fechamento

Durante o desenvolvimento do estudo, verificou-se a necessidade da execução de testes que verificassem a variação do torque durante as manobras de abertura e fechamento do seccionador na caixa de comando dos seccionadores quando submetidos à vibração harmônica forçada e vibração livre.

No decorrer desta seção do estudo, fez-se necessária a utilização de um torquímetro digital para coleta do dados.

O posicionamento de início e fim de rotação do eixo árvore foi definido de modo que a rotação se mostrasse suficiente para tirar/colocar a lâmina da haste principal no contato fixo.

Posteriormente, realizou-se uma bateria de 10 ciclos de manobra de abertura da chave e 10 ciclos de fechamento da chave, para análise de qual condição, manobra de abertura ou manobra de fechamento apresentaria a necessidade de maior esforço.

Dados de torque da manobra para a condição de vibração livre foram coletados. Em seguida o processo foi repetido para a condição de vibração forçada sob excitação harmônica.

Na condição de coleta de dados para vibração harmônica forçada, foram feitos alguns ajustes nos parâmetros do motovibrador, as massas excêntricas utilizadas foram de 2,2 Kg. Com relação a frequência foram coletados dados de torque para as frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz e 30 Hz. Com esses dados, pode-se verificar qual a frequência que proporcionou alívio do torque para a manobra.

Após a verificação das frequências listadas acima pautada pela que apresentou a redução mais significativa, variou-se 2 Hz para cima e para baixo de modo que e por fim 0,5 Hz até que fosse obtida a maior redução no torque para a manobra dos seccionadores.

3.1.9 Demais Equipamentos

Junto ao motovibrador descrito na seção 3.1.8 utilizou-se um inversor de frequência para que seja possível alterar a velocidade de rotação do motor do motovibrador, e consequentemente, a variação da frequência de vibração.

A utilização do inversor de frequência tem como principal finalidade variar a frequência de forma rápida e prática até que a frequência ideal seja encontrada, ou seja, a frequência que possibilite o fechamento dos contatos e que não cause o fenômeno da ressonância no equipamento.

A seguir são apresentadas algumas características importantes do inversor utilizado:

- Fabricante: WEG;
- Modelo: CFW300B10P0B2DB20;
- Frequência de Saída: 0 Hz a 400 Hz;
- Resolução: 0,1 Hz.

Através da programação deste CLP pode-se fazer a automação de alguns equipamentos usados, como por exemplo o equipamento para aquisição de dados, a caixa de comando da chave seccionadora e o próprio inversor de frequência.

Barbosa da Silva *et al.* (2014) define CLP como sendo um equipamento eletrônico digital, formado por *software* e *hardware* compatíveis com aplicações industriais. Portanto o desempenho de cada dispositivo conectado ao CLP será gerenciado pela interface homem-máquina incorporado através do *software* embarcado com a sua linguagem de programação.

O controlador lógico programável tornou-se fundamental para o estudo, já que a quantidade de testes, na seção referente a metodologia de testes será abordado de forma mais detalhada as características das baterias de teste, necessários para o atendimento das normas é bastante grande.

Pode-se mencionar algumas características técnicas do produto do CLP:

- Marca: WEG;
- Série: CLIC 02
- Modelo: CLW-02/20HR-D
- Entradas: 12 portas (8 portas digitais e 4 portas analógicas);
- Saídas: 8 portas;

Controladores lógico programáveis podem ser utilizados em inúmeras aplicações nas mais diversas áreas, como em pesquisas, aplicações industriais, sistemas avançados (ALPHONSUS; ABDULLAH, 2016).

Ao se examinarem possíveis localizações para a instalação dos equipamentos apontados anteriormente, constatou-se que havia espaço para instalação dos mesmos junto ao quadro de comando utilizado para instalação do sistema de aquisição de dados. Desse modo o quadro de comando fora montado de tal forma que pudessem ser instalados equipamentos como o sistema de aquisição de dados, fonte de alimentação, inversor e CLP.

Por consequência da instalação destes equipamentos, o quadro de comando ficou posicionado dentro da área destinada a bancada de testes, para que pudesse ser alocado próximo a chave em que estava sendo efetuado a bateria de teste.

A disposição dos equipamentos do quadro de comando mencionado encontra-se na Figura 22.

Figura 22 – Quadro de comando equipamentos auxiliares



Fonte: Autor (2019).

A seguir são apresentadas algumas características importantes do equipamento.

- Modelo: Tramontina-Pro 44502/301;
- Precisão: $\pm 3\%$ valor do torque; $\pm 2\%$ valor do ângulo;
- Torque: De 17 N.m até 340 N.m;
- Resolução: 0,1 N.m.

É de essencial importância a utilização do torquímetro, haja vista que existem recomendações que sugerem que os parafusos sejam usados uma única vez, e que após a retirada total da porca, os parafusos sejam substituídos por novos parafusos, reduzindo assim a possibilidade de falha dos parafusos. Segundo Goettems, Braga e Reguly (2017), 85% das falhas em uniões parafusadas são decorrentes da fadiga e 45% relacionadas a erro de montagem. Tendo por base este conceito e observando que as estruturas de suporte das chaves poderiam conter parafusos utilizados mais de uma vez, foi realizada a substituição completa dos parafusos das estruturas de suporte para os dois modelos de chaves seccionadoras estudados.

Os antigos elementos de fixação das estruturas foram substituídos por parafusos novos, da classe 8.8 e tamanho M12, com rosca métrica normal, tendo seu limite de escoamento de 640 N/mm².

O torque a ser aplicado nos parafusos pode ser calculado pela equação (9):

$$T = K_t D_{nom} F_{cp} \quad (9)$$

Onde:

T : Torque [N.m];

K_t : Coeficiente de torque;

D_{nom} : Diâmetro nominal do parafuso [m];

F_{cp} : Força tensora [N].

Através da equação (9), pode ser observado que o torque aplicado no parafuso é diretamente proporcional ao coeficiente de torque, porém segundo Bickford (1995) esta constante é obtida considerando fatores muito difíceis de serem considerados para fins de cálculo e também altamente sujeitos a erros, tais como irregularidades dimensionais, defeitos na rosca, aspecto da superfície dos elementos, lubrificação, sujidade, coeficiente de atrito da cabeça e da rosca, dentre outros.

Atentando ao disposto no parágrafo anterior optou-se pela obtenção do torque a ser usado nos novos fixadores fornecidos por fabricantes de parafusos. Seguindo pela descrição do parafuso, tendo como indicadores a classe e o tamanho do parafuso, sabe-se que o torque utilizado foi de 88 N.m, conforme orientação da Ciser (2018).

3.2 Planejamento Experimental

Tem-se conhecimento da importância da criação de procedimentos operacionais para o detalhamento de tarefas e, conseqüentemente, uma padronização da execução de trabalhos. Tendo esse viés em mente, esta seção estudará e apresentará uma metodologia de testes para chaves seccionadoras. Para esta seção, a construção e o desenvolvimento desta seção estão baseadas principalmente nas normas regulamentadoras do setor elétrico brasileiro e mundial.

3.2.1 Orientações baseadas em Normas

Esta seção está baseada no estudo das seguintes normas:

- ABNT NBR IEC 62271 – 102:2006;

- ABNT NBR IEC 60694;
- ABNT NBR 7571;
- IEEE Std 37.30;
- IEEE Std 37.34;

Antes das orientações contidas nas normas, procurou-se criar algumas sequências de passos que pudessem verificar o correto funcionamento dos componentes das chaves. Para tal, considerou-se a verificação de funcionamento das chaves seccionadoras da forma que se executa atualmente, ou seja, fazendo as operações necessárias através da caixa de comando acionado por motor elétrico. Antes disso, porém o processo manual de fechamento e abertura da chave seccionadora foi executado para verificar o correto funcionamento dos mecanismos mecânicos de acionamento.

Dada a natureza deste estudo estar voltada à avaliação e validações de soluções presentes na patente BR 10 2013 020198 7, durante o estudo das normas destacou-se a norma NBR 62271-102 (2006), norma esta responsável por tratar de ensaios de durabilidade mecânica para chaves seccionadoras. Importante elucidar que ensaios voltados para testes da parte elétrica não foram executados.

A NBR 62271-102 (2006) apresenta valores para operação de durabilidade mecânica que chaves seccionadoras devem ser capazes de realizar e esses valores estão relacionados a manutenção específica pelo fabricante.

Conforme constata-se na Tabela 3, tem-se que a única diferença entre as classes M1 e M2 é a duração do ensaio.

Com as chaves seccionadoras montadas na bancada de testes, aplicaram-se algumas orientações expressas nas normas, tais como a verificação da força necessária para fechamento manual de ambos os modelos de chaves estudados. Com a aplicação deste item, buscou-se garantir o correto funcionamento da chave seccionadora, exatamente como acontece nas subestações.

Tabela 3 – Classificação das chaves seccionadoras em relação ao número de ciclos

Classe	Tipo de Seccionador	Número Mínimo de Ciclos de Operação
M0	Seccionador padrão (durabilidade mecânica normal)	1.000
M1	Seccionador destinado a uso com disjuntor de classe igual (durabilidade mecânica estendida)	2.000
M2	Seccionador destinado a uso com disjuntor de classe igual (durabilidade mecânica estendida)	10.000

Fonte: NBR 62271-102 (2006)

Antes do início da coleta de dados das grandezas a serem monitoradas, executou-se o ensaio para verificar o alívio do torque necessário para a execução das manobras de abertura/fechamento. Para este teste utilizou-se de um torquímetro e dois componentes desenvolvidos e fabricados para este ensaio.

Foram monitorados e coletados diversos dados oriundos da bancada de testes. A norma NBR 62271-102 (2006) sugere que sejam monitorados alguns parâmetros, como o tempo de operação, qualidade de abertura/fechamento, máximo consumo de energia, dentre outros.

No presente estudo, por se tratar da validação de uma nova solução, proveniente da patente BR 10 2013 020198 7, outros parâmetros serão monitorados, além de alguns sugeridos pelas normas tais como:

- Qualidade de abertura/fechamento;
- Tensão mecânica;
- Deformação;
- Torque no eixo da caixa de comando;
- Torque nos parafusos;
- Frequência da chave seccionadora.

A bateria de teste foi dividida em 5 séries, tendo em cada sessão 10 ciclos de abertura e fechamento, haja vista a falha de alguns componentes mecânicos e elétricos ao longo da pesquisa e dos testes preliminares. Desta forma, devido à perda de integridade de componentes e as variáveis dos ensaios o número de ciclos foi ajustado de modo a coletar os dados necessários e não inutilizar os seccionadores.

Nos intervalos das séries de 10, manutenções e ajustes mecânicos serão permitidos, porém substituição de subcomponentes, como contatos não foi executada, orientação está em concordância com a norma NBR 62271-102 (2006).

Nesta fase do estudo tornou-se necessária a verificação da vibração mecânica como fator de alívio para as manobras de abertura/fechamento de chaves seccionadoras.

Fez-se necessário um teste de alívio de torque nas caixas de comando dos seccionadores, quando da sua manobra de abertura e fechamento. Para isso buscou-se variar a frequência e a massa do motovibrador até que se encontrasse a melhor configuração que possibilitasse a redução do torque.

Para verificação da variação do torque, a utilização do torquímetro de demonstrou necessárias. O torquímetro foi acoplado no pino para a movimento manual do seccionador, executando-se assim a manobra de abertura e fechamento pelo torquímetro.

Para isso variou-se a frequência de vibração do motovibrador e em seguida utilizando-se de um torquímetro digital acoplado ao sistema de abertura manual do quadro de comando de cada chave executou-se a manobra de abertura e fechamento do seccionador. Com o torquímetro digital pode-se acompanhar o torque necessário para cada frequência testada.

Sabendo-se que os modelos de chaves seccionadoras estudados finalizaram seu tempo de depreciação, conforme orientação da ANEE, devido ao tempo de depreciação dos seccionadores alguns componentes mecânicos apresentaram falhas estruturais.

Assim, verificou-se a necessidade da definição de um novo número de amostragem, que possibilita-se a obtenção e análise de dados, considerando-se que os seccionadores foram produzidos muito antes da elaboração da norma vigente NBR 62271-102 (2006). Dessa forma, executaram-se baterias com 50 ciclos de abertura e fechamento para vibração livre e 50 ciclos de abertura e fechamento para vibração forçada sob excitação harmônica forçada.

3.3 Torque nos Parafusos da Estrutura de Suporte

O impacto da vibração foi monitorado em duas baterias de testes de 100 ciclos de manobra de abertura e fechamento das chaves seccionadoras. Os primeiros 100 ciclos de manobra foram feitos com vibração livre para observarmos o comportamento da estrutura sem a vibração harmônica forçada. Em seguida foram feitos os testes com a vibração harmônica forçada e então os resultados foram comparados.

Alguns métodos foram utilizados para auxiliar no monitoramento do efeito da vibração livre e da vibração harmônica forçada nos parafusos. O primeiro método utilizado denota de monitoramento visual dos parafusos submetidos ao efeito de vibração. Neste caso se fez necessária executar uma marcação visual em todos os parafusos monitorados através do uso de um marcador industrial. O monitoramento foram feitos em ambas as chaves tendo um total de parafusos monitorados de aproximadamente 300 unidades.

Para o segundo método de verificação, recorreu-se para a utilização do torquímetro digital. Nesse caso, ao final da bateria de 100 ciclos, todos os parafusos da estrutura de suporte foram verificados para checar se o torque indicado pelo fabricante aplicado no início da bateria de teste de 88 N.m manteve-se inalterado.

3.4 Análise de eficiência de frequência e massas

Durante a pesquisa alguns testes foram efetuados tendo como principal objetivo avaliar a melhor combinação de frequência e massas excêntricas buscando um deslocamento maior no ponto monitorado.

Para que esta seção pudesse ser desenvolvida, utilizou-se um sistema para coleta da velocidade no ponto monitorados. Abaixo segue a descrição do equipamento.

- Marca: Teknikao;
- Modelo: NK 620;
- Amplitude: 200 mm/s;
- Faixa de Frequência: 5 Hz até 2 kHz

Além do sistema descrito acima, para monitorar a velocidade, utilizou-se também o CLP para que as frequências pudessem ser alteradas durante o estudo.

Em ambas as chaves seccionadoras o acelerômetro utilizado pelo sistema de coleta de aceleração foi posicionado na haste do contato principal de modo a ficar o mais próximo possível do contato fixo do seccionador.

Para as condições de contorno testadas (frequência e massas excêntricas) o intervalo de estudo se deu entre 5 Hz e 20 Hz para a frequência e de 2,2 kg, 4,4 kg e 6,6 kg para as massas excêntricas, massas estas divididas em pares.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos neste estudo, comparando as situações monitoradas e também será apresentado um estudo de análise de variância para, em seguida serem interpretados os resultados obtidos. Os resultados estão dispostos da seguinte forma no decorrer da seção.

- Bancada de testes;
- Procedimento operacional padrão para ensaio;
- Ensaio com vibração livre;
- Ensaio com vibração forçada sob excitação harmônica;
- Análise de estatística dos dados obtidos na chave BMKU- 40A;
- Análise de estatística dos dados obtidos na chave Lorenzetti 242 kV.

4.1 Bancada de testes

A construção da bancada de testes foi o primeiro passo para que o estudo pudesse ser desenvolvido. A bancada de testes foi projetada para receber dois modelos de chaves seccionadoras, deixando também um espaço de 5000 mm entre a base da coluna e o alambrado de proteção, essa distância pode ser útil para os casos de um caminhão ter necessidade de acessar a bancada para executar alguma tarefa.

Na Figura 23 apresenta-se a bancada de testes completamente finalizada.

A bancada de testes foi projetada de forma que a energia elétrica chegasse ao quadro de comando geral da bancada e posteriormente fosse distribuído através de fiação para as duas caixas de comando responsáveis pelo acionamento das chaves seccionadoras testadas.

Como resultado desta subseção, vê-se na Figura 23 que a bancada de testes possibilitou a montagem das chaves seccionadoras bem como a possibilidade de execução dos ensaios em três turnos, devido à instalação de iluminação.

Figura 23 – Bancada de testes finalizada



Fonte: Autor (2019).

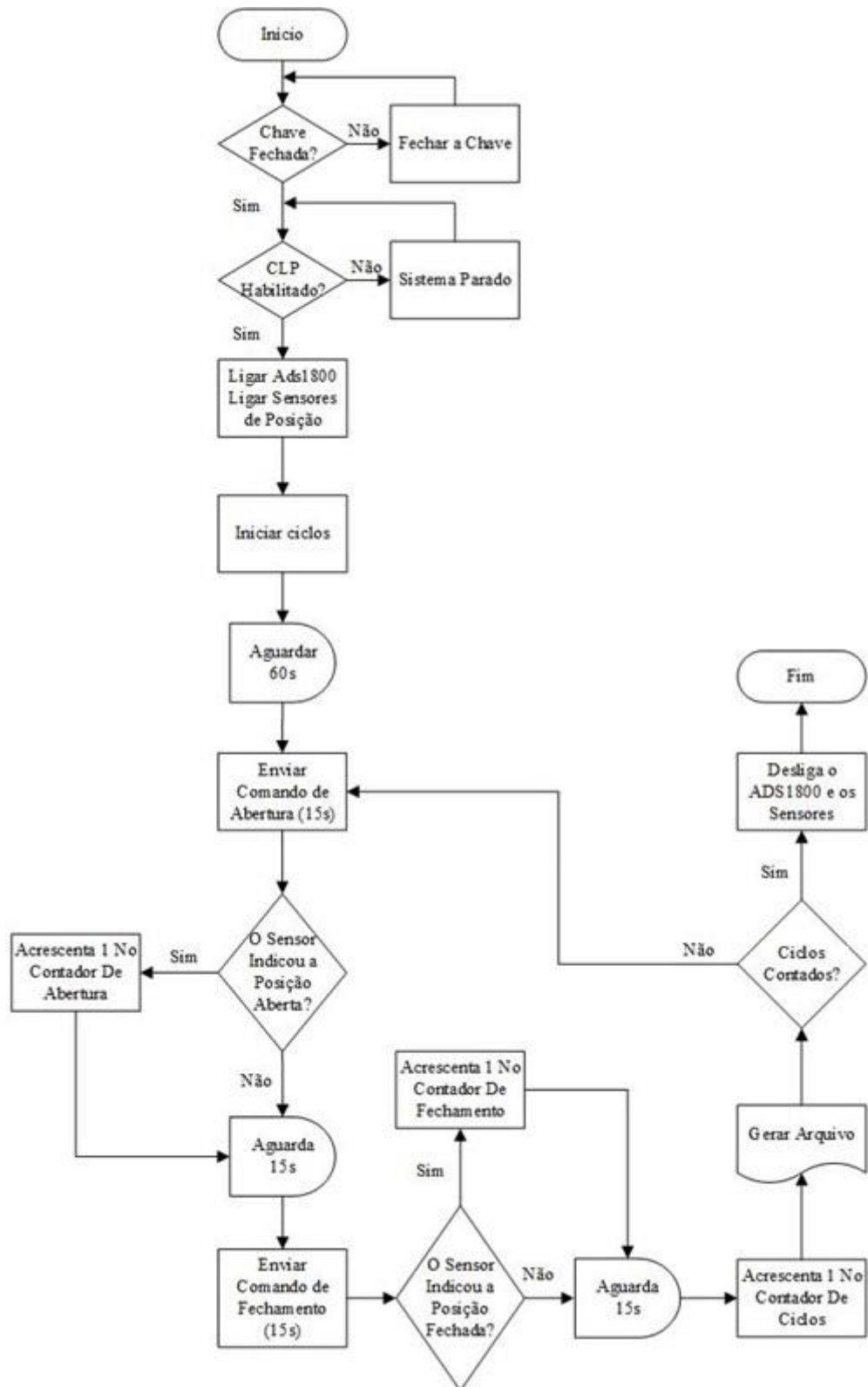
4.2 Procedimento operacional padrão para ensaio

O procedimento operacional padrão adotado mostrou-se eficaz no decorrer do estudo tendo em vista as diversas variáveis consideradas quanto a sua elaboração, sendo este procedimento testado para validação da hipótese deste estudo.

Buscou-se neste trabalho experimental, automatizar todo o processo de manobra das chaves seccionadoras. Com isso em mente utilizaram-se alguns equipamentos caracterizados no capítulo 3, visando a automação das operações de manobra das chaves seccionadoras possibilitando assim que os testes pudessem ocorrer em dias chuvosos já que bancada de testes está exposta ao tempo.

A Figura 24 apresenta o procedimento operacional padrão para vibração livre no ensaio das chaves seccionadoras de acordo com as características atuais empregadas pelo sistema elétrico para as manobras em chaves seccionadoras.

Figura 24 – Procedimento operacional para vibração livre



Fonte: Autor (2018).

De acordo com o fluxograma apresentado na Figura 24, observa-se que o primeiro processo do procedimento operacional é analisar se a chave seccionadora se encontra na posição fechada, isso porque é a posição mais usual nas subestações de energia elétrica.

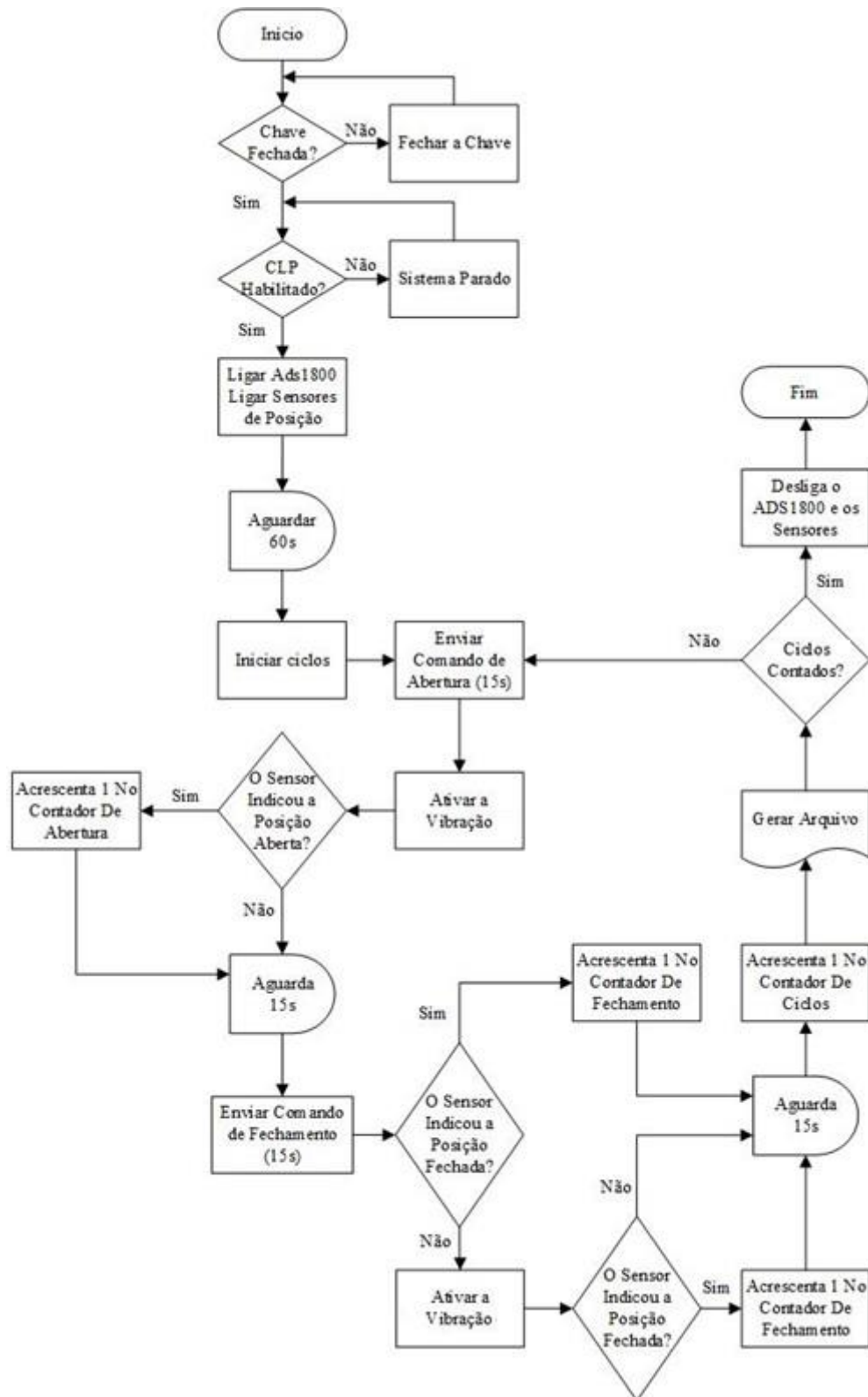
Posteriormente buscou-se averiguar se o CLP está conectado à energia e ativo. Esta verificação foi necessária para que toda a automação do processo de manobra possa ser iniciada, já que a programação e o procedimento operacional padrão foram inseridos na forma de linguagem *ladder*, possibilitando assim o acionamento do sistema de aquisição de dados e dos sensores utilizados para verificação de posição da chave seccionadora e o início dos ciclos necessários para atendimento das normas referente a durabilidade mecânica.

Após um período necessário para ativar os componentes do sistema de automação, o CLP enviou um sinal por um intervalo de 15 segundos para abertura da haste móvel da chave seccionadora. Logo após o sensor confirmou a abertura da chave seccionadora, o contador programado junto ao CLP acrescentou uma unidade no número de ciclo de abertura. Caso fosse enviado o sinal de abertura e o sensor não confirmaria a abertura e seriam aguardados 15 segundos necessários para amortecimento da estrutura devido ao impacto gerado pelo contato móvel no contato fixo. Todavia não seria acrescentada a manobra nos ciclos totais de abertura.

Em seguida, foi gerado um arquivo com os dados dos parâmetros monitorados (qualidade de abertura/fechamento, tensão mecânica, deformação, torque na caixa de comando, frequência da caixa seccionadora) para cada ciclo de abertura e fechamento realizado. Foram necessários 100 ciclos (50 ciclos de vibração livre e 50 ciclos vibração harmônica forçada), devido ao tempo de fabricação das chaves, também para que componentes mecânicos e elétricos não apresentem falhas devido no decorrer do estudo, também será executada uma análise preliminar nos dados obtidos, bem como uma avaliação visual na integridade da estrutura e das chaves.

Para o procedimento operacional utilizando a vibração harmônica forçada desenvolveu-se o fluxograma apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Procedimento operacional padrão utilizando vibração harmônica forçada



Fonte: Autor (2018).

Ao serem comparadas as Figuras 24 e 25, nota-se a adição do processo de ativar a vibração mecânica. A ativação da vibração mecânica se deu através da programação inserida no CLP que ativou o motovibrador.

Importante destacar a utilização da figura geométrica que representa a função atraso nos fluxogramas. Esta utilização se deu como nos 60 segundos entre o acionamento dos sensores de posição, sistema de aquisição de dados e o início dos ciclos propriamente dito. Esse atraso mostrou-se necessário para que todos os sistemas, incluindo os *strain gages* e acelerômetros, enviassem dados para o sistema de aquisição e também para o sistema de armazenamento dos dados, iniciando-se a gravação dos dados.

Por fim, os atrasos dispostos com o tempo de 15 segundos referem-se a duas situações, na primeira logo após o processo do sensor de posição indicar a posição da haste móvel. Este atraso é importante para que haja tempo suficiente para a conclusão da manobra de abertura e ou fechamento.

4.3 Torque nos Parafusos da Estrutura de Suporte

Após a conclusão dos 100 ciclos de testes com a vibração livre, percebeu-se que nenhum dos parafusos da estrutura havia se deslocado da sua marca visual, ou seja, estavam todos ainda com o mesmo aperto. Para verificar quantitativamente, foi utilizado o torquímetro digital nos parafusos novamente e foi notado que o torque era realmente o mesmo. Com isto, descobriu-se como a estrutura se comportava com o acionamento original do seccionador.

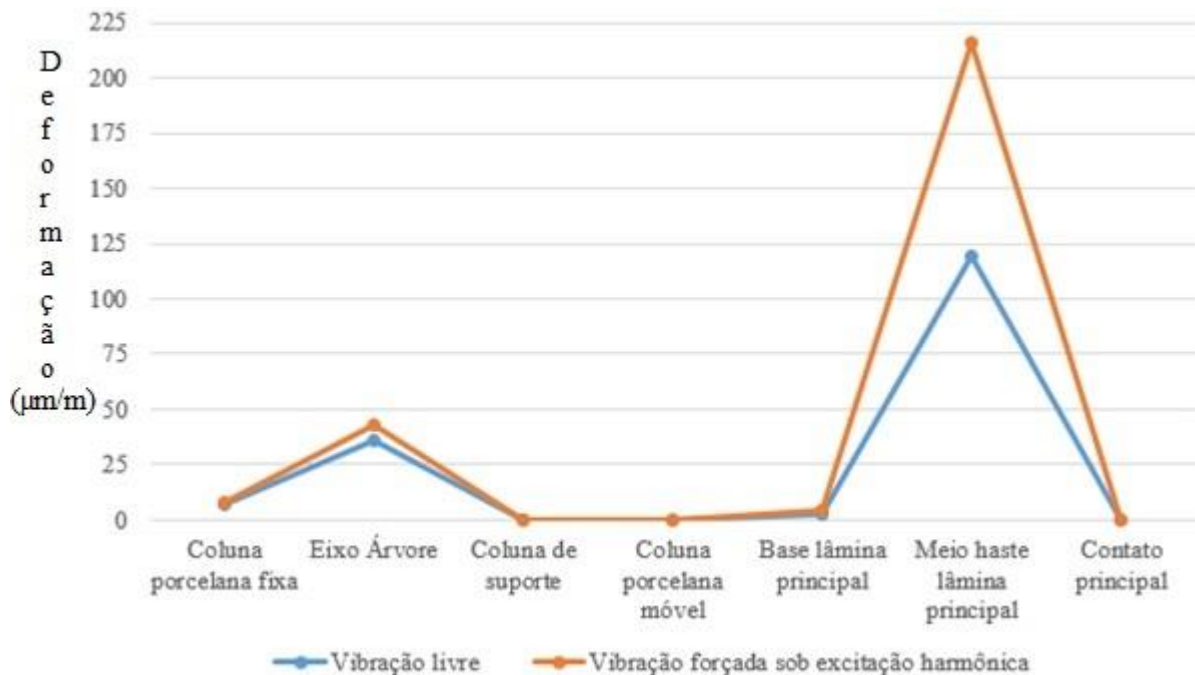
Com os parafusos com o aperto necessário, foram feitos os testes com a vibração harmônica forçada, utilizando o motovibrador a uma frequência de 30 Hz e 2,2 kg de massa excêntrica. Então após a conclusão dos 100 ciclos, a análise visual nos parafusos foi feita. Notou-se, com exceção de um parafuso do próprio motovibrador, que nenhum dos parafusos da estrutura metálica do seccionador havia se deslocado de sua marca visual, ou seja, mesmo após a utilização de vibração harmônica forçada, os parafusos ainda estavam com o aperto inicial. Para fins de comprovação, empregou-se novamente o torquímetro digital e observou-se que os parafusos realmente ainda estavam com o torque inicial. Para o afrouxamento constatado no parafuso do motovibrador uma possível solução é a utilização de arruelas de pressão.

4.4 Seccionador BMKU – 40A

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no ensaio com vibração livre e vibração forçada para as manobras de abertura e fechamento do seccionador.

Na Figura 26 estão apresentados os dados referentes as deformações média da vibração livre e vibração forçada sob excitação harmônica para os pontos monitorados.

Figura 26 – Deformações chave seccionadora BMKU – 40A



Fonte: Autor (2019).

Por intermédio da Figura 26, nota-se que a deformação aumenta com a utilização da vibração sob excitação harmônica forçada. Nota-se também que os pontos apresentam uma variação maior no meio da haste, ponto onde a deformação no plano y dos eixos coordenados definidos para o estudo.

A maior deformação no seccionador BMKU – 40A caracterizada na Figura 26 pelo ponto 2. Esta deformação se caracteriza pela tipologia construtiva do seccionador que apresenta abertura vertical reversa, como a base da lâmina engastada fazendo com que o momento fletor na haste devido à gravidade, aumentando assim a deformação no meio da haste.

As frequências incidentes nos seccionadores foram obtidas com o auxílio de um sistema de aquisição de dados e acelerômetros. Tornou-se necessário definir o sistema de coordenadas cartesianas da bancada de testes. A Figura 27 retrata a disposição do sistema.

Figura 27 – Sistema de coordenadas



Fonte: Autor (2019).

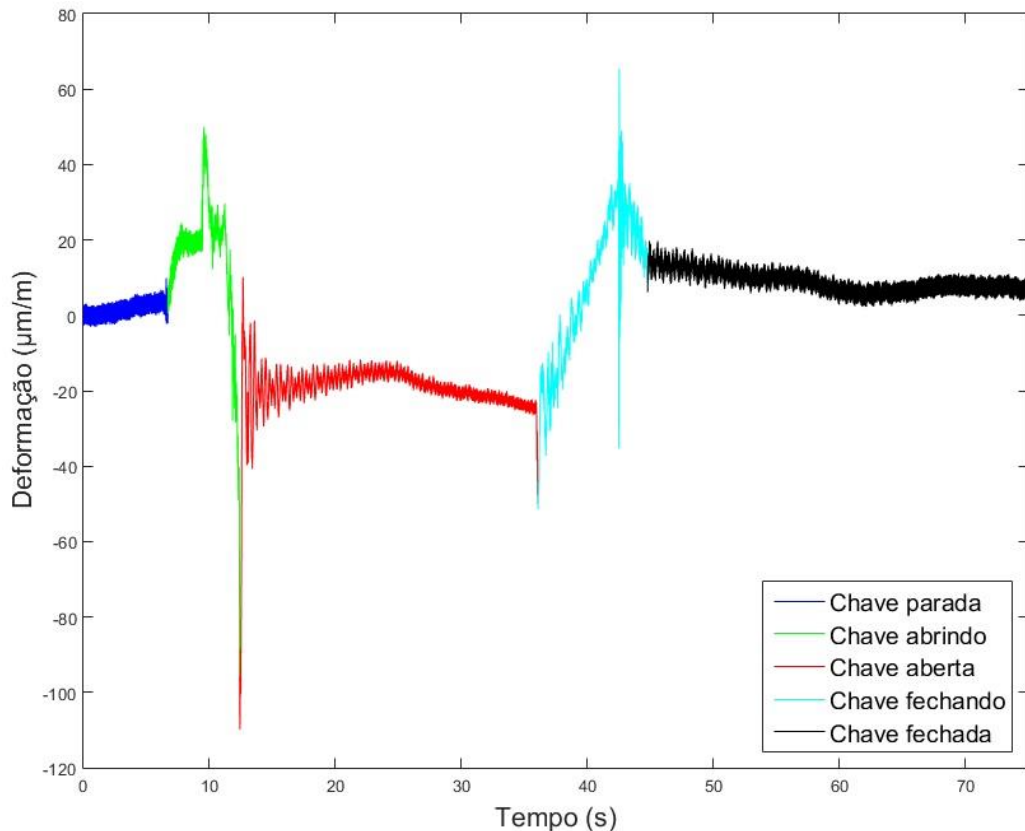
4.4.1 Ensaios com vibração livre

As amostras foram coletadas com um ciclo máximo de 75 segundos, contando do início da manobra de abertura até a conclusão da manobra de fechamento. A duração de coleta dos dados de aceleração e dos dados de extensometria de cada ciclo foi de 75 segundos e a taxa de aquisição de dados utilizada foi de 24.000 Hz.

Diversos pontos do seccionador foram monitorados para que a coleta das deformações pudessem ser obtidas. Dentre os pontos coletados, uma atenção especial foi dada ao ponto que apresentou o maior valor absoluto de deformação.

A Figura 19 demonstra o sinal de deformação coletado do ponto que apresentou maior deformação durante os testes, ou seja, meio da haste da lâmina principal.

Figura 28 – Deformação meio da haste vibração livre seccionador BMKU – 40A



Fonte: Autor (2019).

Percebe-se na Figura 28 que o sinal possui cores distintas ao longo do tempo. Esta diferenciação permite que se possa segmentar o sinal com o tempo, facilitando a interpretação do dado ao longo do tempo.

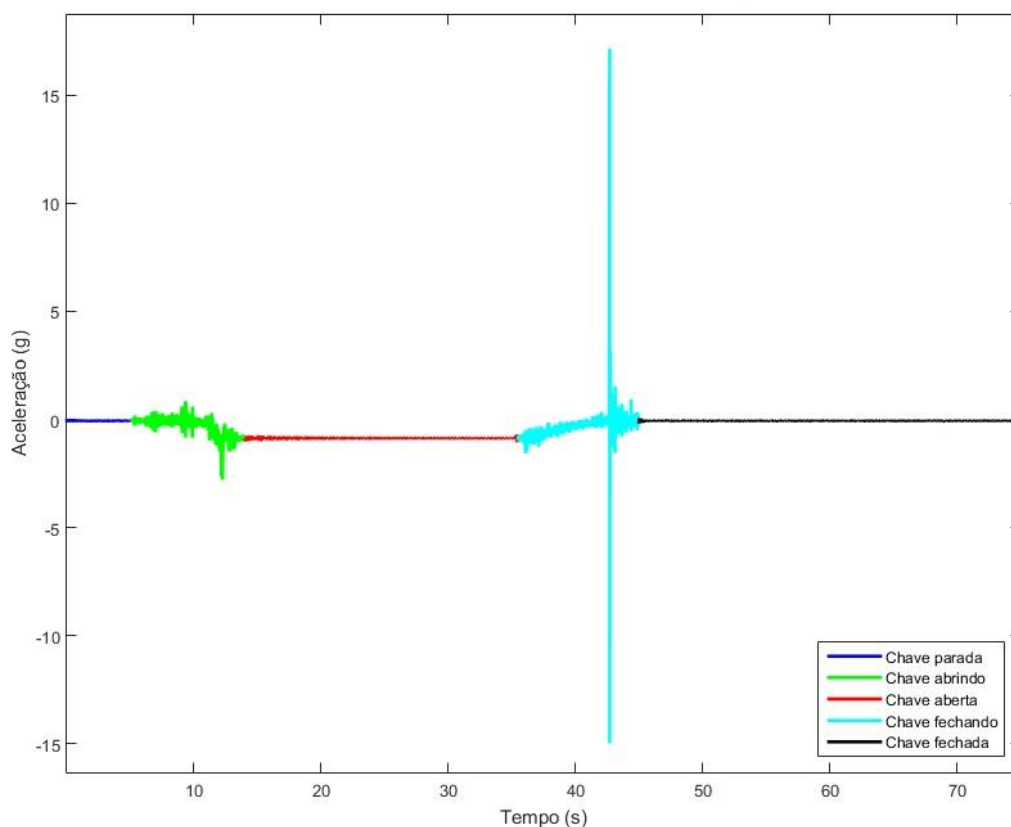
Observa-se que a deformação no meio da haste da lâmina do contato principal aumenta conforme a lâmina se movimenta na direção de saída do contato fixo, no instante seguinte a saída a deformação vai diminuindo até que o peso próprio da haste causa uma compressão no ponto de coleta do dado e por fim, devido a incidência da gravidade está compressão aumenta no exato momento em que a lâmina chega na posição horizontal.

Na continuidade do sinal, mesmo a lâmina estando aberta e parada, o peso próprio da mesma continuou aplicando uma deformação por compressão na lâmina até que então chegasse na execução da manobra de fechamento do seccionador e a deformação da lâmina passa de compressão para tração. Verifica-se que na manobra de fechamento que tem-se um pico de deformação, tanto para tração quanto para compressão, este pico se dá na ocasião em que a haste da lâmina principal choca-se com o batente do contato fixo.

Outro dado coletado no estudo e obtido com a utilização de acelerômetros são as frequências da estrutura durante o ensaio.

Na Figura 29, apresenta-se os dados de um ciclo de abertura/fechamento obtidos com o acelerômetro posicionado no contato principal da chave seccionadora.

Figura 29 – Acelerações vibração livre incidentes seccionador BMKU – 40 A



Fonte: Autor (2019).

O sinal apresentado na Figura 29 refere-se ao dado coletado com o acelerômetro posicionado para coletar os sinais incidentes na direção y, da Figura 27.

Notou-se que houve uma variação positiva e negativa no sinal em torno de 0 g. Isso se deve ao movimento de rotação que a lâmina principal do seccionador apresenta durante a manobra de abertura e fechamento, e ao fato da lâmina girar em seu próprio eixo.

No gráfico coletado com o acelerômetro o instante em que a lâmina do contato principal chocou-se com o batente do contato fixo, a mesma apresentou maior amplitude de aceleração, aproximadamente no instante de 45 segundos após o início do ciclo das manobras.

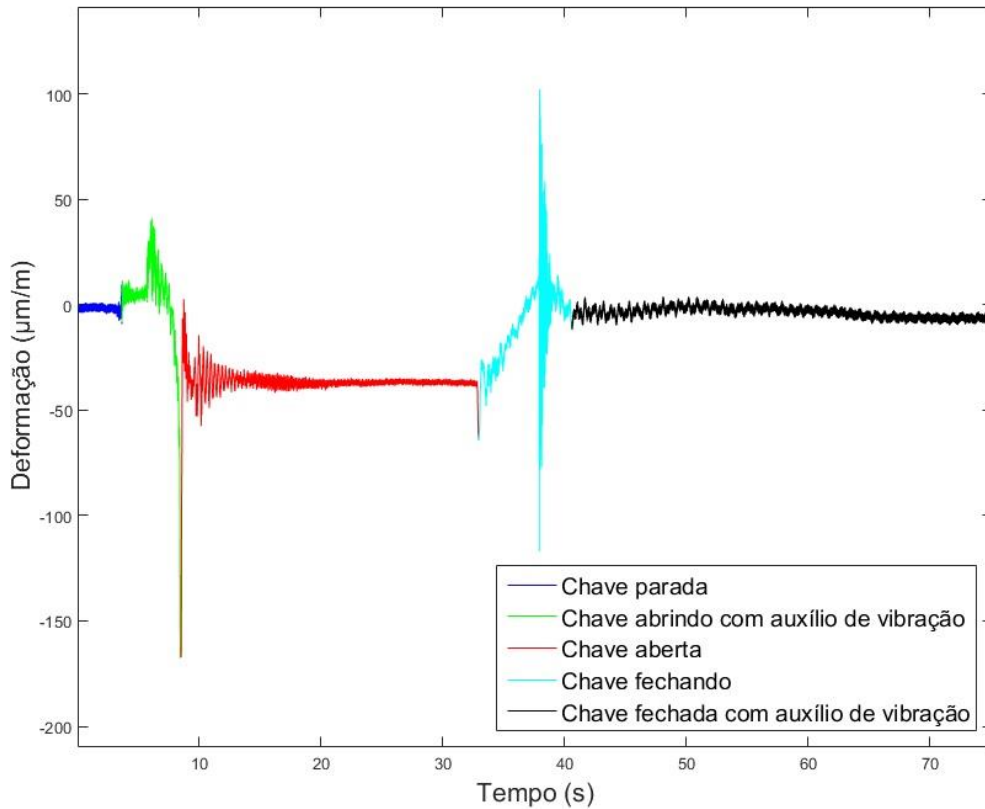
4.4.2 Ensaio com Vibração Forçada sob Excitação Harmônica

Como padronizado através da programação do CLP a duração do ciclo completo da manobra foi de 75 segundos incluindo o tempo na qual o motovibrador permaneceu em funcionamento.

Na Figura 30, é apresentado o perfil de deformação no meio da lâmina das haste principal do seccionador. O seccionador BMKU – 40A apresentou seu ponto de maior deformação no meio da haste da lâmina do contato principal. Observou-se que o seccionador apresentou dois pontos de notoriedade, o primeiro deles apresenta uma compressão na lâmina no momento em que a manobra de abertura é finalizada. Neste instante a lâmina do seccionador finaliza o processo de abertura, estando com a lâmina do contato principal na horizontal.

O segundo ponto em destaque é no momento do fechamento do seccionador, na qual a lâmina do contato principal fez o acoplamento no contato fixo, afastando-se da posição horizontal para a posição vertical. Assim, a lâmina colidiu junto ao batente instalado no contato fixo, causando uma deformação no meio da haste. Esta ação ocorreu pois a lâmina que possuía apenas um ponto de apoio, modificou sua disposição estrutural para dois pontos de apoio.

Figura 30 – Deformação meio da haste vibração forçada seccionador BMKU – 40A



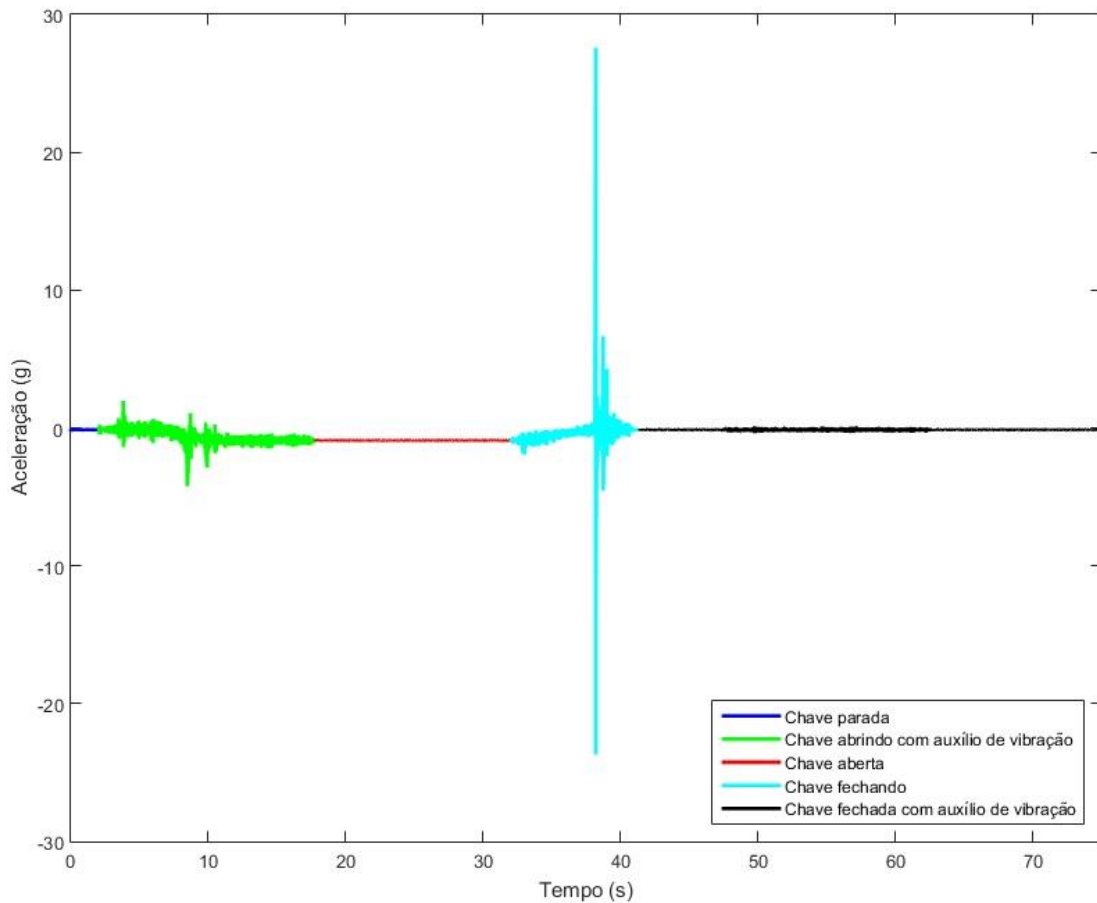
Fonte: Autor (2019).

Na Figura 31, com o sinal de aceleração coletado junto ao acelerômetro durante um ciclo de vibração forçada sob excitação harmônica.

Assim como adotado para vibração livre, o sinal coletado refere-se ao acelerômetro instalado para coletar as acelerações incidentes no eixo y, conforme a convenção cartesiana adotada.

Comparando-se os dois tipos de vibração utilizada no estudo, observou-se que para a vibração forçada sob excitação harmônica houve um aumento da aceleração na estrutura oriunda da utilização deste tipo de vibração.

Figura 31 – Acelerações incidentes da vibração forçada seccionador BMKU – 40 A



Fonte: Autor (2019).

4.5 Seccionador Lorenzetti 242 kV

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no ensaio com vibração livre e vibração forçada para as manobras de abertura e fechamento

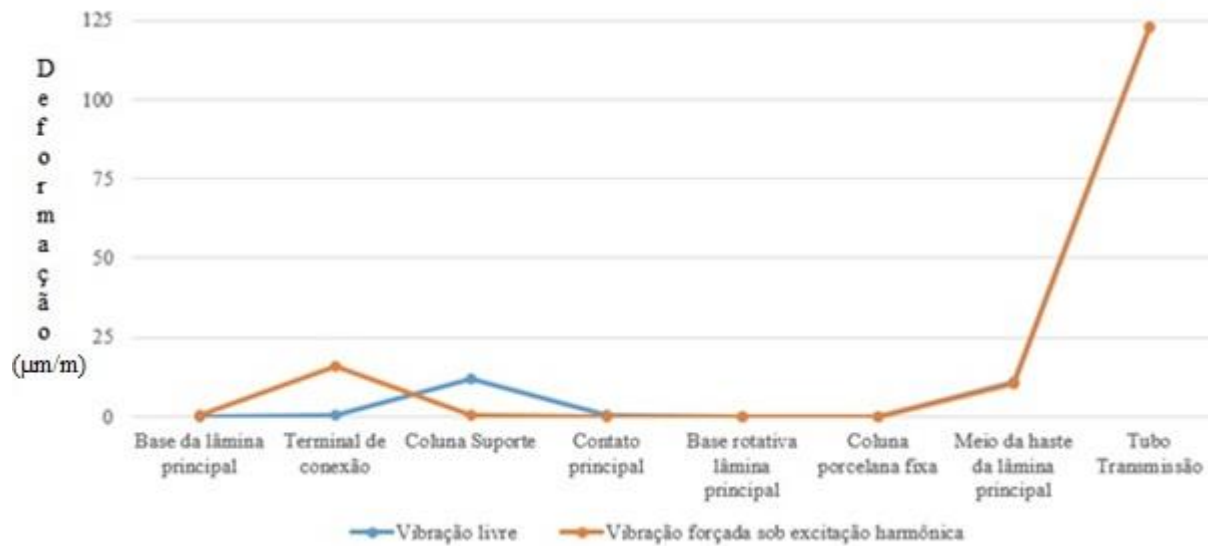
Na Figura 32, estão demonstrados os valores de deformação para os pontos onde houve aquisição de dados. As deformações estão apresentadas tanto para vibração livre quanto para vibração forçada sob excitação harmônica.

O ponto que apresentou maior deformação no seccionador é o ponto denominado de tubo de transmissão, representado na Figura 20 através do ponto 6.

A deformação no tubo de transmissão é justificada pela cadeia cinemática do seccionador. O tubo de transmissão é responsável por transmitir o movimento gerado pela caixa de comando para as fases do seccionador, fazendo com que a lâmina do contato principal se

mova da posição horizontal para vertical na manobra de abertura e da posição vertical para posição horizontal.

Figura 32 – Deformação chave seccionadora Lorenzetti 242 kV



Fonte: Autor (2019).

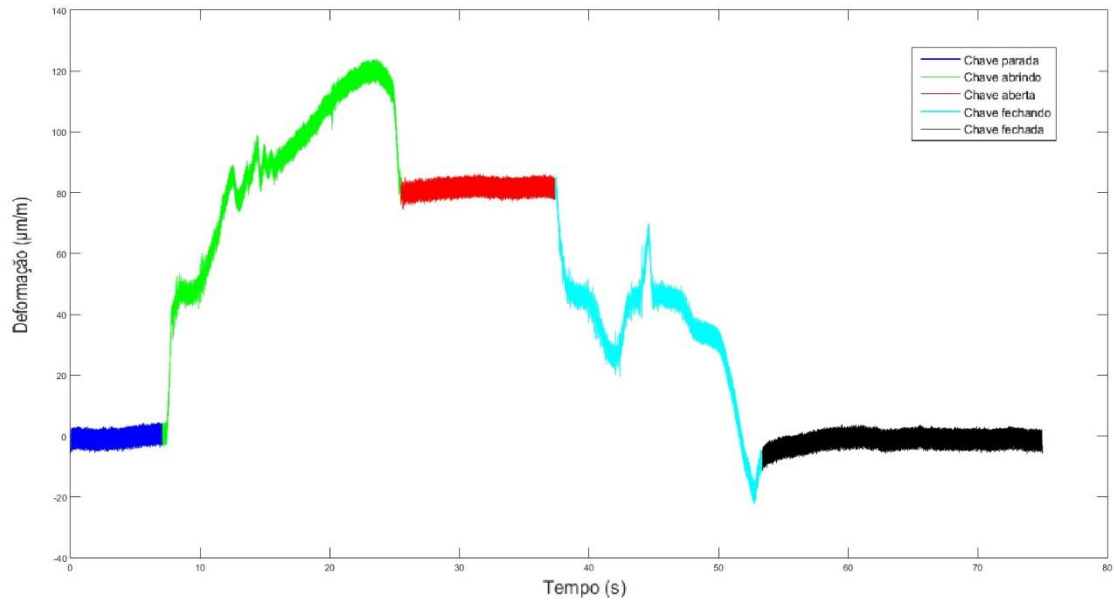
4.5.1 Ensaios com vibração livre

Assim como nos ensaios realizados no seccionador anterior, os parâmetros de coleta dos dados foram os mesmos utilizados na subseção 4.5.

Na Figura 20, apresentada anteriormente, os pontos onde os sinais de deformação foram monitorados durante o estudo são demonstrados. Na Figura 33 apresenta-se o sinal de deformação coletado através do sistema de aquisição de dados para o ponto que apresentou maior deformação durante os ensaios experimentais, para o tubo de transmissão do seccionador.

Pode-se verificar também que o pico de deformação é atingido no momento da abertura das fases do seccionador até que as fases fiquem na posição vertical, reduzindo posteriormente a carga no tudo, retornando a deformação inicial conforme o ciclo chega ao final.

Figura 33 – Deformação tubo de transmissão vibração livre seccionador Lorenzetti 242 kV

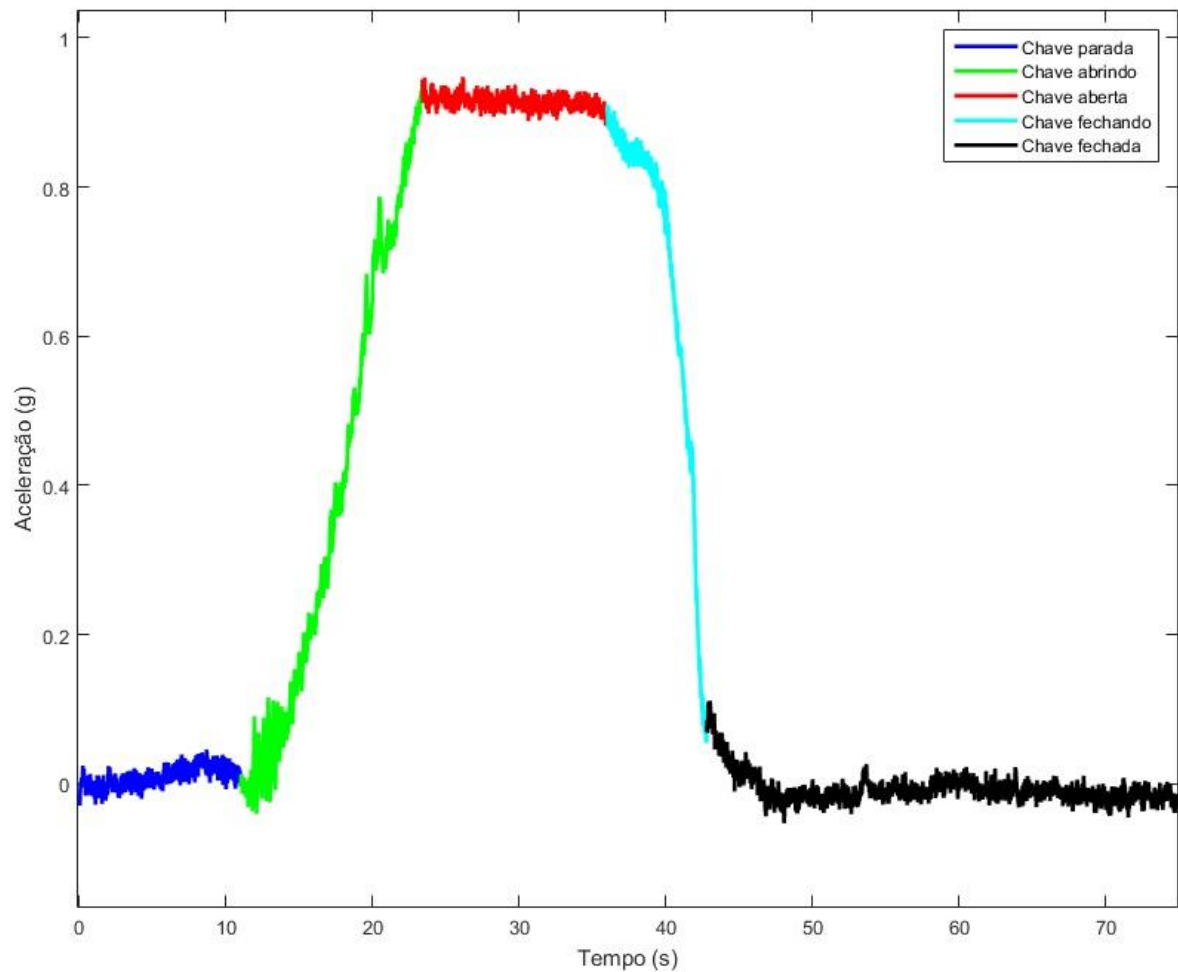


Fonte: Autor (2019).

Dados referente às acelerações presentes nas lâminas do contato principal, próximo ao contato fixo também foram coletados. Neste seccionador as acelerações coletadas incidiram no eixo x, conforme convenção cartesiana apresentada anteriormente. Na Figura 34 é apresentado o sinal de aceleração coletado em uma das fases do seccionador.

Pelos sinais apresentados, notou-se que a maior aceleração se dá no momento da abertura da lâmina do contato principal, com estes dados efetuou-se uma FFT e uma PSD para que os dados de frequência pudessem ser plotados.

Figura 34 – Acelerações incidentes da vibração livre seccionador Lorenzetti 242 kV



Fonte: Autor (2019).

4.5.2 Ensaio com Vibração Forçada sob Excitação Harmônica

Nesta secção os dados referentes à deformação no tubo de transmissão do seccionador serão apresentados, bem como as frequências que incidem durante o teste de vibração forçada para o seccionador Lorenzetti de 242 kV.

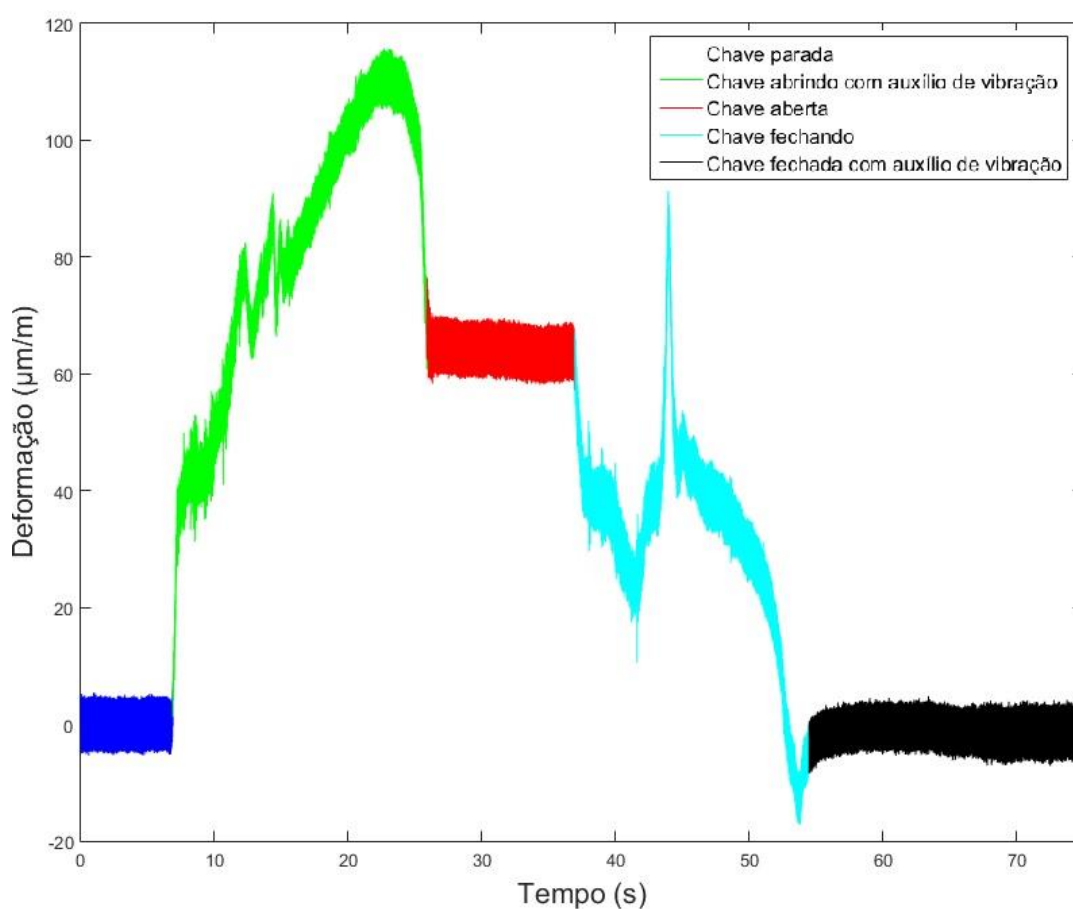
Dentre todos os pontos monitorados das deformações neste seccionador a maior deformação da estrutura se deu no tubo de transmissão, para ambos os modelos de vibrações testados.

Na Figura 35 está apresentado o sinal de deformação incidente no ponto de maior deformação. Percebe-se através do sinal que o momento de maior deformação se deu no

momento de abertura da chave, momento este em que a lâmina do contato principal se moveu na direção de saída do contato fixo.

Quando o seccionador encontrou-se na posição aberta, o tubo de transmissão ainda apresentou certa deformação, haja vista que a cadeia cinemática foi projetada para que o tubo de transmissão fosse uma espécie de *backup* para o sistema projetado para manter a lâmina do contato principal na posição vertical.

Figura 35 – Deformação tubo de transmissão vibração forçada sob excitação harmônica seccionador Lorenzetti 242 kV



Fonte: Autor (2019).

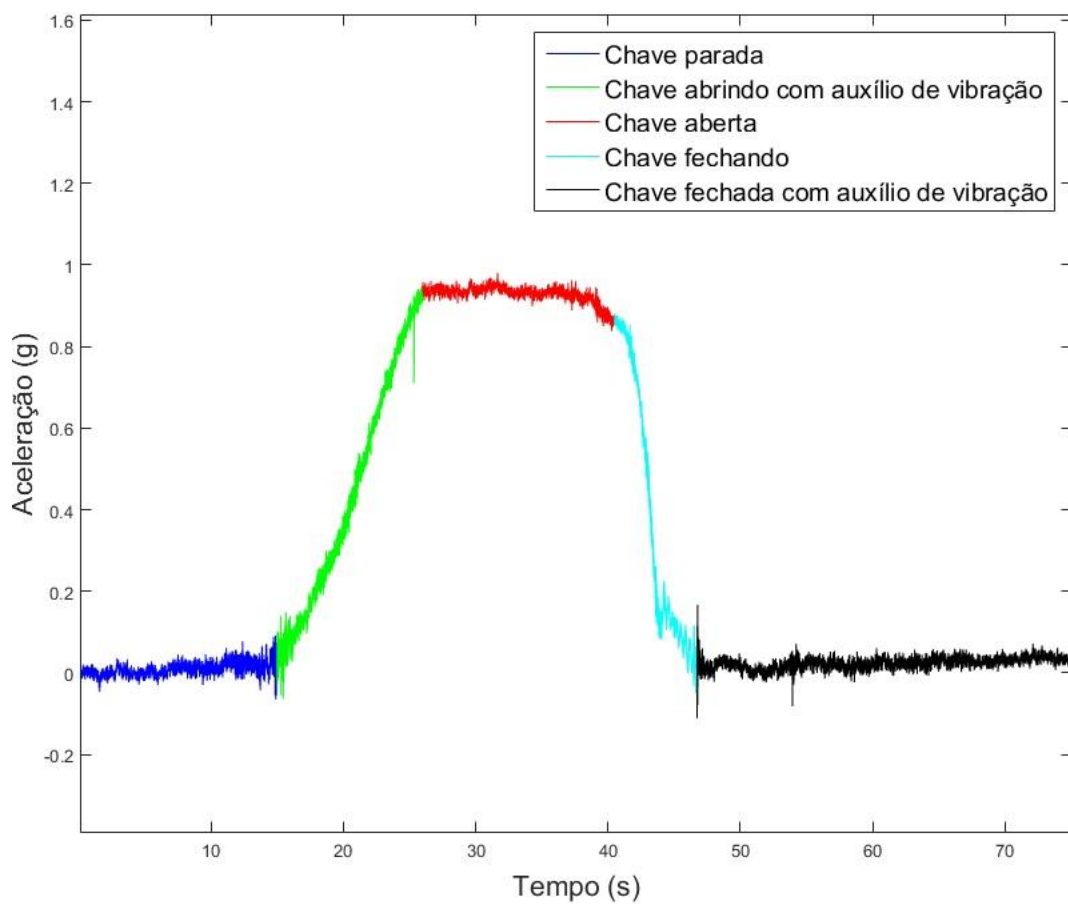
Os ensaios desta secção transcorreram de acordo com os parâmetros de massas excêntricas e frequência de excitação como apontado anteriormente (2,2 kg e 6,8 Hz respectivamente).

Diferentemente do seccionador BMKU – 40A, neste seccionador o sentido de excitação unidirecional se deu no eixo x da convenção de eixos adotados anteriormente. Assim como os

testes no seccionador BMKU – 40A, a duração do ciclo programado através do CLP foi de 75 segundos.

Na Figura 36 mostra-se a assinatura de aceleração na qual a lâmina do contato principal foi submetida durante a excitação harmônica forçada. Verifica-se que a aceleração incidente na lâmina do contato principal é praticamente a mesma que incidiu durante os testes com vibração livre.

Figura 36 – Acelerações incidentes da vibração forçada sob excitação harmônica seccionador Lorenzetti 242 kV



Fonte: Autor (2019).

4.6 Teste de hipótese para vibração livre e vibração sob excitação harmônica

Após a determinação do intervalo de confiança de 95% analisou-se a diferença entre média da população dos dados coletados. Logo em seguida determinou-se se as diferenças estatísticas são significativas.

Ressalta-se que, em todos os testes analisou-se a presença de valores atípicos (*outliers*) através de gráficos do tipo *boxplot*. Observada a presença de tais valores, os mesmos acabaram por ser excluídos, antes de posterior inferência. Com isso, espera-se garantir uma maior confiabilidade em relação as conclusões finais dos testes.

4.6.1 Chave Seccionadora BMKU – 40A

A Tabela 4 apresenta uma síntese das inferências realizadas utilizando teste *t* para duas amostras, a fim de verificar se as médias das deformações, oriundas de dois tipos de vibração, vibração livre e vibração sob excitação harmônica forçada, aplicadas em posições distintas de ensaio, apresentam diferença estatisticamente significativas.

Com os dados apresentados na Tabela 4 constatou-se a necessidade de se fazer uma análise juntamente com os dados de deformações dos pontos monitorados, buscando verificar se as deformações estavam dentro do regime elástico do respectivo material.

Em relação aos dados coletados no contato principal da chave e na base da lâmina, os mesmos não apresentaram diferenças significativas quando utilizado vibração forçada sob excitação harmônica. Logo, ao analisar-se os dados de deformação do seccionador BMKU – 40A notou-se que a maior deformação está localizada no ponto denominado meio da haste. Percebe-se também, que apesar de haver variação significativa dentre os valores de vibração livre e vibração forçada sob excitação harmônica os valores permaneceram dentro do regime elástico do material da lâmina do contato principal.

Tabela 4 – Resultados do teste de hipótese para seccionador BMKU – 40A

Descrição do ponto	Hipótese Nula (H_0)	Hipótese Alternativa (H_1)
Contato principal	X	
Meio da haste da lâmina principal		X
Base da lâmina principal	X	
Coluna de porcelana móvel		X
Coluna de porcelana fixa		X
Eixo árvore		X
Coluna de suporte		X

Fonte: Autor, 2019

4.6.2 Chave Seccionadora Lorenzetti 242 kV

Em seguida, na Tabela 5 estão apresentados os dados para, o seccionador Lorenzetti 242 kV, dados estes obtidos através do teste de comparação de médias, teste t , comparando vibração livre e vibração sob excitação harmônica.

Tabela 5 – Resultados do teste de hipótese para seccionador Lorenzetti 242 kV

Descrição do ponto	Hipótese Nula (H_0)	Hipótese Alternativa (H_1)
Contato principal		X
Meio da haste da lâmina principal		X
Base da lâmina principal		X
Terminal de conexão		X
Base rotativa da lâmina principal		X
Tubo de transmissão	X	
Coluna de porcelana fixa	X	
Coluna de suporte		X

Fonte: Autor, 2019

Assim como apontado na seção 4.5.1, é importante que os dados de deformação de cada ponto sejam comparados com o limite de escoamento do material de cada ponto, para que desta forma seja verificada se a deformação encontra-se dentro do limite elástico do material.

Através da deformação dos pontos monitorados, verificou-se que o ponto de maior deformação, tubo de transmissão, apresentam igualdade quando compararam-se os modelos de vibrações testados, vibração livre e vibração forçada sob excitação harmônica. É pertinente apontar também que todas as deformações na estrutura encontraram-se dentro do regime elástico dos materiais, inclusive no tubo de transmissão.

4.7 Combinação de frequências e massas excêntricas

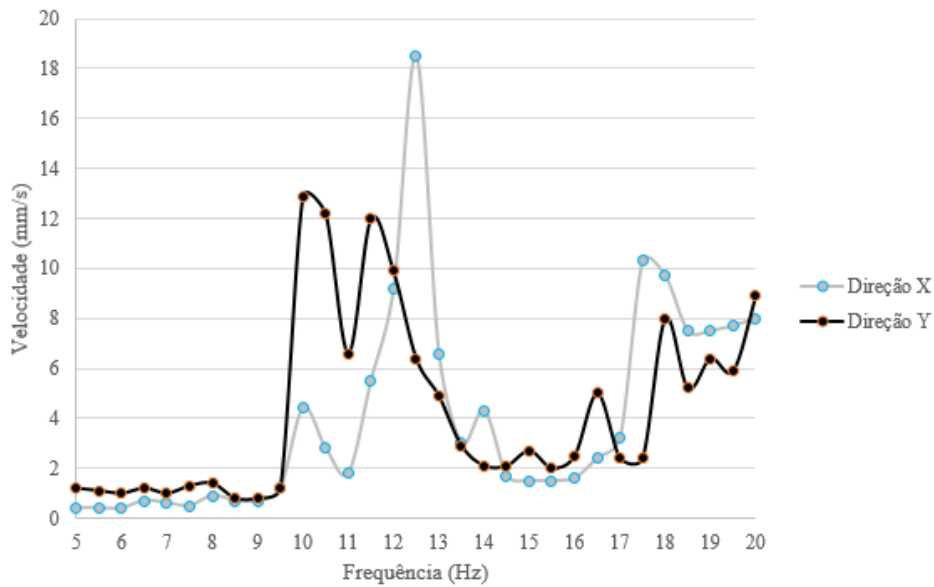
Nesta seção serão apresentados os dados combinados das frequências com as massas excêntricas. Importante destacar que dados de aceleração foram monitorados na região de acoplamento da lâmina do contato principal com o contato fixo nos eixos x e y, conforme convenção adotada e apresentada na Figura 27.

4.7.1 Chave Seccionadora BMKU – 40A

Abaixo serão apresentados os dados referentes aos *setups* das condições de contorno descrita na seção 3.4.

Na Figura 37, estão apresentados os dados coletados considerando a configuração de 1 para de massas, ou seja 2,2 kg.

Figura 37 – Velocidades de vibração para 1 par de massas seccionador BMKU – 40A

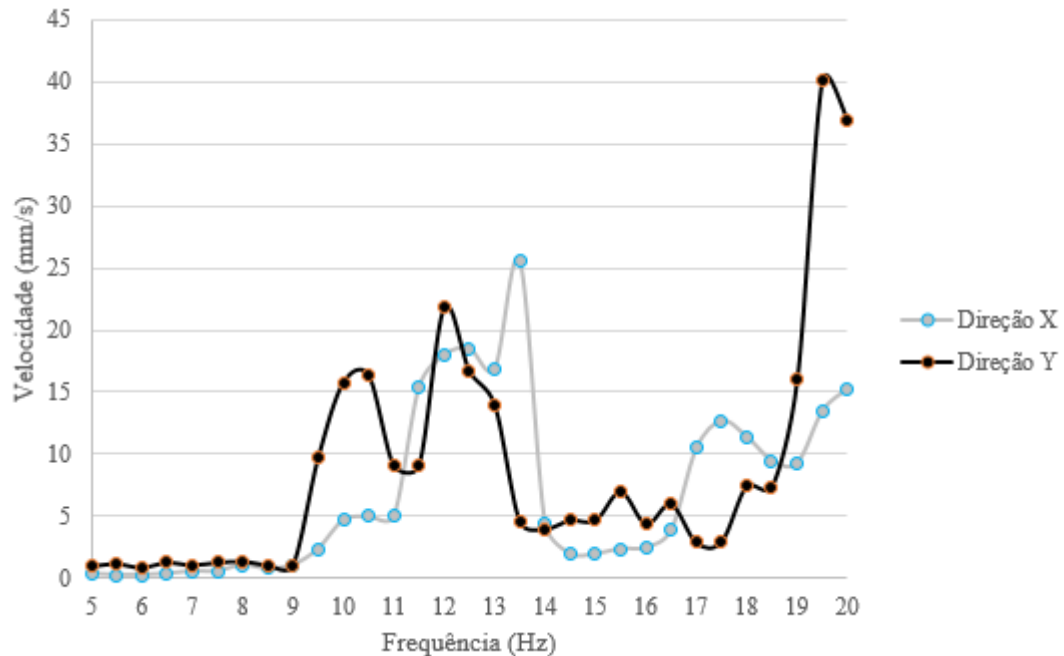


Fonte: Autor (2019).

Com os dados contidos na Figura 37, percebe-se que o sentido que apresenta a maior velocidade na ponta da lâmina do contato principal é o eixo x, 12,5 Hz de frequência, conforme apresentado na Figura 27, ou seja, no sentido da manobra de abertura/fechamento do seccionador.

Já na Figura 38, tem-se os dados referentes as velocidades incidentes para a configuração de dois pares de massas excêntricas.

Figura 38 – Velocidades de vibração para 2 pares de massas seccionador BMKU – 40A

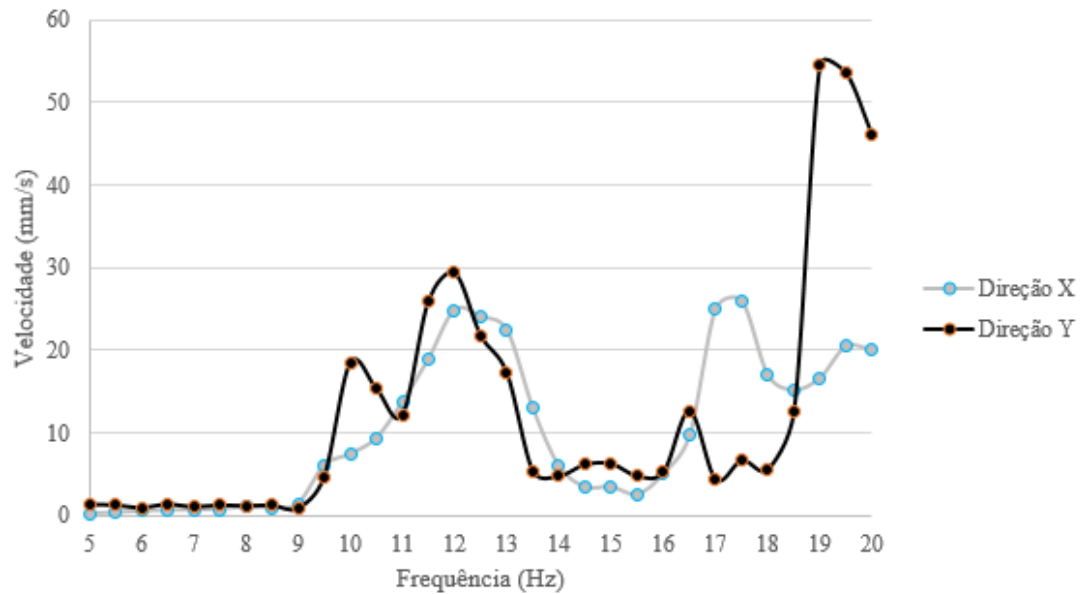


Fonte: Autor (2019).

Observando a Figura 38, verifica-se que há uma diferença ao comparar com a configuração de 1 par de massa excêntrica, sendo esta diferença a direção da maior velocidade. Para a configuração de dois pares de massas excêntricas, a maior velocidade deu-se no sentido da direção y, conforme apresentado no sistema de eixos coordenados da Figura 27, isso demonstra que para esta configuração a velocidade incide na forma perpendicular ao sentido da manobra de abertura/fechamento do seccionador. A maior velocidade atingida se deu com uma frequência de 19,5 Hz.

A Figura 39 apresenta os dados coletados para a configuração de três pares de massas excêntricas.

Figura 39 – Velocidades de vibração para 3 pares de massas seccionador BMKU – 40A

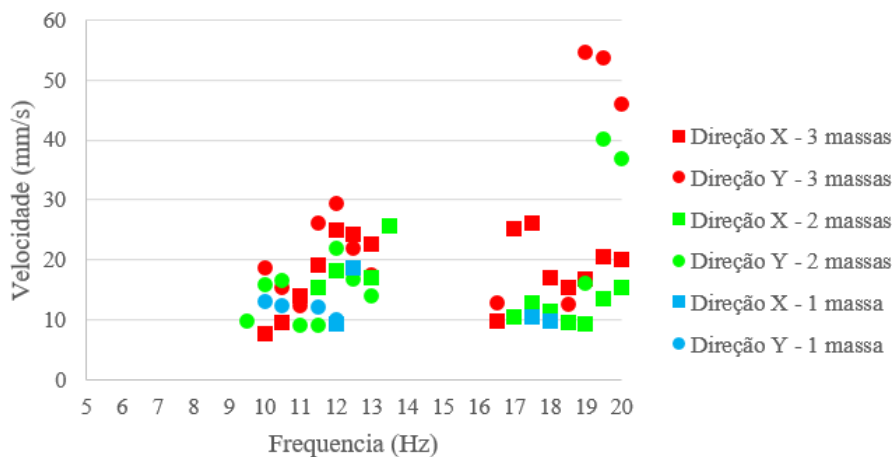


Fonte: Autor (2019).

Nesta configuração tem-se a maior velocidade incidindo sobre a direção do eixo y, perpendicular ao sentido da manobra de fechamento do seccionador. Pode-se destacar que a frequência que proporcionou um melhor resultado de velocidade se deu com 19 Hz.

Compilando os dados das três configurações testadas, obteve-se os dados apresentados na Figura 40.

Figura 40 – Comparação de velocidades para seccionador BMKU – 40A



Fonte: Autor (2019).

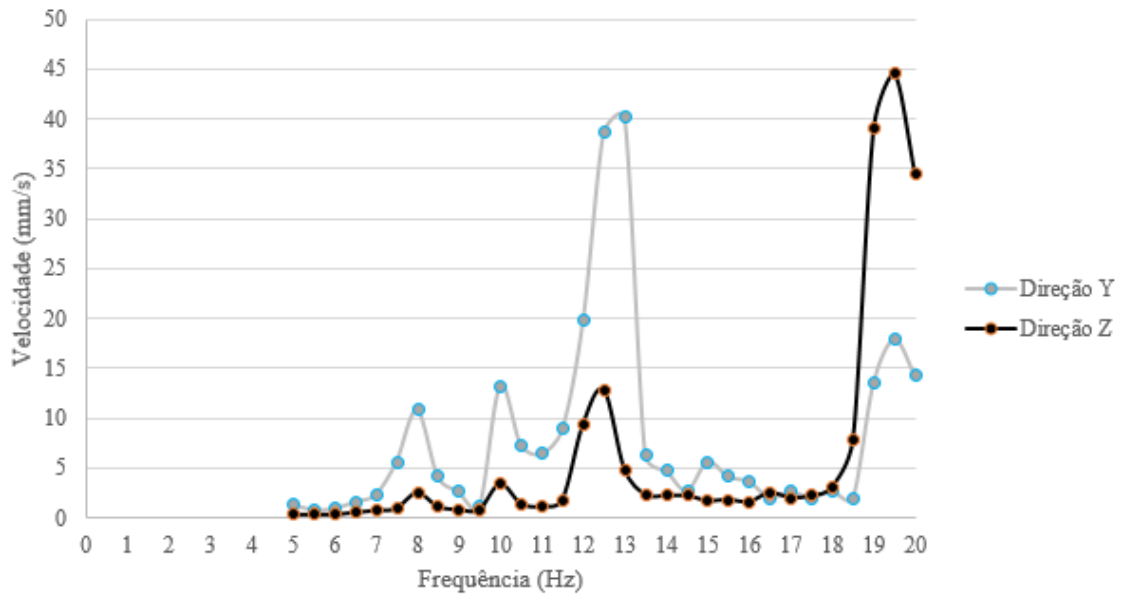
Pela Figura 40 pode-se verificar que as maiores velocidades são obtidas nas frequências de 19 Hz e 19,5 Hz, e para mesma direção de vibração o eixo y, perpendicular ao sentido de fechamento da lâmina de contato móvel com o contato fixo. Para este modelo de seccionador estudado a configuração que com três pares de massa apresentou uma resposta em velocidade maior do que o restante das configurações testadas.

4.7.2 Chave Seccionadora Lorenzetti 242 kV

Abaixo serão apresentados os dados referentes aos *setups* das condições de contorno descrita na seção 3.5.

Na Figura 41, apresenta-se os dados coletados para a configuração de 1 par de massas, ou seja 2,2 kg.

Figura 41 – Velocidades de vibração para 1 par de massas seccionador Lorenzetti 242 kV

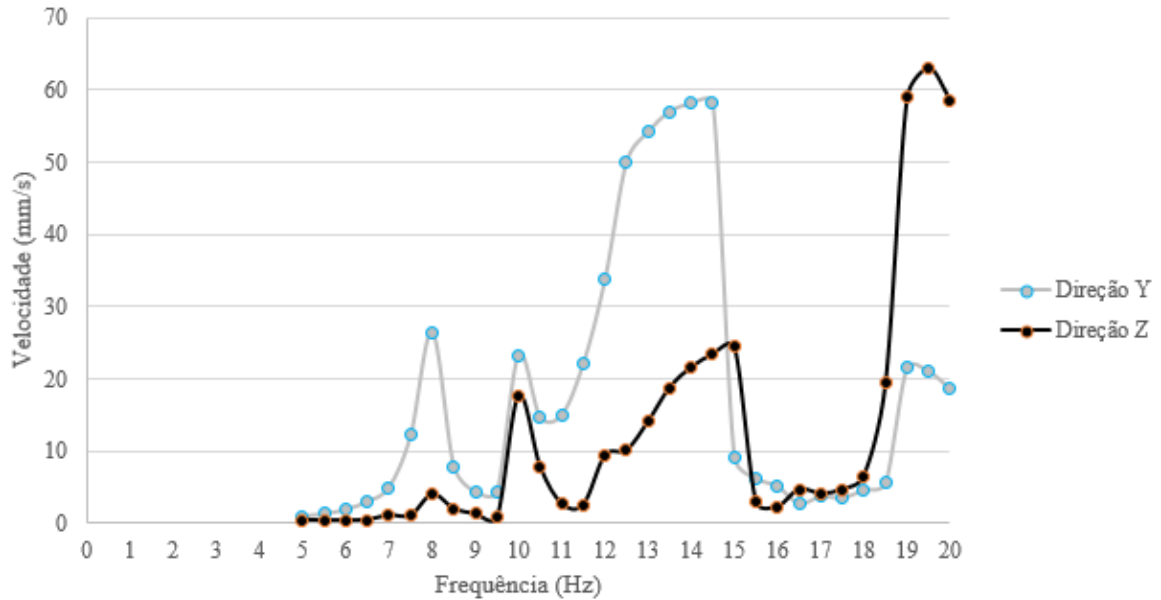


Fonte: Autor (2019).

Pode-se verificar através da Figura 41 que a maior velocidade para o conjunto de massas de 2,2 kg se deu na frequência de 19,5 Hz. Vê-se também que a velocidade se deu na direção do eixo z, ou seja, no sentido de fechamento do seccionador, a lâmina do contato principal entrando no contato fixo.

A Figura 42, apresenta os dados coletados para a configuração de 2 pares de massa, ou seja, 4,4 kg.

Figura 42 – Velocidades de vibração para 2 pares de massas seccionador Lorenzetti 242 kV

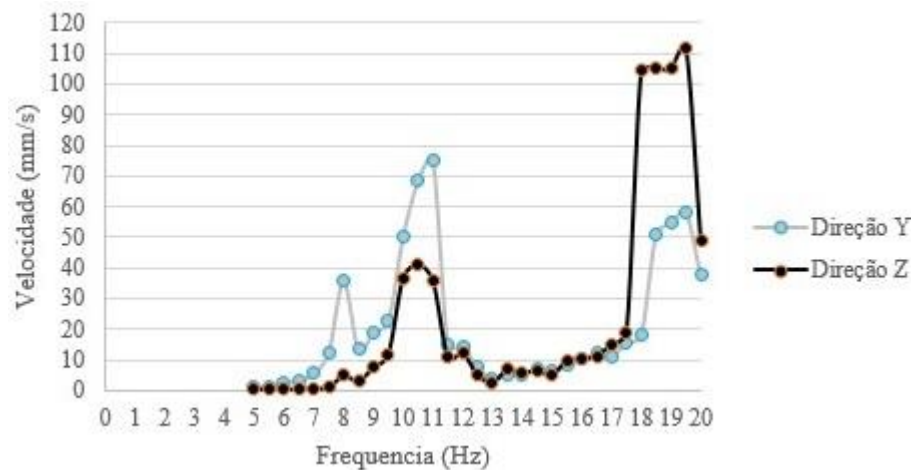


Fonte: Autor (2019).

Percebe-se que para esta configuração de massas, a maior velocidade constatada também está na casa dos 19,5 Hz de frequência e também a na direção do eixo z. Importante destacar que velocidades próximas foram atingidas na direção do eixo y, porém com frequência diferente, neste caso em específico 14 Hz.

A Figura 43, apresenta os dados para a configuração de 3 pares de massas excêntricas, 6,6 kg.

Figura 43 – Velocidades de vibração para 3 pares de massas seccionador Lorenzetti 242 kV

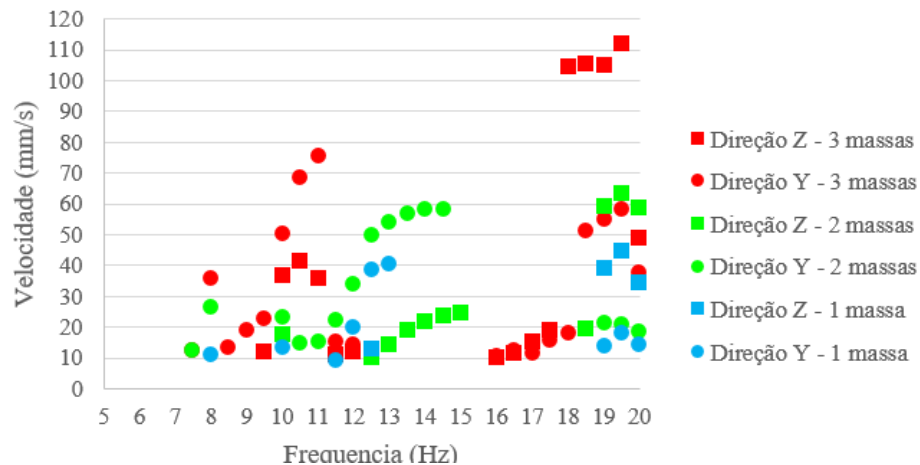


Fonte: Autor (2019).

Para a configuração de massas excêntricas da Figura 43, notou-se que a maior velocidade se dá em uma frequência de 19 Hz, e também que a velocidade máxima atingida foi a maior dentre as três configurações testadas.

A Figura 44, apresenta os dados de todas as configurações em um mesmo gráfico.

Figura 44 – Comparação de velocidades para seccionador Lorenzetti 242 kV



Fonte: Autor (2019).

Através da Figura 44, pode-se chegar a resultados importantes para o estudo, nota-se que existem duas nuvens de pontos de maior interesse, ou seja, maior velocidade e elas ocorrem

em direções diferentes no eixo de coordenadas. Também percebe-se que as maiores velocidades atingidas são com a configuração de três pares de massas excêntricas e para a frequência de 19,5 Hz.

5 CONCLUSÃO

Nesta dissertação, a ênfase se deu na base experimental tendo em vista os impactos sofridos no abastecimento de energia quando ocorrem falhas nas chaves seccionadoras. Contudo apesar dos investimentos constantes na área de pesquisa e desenvolvimento no setor elétrico ainda não existe uma resposta concreta, que atenda a diversidade de chaves seccionadoras presente no sistema de geração, distribuição e transmissão.

Portanto como conclusão este estudo faz os seguintes apontamentos:

- Existem algumas orientações da ANEEL sobre o *payback* dos equipamentos de subestações, dando conta que depreciação dos seccionadores transcorre no intervalo de tempo de 30 anos. No entanto os mesmos não são substituídos por equipamentos mais modernos ao final deste período;
- Alguns componentes elétricos apresentaram defeitos e vieram a falhar no decorrer dos testes preliminares: Durante os testes componentes apresentaram falhas devido ao tempo em que o sistema de acionamento de abertura e fechamento permaneceu ativo para o atendimento dos requisitos de ciclos da norma NBR 62271-102;
- Alguns componentes mecânicos apresentaram defeitos e falhas oriundas de defeitos nos componentes elétricos: As falhas nos sistemas elétricos causaram a falha de componentes mecânicos devido à forma como a seccionadora foi projetada, sendo apenas os componentes elétricos responsáveis por interromper as manobras de abertura e fechamento;
- As normas para ensaios de durabilidade mecânica são pouco claras com relação as variáveis a serem monitoradas: As normas que regimentam as chaves seccionadoras são pouco claras com relação a sua durabilidade, deixando claro apenas o número de ciclos necessários para durabilidade das chaves mais novas, deixando outras variáveis a critério de fabricantes;
- Ambas as chaves seccionadoras testadas nos ensaios preliminares não atendem aos requisitos de durabilidade mecânica da NBR 62271-102 e NBR 60694: Ao todo foram realizadas mais de 10.000 ciclos de abertura e fechamento somando as manobras dos dois seccionadores. Ficou constatado durante o ensaio que dado o ano de fabricação dos dois seccionadores estudados, os mesmos não foram

desenvolvidos respeitando as normas em vigência atualmente e alguns componentes tiveram de ser substituídos antes do atendimento dos ciclos necessários descritos nas normas para que o seccionador seja aprovado;

- A metodologia desenvolvida para definição do procedimento de teste se mostrou útil, devido aos pontos e *insights* para padronização e sugestão de ensaios para entidades normativa: este tópico se demonstrou satisfatório pois possibilitou que a vibração forçada sob excitação seja ajustada em relação à força centrífuga. Ensaios podem ser padronizados para teste individual de componentes mecânicos e elétricos;
- Constata-se que mesmo havendo diferença entre vibração livre e vibração sob excitação harmônica forçada no ponto de maior deformações para a chave seccionadora, a deformação está dentro do regime elástico do material: Em todos os dados coletados e estudos durante a pesquisa verificou-se que a deformação de todos os pontos monitorados para ambas as chaves seccionadoras ficou dentro do regime elástico dentre todos os materiais dos pontos monitorados;
- As manobras de abertura/fechamento apresentaram fechamento satisfatório em 100% dos ciclos com aplicação de vibração forçada sob excitação harmônica: Em 100% dos casos monitorados da manobra de abertura e fechamento os sensores apontaram que todos os ciclos foram satisfatórios, ou seja, tanto na abertura quanto no fechamento a vibração harmônica forçada tornou a manobra satisfatória no e mais eficiente;
- Os elementos de fixação das estruturas de suporte de ambos os seccionadores se mantiveram íntegros durante a pesquisa: Todos os parafusos das estruturas de suporte dos dois seccionadores estudados não apresentaram nenhuma avaria ou efeito colateral a utilização da vibração harmônica forçada. Assim, pode concluir que considerando o tempo de depreciação das chaves seccionadoras e dentro das condições estudadas não apresentaram afrouxamento nem variação de torque com a aplicação de vibração forçada sob excitação harmônica;
- Comparação de frequências e massas para seccionador BMKU – 40A: Ficou caracterizado para este seccionador que as maiores velocidades incidiram no sentido perpendicular ao sentido de manobra do seccionador, ou seja, a maior velocidade se deu no eixo y do sistema de coordenadas adotadas para o estudo.

Nesta chave seccionadora a configuração que apresentou maiores velocidades e consequentemente melhor resultado foi 19 Hz e três pares de massas excêntricas (6,6 kg);

- Comparação de frequências e massas para seccionador Lorenzetti 242 kV: Ficou evidenciado no decorrer da pesquisa que há uma diferença entre as velocidades do eixo z e eixo y, que conforme a frequência de operação uma ou outra apresenta melhores resultados. Ficou constatado também que a maior força centrífuga apresentou os maiores valores para as velocidades incidentes na lâmina da haste principal. A melhor configuração para obtenção de uma velocidade maior foi a configuração de 19,5 Hz e dois pares de massa (6,6 kg).
- A estrutura de suporte da chave seccionadora BMKU-40A não apresenta rigidez estrutural suficiente para transmitir toda a vibração obtida com a excitação harmônica forçada para a chave. Uma alternativa para transmitir melhor a vibração obtida através do motovibrador seria produzida pelo motovibrador para as chaves seccionadoras de alta tensão com abertura vertical é acoplar o motovibrador diretamente na base da chave. Mesmo este ponto não sendo rígido o suficiente para transmitir toda a energia obtida da excitação harmônica vibração, o fato de não ter uma cadeia de junções aparafusadas, faz com que sejam reduzidas as perdas de força na estrutura.
- Para chaves seccionadoras de alta tensão com abertura vertical, existe a possibilidade de vibrar a estrutura que segura o mecanismo da chave, e a outra estrutura que segura o contato fixo. Foi verificado que para este modelo de chave seccionadora, a vibração aplicada na estrutura que segura o contato fixo é mais eficiente.
- Para chaves seccionadoras de alta tensão tripolares, como no caso da chave Lorenzetti 242kV, a utilização de apenas um motovibrador para as três fases não é suficiente. Com isto, é entendido pela equipe, que este sistema necessita de um motovibrador por chave seccionadora.

Portanto pode-se concluir através do objetivo principal desta pesquisa que a aplicação de vibração forçada sob excitação harmônica traz diversos benefícios para as manobras de abertura e fechamento de seccionadores, dentre eles a velocidade de vibração na lâmina do conato móvel com o contato fixo, tendo como consequência o deslocamento necessário para o

correto fechamento/abertura, podendo assim validar em âmbito experimental a patente BR 10 2013 020198 7.

Alguns pontos carecem de maior atenção para o desenvolvimento de análises mais abrangentes. Pensando nisto, segue abaixo algumas sugestões de trabalhos futuros:

- Encontrar a posição ideal para o motovibrador, em termos de eficiência da energia gerada pelo mesmo;
- Avaliar os componentes da cadeia cinemática do seccionador no que tange a mecânica da fratura e fadiga;
- Aplicar a metodologia aqui apresentada para modelos de seccionadores mais novos;
- Correlacionar assinatura do torque do motor com vibração sob excitação harmônica forçada.

REFERÊNCIAS

- ABEID, L.; TORT, A. C. **As forças de atrito e os freios ABS**. Revista Brasileira de Ensino de Física, Vol 36, N° 2, 2014.
- ABNT NBR 5462. **Confiabilidade e Manutenibilidade**, 1994.
- ABNT NBR 6935. **Secionador, chaves de terra e aterramento rápido**, 2011.
- ABNT NBR 7497. **Vibrações mecânicas e choques**, 1982.
- ABNT NBR 7571. **Seccionadores – Características técnicas e dimensionais**, 1985.
- ABNT NBR 14762. **Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio - Procedimento**. 2010.
- ABNT NBR IEC 60694 **Especificações comuns para normas de equipamentos de manobra e alta-tensão e mecanismos de comando**. 2006.
- ABNT NBR IEC 62271-102 **Equipamentos de alta tensão parte 102: Seccionadores e chaves de aterramento**. 2006.
- ALPHONSUS, E. R.; ABDULLAH, M. O. **A Review on the Applications of Programmable Logic Controllers (PCLs)**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 60, pages 1185-1205, 2016.
- ARNOV, V.; SOUZA, A. F. D.; KALPAKJIAN, S.; SHAREEF, I. **Interactions among friction wear and system stiffness. Part 2 Vibration by dry friction**, ASME Journal of Tribology. N° 16, 1984.
- BACK, N.; OGLIARI, A.; DIAS, A.; SILVA, J.C **Projeto integrado de produtos:planejamento, concepção e modelagem**. Barueri: Malone, 2008
- BARBOZA DA SILVA, R.; MASQUETO, B. J.; LANÇAS, K. P.; MELO SILVA, F.A. **Desenvolvimento, automação e desempenho de um consolidômetro com interface homem-máquina**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2015.
- BAXTER, M. **Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2011.
- BICKFORD, J.; **An introduction to the design and behavior of bolted joints**. 3rd ed, Marcel Dekker. New York, 1995.
- BORGES, F. M; RODRIGUES, C. L. P. **Pontos Passíveis de Melhoria no Método de Projeto de Produto de PAHL e BEITZ**. Gest. Prod. vol.17 no.2 São Carlos 2010.

BRASIL. ANEEL. **Resolução Normativa N° 63 de 12 de Maio de 2004**. Aprova procedimentos para regular a imposição de penalidades aos concessionários, permissionários, autorizados e demais agentes de instalações e serviços de energia elétrica, bem como às entidades responsáveis pela operação do sistema, pela comercialização de energia elétrica e pela gestão de recursos provenientes de encargos setoriais.

BRASIL. ANEEL. (9 de 11 de 2017). Agência Nacional de Energia Elétrica. Fonte: ANEEL: <http://www.aneel.gov.br/a-aneel>

BRASIL. ANEEL. **REN 367/2009 – Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico**. Versão 9, Brasília, 2009.

BRASIL.; **Código de proteção e defesa do consumidor**. Lei nº 8.078/90.

BRASIL. ANEEL. **Resolução Normativa N° 479 de 03 de Abril de 2012**. Altera a resolução normativa nº 414 de 09 de setembro de 2010, que estabelece condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma consolidada e atualizada.

BRASIL. ANEEL. **Resolução Normativa N° 414 de 09 de Setembro de 2010**. Estabelece as condições gerais de fornecimento de Energia Elétrica de forma consolidada e atualizada.

CAMARGO, M. N. **Mecânica Vibratória**. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

CARDINALE, M.; WAKELING, J. **Whole body vibration exercise: are vibrations good for you?** British Journal of Sports Medicine, Vol 39, 2005.

CISER.; **Informações Técnicas – Uso Orientativo**. Joinville, 2018.

DA SILVA, J. C.; BRASIL, A. V. A.; TEIXEIRA, R. M. **Análise de Desempenho de Seccionadores Frente a Mudança de Política de Manutenção Aplicada**. Anais, XXIII SNPTE, 2015.

DE SOUZA, A. F. **Sistema para monitoração da operação de chave seccionadora de alta tensão baseado na análise das correntes do motor de acionamento**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

DUAILIBE, P. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. **Subestações: Tipos, equipamentos e proteção**. Rio de Janeiro, Nov, 1999. Disponível em: <<http://www.uff.br/lev/downloads/apostilas/SE.pdf>>. Acesso em: Nov. 2017.

DRUMMOND, M. D. M. **Efeito da aplicação de vibração mecânica localizada durante o treinamento de força sobre a hipertrofia muscular**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

FRONTIN, S. O. **Equipamentos de Alta Tensão – Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas**. Universidade de Brasília, 1ª ed. Brasília, 2013.

GALEANO, J. C. C.; SARMIENTO, W. J. C.; PORTILLA, J. F. O. **Fault and Load Flows Analysis of Electricity Transmission and Distribution System in Casanare (Colombia)**. Facultad de Ingeniería, Vol. 26, Tunja-Boyacá - Colômbia, 2017.

GOETTEMS, F. S.; DE BRAGA, R. M.; REGULY, A.; **Controle de pré - carga em parafusos: Correlação entre o método do torque e do alongamento medido por ultrassom**. Tecnol, Metal, Mater, Miner. São Paulo, 2017.

HARRIS, C. M.; PIERSOL, A. G. **Harri's Shock and vibration handbook**. 5a Edição. McGraw-Hill. New York, 2002.

HE, J. FU, Z. F. **Modal Analysis**. Butterworth-Heinemann, 2001.

HOLANDA, S. M. S. **Aplicação da manutenção preditiva por análise de vibrações em equipamentos de trens urbanos com plano de manutenção proposto**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

KELLY, S. G. **Vibrações Mecânicas: Teorias e Aplicações**. Cengage São Paulo, 2017.

KRISHNA, K.; SWARNAMANI, S. **Vibration monitoring sliding wear plasma sprayed ceramics**. Wear, N° 210, 1997.

LEAL, D. F. **Sobre Perfis de Aço Formados a Frio Compostos por Dupla Cantoneira com seção "T" submetidos a compressão**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

LUO, J.; MCNAMARA, B.; MORAN, K. **The Use of Vibration Training to Enhance Muscle Strength and Power**. Sports Medicine, Vol 35, N° 1, 2005.

MARINS, R. P. S.; MORENO, F. P. **Análise de Atos Normativos por meio do Comportamento de Busca de Usuários: O caso da Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel**. Biblios N° 67, 2017.

MASCARENHAS, A. O.; ZAMBALDI, A. **Opção Estratégicas e Implicações Organizacionais da Tecnologia da Informação: Automatização e Informatização**. Revista Organizações em Contexto, Vol 5, N° 10, páginas 17-29, 2009.

MELLO, C. A. B. **Curso de Direito Administrativo**. 27 ed. São Paulo, Malheiros, 2010.

MUZY, G. L. C. O. **Subestações Elétricas**. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

NASA. **RCM Guide – Reliability-centered maintenance guide for facilities and colateral equipment**. Estados Unidos, 2008.

NATIONAL INSTRUMENTS. 2015 Disponível em: ftp://ftp.ni.com/pub/branches/latam/brazil/Sensor_fundamentals/pt_medicoes_de_deformacao.pdf. Acessado em: 14 de Junho de 2018.

PAHL, G; BEITZ, W; FELDHUSEM, J; GROTE, K. H. Projeto na Engenharia. 6ª ed. Editora Blucher, São Paulo, 2005.

PETER RUBIE, J. R. *Australia/Queensland Patent No. US6889820 B2*. 2001.

PIERSOL, A.G.; PAEX, T.L. **Harry's Shock and Vibration Handbook**. 6th Edition. McGraw-Hill, 2010.

PROUDFOOT, D.; TAYLOR, D. **How to turn a substation into a database server**. IEEE Computer Application in Power, April 1999.

QUERINO, T. F. **Metodologia para Gestão de Ativos para Chave Seccionadora 15 kV**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. 5a Edição. Prentice Hall. Upper Saddle River, 2011.

RIBEIRO, S. P. T. **Terraplanagem: Metodologia e Técnicas de Compactação**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, Portugal 2008.

RITTWEGGER, J. **Vibration as an exercise modality: how it may work, and what its potential might be**. European Journal of Applied Physiology, Vol. 108, 2010.

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, L. F., Inventor; CEEE, Cessionário; FUPF, Cessionário. **Dispositivo de Automação de Seccionador de Alta Tensão**. Brasil BR 10 2013 020198 7. 08 de Agosto de 2013.

SETTI, A.; DARONCH, J.W.; DALA MARIA, L.; MARTINELLI, P. V.; HERZOG, J.V.B; RECH, M.; ISRAEL, C.L.; DA ROCHA, L. **Impacto da Vibração Mecânica em Parafusos de Seccionadores Lorenzetti 242 kV e BMKU – 40A**. XVII ERIAC, Foz do Iguaçu, 2019. Disponível em: http://www.xviiiieriac.com.br/Trabalhos%20Tecnicos/D1/D1.06_535.pdf

SILVA, C. W. **Vibration and Shock Handbook**. 1a Edição. Taylor & Francis Group. Broken Sound Park, New York, 2005.

SILVA, L. G. W.; PEREIRA, R. A.; MANTOVANI, J. R. S. **Alocação Otimizada de Dispositivos de Controle e Proteção em Redes de Distribuição**. Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica, Vol. 21, N°3, 2010.

SINHA, J. K. **Vibration Analysis, Instruments and Signal Processing** . 1a Edição. CRC Press. Boca Raton, 2015.

TERCHECI, M.; MANORY, R. R.; HENSLER, J.H. The friction and wear automotive grey cast iron under dry sliding conditions. Part 1 Relationships between wear loss and testing parameters. Wear, N° 180, 1995.

XIAO, X.; YIN, Y.; BAO, J. "Review on the friction and wear of break matirials". Advances in Mechanical Engineeing. 2016. V.8, n.5, p.1-10



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

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