

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM PROJETO E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO

Área de concentração: Projeto e Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado

DESENVOLVIMENTO CONCEITUAL DE UM
MOTOVIBRADOR UNIDIRECIONAL UTILIZADO EM
ACIONAMENTO DE CHAVES SECCIONADORAS

Huann Costa Rodrigues

Passo Fundo



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

Huann Costa Rodrigues

DESENVOLVIMENTO CONCEITUAL DE UM MOTOVIBRADOR
UNIDIRECIONAL UTILIZADO EM ACIONAMENTO DE CHAVES
SECCIONADORAS

Passo Fundo

2021

Huann Costa Rodrigues

**DESENVOLVIMENTO CONCEITUAL DE UM MOTOVIBRADOR
UNIDIRECIONAL UTILIZADO EM ACIONAMENTO 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
2021

CIP – Catalogação na Publicação

R696d Rodrigues, Huann Costa
Desenvolvimento conceitual de um motovibrador unidirecional utilizado em acionamento de chaves seccionadoras [recurso eletrônico] / Huann Costa Rodrigues. – 2021.
4.2 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Charles Leonardo Israel.
Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação) – Universidade de Passo Fundo, 2021.

1. Processos de fabricação. 2. Chave seccionadora.
3. Motovibrador. 4. Desbalanceamento rotativo.
5. Vibração. I. Israel, Charles Leonardo, orientador.
II. Título.

CDU: 621

Catalogação: Bibliotecária Jucelei Rodrigues Domingues - CRB 10/1569

Huann Costa Rodrigues

**DESENVOLVIMENTO CONCEITUAL DE UM MOTOVIBRADOR
UNIDIRECIONAL UTILIZADO EM ACIONAMENTO 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 Adriano Luis Toazza
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Agenor Dias de Meira Junior
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Jakerson Ricardo Gevinski
Instituto Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço aos meus pais, Ademar e Edna que, apesar da distância, nunca deixaram de me dar suporte e incentivo para a conclusão deste curso. Portanto, foram e ainda são essenciais para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

Agradeço a minha esposa, Jessica, pelo apoio, atenção e pelo carinho, seguindo ao meu lado e me apoiando diante aos desafios.

Ao Professor Doutor Charles Leonardo Israel que me orientou nas atividades desenvolvidas no decorrer da dissertação e à Universidade de Passo Fundo pelos recursos disponibilizados.

Agradeço aos meus amigos e familiares por todo apoio ao longo desse trajeto, pelas alegrias e experiências compartilhadas.

Especialmente, sou grato a todos professores que tive até este momento. Acredito que a conclusão dessa pesquisa só foi possível em virtude da presença de cada uma destas pessoas em minha vida. Enfim, agradeço pelo aprendizado e conhecimento transmitido.

RESUMO

A presença de atrito e do arco elétrico entre os contatos principais das chaves seccionadoras de alta tensão, com certa frequência, impede o fechamento do seccionador por completo, causando problemas ao equipamento e exigindo o deslocamento de operadores até o local para que a conclusão seja feita manualmente. Dessa maneira, com o objetivo de resolver a problemática, busca-se obter um procedimento mais eficiente. Tendo em vista que, de acordo com a patente BR 10 2013 020198 7 de Rocha (2013), a aplicação de vibração unidirecional nas chaves seccionadoras reduz a força de atrito seco entre os contatos principais e contribui para o fechamento completo da chave, o presente trabalho aborda o desenvolvimento conceitual de um motovibrador unidirecional para a aplicação em manobras de fechamento de seccionadores de alta tensão, como as chaves seccionadoras Lorenzetti EV 242 kV e Harvey Hubble BMKU-40A. Além disso, a dissertação também aborda o projeto conceitual da fixação do motovibrador à estrutura da chave seccionadora. Uma lista de requisitos é desenvolvida através dos métodos de projeto de Pahl et al. (2005) que conduz o desenvolvimento conceitual do equipamento. Sendo assim, doze alternativas de solução puderam ser propostas diante à função global do produto e quatro variáveis finais foram avaliadas, resultando na concretização das concepções do motovibrador unidirecional e de seus suportes. Ao fim do estudo, em consequência do método de desenvolvimento de produto (PAHL et al., 2005) foi possível obter um produto composto por um sistema de massas excêntricas que giram em direções opostas, o qual produz vibração unidirecional e sendo este um conceito inovador considerando a aplicação em chaves seccionadoras. A concepção obtida ainda conta com um sistema modular de montagem, uma proteção fixa de acordo com as normas NR-12 e IP 66 e um sistema de transmissão de movimento que é composto por três polias e uma correia sincronizadora dupla.

Palavras-chave: Motovibrador. Chave seccionadora. Desbalanceamento rotativo. Vibração. Projeto conceitual.

ABSTRACT

In some occasions, the switches of the high voltage disconnect switch have not closed completely due the friction and electric arc which it causes large problems for the equipment and the electricity companies have to mobilize workers to the locations where there is need of the switches closing. Therefore, aiming to solve that problem, Rocha (2013) developed a model patent BR 10 2013 020198 7 which, according to him, when vibration is applied to the structure, it can reduce the strength of dry friction between the contacts and the stem and contribute it to close completely. Hence, the focus of this research is the conceptual development of a directional motovibrator applied in high voltage disconnect switch as Lorenzetti EV 242 kV and Harvey Hubble BMKU-40A. The directional motovibrator has to be fixed on the structure of the disconnect switch and it is studied too. The list of requirements developed by using the design methods of Pahl et al. (2005) guided the conceptual development. Twelve solutions achieved the global function of the product and a selection made possible to obtain four final varieties that resulted in a directional motovibrator and its mounting brackets. An innovative product obtained can produced vibration directional because of its eccentric masses that rotate in opposite directions. Three pulleys and one double-sided synchronous belt perform the transmission of movement. The final concept has a modular system to mount it on the structure and a fixed guard in accordance with the standards NR-12 and IP 66.

Keywords: Motovibrator. Disconnect switch. Rotating unbalance. Vibration. Conceptual design.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Chave seccionadora tipo dupla abertura lateral. Vista frontal à esquerda e superior à direita.....	17
Figura 2 - Chaves seccionadoras Lorenzetti EV 242 kV (à esquerda) e Harvey Hubble BMKU-40A (à direita)	19
Figura 3 - Variação do fator de amplificação com a razão de frequências	24
Figura 4 - Carga rotativa.....	26
Figura 5 - Massas desbalanceadas em rotação. Sistema massa-mola (a) e forças centrífugas (b).	27
Figura 6 - Variação de (MX/me) com a razão de frequências	27
Figura 7 - Organograma de objetivos com os setores (vertical), as complexidades de cada setor (horizontal) e os valores ponderados de cada um.....	29
Figura 8 - Motovibrador IP 66 (a) e motovibrador linha LV (b).....	34
Figura 9 - Vista explodida de um motovibrador.....	35
Figura 10 - Vibrador pneumático de esfera tipo S (a) e vibrador industrial eletromagnético (b)	36
Figura 11 - Máquina para testes de fadiga.....	37
Figura 12 - Motovibrador para testar soldas, consolidar e preencher moldes com concreto ...	38
Figura 13 - Protótipo do absorvedor dinâmico de vibração	39
Figura 14 - Equipamento de medição de vibração	40
Figura 15 - Componentes e funcionamento do seccionador de abertura vertical.....	41
Figura 16 - Chave seccionadora de abertura vertical e o contato fixo em destaque.....	42
Figura 17 - Componentes do seccionador de abertura vertical reverso.....	43
Figura 18 - Ideia elementar do estudo	49
Figura 19 - Massa com regulagem de posição	58
Figura 20 - Massas excêntricas de acordo com a aplicação (Lorenzetti EV 242 kV à esquerda e BMKU-40A à direita).....	70
Figura 21 - Modelo CAD da chave seccionadora BMKU-40A e da montagem do motovibrador	71
Figura 22 - Modelo CAD da chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV.....	73

Figura 23 - Montagem do motovibrador na chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV.....	73
Figura 24 - Organograma de objetivos	77
Figura 25 - Layout final do motovibrador unidirecional. Vista isométrica (a) e lateral (b).....	80
Figura 26 - Correia A 322 DL 075 e polias	81
Figura 27 - Furos para a fixação dos mancais de rolamento do eixo de tração.....	81
Figura 28 – Vista explodida da montagem da proteção sob medida no motovibrador unidirecional (a) e isométrica da proteção sob medida (b).....	82
Figura 29 - Posição do suporte do motovibrador na chave seccionadora BMKU-40A utilizado por Rech (2019). Unidades em mm.....	84
Figura 30 - Suporte do motovibrador na chave seccionadora BMKU-40A utilizado na pesquisa de Rech (2019). Foto da montagem (a) e layout do suporte (b).....	84
Figura 31 - Posição do suporte do motovibrador na chave seccionadora BMKU-40A para a atual pesquisa. Vista lateral (a) e isométrica da posição do suporte (b). Unidades em mm.....	85
Figura 32 - Primeira submontagem do suporte do motovibrador da chave seccionadora BMKU-40A.....	86
Figura 33 - Segunda submontagem do suporte do motovibrador da chave seccionadora BMKU-40A.....	86
Figura 34 - Montagem final do suporte do motovibrador da chave seccionadora BMKU-40A	87
Figura 35 - Montagem do suporte na chave seccionadora BMKU-40A. Vista isométrica e aproximada da montagem do suporte.....	87
Figura 36 - Vista explodida da montagem modular entre o suporte da chave seccionadora BMKU-40A e o motovibrador (a). Montagem do motovibrador no suporte na chave seccionadora BMKU-40A (b). Encaixe entre o suporte e o motovibrador visto de baixo (c) ..	88
Figura 37 - Suporte do motovibrador na chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV utilizado na pesquisa de Rech (2019). Layout (a) e montagem do suporte (b)	89
Figura 38 - Posição do suporte do motovibrador na chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV para a atual pesquisa. Vista lateral (a) e isométrica da posição do suporte (b). Unidades em mm.....	90
Figura 39 - Primeira submontagem do suporte do motovibrador da chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV.....	91

Figura 40 - Segunda submontagem do suporte do motorvibrador da chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV.....	91
Figura 41 - Vista explodida da montagem modular entre as submontagens do suporte da chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV (a). Montagem final do suporte do motorvibrador (b)	92
Figura 42 - Montagem do suporte na chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV. Vista isométrica e aproximada da montagem do suporte	93
Figura 43 - Vista explodida da montagem modular entre o suporte da chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV e o motorvibrador (a). Montagem do motorvibrador no suporte na chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV (b). Encaixe entre o suporte e o motorvibrador (c)	94

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Lista de avaliação	30
Quadro 2 - Linha mestra com lista de características principais	46
Quadro 3 - Lista de requisitos para o motovibrador e suportes de fixação	47
Quadro 4 - Entradas e saídas para a execução da função global	52
Quadro 5 - Matriz morfológica.....	56
Quadro 6 - Lista de avaliação das soluções	60
Quadro 7 - Combinação dos princípios de solução	61
Quadro 8 - Seleção das alternativas de solução.....	62
Quadro 9 - Lista de seleção das variantes de solução.....	64
Quadro 10 - Variáveis V3, V5, V9 e V11	65
Quadro 11 - Orientação para avaliação dos objetivos	78
Quadro 12 - Avaliação das variáveis	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Carregamento do motovibrador em relação à frequência de excitação na BMKU-40A	68
Tabela 2 - Carregamento do motovibrador em relação à frequência de excitação na Lorenzetti EV 242 kV	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DA	Dupla abertura
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica
UPF	Universidade de Passo Fundo
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
FG	Função global do produto
FE	Função essencial do produto
FP	Função parcial do produto
NBR	Norma brasileira
AL	Abertura latera
AC	Abertura central
AV	Abertura vertical
VR	Vertical reverso
FC	Faca
BC	Basculante
SB	Semi-basculante
PG	Pantográfico
SV	Semi-pantográfico
TE	Chave de terra
AR	Aterramento rápido
IP	Grau de proteção
NR	Norma regulamentadora
FG	Função global

LISTA DE SÍMBOLOS

k	Rigidez, N/m
F	Força da mola, N
x	Deformação, m
$freq$	Frequência, Hz
m	Massa, kg
ω_n	Frequência natural angular, rad/s
ζ	Fator de amortecimento
c	Constante de amortecimento
c_c	Constante de amortecimento crítico
M	Fator de amplificação
X	Amplitude dinâmica, m
δ_{st}	Amplitude estática, m
r	Razão de frequências
$F(t)$	Força harmônica, N
ω	Velocidade angular, rad/s
ϕ	Ângulo de fase, rad
e	Excentricidade, m
MX/me	Desbalanceamento rotativo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	O problema da pesquisa	18
1.2	Justificativa do trabalho	19
1.3	Objetivos do estudo	20
1.3.1	Objetivo geral	20
1.3.2	Objetivos específicos	20
1.4	Organização do trabalho	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	Vibrações mecânicas	22
2.1.1	Conceitos básicos de vibração	23
2.1.2	Classificação de vibrações	25
2.1.3	Excitação harmônica.....	25
2.1.4	Força centrífuga	26
2.2	Método para projeto e desenvolvimento de produtos.....	28
2.3	Norma regulamentadora 12	31
2.4	Estado da arte sobre motovibradores	34
2.4.1	Motovibradores no contexto comercial.....	34
2.4.2	Motovibradores no contexto acadêmico.....	36
2.5	Chaves seccionadoras	40
2.5.1	Definições sobre os seccionadores.....	40
3	DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO	44
3.1	Metodologia aplicada	44
3.2	Elaboração da lista de requisitos	44
3.3	Projeto conceitual.....	50
3.3.1	Abstração	50
3.3.2	Elaboração da estrutura de funções	51
3.3.3	Matriz morfológica.....	55
4	SELEÇÃO DOS CONCEITOS DE ACORDO COM O TIPO DE SECCIONADOR	67

4.1	Quantidade de massas excêntricas exigidas para excitar os seccionadores BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV	67
4.1.1	Quantidade de massas excêntricas para excitar o seccionador BMKU-40A.....	68
4.1.2	Quantidade de massas excêntricas para excitar o seccionador Lorenzetti EV 242 kV.....	69
4.1.3	Quantidade ideal de massas excêntricas para os seccionadores BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV	69
4.2	Posição do suporte de fixação do motovibrador.....	70
4.2.1	Posição do suporte na estrutura metálica base do seccionador BMKU-40A	71
4.2.2	Posição do suporte na estrutura metálica base do seccionador Lorenzetti EV 242 kV.....	72
4.2.3	Posição ideal dos suportes de fixação do motovibrador para os seccionadores BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV	74
5	AVALIAÇÃO E APRESENTAÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO DE ACORDO COM O TIPO DE CHAVE SECCIONADORA E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	75
5.1	Avaliação das alternativas de solução	75
5.1.1	Avaliação das alternativas de solução conforme o tipo de chave seccionadora ...	76
5.2	Apresentação das concepções.....	79
5.2.1	Concretização do motovibrador unidirecional.....	80
5.2.2	Concretização do suporte de fixação para chave seccionadora BMKU-40A	83
5.2.3	Concretização do suporte de fixação para chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV.....	89
5.3	Discussão dos resultados.....	95
5.3.1	Aplicação de uma metodologia de desenvolvimento de produto	95
5.3.2	Sistema vibratório unidirecional e a transmissão de movimento por correia	97
5.3.3	Sistema modular de fixação do motovibrador unidirecional.....	98
6	CONCLUSÃO	100
6.1	Atendimento dos objetivos	100
6.2	Contribuição científica.....	101
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	103
	REFERÊNCIAS	104

APÊNDICE A – DIMENSÕES TOTAIS DO MOTOVIBRADOR UNIDIRECIONAL E DE SUA PROTEÇÃO	108
APÊNDICE B – DIMENSÕES TOTAIS DO SUPORTE DO MOTOVIBRADOR DA CHAVE SECCIONADORA BMKU-40A	110
APÊNDICE C – DIMENSÕES TOTAIS DO SUPORTE DO MOTOVIBRADOR DA CHAVE SECCIONADORA LORENZETTI EV 242 KV.....	111
ANEXO A – DETALHAMENTOS GERAIS DAS CHAVES SECCIONADORAS	112

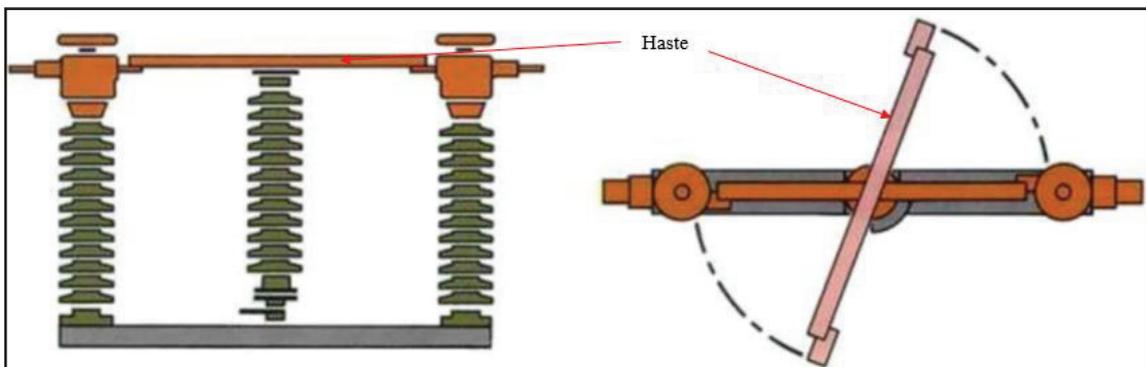
1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é utilizada em diversos segmentos. De modo geral, ela é gerada por meio de usinas, corrigida e depois distribuída conforme a necessidade da população. A distribuição de energia elétrica é feita por meio de estações e subestações de energia elétrica. Dentre os vários componentes usados na distribuição de energia elétrica, destaca-se a chave seccionadora.

A função da chave seccionadora é de interromper a passagem de corrente elétrica e, assim, possibilitando a manutenção na rede elétrica. Este dispositivo é de extrema importância em razão do risco de vida que o manutentor está exposto. Ela apresenta um mecanismo que possibilita realizar a abertura e o fechamento da mesma. Quando aberta, não há transição de corrente elétrica e é possível executar a manutenção dos equipamentos e componentes que auxiliam na distribuição de energia elétrica. Após a manutenção, a chave é fechada e a energia é distribuída novamente.

Na Figura 1 é apresentada, respectivamente, a vista frontal e superior da chave seccionadora do tipo DA (dupla abertura). A chave mostrada na Figura 1 está aberta, ou seja, a haste girou no sentido anti-horário para abrir. Para executar a manobra de fechamento, a haste gira no sentido horário. Neste caso, o movimento de abertura e fechamento é originado por um motor elétrico que é transmitido por um eixo de comando, movimentando a haste, onde é apresentado com mais detalhes no capítulo da fundamentação teórica.

Figura 1 - Chave seccionadora tipo dupla abertura lateral. Vista frontal à esquerda e superior à direita.



Fonte: Adaptado de Schenaidner eletric (2011, apud ROCHA, 2014).

No entanto, as chaves seccionadoras de alta tensão têm evidenciado um problema no momento da manobra de fechamento. Após certo tempo de uso das chaves seccionadoras, o atrito entre os contatos principais (contato fixo e móvel) aumenta em virtude da oxidação originada, dificultando no fechamento da chave e, em certas ocasiões, ele não é concluído.

A seguir, o problema da pesquisa é esclarecido e assim é possível justificar a proposta do projeto. Além disso, o objetivo geral e os objetivos específicos são apresentados ao final do presente capítulo.

1.1 O problema da pesquisa

A manobra de abertura e fechamento das chaves seccionadoras ocasiona o efeito corona que é proveniente de campos elétricos elevados (alta tensão). O efeito corona origina o gás ozônio que é altamente oxidante (JACINTO, 2012, apud. QUARESMA, 2013). Gradativamente, o atrito entre os contatos principais da chave é elevado em virtude da oxidação consequente deste efeito.

Sendo assim, muitas vezes o fechamento do seccionador não ocorre por completo devido ao acúmulo de material oxidado que aumenta o atrito e dificulta o chaveamento. Quando isso ocorre, há a necessidade de que um operador se desloque até o local e realize manualmente o fechamento da chave. No entanto, esta ação é perigosa devido à energia elétrica presente no processo.

Esta problemática foi objeto de estudo realizado por Rocha (2014) cujo autor avaliou o atrito proveniente do efeito corona no contato da chave seccionadora tipo DA e, além disso, verificou a aplicabilidade de um sistema para manobras de seccionadores de alta tensão visando o processo de automação.

Diante deste problema, Rocha (2013) patenteou um dispositivo que vibra numa única direção e alivia o atrito entre os contatos principais das chaves seccionadoras conforme a patente de invenção N° BR 10 2013 020198 7. A patente conta com um equipamento vibratório que é instalado na chave seccionadora com facilidade, permitindo a rápida substituição ou retirada para revisões. Ainda, a patente exige que a alteração do projeto estrutural do seccionador seja evitada na montagem do equipamento.

1.2 Justificativa do trabalho

Com a intenção de evitar o risco à vida humana, a automatização do processo de abertura e fechamento da chave seccionadora foi proposta por Rocha (2014). O autor afirma que a alteração do projeto do seccionador seria inviável, visto que envolve todo o sistema elétrico brasileiro.

Dessa forma, por meio de experimentos realizados por Rocha (2014), o autor afirma que a aplicação de um motovibrador unidirecional auxilia no fechamento da chave seccionadora. A vibração em apenas uma direção diminui o atrito seco entre os contatos principais e alivia as tensões mecânicas residuais dos mecanismos de fechamento, promovendo o fechamento adequado da chave seccionadora. À vista disso, o projeto conceitual do motovibrador unidirecional é explorado neste trabalho, em consequência do mesmo ser considerado uma alternativa eficiente para solucionar o problema descrito acima.

Além disso, o estudo de Rocha (2014) originou a parceria entre a Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) e a Universidade de Passo Fundo (UPF) que, mais tarde, a partir de recursos disponibilizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a bancada de testes foi construída e as chaves seccionadoras Lorenzetti EV 242 kV e Harvey Hubble BMKU-40A foram montadas no parque tecnológico da UPF (Figura 2). Vale ressaltar que não há energia elétrica nas duas chaves seccionadoras e elas estão disponíveis para ensaios experimentais ou análises que contribuam com a pesquisa e desenvolvimento.

Figura 2 - Chaves seccionadoras Lorenzetti EV 242 kV (à esquerda) e Harvey Hubble BMKU-40A (à direita)



Fonte: o autor.

As chaves seccionadoras são encontradas em diversos tipos construtivos, conforme são apresentadas na fundamentação teórica. Contudo, a presente pesquisa é restringida apenas às chaves seccionadoras que estão na UPF. Dessa forma, o motovibrador unidirecional será projetado a fim de ser utilizado especificamente em chaves seccionadoras de alta tensão.

Além disso, uma vez que é inviável a alteração estrutural das chaves seccionadoras, é importante o desenvolvimento de um dispositivo que auxilie na fixação do motovibrador no local onde ele irá trabalhar. Desta maneira, o projeto também aborda um mecanismo de fixação de modo que o produto seja posicionado na estrutura da chave seccionadora, visando sua maior eficiência e evitando alterações na estrutura

1.3 Objetivos do estudo

Neste tópico são apresentados: o objetivo geral e os objetivos específicos do presente trabalho.

1.3.1 Objetivo geral

O projeto conceitual de um motovibrador unidirecional utilizado nos acionamentos das chaves seccionadoras BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) Desenvolver o projeto conceitual do motovibrador unidirecional utilizando uma metodologia de projeto;
- b) Desenvolver o projeto conceitual de uma proteção para o motovibrador que seja segura ao operador conforme a norma regulamentadora 12 (NR12);
- c) Obter o conceito de um mecanismo que possibilite ao equipamento ser montado nas chaves seccionadoras BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV.

1.4 Organização do trabalho

O presente estudo se encontra dividido em sete capítulos, com os conteúdos descritos em sequência.

O capítulo 1 trata da introdução que traz a contextualização, a problemática da pesquisa, justificativa e os objetivos do trabalho.

No capítulo 2, apresenta-se a fundamentação teórica, exibindo alguns conceitos sobre vibrações mecânicas, metodologia de projeto, norma regulamentadora 12, estado da arte sobre motovibradores e chaves seccionadoras.

O capítulo 3 expõe o desenvolvimento do produto e suas fases como a elaboração da lista de requisitos e o projeto conceitual.

O capítulo 4 mostra a seleção dos conceitos de acordo com o tipo de seccionador, ou seja, as concepções relacionadas a quantidade de massas excêntricas e o suporte de fixação do motovibrador são selecionadas conforme o tipo construtivo da chave seccionadora.

No capítulo 5 é feita a avaliação e a apresentação das alternativas de solução de acordo com o tipo de chave seccionadora e discussão dos resultados.

Por fim, o trabalho é concluído no capítulo 6 onde são feitas as considerações finais a respeito da concepção desenvolvida e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 7.

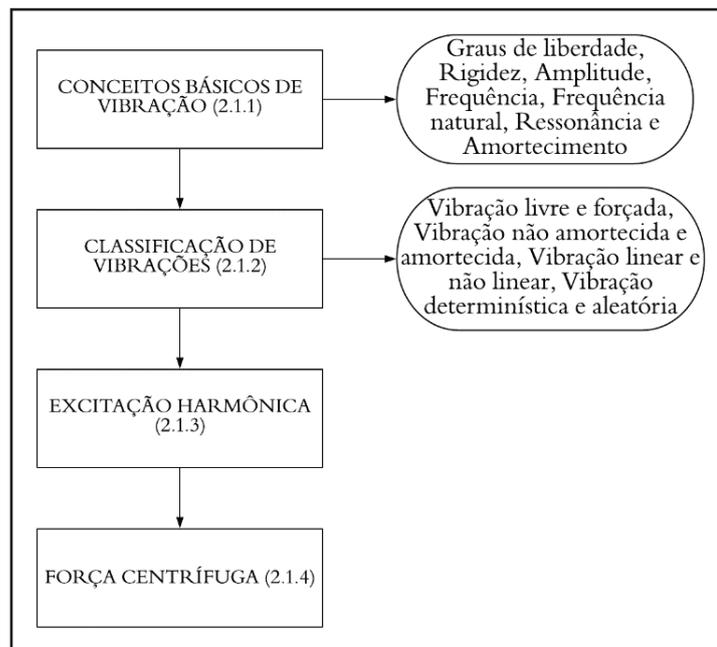
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os temas fundamentais para a elaboração do projeto conceitual do motovibrador unidirecional são abordados neste capítulo. Os fundamentos sobre vibrações mecânicas, projeto mecânico, estado da arte sobre motovibradores e chaves seccionadoras são explorados.

2.1 Vibrações mecânicas

Este capítulo apresenta os conceitos essenciais de vibrações mecânicas que fundamentaram o desenvolvimento deste trabalho. O Fluxograma 1 aborda uma sequência lógica para a melhor compreensão dos temas que são discutidos.

Fluxograma 1 - Sequência lógica dos conceitos de vibrações



Fonte: o autor.

2.1.1 Conceitos básicos de vibração

“Em geral, um sistema vibratório inclui um meio para armazenar energia potencial (mola ou elasticidade), um meio para armazenar energia cinética (massa ou inercia) e um meio de perda gradual de energia (amortecedor)” (RAO, 2009), sendo que um sistema é modelado e analisado considerando que o mesmo é contínuo de massa distribuída ou a partir de modelos de massa e rigidez levando em conta os graus de liberdade do sistema mecânico.

Rao (2009) afirma que “o número mínimo de coordenadas independentes requeridas para determinar completamente as posições de todas as partes de um sistema a qualquer instante define o grau de liberdade do sistema”, ou seja, este é definido através da compreensão do comportamento dinâmico do sistema. O autor também salienta que os sistemas que apresentam “n” graus de liberdade, contem “n” frequências naturais associadas as suas formas modais. De acordo com Rao (2009), uma força que é desenvolvida em uma mola é proporcional ao movimento relativo entre suas duas extremidades e a rigidez (k) do sistema pode ser calculada com a Equação (1), sendo que a força da mola (F) é medida em Newton e a deformação (x) em metros.

$$F = kx \quad (1)$$

Costa (2015) afirma que a amplitude é o máximo deslocamento do corpo vibratório em relação a sua posição de equilíbrio e frequência é o número de ciclos realizados por unidade de tempo. A frequência pode ser medida em ciclos por segundo (Hertz), sendo inversa ao período e calculada conforme a Equação (2) (RAO, 2009).

$$freq = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2)$$

Holanda et al. (2014) afirma que a frequência natural de vibração depende da massa (m) e rigidez (k) do sistema. A frequência natural angular é medida em radianos por segundo, a rigidez em newtons por metro e a massa em quilograma. A Equação (3) corresponde à frequência natural angular (RAO, 2009).

$$\omega_n = \left(\frac{k}{m}\right)^{1/2} \quad (3)$$

O fenômeno de ressonância acontece quando a frequência de excitação coincide com a frequência natural da máquina ou estrutura, resultando em grandes deflexões (RAO, 2009).

Por outro lado, quando o sistema apresenta amortecimento, as deflexões são menores (COSTA, 2015).

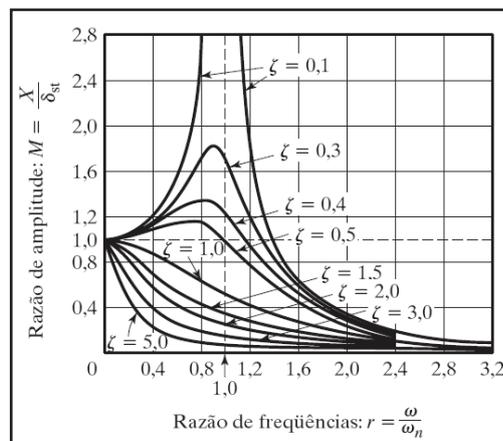
O amortecimento é o fenômeno que resulta na dissipação da energia de vibração do material ou do sistema mecânico e pode ser modelado matematicamente como: Amortecimento interno (material), amortecimento estrutural e amortecimento viscoso. O amortecimento interno é determinado à medida que a microestrutura e a macroestrutura do material são organizadas. O amortecimento estrutural é definido de acordo com o contato (atrito) entre as peças que compõe o sistema mecânico, como juntas e uniões. O amortecimento viscoso é caracterizado conforme o fluido em que o sistema se encontra (MEVADA; PATEL, 2016).

Mevada e Patel (2016) salientam que o amortecimento possui significado físico e pode ser medido ou quantificado por meio do fator de amortecimento (ζ) que é a razão entre a constante de amortecimento (c) e a constante de amortecimento crítico (c_c) como descrito na Equação (4) (RAO, 2009).

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (4)$$

A resposta de um sistema amortecido à força harmônica pode ser observada na Figura 3, sendo que (M) é o fator de amplificação, (X) é a amplitude dinâmica e (δ_{st}) é a amplitude estática. A razão de frequências é r . Abaixo, é possível notar que M tende ao infinito quando a razão de frequências é igual a um (ressonância) e o amortecimento nulo. Nota-se também que o M reduz quando há presença de amortecimento, ou seja, quando (ζ) é maior que zero. Conclui-se que o amortecimento é um fator limitante da amplitude de vibração (RAO, 2009).

Figura 3 - Variação do fator de amplificação com a razão de frequências



Fonte: Rao (2009).

2.1.2 Classificação de vibrações

As vibrações são classificadas de várias maneiras e as mais importantes são as seguintes: vibração livre e forçada, vibração não amortecida e amortecida, vibração linear e não linear, vibração determinística e aleatória (RAO, 2009).

Para a elaboração deste projeto, é de suma importância o entendimento dos conceitos de vibração forçada e amortecida. Rao (2009) afirma que a vibração forçada surge quando há alguma força externa agindo no sistema e a vibração amortecida é aquela que a energia é dissipada ou perdida durante a oscilação. Como o objetivo do equipamento proposto são deflexões suficientes para auxiliar na conclusão do fechamento da chave e o amortecimento é o único meio para atenuar a amplitude de vibração, é importante conhecer os conceitos referentes ao amortecimento do sistema como apresentado no tópico anterior.

2.1.3 Excitação harmônica

Denomina-se de movimento harmônico aquele que se repete a intervalos de tempo iguais e é originário de uma excitação harmônica (RAO, 2009). Esta excitação é classificada como uma vibração forçada, ou seja, é a resposta de um sistema por ação de uma energia externa que pode ser uma força ou uma excitação de deslocamento (RAO, 2009).

Este tipo de excitação é calculado por meio da Equação (5), sendo que a velocidade angular (ω) é medida em radianos por segundo e o ângulo de fase (ϕ) em radianos que é a defasagem entre a excitação e a resposta do sistema (RAO, 2009).

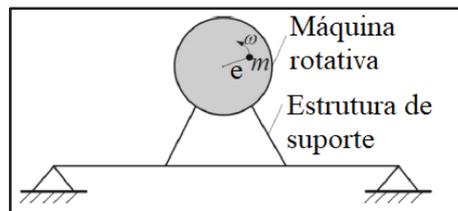
$$F(t) = F_0 \sin(\omega t + \phi) \quad (5)$$

2.1.4 Força centrífuga

É possível observar vibração em rotores desbalanceados devido à força centrífuga resultante da massa desbalanceada (MACCAMHAOIL, 2016). Na pesquisa realizada por Anekar et al. (2015), os autores também afirmam que o desbalanceamento em máquinas rotativas é uma fonte de vibração forçada causada pela força centrífuga que age como uma força harmônica de excitação.

Liu, Zhang e Gao (2016) afirmam que a força centrífuga, também chamada como carga rotativa, é originada de uma massa desbalanceada (m) com excentricidade (e) girando a uma velocidade (ω) que pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 - Carga rotativa



Fonte: Adaptado de Liu, Zhang e Gao (2016).

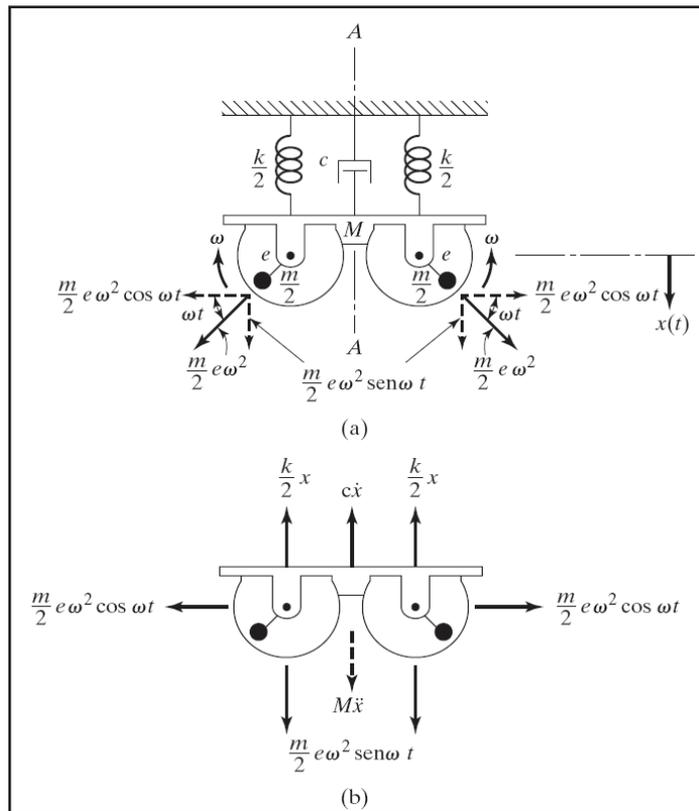
Além disso, conforme relatam os autores, a carga rotativa excita a estrutura de suporte que é localizada logo abaixo da máquina rotativa. A força centrífuga é calculada utilizando a Equação (6) (LIU; ZHANG; GAO; 2016).

$$F_c = m\omega^2 e \quad (6)$$

De acordo com a Figura 5, Rao (2009) apresenta em (a) duas massas $\frac{m}{2}$ girando em sentidos opostos, numa velocidade ω e deslocadas do centro de giro a uma distância e , resultando na força centrífuga como descrito na Equação (7). Dessa forma, as forças centrífugas de cada massa $\frac{m}{2}$ se anulam quando estiverem no eixo horizontal e se somam quando estiverem direcionadas no eixo vertical como mostrado em (b). Este desbalanceamento rotativo excita o sistema de massa (M), rigidez k e amortecimento c .

$$F(t) = me\omega^2 \sin \omega t \quad (7)$$

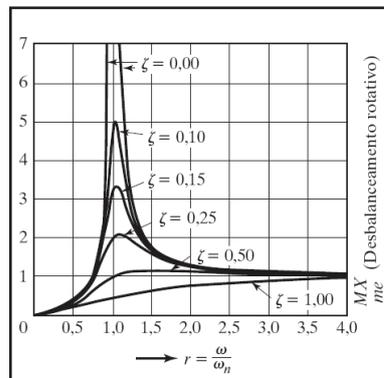
Figura 5 - Massas desbalanceadas em rotação. Sistema massa-mola (a) e forças centrífugas (b).



Fonte: Rao (2009).

A expressão (MX/me) é conhecida como desbalanceamento rotativo. Nota-se na Figura 6 que quando a velocidade é muito elevada, o amortecimento se torna desprezível e o desbalanceamento rotativo tende ao valor unitário (RAO, 2009).

Figura 6 - Variação de (MX/me) com a razão de frequências



Fonte: Adaptado de Rao (2009).

2.2 Método para projeto e desenvolvimento de produtos

A partir duma demanda verificada no mercado, como por exemplo um problema a ser solucionado, um produto que atenda essa necessidade é demandado. A resposta ao mercado deve ser rápida e eficiente tendo em vista os concorrentes. Além disso, a criatividade é muito importante no desenvolvimento do produto, mas também pode dispersar a atenção do projetista e o trabalho acaba sendo exaustivo. Portanto, uma metodologia que auxilie na orientação do projetista é indispensável.

A metodologia de Pahl et al. (2005) é utilizada massivamente hoje em dia, tendo em vista sua eficiência no desenvolvimento de projetos na engenharia. Ela abrange as seguintes fases: a especificação de projeto, o projeto conceitual, anteprojecto e o projeto detalhado. Como o atual trabalho é realizado apenas até a fase conceitual do produto, ou seja, a metodologia aplicada nessa pesquisa se refere apenas a primeira (especificação de projeto) e segunda fase (projeto conceitual), uma síntese sobre cada uma delas é encontrada abaixo. As fases do projeto são detalhadas no capítulo de desenvolvimento do produto.

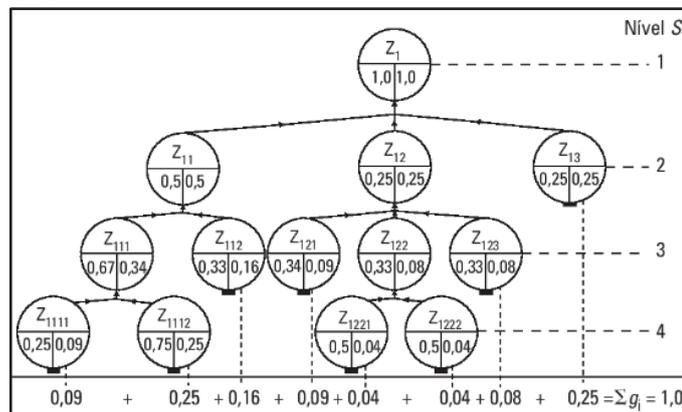
- Na especificação de projeto é feito um estudo informativo sobre o problema, elaborando a lista de requisitos por meio da linha mestra com a lista de características principais;
- No projeto conceitual é definido a estrutura funcional do produto que é feita com base na lista de requisitos. A função global do produto (FG) é definida e ela é desdobrada em subfunções. Em sequência, a matriz morfológica é elaborada, apresentando alternativas de solução para cada subfunção. A avaliação das soluções é feita, resultando nas variantes de solução mais relevantes ao projeto que, de acordo com Pahl et al. (2005), são combinações entre as alternativas de solução. Por fim, é necessário avaliar as variantes apresentadas e compara-las entre si para obter e apresentar a variante ideal ao objetivo da máquina.

Com o objetivo de obter resultados mais significantes e confiáveis na etapa conceitual do equipamento, Pahl et al. (2005) sugere que seja utilizado o método VDI (Verein Deutscher Ingenieure) 2225 para auxiliar na avaliação final das variantes.

Este método sustenta a avaliação das variantes finais através de critérios técnicos e econômicos como o princípio dos custos mínimos de produção, necessidade mínima de espaço, construção leve, desperdício mínimo e manipulação mais adequada. Assim, as variantes finais são avaliadas em relação ao objetivo do equipamento, sendo comparadas aos critérios de uma solução ideal.

Os critérios são descritos como o conjunto de objetivos da máquina proposta e formulados de um sentido uniforme por meio de uma árvore de objetivos (organograma de objetivos) que abrange os setores e a complexidade de cada um deles que estão apresentados na horizontal e vertical, respectivamente. A VDI 2225 orienta que uma ordem hierárquica não é necessária no organograma, mas apenas a relação entre a complexidade de cada setor e a máquina almejada. Além disso, quando os critérios de avaliação se diferem de forma sucinta em sua importância diante ao objetivo principal do equipamento, cada um precisa ser ponderado e formulado conforme o peso em relação ao valor global da solução (Figura 7).

Figura 7 - Organograma de objetivos com os setores (vertical), as complexidades de cada setor (horizontal) e os valores ponderados de cada um



Fonte: Pahl et al. (2005).

A Figura 7 mostra um exemplo de organograma que é iniciado por Z_1 no primeiro nível, sendo o objetivo da máquina, e se divide em três principais setores Z_{11} , Z_{12} e Z_{13} no segundo nível e nos demais seguintes. Ainda, é possível observar que cada critério é ordenado de forma decrescente em relação a complexidade dele e recebe um valor ponderado final entre zero e um, uma vez que a soma dos valores de qualquer nível é igual a um. O valor ponderado de cada critério é obtido multiplicando o valor ponderado deste nível pelos níveis superiores.

Por exemplo, o valor da meta Z_{1112} de 0,25 foi obtido multiplicando pelos valores de Z_{111} , Z_{11} e Z_1 .

Após a ponderação dos critérios, os parâmetros são determinados e relacionados com os critérios. Os valores são atribuídos aos parâmetros entre zero e quatro como muito abaixo da média, abaixo da média, na média, acima da média e muito acima da média. Assim, as variantes são caracterizadas de acordo com a atribuição do valor de cada critério de forma verbal e numérica.

Por fim, os resultados são exibidos numa lista de avaliação onde cada critério apresenta um fator de ponderação e valor de acordo com a variante avaliada. O fator e valor de cada critério são multiplicados e a soma final dos resultados é feita para obter o valor global da variante como pode ser observado no Quadro 1. A variante que possui o maior valor global é a mais eficiente para o objetivo da máquina. Neste caso, Faccin (2018) verificou que a variante doze indicou maior valor global e, portanto, foi selecionada para a concretização da concepção.

Quadro 1 - Lista de avaliação

Critérios de avaliação			Parâmetros	Variante 12			Variante 13		
Nr.	Características	Fator	Nome	Propriedade	Valor	Valor Ponderado	Propriedade	Valor	Valor Ponderado
1	Geometria ajustável e personalizada	0,10	Flexibilidade	Boa	3	0,3	Boa	3	0,3
2	Multifuncionalidade no Projeto interior	0,15	Flexibilidade	Muito eficiente	4	0,6	Muito eficiente	4	0,6
3	Precisão no mapeamento da pressão	0,125	Confiabilidade eletrônica	Muito Preciso	4	0,5	Regular	2	0,25
4	Interface amigável	0,125	Interfaceamento	Simples	3	0,375	Simples	3	0,375
5	Controle e silêncio nas articulações	0,15	Eficiência mecânica	Alto	3	0,45	Alto	3	0,45
6	Elevada segurança	0,10	Risco de danos	Alta	3	0,3	Alta	3	0,3
7	Superfície respirável e antibactericida	0,125	Eficiência	Muito eficiente	4	0,5	Eficiente	3	0,375
8	Interior respirável e antibactericida	0,125	Eficiência	Muito eficiente	4	0,5	Muito eficiente	4	0,5
		$\sum g_i =$			28	3,525		25	3,15

Fonte: Faccin (2018).

Através do método VDI 2225 é possível identificar os pontos fracos das variantes, ou seja, os valores que estão abaixo da média são verificados e as respectivas variantes são eliminadas na avaliação final. Assim, o método é concluído tendo em vista que o mesmo não prevê estimativas de incertezas e a concepção pode ser concretizada e apresentada.

2.3 Norma regulamentadora 12

É estabelecido na norma regulamentadora 12 que o projeto e a utilização de equipamento não devem oferecer risco à saúde dos trabalhadores. Almejando a prevenção de acidentes e doenças de trabalho, o empregador deve garantir esta segurança adotando medidas eficientes como medidas de proteção coletiva, administrativas ou de organização do trabalho e de proteção individual. Sendo assim, é afirmado na NR-12 que sistemas de segurança devem ser adequados às características técnicas da máquina e ao processo de trabalho para que o equipamento apresente segurança.

Os trabalhadores possuem função essencial em garantir a segurança, cumprindo com as orientações relativas aos procedimentos seguros referentes à utilização do equipamento, evitando alterar as proteções mecânicas ou os dispositivos de segurança e comunicando ao superior caso estas forem alteradas, participando de treinamentos que orientem sobre a aplicação da NR-12 e colaborando com o empregador na implementação da mesma.

Quando o equipamento apresenta zonas de perigo, como transmissão de movimento e inercia de objetos, é enfatizado na NR-12 que proteções fixas, móveis e dispositivos de segurança interligados sejam utilizadas, não sendo considerados itens opcionais, mas essenciais para garantir a segurança dos trabalhadores. Porém, quando as partes do equipamento que oferecem risco a saúde do trabalhador estão totalmente enclausuradas através de uma proteção fixa, outro dispositivo de proteção não se torna necessário, visto que o mesmo não possibilitaria a redução de risco.

De acordo com a NR-12, a barreira física pode ser uma proteção fixa ou móvel, sendo que, quando fixa, a fixação é feita por meio de elementos de fixação de modo que ela só possa ser removida por meio de ferramentas. Este tipo de proteção é indicado para os casos em que há transmissão de potência, componentes móveis e, ainda, para aqueles que existe o risco de ruptura e projeção de materiais.

Os requisitos que a proteção precisa apresentar para garantir a saúde e integridade física do trabalhador são os seguintes:

- Impedir o acesso à zona de perigo e apresentar sua função durante a vida útil do equipamento;
- Ser projetado com material e dimensões adequadas para conter a projeção de materiais e resistir aos esforços submetidos;
- Resistir às condições ambientais em que ela estiver exposta;
- Ser firme;
- Possibilitar condições de limpeza;
- Não oferecer riscos adicionais a saúde do trabalhador como esmagamento, agarramento e arestas cortantes;
- Dificultar a burla.

É afirmado na NR-12 que o procedimento e periodicidade da manutenção devem ser definidos por profissional qualificado e registrados num livro próprio com as seguintes informações: intervenções realizadas, data de cada intervenção, nome do responsável pela execução das intervenções, serviço realizado, peças reparadas ou substituídas, condições de segurança do equipamento e a conclusão sobre as mesmas, estando disponível aos trabalhadores. Assim sendo, é importante que as máquinas estejam isoladas e descarregadas da fonte de energia para a realização das manutenções.

Além disso, os componentes que influenciam na segurança precisam de um cronograma para a execução da manutenção e quando detectado qualquer defeito em componentes que comprometam a segurança, a reparação ou substituição precisa ser feita imediatamente por peça original ou equivalente, garantido a segurança do equipamento.

O projeto da máquina precisa apresentar segurança intrínseca a mesma, ou seja, não apresentando erros relacionados à montagem ou remontagem, ao meio de levantamento, carregamento, instalação, remoção e transporte do equipamento. A máquina precisa ser projetada e operada conforme norma regulamentadora 17 (NR-17). Assim sendo, o peso do equipamento que será transportado manualmente não deve comprometer a saúde e segurança do trabalhador.

O grau de proteção IP da máquina identifica as características da proteção de forma numérica em relação a entrada de objetos sólidos e líquidos no equipamento, sendo o primeiro algarismo referente aos objetos sólidos e o segundo aos líquidos. Assim sendo, a proteção é identificada através deste grau que complementar a NR-12. O primeiro algarismo recebe a numeração de 0 a 6, sendo 0 não protegido e 6 totalmente protegido contra poeira. O segundo algarismo recebe a numeração de 0 a 8, sendo 0 não protegido e 8 protegido contra submersão.

O primeiro algarismo é representado da seguinte forma:

- 0: não protegido;
- 1: protegido contra objetos sólidos com diâmetro maior que 50 mm;
- 2: protegido contra objetos sólidos com diâmetro maior que 12 mm;
- 3: protegido contra objetos sólidos com diâmetro maior que 2,5 mm;
- 4: protegido contra objetos sólidos com diâmetro maior que 1 mm;
- 5: proteção parcial contra poeira. Caso a poeira penetre, o funcionamento da máquina não será prejudicado;
- 6: totalmente protegido contra poeira.

Já o segundo algarismo representa:

- 0: não protegido;
- 1: protegido contra quedas verticais de gotas d'água;
- 2: protegido contra quedas verticais de gotas d'água para uma inclinação máxima de 15°;
- 3: protegido contra água aspergida de um ângulo de mais ou menos 69°;
- 4: protegido contra projeções d'água;
- 5: protegido contra jatos d'água;
- 6: protegido contra ondas do mar ou jatos potentes;
- 7: protegido contra imersão;
- 8: protegido contra submersão.

2.4 Estado da arte sobre motovibradores

Almejando um equipamento eficiente diante à problemática apresentada, um estado da arte é feito para auxiliar na compreensão sobre o funcionamento do motovibrador e verificar como este tipo de equipamento está sendo utilizado no contexto comercial e acadêmico.

2.4.1 Motovibradores no contexto comercial

O mercado atual de motovibradores dispõe de vários equipamentos que podem ser utilizados em diversas áreas. Todavia, o princípio de vibração é muito similar para todos os tipos de motovibradores, ou seja, a vibração é oriunda de massas excêntricas e dependendo do equipamento e aplicação, podem ser adicionadas com a intenção de produzir uma maior força centrífuga.

O equacionamento do motovibrador conta com os fundamentos discutidos na seção 2.1 e principalmente nos tópicos referentes à excitação harmônica e força centrífuga. Basicamente, o equipamento apresenta massas excêntricas que giram a uma velocidade angular. A combinação entre as massas excêntricas, velocidade angular e a excentricidade das massas ocasiona a força centrífuga que é caracterizada como uma excitação harmônica.

Por exemplo, na Figura 8, observa-se em (a) um motovibrador tradicional fabricado pela empresa MVL Vibradores que pode ser empregado no transporte, dosagem e compactação de sólidos e granulados. Nota-se em (b) um outro tipo de motovibrador fabricado pela mesma empresa, sendo que este é mais robusto devido à aplicação e pode ser utilizado no setor de mineração, petróleo e gás.

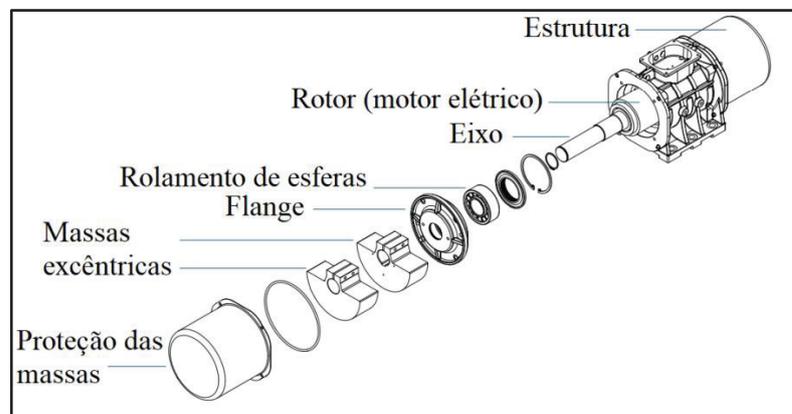
Figura 8 - Motovibrador IP 66 (a) e motovibrador linha LV (b)



Fonte: MVL Vibradores (2019).

Na Figura 9, o motovibrador da empresa OLI é apresentado numa vista explodida e, basicamente, apresenta os seguintes componentes (descritos na imagem da direita à esquerda): estrutura, rotor (motor elétrico), eixo, rolamento de esferas, flange, massas excêntricas e proteção das massas. O fabricante comenta que o rolamento de esferas é amplamente utilizado nos motovibradores para aplicações mais leves, que requerem menor força centrífuga, e o rolamento de rolos apenas em aplicações que necessitam de maior força de vibração. Desse modo, o equipamento consegue cumprir com sua função em diversos setores da indústria, como por exemplo no transporte e separação de produtos, compactação e consolidação de concreto e, ainda, esvaziando silos.

Figura 9 - Vista explodida de um motovibrador



Fonte: OLI (2018).

Encontram-se também na indústria os vibradores pneumáticos e eletromagnéticos (Figura 10) que são aplicados nas mesmas ou similares áreas que os motovibradores. Os vibradores pneumáticos (a) apresentam como princípio de vibração a rotação de uma esfera de aço a partir da injeção de ar comprimido no equipamento. De outro modo, os vibradores eletromagnéticos originam vibração através do movimento da bobina (b).

Figura 10 - Vibrador pneumático de esfera tipo S (a) e vibrador industrial eletromagnético (b)



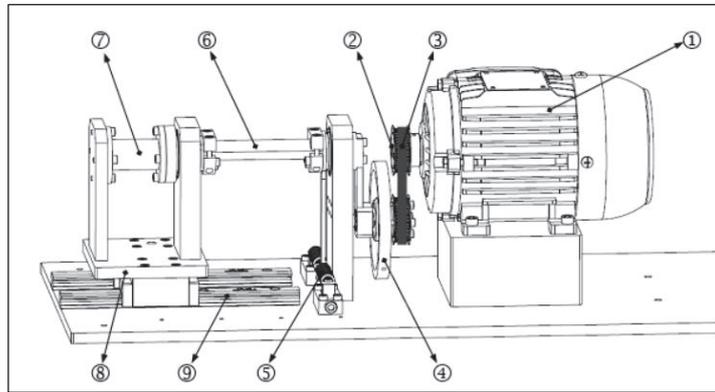
Fonte: MVL Vibradores (2019).

2.4.2 Motovibradores no contexto acadêmico

A aplicação e desenvolvimento de motovibradores é observável em diversas áreas, visto que o princípio de vibração pode ser benéfico e, ainda, uma alternativa de baixo custo para vários setores, como por exemplo na área acadêmica, onde os pesquisadores Vieira, Barbieri e Verran (2017) apresentam um equipamento para executar testes de fadiga em peças metálicas e não-metálicas.

Eles desenvolveram uma máquina que possui o mesmo princípio de funcionamento de um motovibrador, ou seja, utilizaram uma rotação desbalanceada. O equipamento é composto por um motor elétrico (1), acoplado numa polia sincronizada (2) e o movimento é transmitido à massa excêntrica (4) por meio de uma correia dentada (3). Além disso, a máquina de teste de fadiga conta com uma mola helicoidal de torção (5), medidor de torque (7), base (8) e guias lineares (9) para posicionar o corpo de prova (6) (Figura 11). O princípio de funcionamento da máquina leva em conta a definição da carga (massa excêntrica) e frequência de rotação. O desbalanceamento rotativo ocasiona um torque ao corpo de prova e leva o mesmo à fadiga. Os pesquisadores apresentam um teste feito na máquina e seus resultados, expondo o cumprimento dos objetivos propostos. Por fim, é obtido uma patente de baixo custo de manutenção e baixo ruído.

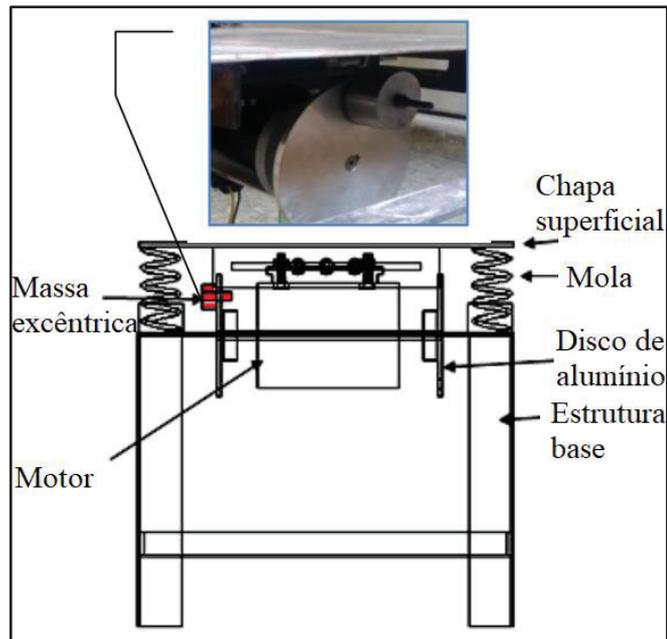
Figura 11 - Máquina para testes de fadiga



Fonte: Vieira, Barbieri e Verran (2017).

Bem como o artigo desenvolvido por Vieira, Barbieri e Verran (2017), Rao et al. (2014) produziram um estudo, porém, esse de caráter comercial, em que os autores desenvolveram um motovibrador. O objetivo da máquina seria para testar soldas, consolidar e preencher moldes com concreto. O equipamento é constituído por um motor que é montado sobre uma estrutura base, dois discos de alumínio com massas excêntricas que são acoplados no motor por meio de um eixo e duas molas que também são posicionadas na estrutura base e suportam uma superfície onde é posicionado o material em teste ou o concreto (Figura 12). Testes de consolidação e preenchimento de moldes com cimento foram executados para comprovar a eficiência do motovibrador. Além disso, foi possível a validação dos resultados a partir da comparação entre a teoria e a medição das amplitudes de vibração. A pesquisa apresentou bons resultados, visto que a máquina desenvolvida é mais barata e de menor tamanho quando comparada com outras disponíveis no mercado para a mesma aplicação.

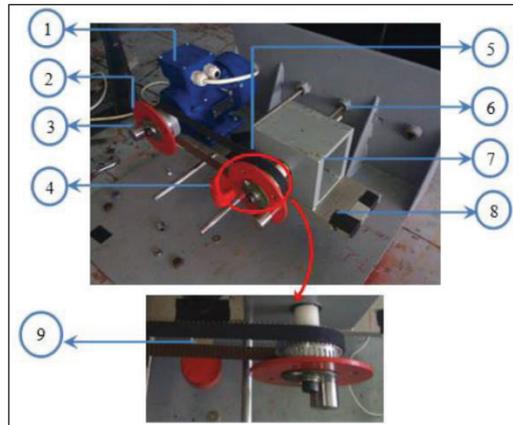
Figura 12 - Motovibrador para testar soldas, consolidar e preencher moldes com concreto



Fonte: Adaptado de Rao et al. (2014).

Ainda, acrescentando o conteúdo à área acadêmica e almejando a redução de vibração no movimento de translação e rotação, os pesquisadores Daman, Guntur e Susastro (2016) desenvolveram um protótipo de absorvedor dinâmico de vibração. Para isso, a máquina foi fabricada e testada por meio de experimentos e simulações. O equipamento funciona como um motovibrador e apresenta um motor elétrico (1), disco (2), massa desbalanceada (3), absorvedor (4), correia (5), estrutura principal engastada (6), caixa (7), viga (8) e absorvedor engastado (9) (Figura 13). Testes foram feitos na máquina, avaliando a influência da variação da distância do absorvedor em relação ao centro de gravidade do equipamento e as frequências naturais do mesmo. Conforme os resultados correspondentes das simulações e experimentos obtidos, é concluído que a adição do absorvedor apresenta significativo efeito na aceleração da estrutura (movimento translacional) e, por outro lado, pouca influência na aceleração angular (movimento rotacional). Por fim, é evidente que a máquina fabricada pelos pesquisadores apresentou um bom desempenho e bons resultados.

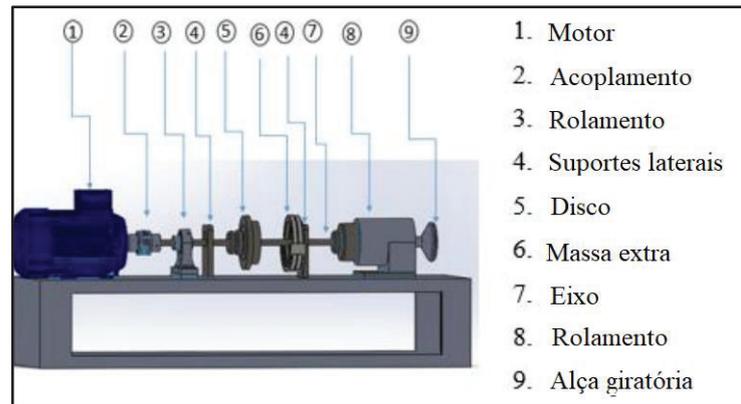
Figura 13 - Protótipo do absorvedor dinâmico de vibração



Fonte: Daman, Guntur e Susastro (2016).

O pesquisador Nagarjuna (2017) elaborou sua dissertação abordando o desenvolvimento conceitual de um equipamento de medição de vibração. A máquina pode ser utilizada para a identificação de falhas relacionadas à vibração como o desbalanceamento, desalinhamento, conexões soltas e falhas de rolamentos. A parte mecânica do equipamento como os rolamentos (3), eixo (7), massa excêntrica (6) e os mancais (4) já tinham sido selecionados anteriormente a esta pesquisa (Figura 14). Assim sendo, o estudante focou seu trabalho no projeto e seleção de sensores de medições, como os acelerômetros, motor elétrico, inversor de frequência e um sistema e software que fazem o controle e monitoramento do aparelho de medição de vibração. Para isso, Nagarjuna (2017) converteu as informações de seu sistema massa-mola-amortecedor em um circuito elétrico e, dessa forma, obteve correspondência entre os parâmetros mecânicos e elétricos. Conforme o projeto conceitual desenvolvido pelo estudante, os sensores seriam posicionados nos rolamentos e fariam a medição da vibração. A massa excêntrica pode ser posicionada no eixo e, a partir dele, a vibração é originada e transmitida ao restante do sistema. Ainda, seria possível a alteração da velocidade do motor elétrico, variando a frequência de rotação da massa e, em consequência, a força centrífuga iria variar.

Figura 14 - Equipamento de medição de vibração



Fonte: Adaptado de Nagarjuna (2017).

2.5 Chaves seccionadoras

Visto que este trabalho também aborda o mecanismo de fixação do motovibrador, o presente tópico apresenta um estudo mais detalhado sobre o local onde o equipamento pode ser fixado e aplicado, ou seja, as chaves seccionadoras de alta tensão BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV e algumas normas que se referem a elas.

2.5.1 Definições sobre os seccionadores

De acordo com a norma brasileira (NBR) 6935 (1985), um seccionador ou chave é um equipamento de manobra que permite ou não passagem de corrente elétrica. Estes dispositivos também são capazes de conduzir correntes, ou seja, o fluxo de energia elétrica ocorre quando há o contato entre duas ou mais peças condutoras de uma chave e há o isolamento quando estas não estão mais em contato.

Há vários tipos construtivos de seccionadores que podem ser encontrados no mercado. Eles são classificados em duas categorias de acordo com o movimento do contato móvel. O seccionador de operação lateral é caracterizado pelo deslocamento paralelo do contato móvel em relação ao plano da base e o seccionador de operação vertical apresenta o deslocamento longitudinal normal do contato móvel em relação ao plano da base. As duas categorias ainda são subdivididas conforme descrito abaixo (NBR 6935, 1985).

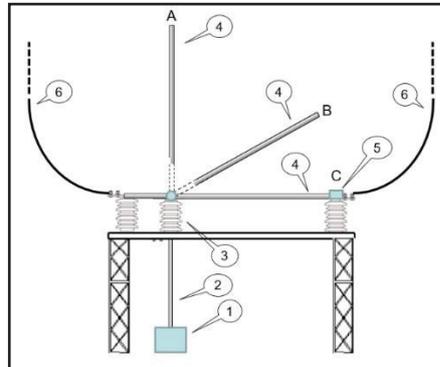
- Seccionador de operação lateral: Seccionador de abertura lateral (AL), abertura central (AC) e dupla abertura (DA).

- Seccionador de operação vertical: Seccionador de abertura vertical (AV), vertical reverso (VR), faca (FC), basculante (BC), semi-basculante (SB), pantográfico (PG), semi-pantográfico (SV e SH), chave de terra (TE) e aterramento rápido (AR).

A chave seccionadora BMKU-40A é classificada como seccionador de abertura vertical reverso e a Lorenzetti EV 242 kV como seccionador de abertura vertical. Esta última é mais comumente utilizada.

Na Figura 15 é apresentado um seccionador AV cujo motor de acionamento (1) gira o eixo de comando (2) e, por consequência, o isolador (3) também gira. A rotação do isolador aciona um mecanismo interno e faz com que a haste móvel (4) suba ou desça. Além disso, a chave seccionadora está representada em três posições. Na posição (A), a chave se encontra aberta e não há fluxo de energia elétrica. Na posição (B), a chave está em movimento e não há fluxo de energia elétrica. Na posição (C), a chave está fechada, ou seja, o contato fixo (5) está completamente em contato com a haste móvel, e, dessa forma, a corrente elétrica flui através dos condutores (6) (WERNECK; ALLIL, 2019).

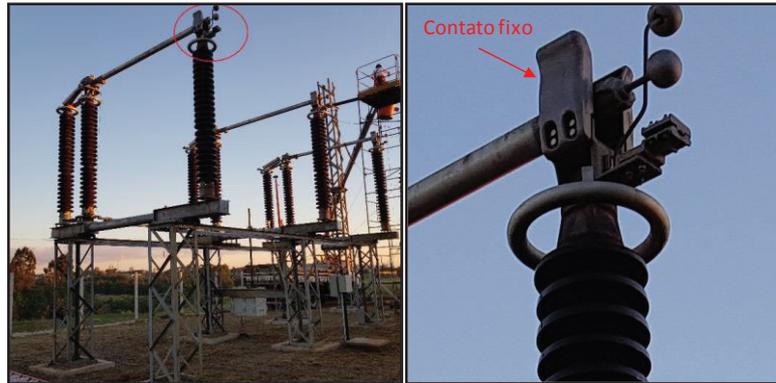
Figura 15 - Componentes e funcionamento do seccionador de abertura vertical



Fonte: Adaptado de Werneck e Allil (2019).

A chave seccionadora de abertura vertical representada na Figura 16 faz parte da bancada de testes da UPF em parceria com a CEEE e, à direita, é possível observar o contato fixo mais detalhadamente.

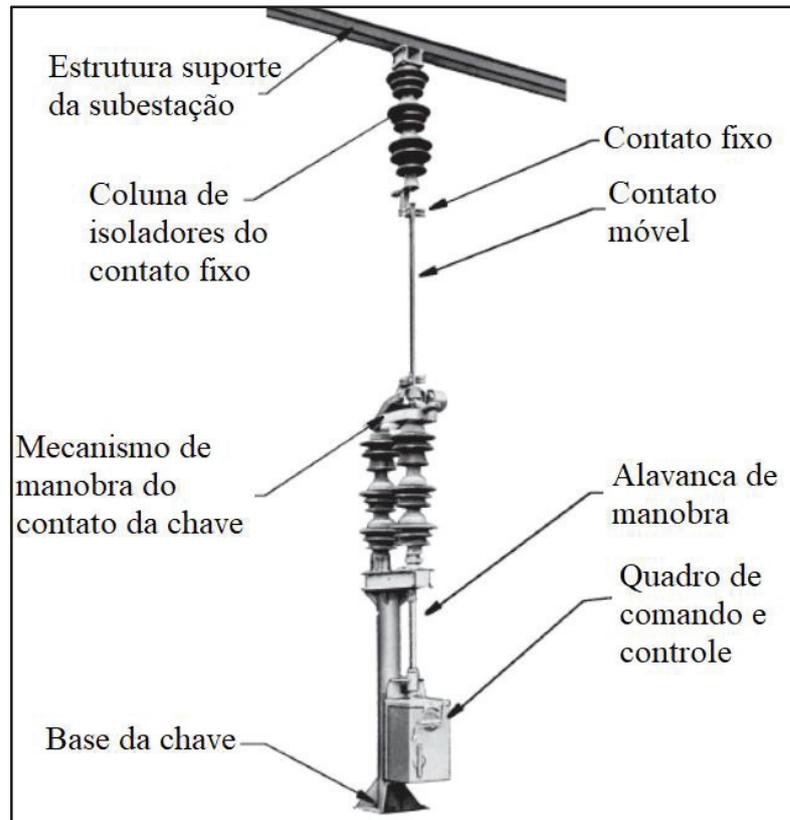
Figura 16 - Chave seccionadora de abertura vertical e o contato fixo em destaque



Fonte: o autor.

De outra forma, o seccionador VR é constituído pela base da chave, quadro de comando e controle, alavanca de manobra, coluna de isoladores, mecanismo de manobra do contato da chave, contato móvel, contato fixo e estrutura suporte da subestação apresentado na Figura 17. Através da alavanca de manobra, o mecanismo de manobra do contato da chave é acionado e a haste ou contato móvel é movimentado lateralmente, realizando a manobra de abertura ou fechamento (MAMEDE FILHO, 2019).

Figura 17 - Componentes do seccionador de abertura vertical reverso



Fonte: Adaptado de Filho (2019).

3 DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO

De acordo com Policena (2016), a metodologia de Pahl et al. (2005) “[...] apresenta uma abordagem mais compacta no desenvolvimento de produtos, é focada na área de engenharia e sistemas técnicos, prevalecendo as características de projeto mecânico sobre o gerenciamento do produto e o *design*”.

Haja vista a importância do método a ser empregado no projeto, o método de Pahl et al. (2005) é adotado no presente trabalho, em virtude da contribuição da metodologia no desenvolvimento conceitual do equipamento proposto.

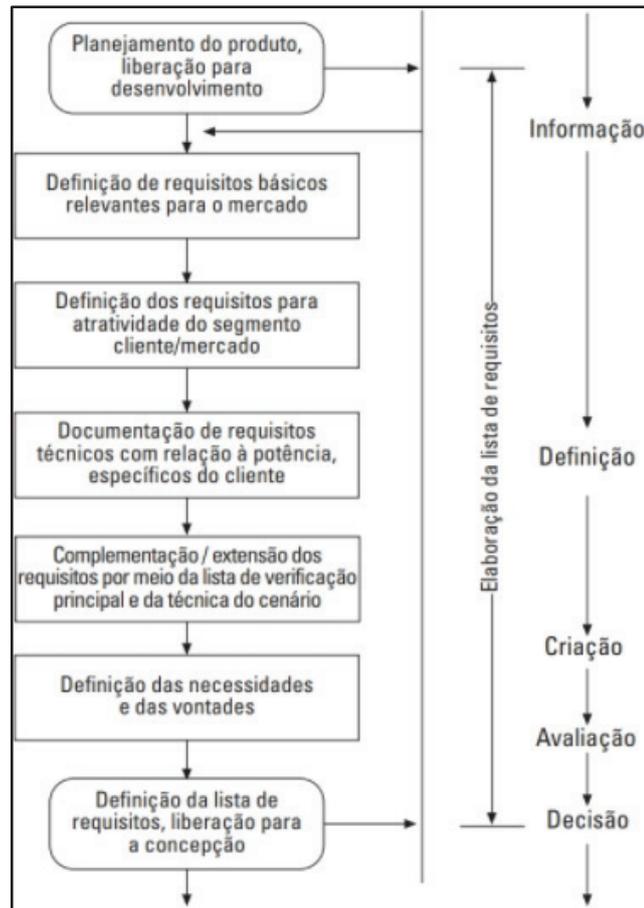
3.1 Metodologia aplicada

Inicialmente, a metodologia de projeto de Pahl et al. (2005) sugere a elaboração da lista de requisitos que irá auxiliar no desenvolvimento do produto em todas as suas fases. Cada etapa do projeto será discutida nos tópicos seguintes mais detalhadamente.

3.2 Elaboração da lista de requisitos

A lista de requisitos pode ser elaborada conforme metodologia descrita por Pahl et al. (2005). As etapas para a elaboração da lista de requisitos estão descritas no Fluxograma 2. A metodologia foi utilizada na definição da lista de requisitos para o desenvolvimento do presente projeto.

Fluxograma 2 - Etapas para a elaboração da lista de requisitos



Fonte: Pahl et al. (2005).

Inicialmente, um estudo é feito sobre o problema de projeto, ou seja, sobre o contexto que o produto será inserido. A problemática da pesquisa é descrita no capítulo 1 e as suas delimitações conforme as necessidades são explanadas abaixo. Depois desta contextualização, é possível definir as necessidades essenciais, ou seja, a solução obrigatoriamente deve atender a estas necessidades, e as vontades que podem ser adotadas na medida do possível. Estas características devem ser especificadas de forma quantitativa ou qualitativa.

As necessidades essenciais, também consideradas como fatores limitantes do produto, e as vontades ou desejos foram determinados de acordo com os trabalhos iniciais de marketing feitos pelos pesquisadores da UPF juntamente com a empresa CEEE. Os requisitos considerados similares ou repetidos foram eliminados para que, de modo simplificado, seja obtido apenas os mais relevantes para o projeto. Por fim, a lista de requisitos pode ser constituída de forma que os mesmos são classificados em necessidades ou vontades (desejo

ou exigência) e, ainda, subdividida conforme o desdobramento da linha mestra (**Quadro 2****Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

A linha mestra apresenta duas colunas, as características principais do projeto são descritas na primeira coluna e as definições das mesmas para o projeto proposto são feitas na segunda coluna (PAHL et al., 2005).

Quadro 2 - Linha mestra com lista de características principais

Característica principal	Definições
Geometria	As medidas máximas (comprimento, largura e altura) podem ser definidas de forma que facilite a operação do equipamento. A montagem do motovibrador no suporte de fixação da estrutura metálica dos seccionadores deve ser feita de forma modular.
Cinemática	O equipamento deve excitar a estrutura metálica dos seccionadores numa única direção, ou seja, as massas excêntricas devem girar em sentidos opostos de modo que as forças centrífugas irão se somar ou se anular.
Forças	A força centrífuga e o peso são as principais forças e reações existentes no equipamento e nos suportes de fixação do mesmo.
Energia	A fonte de energia é elétrica e é transformada em energia mecânica por meio do motor elétrico.
Material	O aço carbono é o principal material e deve possuir pintura superficial para a proteção do material (IP 66).
Sinal	A frequência de trabalho é definida por meio de um inversor de frequência.
Segurança	O equipamento deve ser seguro para os operadores conforme NR-12.
Ergonomia	O peso do motovibrador deve ser baixo, possibilitando a movimentação do equipamento por operadores caso necessário.
Produção	Algumas tolerâncias deverão ser definidas posteriormente na etapa de Anteprojeto (PAHL et al., 2005), como por exemplo a rugosidade do eixo onde as massas excêntricas irão girar.
Controle de qualidade	A eficiência do equipamento deve ser mensurada.
Montagem	O motovibrador deve ser de fácil montagem no suporte de fixação dos seccionadores.
Operação	O equipamento deve originar um ruído baixo e ser de fácil operação.
Manutenção	Foco na manutenção preventiva. Realizar inspeção visual no equipamento (componentes) e definir a periodicidade conforme a necessidade.
Custos	Definição dos custos conforme disposição do investimento da empresa CEEE.

Fonte: o autor.

A definição da linha mestra auxilia na elaboração da lista de requisitos (Quadro 3), ou seja, a partir da linha mestra é possível visualizar os requisitos de forma mais clara e detalhada, assim, a lista de requisitos pode ser desenvolvida e, dessa forma, o projetista tem acesso às informações com mais detalhes (PAHL et al., 2005).

A lista de requisitos (Quadro 3) contém três colunas. Seguindo a sequência e a definição da linha mestra, as características principais são descritas na primeira coluna, os requisitos são classificados na segunda coluna como exigidos (letra E) ou desejados (letra D) e são descritos na terceira coluna.

Quadro 3 - Lista de requisitos para o motovibrador e suportes de fixação

Lista de requisitos para o motovibrador e suportes de fixação		
Característica principal	E/D	Requisitos
Geometria	D	Comprimento ≤ 550 mm;
	D	Largura ≤ 550 mm;
	D	Altura ≤ 550 mm.
Cinemática	E	A vibração deve ser direcionada em apenas uma direção, ou seja, as massas excêntricas devem girar em sentidos opostos de modo que as forças centrífugas irão se somar ou se anular.
	E	O motovibrador deve ser montado no suporte de fixação da estrutura metálica do seccionador.
	E	O tempo de operação varia conforme a necessidade de aplicação.
Forças	D	Massa máxima do motovibrador ≤ 10 kg.
	E	Força centrífuga entre 500 N e 2000 N.
	E	Frequência de aplicação da força centrífuga até 25 Hz.
	D	A direção da força centrífuga deve ser igual a de fechamento dos contatos principais do seccionador.
Energia	E	Elétrica.
Material	E	Aço carbono com pintura superficial.
Sinal	E	Variar a frequência de vibração por meio de um inversor de frequência.
Segurança	E	Atender à norma NR-12.
Ergonomia	D	Atender massa máxima do motovibrador.
Produção	D	Considerar tolerâncias e peças padronizadas.
Controle de qualidade	E	Realizar a medição de acelerações e deslocamentos nos componentes do motovibrador.
Montagem	D	Ser de fácil montagem no suporte de fixação do equipamento.
Operação	D	Apresentar baixo ruído e ser fácil de operar.
Manutenção	D	Montagem e desmontagem do motovibrador de forma simplificada.
Custos	D	Ser um conceito de baixo custo.

Fonte: o autor.

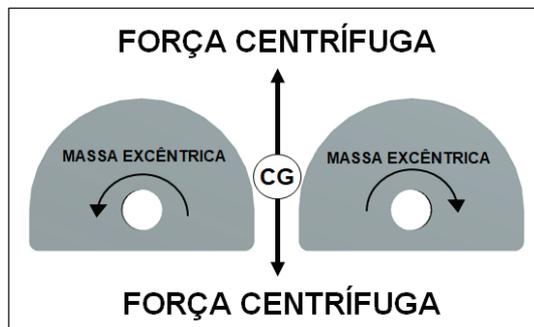
A relevância de cada requisito descrito no Quadro 3 é justificada a seguir.

Motovibrador e suportes de fixação	
Geometria	<p>O equipamento será utilizado exclusivamente em chaves seccionadoras de alta tensão (BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV), ou seja, as dimensões do motovibrador não podem ser maiores que as dimensões da área onde será fixado e montado como aquelas apresentadas na lista anterior.</p> <p>O objetivo do produto é excitar a estrutura metálica para que a haste da chave seccionadora vibre e seja possível concluir o fechamento dos contatos principais. Para que isto aconteça, o motovibrador deve ser eficiente e transmitir a vibração adequadamente. Ele deve ser posicionado de modo que a vibração seja transmitida de forma suficiente e que seja evitado ao máximo a perda da energia vibratória. Assim sendo, é recomendado que o equipamento seja montado em seu centro de gravidade (CG) (Figura 18). Caso contrário, parte da vibração é transmitida ao próprio equipamento, acarretando em fadiga dos componentes e diminuindo a possibilidade de fechamento dos contatos principais. A montagem do equipamento em seu centro de gravidade tem como consequência o aumento de sua eficiência e, dessa forma, o sistema vibratório terá menos perdas de energia vibratória.</p>
Cinemática	<p>A vibração deve ser direcionada em apenas uma direção para auxiliar no fechamento da chave seccionadora e é considerada como função principal da máquina desenvolvida neste trabalho. Assim sendo, os componentes do motovibrador devem ser projetados de forma que esta função seja executada satisfatoriamente.</p>
Forças	<p>A forças centrífuga que é originada partir da rotação das massas excêntricas e, além disso, propriedades como rigidez, propriedades elásticas e as deformações devem ser avaliadas visto que o fator de amortecimento é influenciado por estas propriedades e está diretamente ligado à aplicação do equipamento. O desbalanceamento rotativo é apresentado na lista com base no capítulo 4. O sistema de fixação deve ser desenvolvido para suportar o peso do motovibrador e transmitir vibração. Além disso, o produto deve ser instalado haja vista as recomendações da empresa e as normas brasileiras, como por exemplo a NBR 60694 (2006) que segundo ela, qualquer equipamento auxiliar não deve oferecer risco de contato direto com as partes de alta tensão.</p>
Energia	<p>Como o equipamento será implementado em subestações de energia, a fonte de energia mais eficiente seria por meio da energia elétrica.</p>
Material	<p>A princípio, o aço carbono atenderia às propriedades necessárias à aplicação. O equipamento será utilizado no ambiente externo e, portanto, torna-se necessário a pintura superficial e algum dispositivo que venha a auxiliar na proteção do equipamento (IP 66) para evitar com que o mesmo seja danificado. Dessa forma, o motovibrador deve ser protegido contra objetos sólidos (poeira) e jatos potentes de água.</p>
Sinal	<p>Variar a frequência de trabalho conforme à situação da chave seccionadora em relação ao atrito e corrosão presente nos contatos principais.</p>
Segurança	<p>A operação do equipamento será feita por pessoas e, conseqüentemente, deve ser caracterizado como seguro e atender à norma NR-12.</p>

Ergonomia	A operação do equipamento é realizada por pessoas e, portanto, ele deve ser leve para facilitar os procedimentos de transporte e montagem.
Produção	A padronização dos itens comerciais, como parafusos e das peças em geral, é almejada para que o equipamento se torne competitivo no mercado.
Controle de qualidade	Uma forma de mensurar a eficiência do equipamento vibratório seria realizar a medição de acelerações e deslocamentos dos componentes do motovibrador.
Montagem	O equipamento deve ter peças padronizadas e apresentar uma concepção que desempenhe sua função eficientemente. A padronização também vale para as furações no motovibrador. A montagem deve ser simples e abranger poucas peças. O mecanismo que irá fixar o motovibrador na estrutura deve ser simples e fácil de manusear. Dessa maneira, facilitará a utilização do equipamento pelo operador.
Operação	Tendo em vista que “[...] a maior parte dos ruídos irradiados por máquinas é gerada pela vibração de suas estruturas” (GERGES, 1992), em decorrência à exposição de pessoas no local, almeja-se um equipamento mais silencioso, ou seja, que apresente baixo nível de ruído. É importante que a montagem do motovibrador no suporte de fixação e na estrutura metálica da chave seccionadora ocorra de forma simplificada e eficiente para que a conclusão do fechamento dos contatos principais seja realizada.
Manutenção	Naturalmente, o equipamento irá necessitar de manutenção e cabe ao projetista selecionar os componentes de forma adequada, ou seja, aqueles que terão um bom desempenho para a aplicação proposta pelo trabalho.
Custos	Tendo em vista o alto custo para a substituição dos seccionadores por outro equipamento novo, o motovibrador proposto deve ser simples e de baixo custo de fabricação, assim, tornando o produto uma opção favorável diante ao problema apresentado.

Muitas características não são possíveis de serem definidas e esclarecidas no início do projeto e, portanto, a definição das mesmas não se torna necessária visto que este fato pode atrasar a execução do projeto e a lista pode ser atualizada posteriormente, sendo utilizada como referência no decorrer do desenvolvimento da concepção do equipamento.

Figura 18 - Ideia elementar do estudo



Fonte: o autor.

3.3 Projeto conceitual

A definição da lista de requisitos apresentada no capítulo anterior é de suma importância para prosseguir com o desenvolvimento do conceito do equipamento, haja vista que o mesmo traz informações essenciais como os requisitos exigidos e desejados pelo equipamento proposto pela atual pesquisa. Essa fonte de dados serve como base para que o conceito seja entendido e ganhe forma ao final do trabalho.

Para um melhor entendimento sobre o conceito em desenvolvimento, é oportuno seguir a metodologia de Pahl et al. (2005). Dessa maneira, a presente seção é dividida em três partes, sendo elas: a abstração, elaboração da estrutura de funções e matriz morfológica.

3.3.1 Abstração

Na abstração, o núcleo da tarefa é definido a partir do questionamento sobre a raiz do objetivo e da intenção da proposta de melhoria. De forma abstrata, a partir da lista de requisitos, propõe-se formas de solução para o problema em questão. Para isso, a metodologia de Pahl et al. (2005) recomenda seguir cinco passos: suprimir as vontades, considerar os requisitos que afetam diretamente as funções, converter os dados quantitativos em qualitativos, ampliar o que foi percebido e formular o problema de forma neutra quanto à solução.

Assim sendo, aplicando os cinco passos recomendados pela metodologia, evitando a especificação da formulação da solução e realizando a análise de forma neutra, os resultados são definidos a seguir.

Resultados da 1ª e 2ª etapas:

- Ser utilizado nas chaves seccionadoras de alta tensão (BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV);
- Excitar a estrutura metálica do seccionador;
- Girar as massas excêntricas em sentidos opostos.

Resultado da 3ª etapa:

- Alternar a força centrífuga das massas excêntricas.

Resultado da 4ª etapa:

- Montar o equipamento num suporte de fixação em seu CG;
- Controlar o desbalanceamento rotativo das massas excêntricas;
- Atender à norma NR-12 e IP 66;
- Satisfazer o peso limite de operação.

Resultado da 5ª etapa:

- Gerar vibração unidirecional e excitar a estrutura metálica do seccionador, controlando a intensidade da força centrífuga criada e sendo operado de forma segura.

A partir da sequência de etapas desenvolvidas, a função global do equipamento proposto pode ser definida como: gerar vibração unidirecional, alternando a intensidade da força centrífuga originada, excitando a estrutura metálica do seccionador e sendo operado de forma segura. Assim sendo, a função global pode ser desdobrada por meio da elaboração da estrutura de funções.

3.3.2 Elaboração da estrutura de funções

A abstração tem como resultado a função global do equipamento e a mesma pode ser definida como: gerar vibração unidirecional, alternando a intensidade da força centrífuga originada, excitando a estrutura metálica do seccionador e sendo operado de forma segura.

Tendo em vista o objetivo de desdobrar a função global, a estrutura de funções (função global e subfunções) pode ser formulada por meio do núcleo da tarefa global. A partir da definição da função global, identifica-se a energia, os sinais e materiais necessários para que a mesma possa ser concretizada, ou seja, a inter-relação entre as variáveis de entrada e saída é definida e, assim, posteriormente possíveis soluções serão propostas por meio de um diagrama de blocos numa estrutura simples (PAHL et al., 2005).

As entradas e saídas do equipamento proposto são identificadas e exibidas no Quadro 4 de forma mais clara. Assim sendo, para que a função global seja executada, a variável de entrada de matéria é o próprio motovibrador, de energia é a energia elétrica e de sinal é o inversor de frequência. As variáveis de saída é o motovibrador que direciona a vibração (unidirecional), a energia mecânica é convertida em vibração e o sinal é obtido quando

confirmado a conclusão do fechamento dos contatos principais, assim, considerando que a função global é concluída, a frequência de rotação das massas pode ser reduzida a zero.

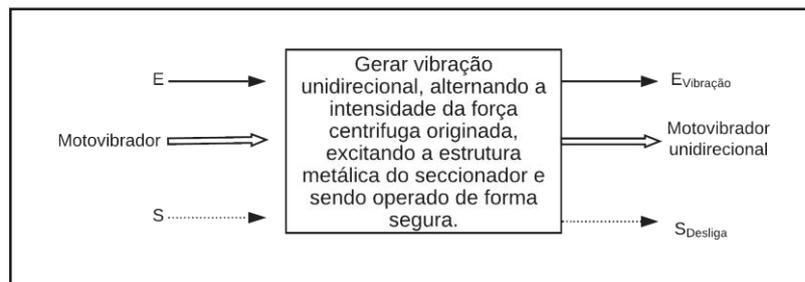
Quadro 4 - Entradas e saídas para a execução da função global

Análise funcional	Entradas	Saídas
Matéria	Motovibrador	Motovibrador unidirecional
Energia	Energia elétrica	Energia de vibração
Sinal	Sinal do inversor	Sinal para desligar.

Fonte: o autor.

Tendo como base o Quadro 4, a função global é descrita no Fluxograma 3 e, dessa forma, é possível prosseguir com o desdobramento da função global em subfunções a partir daquelas consideradas principais.

Fluxograma 3 - Função global



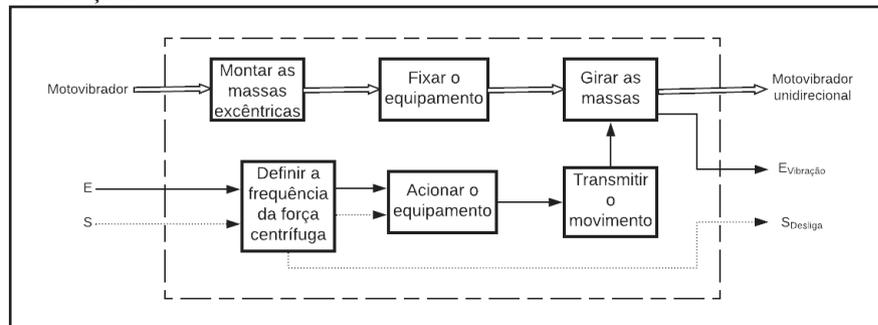
Fonte: o autor.

Considerando a existência de motovibradores, a compreensão sobre os elementos conhecidos do equipamento auxilia na construção da estrutura de função do produto adaptativo e, além disso, quando somado à função global, torna-se possível a otimização e a obtenção de outras soluções para o equipamento proposto. A lista de requisitos é a base para a identificação da relação entre as soluções e, de forma gradativa, as mesmas são especificadas com mais detalhes. A simples listagem das funções identificadas, mesmo sem vínculos, pode servir como ponto de partida para a identificação da estrutura de função (PAHL et al., 2005).

Nesse primeiro momento, a função global é desmembrada em subfunções, tendo em vista a lista de requisitos e o estado da arte sobre os motovibradores. Sendo assim, a estrutura de funcionamento é definida (Fluxograma 4) e as subfunções essenciais para o cumprimento da função global são as seguintes: montar as massas excêntricas, fixar o equipamento, definir

a frequência da força centrífuga, acionar o equipamento, transmitir o movimento e girar as massas.

Fluxograma 4 - Subfunções



Fonte: o autor.

De acordo com a função global e o estado da arte, já é possível presumir alguns pontos sobre a rotação das massas e o princípio físico que o equipamento deve cumprir (descrito no capítulo, força centrífuga). Uma fonte de potência e movimento deve ser aplicada (motor elétrico), outros componentes podem auxiliar no mecanismo proposto, como por exemplo eixos, rolamentos, engrenagens e correias. Ainda, um meio, como por exemplo um suporte ou uma base de fixação irá auxiliar na execução da função global.

A estrutura de funcionamento possibilita um entendimento sobre o equipamento proposto e as subfunções são descritas com maiores detalhes a seguir. Funções complementares às subfunções são descritas logo abaixo de cada subfunção para que, posteriormente, seja feito a identificação das soluções na matriz morfológica.

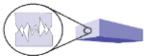
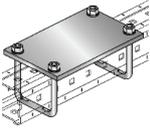
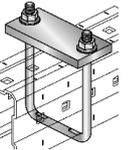
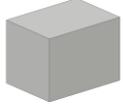
- 1) Montar as massas excêntricas: as massas devem ser posicionadas e montadas em um eixo, impossibilitando o movimento relativo entre o mesmo e as massas, ou seja, as massas excêntricas irão girar juntamente com o eixo e as mesmas não podem deslizar e sair da posição. O projeto deve ter em vista algum tipo de fixação ou encaixe entre as massas excêntricas e o eixo, como por exemplo uma chaveta ou ainda a rugosidade do eixo pode auxiliar no cumprimento desta subfunção.
- 2) Fixar o equipamento: o motovibrador será posicionado na estrutura metálica do seccionador e, por esse motivo, o mesmo deve apresentar uma maneira para a fixação no local. O dispositivo de fixação pode ser separado ou fazer parte da estrutura do equipamento, visando a facilidade de aplicação pelo operador, o peso e as dimensões geométricas desejadas.

- Cumprir à norma NR-12 e IP 66: a proteção do equipamento pode ser projetada de diversas formas, desde que as normas NR-12 e IP 66 sejam cumpridas.
 - Ser resistente: o dispositivo juntamente com o equipamento deve apresentar resistência adequada, suportar o peso do mesmo e transmitir a vibração ao seccionador. Portanto, os componentes devem satisfazer à resistência requisitada.
- 3) Acionar o dispositivo: o acionamento da parte mecânica do equipamento será feito por meio da energia elétrica.
- 4) Alternar a intensidade da força centrífuga: de acordo com a Equação (6), o desbalanceamento rotativo pode variar se a massa, excentricidade ou frequência for alterada.
- Variar a quantidade de massas: projetar a quantidade de massas necessárias, podendo variar a quantidade, aumentando ou diminuindo a mesma e variando a força centrífuga.
 - Variar a excentricidade: projetar a distância do eixo de rotação e do centro de gravidade da massa, podendo variar, aumentando ou diminuindo a mesma e variando a força centrífuga.
 - Variar a frequência: a frequência de rotação pode variar, aumentando ou diminuindo a mesma e variando a força centrífuga.
- 5) Transmitir o movimento: torna-se necessário a aplicação de pares de massas excêntricas para que o direcionamento da energia de vibração seja feito. Dessa maneira, as massas devem apresentar o movimento sincronizado entre elas para que o equipamento seja mais eficiente.
- Permitir a rotação do eixo: o atrito presente no movimento de sincronização entre as massas dificulta a rotação. Tendo como base o estado da arte, avalia-se uma maneira para facilitar este movimento.

3.3.3 Matriz morfológica

Inicialmente foi elaborada a matriz morfológica (Quadro 5) que apresenta a estrutura funcional do produto, ou seja, a função principal ou função global do equipamento é identificada e desdobrada em níveis de modo que seja possível propor alternativas de solução para cada função descrita. As subfunções do produto são desdobradas a partir da função global. Elas estão distribuídas em alternativas de solução nas quatro colunas (A, B, C e D) e em nove linhas (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9).

Quadro 5 - Matriz morfológica

Subfunções		Alternativas de solução			
		A	B	C	D
1	Montar as massas excêntricas	 Chaveta entre as massas e o eixo	 Rugosidade entre as massas e o eixo	 Parafuso e porca	
2	Fixar o equipamento			 Estrutura modular	
3	Cumprir a norma NR12 e IP66	 Proteção sob medida	 Proteção em caixa retangular		
4	Acionar o dispositivo	Motor elétrico			
5	Variar a quantidade de massas	 Um par de massas	Dois pares de massas	Três pares de massas	Quatro pares de massas
6	Variar a excentricidade				
7	Variar a frequência	Inversor de frequência			
8	Transmitir o movimento	 Engrenagens de dentes retos	 Engrenagens helicoidais	 Correia dentada e polias	 Coroa e pinhão
9	Permitir a rotação do eixo	 Mancal hidrodinâmico	 Rolamento de esferas	 Rolamento cônico	 Buchsa

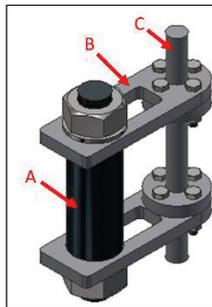
Fonte: o autor.

As soluções propostas para cada subfunção na matriz morfológica são explicadas a seguir:

- Montar as massas excêntricas (1): A montagem das massas pode ser feita por meio de uma das opções propostas ou da combinação entre elas. As massas podem ser posicionadas no eixo por meio de uma chaveta que restringe o movimento da mesma (A). Além disso, a rugosidade entre o eixo e as massas pode auxiliar na restrição de movimento delas, tornando o equipamento mais eficiente (B). Outra opção encontrada para a montagem das massas nos motovibradores atuais é a regulagem de aperto entre a massa e o eixo por meio de um parafuso (C).
- Fixar o equipamento na estrutura (2): Nesta função, a atenção é direcionada ao fato de que a estrutura na qual o equipamento será fixado não pode ser furada ou alterada devido às normas da empresa, além disso, os isoladores e qualquer outro objeto devem estar distanciados de forma que seja acessível e sem risco de contato direto com as partes de alta-tensão (NBR 60694, 2006). Portanto, o produto deve apresentar um sistema de fixação específico para este uso. Três opções são fornecidas como alternativas de solução. O motovibrador pode ser montado em uma chapa que é fixada por parafusos em U (A e B). Do mesmo modo, há a possibilidade de fabricar o suporte por meio de uma estrutura modular (C) ou também, é avaliada a combinação de todas as alternativas para obter a melhor solução.
- Cumprir à norma NR-12 e IP 66 (3): A proteção pode ser fabricada sob medida, acompanhando o design do produto conforme os motovibradores atuais (A), ou ainda, outra alternativa seria a fabricação de uma proteção em caixa retangular, ocupando um volume maior e, também, cumprindo às normas solicitadas (B). Apenas duas opções são exibidas tendo em vista que elas cumprem com excelência o proposto pela subfunção.
- Acionar o dispositivo (4): O acionamento mecânico do equipamento será feito por meio de um motor elétrico em virtude de sua eficiência e da disponibilidade de energia elétrica no local onde o equipamento será empregado (A).
- Variar a quantidade de massas (5): As opções propostas variam de acordo com a quantidade de pares de massas, permitindo o aumento ou a redução da quantidade de massas utilizadas na aplicação e alternando a força centrífuga.

- Variar a excentricidade (6): A opção (A) compreende um par de massas com a possibilidade de variação da distância entre elas e o centro de rotação, tornando possível o aumento ou a redução da força centrífuga, ou seja, conforme a Figura 19, a partir do rasgo da chapa superior e inferior (B), os parafusos são afrouxados, possibilitando que a massa (A) seja movida em relação ao eixo de rotação (C) e dessa forma, variando a excentricidade de acordo com a necessidade. A segunda opção advém do estado da arte, este tipo de massa excêntrica apresenta 4 furações, sendo que o furo central é para montar o eixo de rotação e os demais são para posicionar mais massas, alterando a excentricidade e a massa total.

Figura 19 - Massa com regulagem de posição



Fonte: o autor.

- Variar a frequência (7): De acordo com o estado da arte do motovibrador, o inversor de frequência pode ser aplicado para variar a velocidade de rotação do motor de forma eficiente, permitindo ao operador variar a frequência de rotação das massas excêntricas e, por consequência, a força centrífuga.
- Transmitir o movimento (8): A transmissão de movimento pode ser feita de diversas maneiras e quatro delas foram selecionadas: por engrenagens de dentes retos (A), engrenagens helicoidais (B), correia dentada (C), coroa e pinhão (D).
- Permitir a rotação do eixo (9): O eixo de transmissão deve ser acoplado em algum tipo de mancal para que a rotação seja possível. Como alternativas, posso citar o mancal hidrodinâmico (A), rolamento de esferas (B), rolamento cônico (C) e a bucha (D).

A partir da matriz morfológica, a lista de avaliação das soluções é elaborada conforme o Quadro 6. As letras L e C se referem, respectivamente, a linha e coluna da matriz morfológica, sendo acompanhada por um número que a identifica conforme a sequência mostrada. Por meio desta lista, cada alternativa de solução é avaliada, considerando as condições propostas, ou seja, se a opção atende à lista de requisitos, se é implantada facilmente e/ou realizável em princípio. Caso a alternativa de solução não atenda às exigências determinadas, ela recebe um sinal negativo (-) e se atender, recebe um sinal positivo (+). O sinal de interrogação (?) caracteriza a opção que precisa de mais informações para ser avaliada. A opção que não apresentar nenhum sinal negativo segue para a próxima fase de avaliação.

Quadro 6 - Lista de avaliação das soluções

Lista de avaliação das soluções						Pág.: 1	
Projeto: Motovibrador unidirecional					Decidir		
Subfunções	Lista de soluções	Simbologia dos critérios de avaliação			Simbologia:		
		(+) Sim			(+) Desenvolver solução		
		(-) Não			(-) Excluir solução		
		(?) Informações insuficientes			(?) Reavaliar solução		
		Atende à lista de requisitos					Decisão
					É implantada facilmente		
					É realizável em princípio		
				Observações			
1	L1CA	+	+	+		+	
1	L1CB	?	+	+	Rugosidade pode ser insuficiente, ocasionando o deslocamento da massa em relação ao eixo de rotação.	-	
1	L1CC	-	+	+	Aumenta a massa do equipamento.	-	
2	L2CA	+	+	+		+	
2	L2CB	-	+	+	Apresenta baixa resistência mecânica.	-	
2	L2CC	+	+	+		+	
3	L3CA	+	+	+		+	
3	L3CB	-	+	+	Aumenta a massa e o volume do equipamento.	-	
4	L4CA	+	+	+		+	
5	L5CA	+	+	+		+	
5	L5CB	+	+	+		+	
5	L5CC	+	+	+		+	
5	L5CD	+	-	+	Aumenta a massa e o volume do equipamento.	-	
6	L6CA	-	-	+	Aumenta o volume do equipamento.	-	
6	L6CB	-	+	+	Apresenta menor influência na força centrífuga.	-	
7	L7CA	+	+	+		+	
8	L8CA	-	+	+	Produz muito ruído e exige lubrificação periódica.	-	
8	L8CB	-	+	+	Exige lubrificação periódica.	-	
8	L8CC	+	+	+		+	
8	L8CD	-	-	+	Exige lubrificação periódica.	-	
9	L9CA	-	-	+	Exige lubrificação periódica.	-	
9	L9CB	+	+	+		+	
9	L9CC	+	+	+		+	
9	L9CD	-	+	+	Exige lubrificação periódica.	-	

Fonte: o autor.

Continuando a metodologia, é recomendado fazer mais uma seleção. A lista de requisitos é utilizada como critério novamente. Assim sendo, as soluções são combinadas com outras soluções e pré-avaliadas. Dessa forma, nessa primeira etapa, as combinações ou variáveis que não atendem à lista são eliminadas e a **Quadro 7** referente a combinação das soluções é concluída.

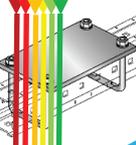
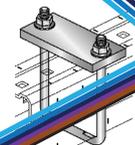
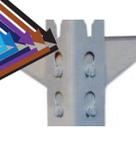
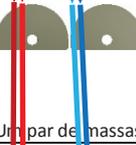
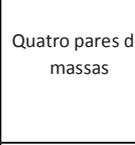
Quadro 7 - Combinação dos princípios de solução

Variantes	Concepções alternativas								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
V1	1A	2A	3A	4A	5A	-	7A	8C	9B
V2	1A	2A	3A	4A	5A	-	7A	8C	9C
V3	1A	2A	3A	4A	5B	-	7A	8C	9B
V4	1A	2A	3A	4A	5B	-	7A	8C	9C
V5	1A	2A	3A	4A	5C	-	7A	8C	9B
V6	1A	2A	3A	4A	5C	-	7A	8C	9C
V7	1A	2C	3A	4A	5A	-	7A	8C	9B
V8	1A	2C	3A	4A	5A	-	7A	8C	9C
V9	1A	2C	3A	4A	5B	-	7A	8C	9B
V10	1A	2C	3A	4A	5B	-	7A	8C	9C
V11	1A	2C	3A	4A	5C	-	7A	8C	9B
V12	1A	2C	3A	4A	5C	-	7A	8C	9C

Fonte: o autor.

As doze variantes de solução são mostradas no Quadro 8, representadas pela letra V, diferenciadas pela numeração em sequência e por cores. Depois, são avaliadas novamente por meio de uma nova lista de seleção. Conseqüentemente, o grande número de combinações é refinado e apenas as variantes mais relevantes diante a lista de requisitos serão selecionadas.

Quadro 8 - Seleção das alternativas de solução

Subfunções		Alternativas de solução			
		A	B	C	D
1	Montar as massas excêntricas	 Chaveita entre as massas e o eixo	 Rugosidade entre as massas	 Parafuso e porca	
2	Fixar o equipamento			 Estrutura modular	
3	Cumprir a norma NR12 e IP66	 Proteção por meio de motor	 Proteção em caixa retangular		
4	Accionar o dispositivo	 Motor elétrico			
5	Variar a quantidade de massas	 Um par de massas	 Dois pares de massas	 Três pares de massas	 Quatro pares de massas
6	Variar a excentricidade				
7	Variar a frequência	 Inversor de frequência			
8	Transmitir o movimento	 Engrenagens de dentes retos	 Engrenagens helicoidais	 Correa dentada e polias	 Coroa e pinhão
9	Permitir a rotação do eixo	 Mancal hidrodinâmico	 Rolamento de esferas	 Rolamento com rolos	 Buchsa

V1 V3 V5 V7 V9 V11 V2 V4 V6 V8 V10 V12

Fonte: o autor.

O Quadro 9 expõe a avaliação das variáveis apresentadas na seleção das alternativas de solução. No campo “Observações”, as principais influências sobre a decisão final da variável são apontadas brevemente e as mesmas são descritas abaixo com mais detalhes.

- Rolamento cônico: Conforme comentado no estado da arte, não é verificado a utilização do rolamento cônico nos motovibradores em aplicações que requerem uma força de vibração mais leve, assim, é necessário de mais informações para a aplicação do mesmo. Por outro lado, o rolamento de esferas é amplamente utilizado na aplicação estudada e, portanto, um componente mais seguro.
- Um par de massas: A aplicação de apenas um par de massas excêntricas representa maior facilidade para a operação do equipamento, tendo em vista que as massas precisam ser montadas no mesmo. Por outro lado, serão necessárias maiores massas excêntricas (maior volume e massa) para compensar desbalanceamento rotativo necessário. Dessa forma, as massas apresentariam um maior volume, acarretando em dimensões maiores quando comparadas àquelas descritas na lista de requisitos. Além disso, a força centrífuga seria constante em virtude do único par de massas.

Quadro 9 - Lista de seleção das variantes de solução

Lista de seleção das variantes de solução					Pág.: 1	
Projeto: Motovibrador unidirecional			Decidir			
Lista de variáveis	Simbologia dos critérios de avaliação			Simbologia:		
	(+) Sim			(+) Desenvolver solução		
	(-) Não			(-) Excluir solução		
	(?) Informações insuficientes			(?) Reavaliar solução		
	Atende à lista de requisitos					Decisão
	É implantada facilmente					
	É realizável em princípio					
Observações						
V1	-	+	+	Rolamento cônico	-	
V2	-	+	?	Rolamento cônico	-	
V3	+	+	+	Atende aos objetivos da pesquisa	+	
V4	+	+	?	Rolamento cônico	-	
V5	+	+	+	Atende aos objetivos da pesquisa	+	
V6	+	+	?	Rolamento cônico	-	
V7	-	+	+	Um par de massas	-	
V8	-	+	?	Um par de massas e Rolamento cônico	-	
V9	+	+	+	Atende aos objetivos da pesquisa	+	
V10	+	+	?	Rolamento cônico	-	
V11	+	+	+	Atende aos objetivos da pesquisa	+	
V12	+	+	?	Rolamento cônico	-	

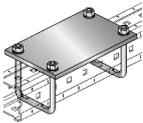
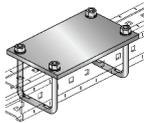
Fonte: o autor.

A partir da seleção feita, restam quatro variáveis e duas delas serão escolhidas na próxima etapa para apresentar o conceito do motovibrador unidirecional. As quatro variáveis V3, V5, V9 e V11 são exibidas no Quadro 10 e a descrição sobre elas é feita abaixo.

- V3: A variável número três abrange a chaveta, chapa de fixação, proteção sob medida, motor elétrico, dois pares de massas, inversor de frequência, correia dentada e rolamento de esferas;
- V5: A variável número cinco abrange a chaveta, chapa de fixação, proteção sob medida, motor elétrico, três pares de massas, inversor de frequência, correia dentada e rolamento de esferas;
- V9: A variável número nove abrange a chaveta, estrutura modular, proteção sob medida, motor elétrico, dois pares de massas, inversor de frequência, correia dentada e rolamento de esferas;

- V11: A variável número onze abrange a chaveta, estrutura modular, proteção sob medida, motor elétrico, três pares de massas, inversor de frequência, correia dentada e rolamento de esferas.

Quadro 10 - Variáveis V3, V5, V9 e V11

VARIÁVEIS SELECIONADAS			
V3	V5	V9	V11
 Chaveta entre as massas e o eixo	 Chaveta entre as massas e o eixo	 Chaveta entre as massas e o eixo	 Chaveta entre as massas e o eixo
		 Estrutura modular	 Estrutura modular
 Proteção sob medida	 Proteção sob medida	 Proteção sob medida	 Proteção sob medida
Motor elétrico	Motor elétrico	Motor elétrico	Motor elétrico
 Dois pares de massas	Três pares de massas	 Dois pares de massas	Três pares de massas
Inversor de frequência	Inversor de frequência	Inversor de frequência	Inversor de frequência
 Correia dentada e polias	 Correia dentada e polias	 Correia dentada e polias	 Correia dentada e polias
 Rolamento de esferas	 Rolamento de esferas	 Rolamento de esferas	 Rolamento de esferas

Fonte: o autor.

Tendo em vista as variáveis restantes, é fundamental selecionar as melhores concepções de acordo com a aplicação. O equipamento será utilizado em dois seccionadores de alta tensão (BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV) que apresentam geometrias distintas e frequências naturais particulares e, portanto, a avaliação das variáveis se torna individual para os mesmos. A seleção das melhores concepções é realizada na próxima etapa com foco nas diferenças entre as chaves seccionadoras: a geometria e a frequência natural. Dessa forma, será possível selecionar a variável mais adequada de acordo com as características requeridas.

4 SELEÇÃO DOS CONCEITOS DE ACORDO COM O TIPO DE SECCIONADOR

As quatro variáveis V3, V5, V9 e V11 apresentam apenas diferenças em suas alternativas de solução nas subfunções “fixar o equipamento” e “variar a quantidade de massas”. A seleção final visa escolher as concepções mais eficientes conforme o tipo de seccionador. Assim sendo, o capítulo quatro é dividido em duas abordagens: a discussão sobre a quantidade de massas excêntricas exigidas para cada seccionador e a posição ideal do suporte de fixação do motovibrador unidirecional de acordo com o tipo de chave seccionadora.

4.1 Quantidade de massas excêntricas exigidas para excitar os seccionadores BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV

A intensidade da força centrífuga está diretamente relacionada com a quantidade de massa. A excentricidade da massa, frequência de rotação e a quantidade da mesma definem a força centrífuga. Como as variáveis são diretamente proporcionais, a variação delas de forma positiva, irá variar o desbalanceamento rotativo da mesma forma. A partir do conteúdo explanado na seção 2.1.4 e os resultados obtidos por Rech (2019), podemos avaliar a quantidade de massa excêntricas exigidas para o motovibrador proposto.

No estudo de Rech (2019), o autor faz algumas considerações em relação à quantidade de massas a serem utilizadas de acordo com a aplicação. As chaves seccionadoras apresentam frequências naturais distintas e, portanto, as frequências de excitação também deverão ser diferentes. Além disso, a intensidade do desbalanceamento rotativo também será particular para cada chave seccionadora, visto que o tipo de abertura da chave seccionadora define a estrutura base, sendo algumas mais reforçadas, constituída por uma maior quantidade de perfis metálicos e outras menos. No presente estudo por exemplo, a Lorenzetti EV 242 kV apresenta uma estrutura metálica mais robusta e resistente à fadiga e, em contrapartida, a estrutura base da BMKU-40A é mais simples.

4.1.1 Quantidade de massas excêntricas para excitar o seccionador BMKU-40A

A estrutura metálica da BMKU-40A apresenta uma base robusta, porém, mais simples e de menor resistência quando comparada àquela da Lorenzetti EV 242 kV. Ainda, como a abertura deste tipo de seccionador ocorre de forma reversa, foi possível montar o motovibrador na mesma direção de fechamento. De acordo com as análises experimentais e numéricas de Rech (2019), as frequências naturais da chave seccionadora BMKU-40A que proporcionam a maior amplitude no eixo x (fechamento) são de 14,65 e 18,68 Hz.

Rech (2019) associa a quantidade de massas excêntricas com a frequência de excitação. Através das análises de tensões da chave, o autor recomenda que quando utilizados três e quatro pares de massas, a frequência natural da chave seccionadora BMKU-40A seja evitada, permanecendo afastada 0,3 Hz abaixo ou acima da frequência natural e, assim, evitando o aumento de tensões. Em alternativa, é sugerido que o seccionador BMKU-40A seja excitado na frequência natural quando utilizados dois pares de massas (Tabela 1). Na Tabela 1, as frequências naturais de interesse são somadas a tolerância de 0,3 Hz, resultando na frequência de excitação segundo as sugestões de Rech (2019) e as forças centrífugas são calculadas através da Equação (6).

Tabela 1 - Carregamento do motovibrador em relação à frequência de excitação na BMKU-40A

FREQUÊNCIA DE EXCITAÇÃO (Hz)	FREQUÊNCIA ANGULAR (rad/s)	QUANTIDADE DE PARES DE MASSAS			
		1	2	3	4
FORÇA CENTRIFUGA (N)					
14,95	93,93	303,41	606,81	910,22	1213,62
18,98	119,25	489,03	978,06	1467,08	1956,11

Fonte: Adaptado de Rech (2019).

4.1.2 Quantidade de massas excêntricas para excitar o seccionador Lorenzetti EV 242 kV

Diante à estrutura metálica mais robusta da chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV, Rech (2019) realizou análises experimentais e numéricas, buscando frequências de excitação que apresentassem um deslocamento significativo do suporte e da haste na direção de fechamento dos contatos principais.

De acordo com os resultados da dissertação de Rech (2019), a frequência de excitação ideal para auxiliar no fechamento do seccionador Lorenzetti EV 242 kV é de 16,80 Hz (Tabela 2). O autor ainda recomenda que sejam utilizados menos pares de massas excêntricas para evitar tensões elevadas e a fadiga da chave seccionadora. Na Tabela 2 são mostrados os resultados obtidos para a Lorenzetti.

Tabela 2 - Carregamento do motovibrador em relação à frequência de excitação na Lorenzetti EV 242 kV

FREQUÊNCIA DE EXCITAÇÃO (Hz)	FREQUÊNCIA ANGULAR (rad/s)	QUANTIDADE DE PARES DE MASSAS			
		1	2	3	4
16,80	105,56	383,16	766,32	1149,48	1532,57

Fonte: Adaptado de Rech (2019).

4.1.3 Quantidade ideal de massas excêntricas para os seccionadores BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV

Segundo as recomendações de Rech (2019), a BMKU-40A pode ser excitada com mais pares de massas excêntricas (maior força centrífuga) através de uma frequência de excitação diferente da frequência natural (afastada 0,3 Hz). Por outro lado, a Lorenzetti EV 242 kV necessita de um maior cuidado e é recomendado que seja evitado a aplicação de muitos pares de massas excêntricas devido à fadiga que pode ocorrer no equipamento.

A quantidade ideal de massas excêntricas depende do tipo de chave seccionadora, considerando que cada um exige tratativas particulares em relação ao objetivo do trabalho. Além disso, as sugestões feitas no estudo de Rech (2019) precisam ser acatadas para que o motovibrador seja eficiente em sua função.

Dessa forma, almejando um equipamento que atenda aos dois seccionadores, as massas excêntricas podem ser utilizadas conforme a aplicação. Tendo em vista que a BMKU-40A necessita de três pares de massas e a Lorenzetti EV 242 kV de dois pares, as mesmas podem ser diferenciadas por cores e, assim, o operador pode distinguir a aplicação das mesmas, evitando cargas elevadas para a Lorenzetti EV 242 kV e aplicando cargas adequadas para ambas as chaves (Figura 20).

Figura 20 - Massas excêntricas de acordo com a aplicação (Lorenzetti EV 242 kV à esquerda e BMKU-40A à direita)



Fonte: o autor.

4.2 Posição do suporte de fixação do motovibrador

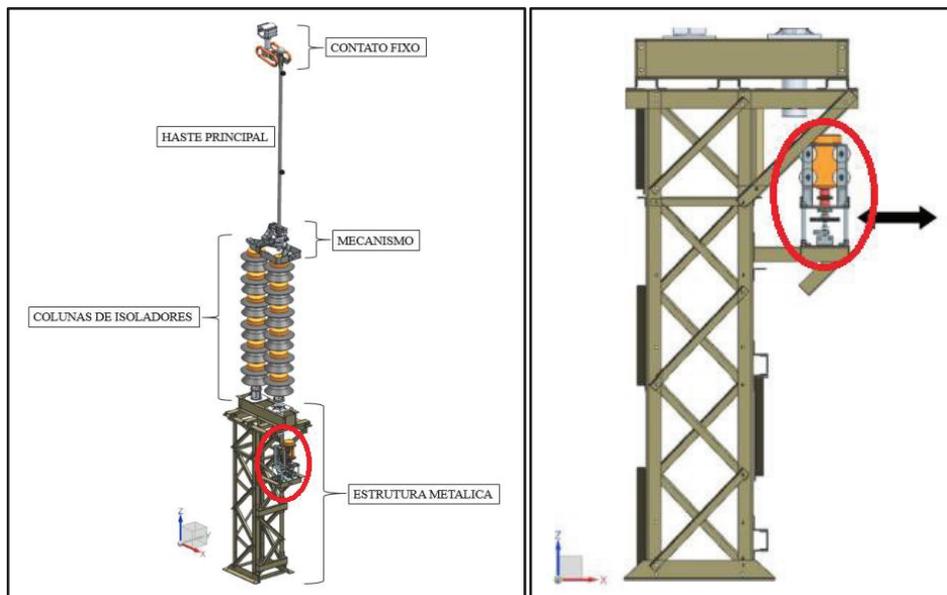
De acordo com o conteúdo explorado na seção 2.5, existem diversas formas construtivas de seccionadores que são classificados de acordo com o tipo de abertura e fechamento da chave. As chaves seccionadoras estudadas apresentam tipos de aberturas diferentes, a BMKU-40A é caracterizada pela abertura vertical reversa e a Lorenzetti EV 242 kV pela abertura vertical. O tipo de abertura do seccionador define a estrutura metálica requerida, ou seja, a estrutura metálica deve possuir resistência adequada para suportar os seccionadores e o movimento de abertura e fechamento.

Tendo em vista que o suporte de fixação do motovibrador deve ser projetado de acordo com a aplicação, o tipo de abertura de cada chave influencia na concepção do suporte e, portanto, é necessário que o local de aplicação seja abordado. No estudo realizado por Rech (2019), os componentes dos seccionadores BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV são medidos e modelados num software CAD.

4.2.1 Posição do suporte na estrutura metálica base do seccionador BMKU-40A

A chave seccionadora BMKU-40A é subdividida em estrutura metálica, colunas de isoladores, mecanismo, haste principal e contato fixo (Figura 21). Considerando a norma NBR 60694 (2006), o motovibrador deve ser aplicado na estrutura metálica, tendo em vista que dessa forma o equipamento não vai oferecer risco de contato direto com as partes de alta tensão.

Figura 21 - Modelo CAD da chave seccionadora BMKU-40A e da montagem do motovibrador



Fonte: Adaptado de Rech (2019).

As dimensões do motovibrador e de seu suporte de fixação devem ser compatíveis com o espaço físico da estrutura metálica, ou seja, a geometria e as dimensões do motovibrador e de seu suporte de fixação são importantes para a montagem do equipamento

no local. Além disso, o motovibrador foi montado em direção ao fechamento da chave, facilitando a manobra de fechamento (RECH, 2019).

Para fazer as análises experimentais, Rech (2019) realizou a montagem do motovibrador conforme sinalizado em vermelho na Figura 21. O equipamento foi montado na mesma direção de fechamento da chave seccionadora.

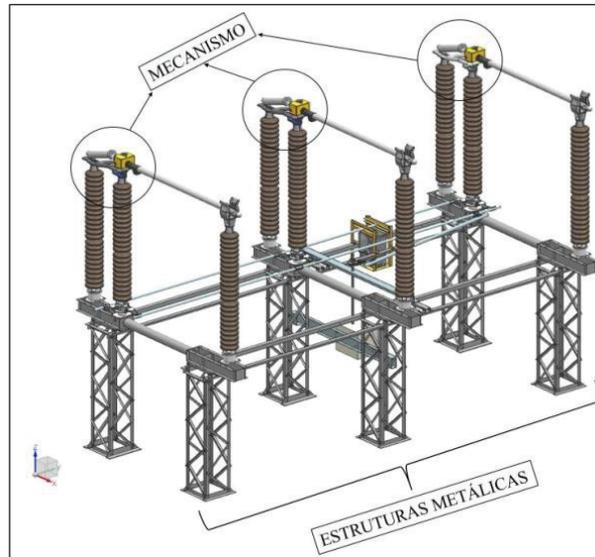
A concepção do motovibrador e de seu suporte de fixação depende das dimensões do local onde o mesmo será aplicado. As dimensões totais da chave seccionadora BMKU-40A estão descritas no ANEXO A.

A partir das imagens anteriores, é possível observar que a montagem do suporte de fixação deverá ser feita diretamente nas cantoneiras. O suporte de fixação deve restringir o movimento relativo entre as estruturas para apresentar a eficiência de transmissão de vibração desejada. Além disso, o local de montagem do equipamento precisa dispor de um espaço com dimensões adequadas à operação do mesmo.

4.2.2 Posição do suporte na estrutura metálica base do seccionador Lorenzetti EV 242 kV

A chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV é subdividida em estruturas metálicas, colunas de isoladores, mecanismos, hastes e contatos fixos (Figura 22). Em contraste com a abertura da BMKU-40A, considerada vertical reverso, a Lorenzetti EV 242 kV apresenta a abertura vertical. Essa diferença implica no posicionamento do motovibrador na chave seccionadora.

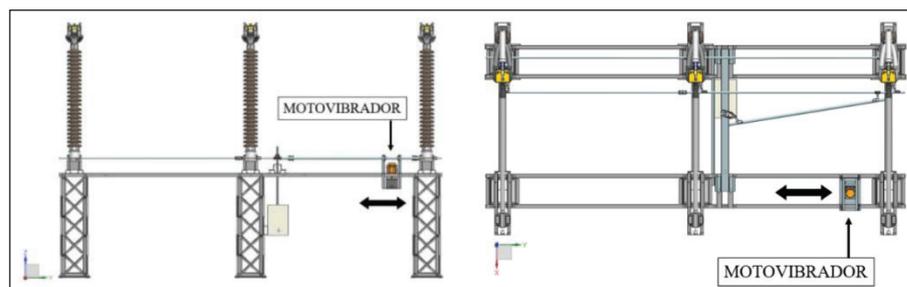
Figura 22 - Modelo CAD da chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV



Fonte: Rech (2019).

Como o fechamento deste seccionador ocorre na vertical, o ideal seria que o motovibrador fosse direcionador na vertical. Na pesquisa feita por Rech (2019), em virtude do motovibrador utilizado, a vibração foi direcionada na horizontal, perpendicular ao fechamento, obtendo a resposta de vibração na direção de fechamento do seccionador (Figura 23).

Figura 23 - Montagem do motovibrador na chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV



Fonte: Rech (2019).

Esta chave apresenta mais componentes e maior área quando comparada com a BMKU-40A, permitindo que a montagem do suporte de fixação do equipamento seja feita em diversas configurações. Assim como a chave seccionadora BMKU-40A, as dimensões totais do seccionador estão detalhadas no ANEXO A.

4.2.3 Posição ideal dos suportes de fixação do motovibrador para os seccionadores BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV

Os resultados obtidos no trabalho de Rech (2019) por meio da vibração forçada sob excitação harmônica estão diretamente relacionados com a posição do motovibrador. Dessa forma, tendo em vista que Rech (2019) obteve resultados relevantes para a concretização do projeto do motovibrador, as posições predefinidas por ele foram priorizadas, buscando direcionar a vibração conforme indicado nos capítulos anteriores.

Além disso, a facilidade de montagem do suporte de fixação e da aplicação do motovibrador deve ser considerada no projeto conceitual, visto que o operador estará diretamente em contato com o equipamento. Através destas considerações iniciais, para auxiliar na seleção do suporte de fixação, a mesma pode ser feita seguindo a metodologia de Pahl et al. (2005), ou seja, as variáveis mais significativas serão apresentadas e avaliadas de forma quantitativa.

5 AVALIAÇÃO E APRESENTAÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO DE ACORDO COM O TIPO DE CHAVE SECCIONADORA E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As variáveis V3 e V9 são referentes à chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV. Apresentam como princípio de vibração a utilização de até dois pares de massas excêntricas montadas em dois eixos que giram em direções opostas. A potência e a velocidade de rotação das massas são originadas de um motor elétrico e transmitidas por correias e polias. Além disso, a velocidade pode ser variada por meio de um inversor de frequência. Ainda, as alternativas de solução dispõem de mancais de rolamentos de esferas para permitir o movimento e a proteção do equipamento é sob medida. A única diferença entre as variáveis são os suportes de fixação do motovibrador, a variável três possui o suporte constituído de barra chata e parafusos em U, enquanto que a variável nove é composto por uma estrutura modular.

As alternativas de solução V5 e V11 são semelhantes às V3 e V9, porém particulares ao seccionador BMKU-40A, ou seja, as variáveis diferem em relação à quantidade de massas excêntricas que podem ser aplicadas que, neste caso, são de até três pares. A diferença entre as variáveis cinco e onze está nos suportes de fixação do motovibrador, sendo a primeira variável citada constituída de barra chata e parafusos em U e a segunda composta por uma estrutura modular.

5.1 Avaliação das alternativas de solução

Cada chave seccionadora analisada neste estudo apresenta duas variantes para serem avaliadas. Visto que os seccionadores apresentam diversas diferenças como já comentado anteriormente, a presente seção apresenta a avaliação das alternativas de solução conforme o tipo do seccionador.

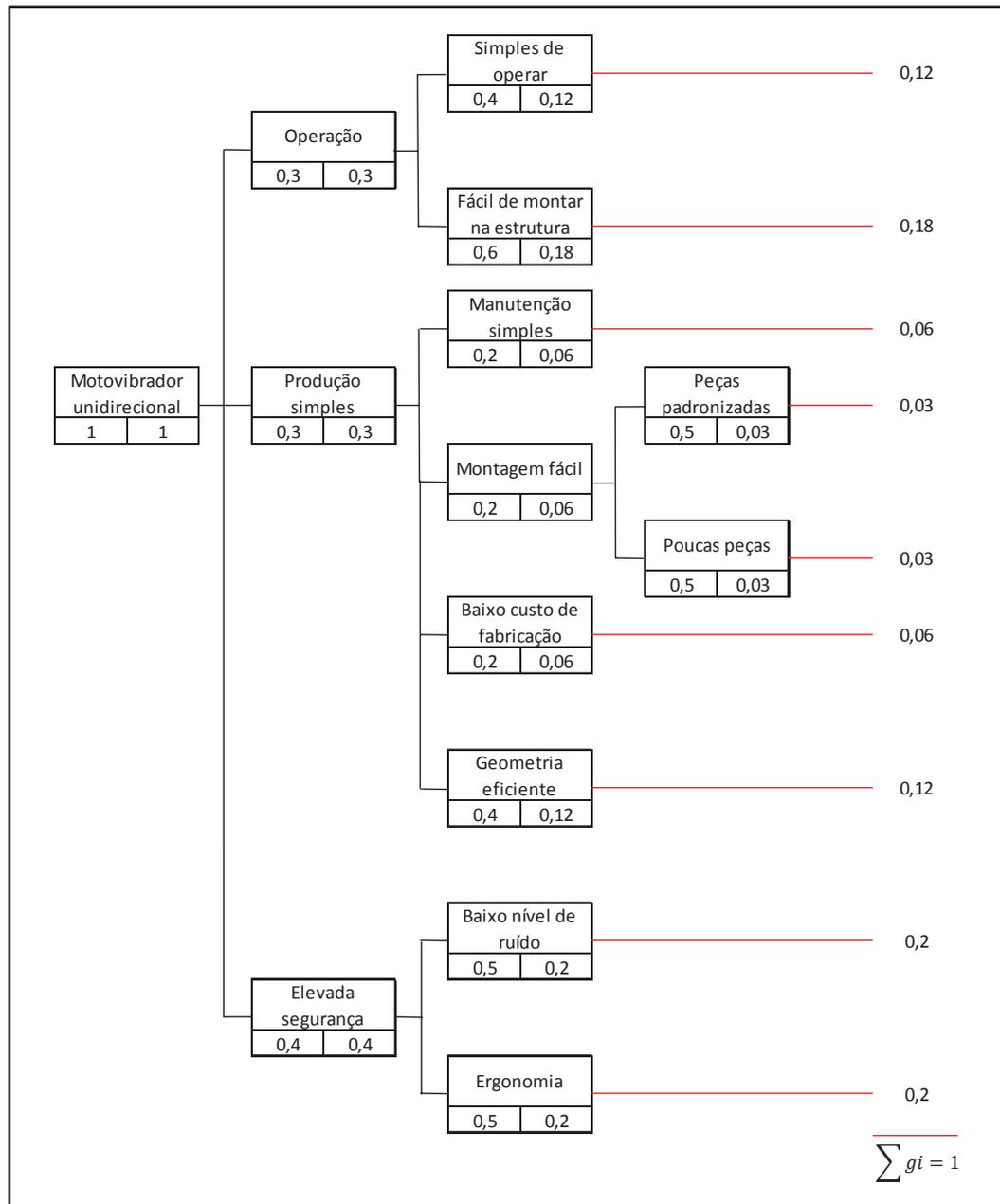
5.1.1 Avaliação das alternativas de solução conforme o tipo de chave seccionadora

A seguir, as alternativas V3, V5, V9 e V11 são avaliadas para verificar quais possuem melhor desempenho, ou seja, qual alternativa é mais eficiente em relação à Função Global. As alternativas também são analisadas, de maneira quantitativa, em relação à lista de requisitos.

O organograma de objetivos é elaborado para auxiliar na avaliação das duas opções. Nele, os objetivos são determinados com base na lista de requisitos e os fatores de ponderação (entre zero e um) de acordo com a relevância do objetivo para o projeto. Por fim, os fatores resultantes são somados e o resultado deve ser igual a um (PAHL et al., 2005).

O organograma estruturado em quatro níveis é apresentado na Figura 24. No primeiro nível consta o nome do equipamento e os níveis subsequentes são estruturados conforme a lista de requisitos. O peso de cada objetivo é obtido multiplicando o peso da primeira coluna do próprio objetivo pelo peso da segunda coluna do objetivo antecedente. Por exemplo, o peso do objetivo “Simples de operar” (segundo nível) é obtido multiplicando 0,4 por 0,3 do objetivo anterior “Operação” (terceiro nível). Contudo, o organograma aponta nove objetivos essenciais para o projeto do motovibrador, os quais são: simples de operar, fácil de montar na estrutura, manutenção simples, peças padronizadas, poucas peças, baixo custo de fabricação, geometria eficiente, baixo nível de ruído e ergonomia.

Figura 24 - Organograma de objetivos



Fonte: o autor.

Seguindo a metodologia, os objetivos são avaliados com a utilização do Quadro 11 que consta a aplicação do método VDI 2225. Este recurso é utilizado para pontuar os nove objetivos. Cada objetivo é pontuado de zero a quatro. O valor zero é dado ao objetivo insatisfatório e, em contrapartida, a solução ótima recebe quatro pontos (PAHL et al., 2005).

Quadro 11 - Orientação para avaliação dos objetivos

Escala de valores		Magnitude dos objetivos								
Análise de valor Pontos	VDI 2225 Pontos	Simple de operar	Fácil de montar na estrutura	Manutenção simples	Peças padronizadas	Poucas peças	Baixo custo de fabricação	Geometria eficiente	Baixo nível de ruído	Ergonomia
1	0	Muito difícil	Muito difícil	Muito difícil	Poquíssimas	Excessivas	Muito alto	Muito pouco eficiente	Muito alto	Alto risco ergonômico
2										
3	1	Difícil	Difícil	Difícil	Poucas	Muitas	Alto	Ineficiente	Alto	Prejudicial
4										
5	2	Razoável	Razoável	Razoável	Regular	Regular	Normal	Regular	Normal	Adequado
6										
7	3	Fácil	Fácil	Simples	Considerável	Poucas	Baixo	Eficiente	Baixo	Ergonômico
8										
9	4	Muito fácil	Muito fácil	Muito simples	Abundante	Poquíssimas	Muito baixo	Muito eficiente	Muito baixo	Muito ergonômico
10										

Fonte: o autor.

A partir dos parâmetros definidos anteriormente, é possível realizar a avaliação final das quatro alternativas por meio da Quadro 12. As quatro alternativas são avaliadas em conjunto visto que V3 e V5 apresentam as mesmas alternativas de solução, assim como as variáveis V9 e V11. Na coluna critérios de avaliação são apresentados os nove objetivos do produto e os correspondentes fatores determinados segundo o organograma de objetivos. Na coluna das alternativas, as características (característica e_{i1} e característica e_{i2}) de cada alternativa são classificadas em relação aos objetivos e pontuadas (valor W_{i1} e valor W_{i2}) de acordo com a Quadro 11. A multiplicação de cada valor (valor W_{i1} e valor W_{i2}) pelo seu respectivo fator resulta na coluna do valor ponderado. Por fim, a coluna valor é somada para obter os valores globais (GW_1 e GW_2) e a coluna valor ponderado é somada para obter o valor global ponderado (GW_{g1} e GW_{g2}).

Quadro 12 - Avaliação das variáveis

Critérios de avaliação			Parâmetros		Variável 3 e 5			Variável 9 e 11				
N	Objetivos	Fator	Nome	Unid.	Caract. (e ₁₁)	Valor (W ₁₁)	Valor pond.	Caract. (e ₁₂)	Valor (W ₁₂)	Valor pond.		
1	Simples de operar	0,12	Simplicidade na operação	-	Fácil	3	0,36	Muito fácil	4	0,48		
2	Fácil de montar na estrutura	0,18	Facilidade de montagem	-	Fácil	3	0,54	Muito fácil	4	0,72		
3	Manutenção simples	0,06	Facilidade de manutenção	-	Simples	3	0,18	Simples	3	0,18		
4	Peças padronizadas	0,03	Itens padronizados	-	Abundante	4	0,12	Considerável	3	0,09		
5	Poucas peças	0,03	Quantidade de itens	-	Poucas	3	0,09	Poucas	3	0,09		
6	Baixo custo de fabricação	0,06	Fabricação barata	-	Baixo	3	0,18	Normal	2	0,12		
7	Geometria eficiente	0,12	Eficiência	-	Eficiente	3	0,36	Eficiente	3	0,36		
8	Baixo nível de ruído	0,2	Silencioso	-	Baixo	3	0,60	Baixo	3	0,60		
9	Ergonomia	0,2	Ergonômico	-	Ergonômico	3	0,60	Ergonômico	3	0,60		
		$\sum g_1 = 1$					GW ₁ = 28	GW _{g1} = 3,03			GW ₂ = 28	GW _{g2} = 3,24

Fonte: o autor.

Assim sendo, a alternativa que evidenciar os maiores valores é escolhida para continuar e será adotada na próxima etapa do projeto (projeto preliminar). Por consequência, as variáveis 9 e 11 são selecionadas por apresentar o maior valor global ponderado. Ainda que as quatro variáveis apresentam a maioria das características iguais entre si, a operação e montagem do equipamento na estrutura foram mais significativas entre os critérios na determinação da variável, visto que o motovibrador deve ser fácil de montar na estrutura metálica do seccionador, evitando assim desgastes ao próprio equipamento e mantendo a eficiência do mesmo.

5.2 Apresentação das concepções

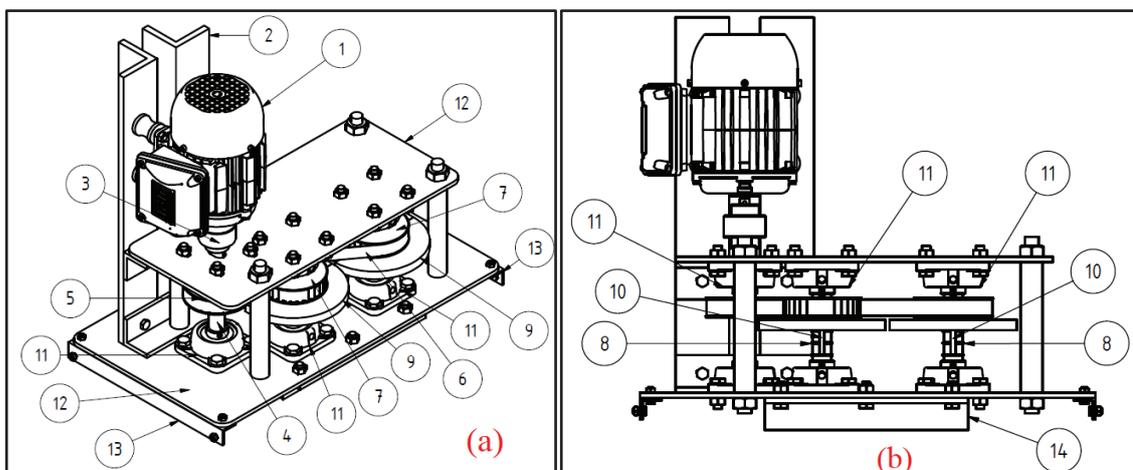
As variáveis 9 e 11 selecionadas possuem as mesmas alternativas de solução, porém, aplicadas em chaves seccionadoras diferentes. Portanto, o presente capítulo é dividido em: motovibrador, suporte de fixação para chave seccionadora BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV. Em cada capítulo, desenhos são apresentados e, ainda, é explicado o fundamento para atingir a concepção desejada.

5.2.1 Concretização do motovibrador unidirecional

A concepção do equipamento é feita de acordo com as características escolhidas na seleção das variáveis, ou seja, o motovibrador unidirecional deve possuir em sua concepção as seguintes alternativas de solução: chaveta entre as massas e o eixo, proteção sob medida, motor elétrico, pares de massas (dois pares para a Lorenzetti EV 242 kV e três para a BMKU-40A), inversor de frequência, correia dentada, polia e rolamento de esferas.

Buscando atingir os desejos e exigências da lista de requisitos, a montagem do motovibrador pode ser concluída e o layout final pode ser apresentado (Figura 25). Dessa maneira, o equipamento conta com um motor elétrico (1) que é apoiado em duas cantoneiras de suporte (2) e, através de um acoplamento elástico (3), acoplado a um eixo de tração (4) onde é montado uma polia (5) que transmite o movimento por meio de uma correia sincronizadora dupla (6) a outras duas polias (7) que são montadas em dois eixos movidos (8). Os pares de massas excêntricas (9) são montadas nos eixos movidos e posicionadas por meio de uma chaveta (10), assim, a força centrífuga pode ser direcionada através do movimento de rotação alternado destes componentes. Além disso, cada eixo é suportado por mancais de rolamentos (11) onde são fixados por meio de parafusos em chapas bases (12). O equipamento ainda conta com duas cantoneiras para a fixação da proteção (13) e outras duas cantoneiras para a montagem modular nos suportes de fixação das chaves seccionadoras (14). As dimensões totais do equipamento estão descritas no APÊNDICE A.

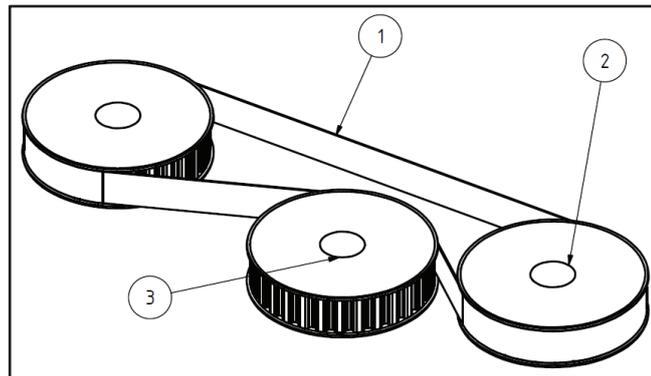
Figura 25 - Layout final do motovibrador unidirecional. Vista isométrica (a) e lateral (b)



Fonte: o autor.

A correia tipo sincronizadora dupla foi escolhida em razão de apresentar dentes dos dois lados da correia, possibilitando o movimento de rotação alternado (horário e anti-horário) e síncrono entre as massas excêntricas. A transmissão foi montada com três polias para possibilitar a oposição de movimento entre as massas excêntricas, ou seja, como a correia é dupla (1), ela transmite o movimento à polia interna (2) e externa (3), sendo que uma das polias pode ser utilizada como tensionador (Figura 26).

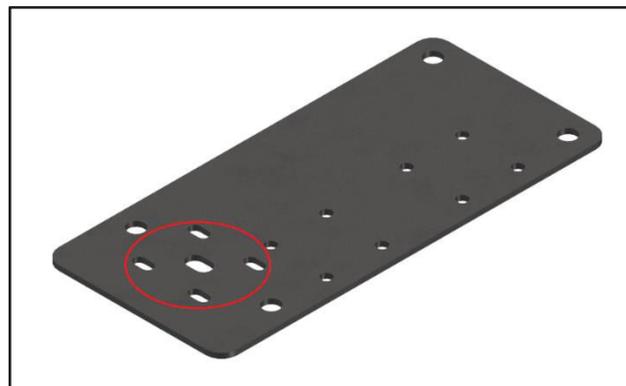
Figura 26 - Correia A 322 DL 075 e polias



Fonte: o autor.

Caso seja necessário tencionar a correia sincronizadora dupla (6), os mancais (11) do eixo de tração podem ser movidos longitudinalmente aos furos das chapas bases (12) sinalizados em vermelho na Figura 27.

Figura 27 - Furos para a fixação dos mancais de rolamento do eixo de tração

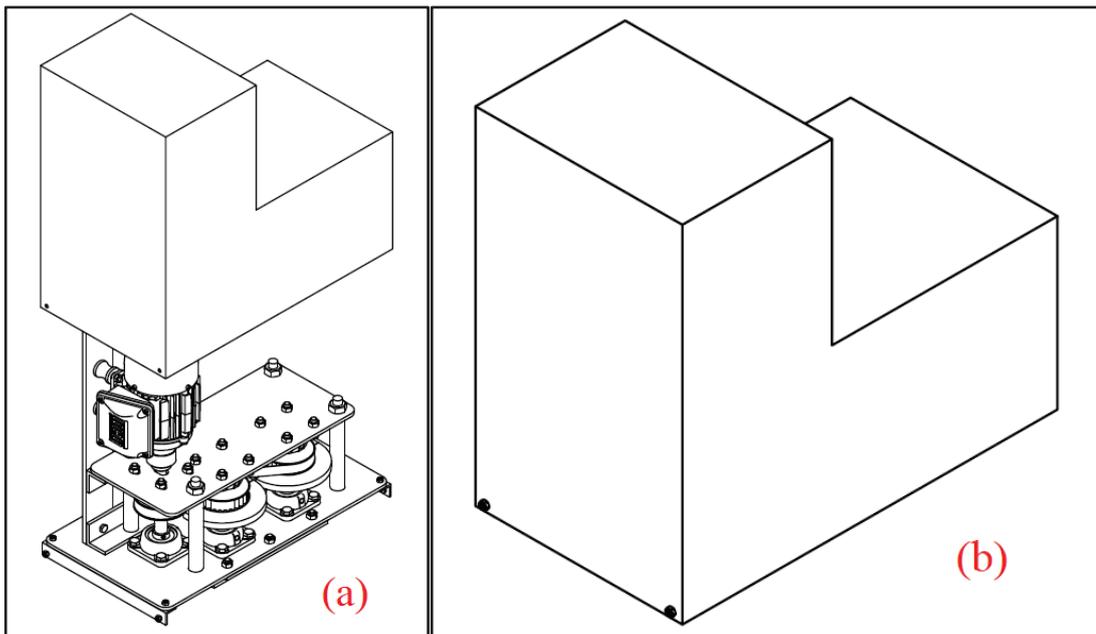


Fonte: o autor.

A partir das dimensões totais do equipamento, a concepção da proteção sob medida pode ser projetada de acordo com as normas NR-12, IP 66 e a geometria desejada.

A proteção sob medida conta com uma chapa em aço carbono com uma fina borracha interna para impossibilitar a entrada de poeira e reduzir o ruído emitido pelo funcionamento do equipamento. A proteção é encaixada no motovibrador unidirecional e fixada por parafusos nas cantoneiras de fixação da proteção segundo a Figura 28 (a). É previsto que a mesma seja pintada para proteger o material e evitar oxidações. Sendo sob medida, a proteção evita com que jatos de água e poeira cheguem ao equipamento como apresentada na Figura 28 (b). Além disso, após a montagem da proteção no motovibrador, o equipamento pode funcionar sem expor riscos à vida do operador. As dimensões totais da proteção estão descritas no APÊNDICE A.

Figura 28 – Vista explodida da montagem da proteção sob medida no motovibrador unidirecional (a) e isométrica da proteção sob medida (b)



Fonte: o autor.

5.2.2 Concretização do suporte de fixação para chave seccionadora BMKU-40A

De acordo com as variáveis V9 e V11 selecionadas, a alternativa de solução para a subfunção “fixar o equipamento” é efetivada através de uma estrutura modular. A alternativa de solução visa realizar a fixação do equipamento no suporte por meio de uma estrutura modular para facilitar a operação e montagem do motovibrador.

O motovibrador é considerado um equipamento auxiliar e deve ser acessível de forma que possa ser operado e manuseado quando necessário. O equipamento não deve apresentar risco de contato direto com as partes de alta tensão (NBR 60694, 2007). Por esse motivo, o produto deve ser instalado na estrutura metálica das chaves seccionadoras, uma vez que não há contato direto entre o motovibrador e as partes de alta-tensão.

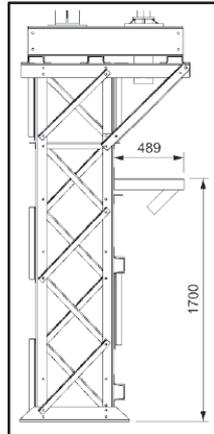
Visto que o motovibrador será utilizado na chave seccionadora BMKU-40A, o equipamento e seu suporte devem apresentar dimensões condizentes com as dimensões onde será fixado. No ANEXO A é possível encontrar as dimensões totais da chave seccionadora BMKU-40A.

No entanto, uma vez que a alteração da estrutura metálica do seccionador seja feita, descontinuidades são originadas que resultam concentradores de tensões, alterando a distribuição de tensões apresentada no material, como, por exemplo, o processo de soldagem que fragiliza o material e acelera a falha do mesmo (BUDYNAS; NISBETT; 2016). Além disso, essa alteração envolveria um certo custo para ser realizada. Portanto, a presente seção aborda uma forma de fixar o suporte na estrutura metálica, evitando alterações estruturais da chave seccionadora.

Dessa forma, primeiramente, é estudado o local e suas limitações onde o suporte do motovibrador foi utilizado no trabalho de Rech (2019) e como ele foi montado e fixado na estrutura metálica do seccionador. Posteriormente, almejando a estrutura modular como alternativa de solução, o conceito de montagem do motovibrador em seu suporte de forma modular pode ser elaborado.

O motovibrador utilizado no estudo de Rech (2019) foi montado no suporte que está localizado a uma distância de 1700 mm da base e a 489 mm de distância da estrutura metálica do seccionador (Figura 29).

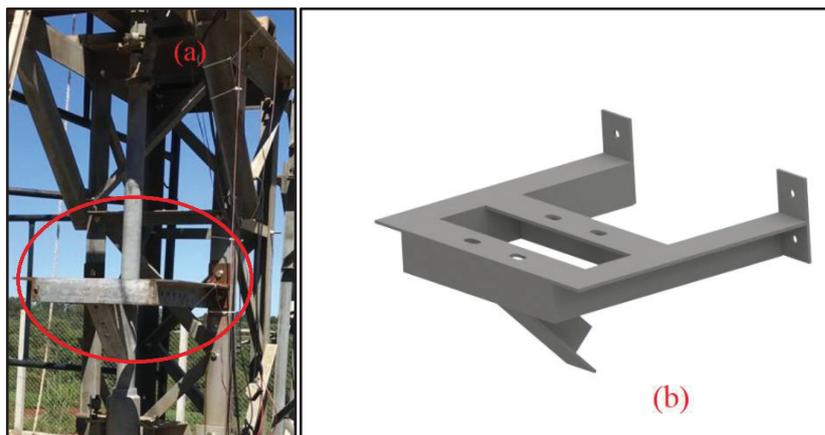
Figura 29 - Posição do suporte do motovibrador na chave seccionadora BMKU-40A utilizado por Rech (2019).
Unidades em mm



Fonte: Rech (2019).

A montagem do suporte do motovibrador unidirecional de Rech (2019) foi feita em cantoneiras verticais da estrutura metálica do seccionador e fixado por meio de parafusos como pode ser observado na Figura 30 (a) sinalizado em vermelho. O layout do mesmo suporte é apresentado na Figura 30 (b). O suporte apresenta este vão entre as cantoneiras dele em virtude de o eixo responsável pelo movimento do seccionador passar neste local.

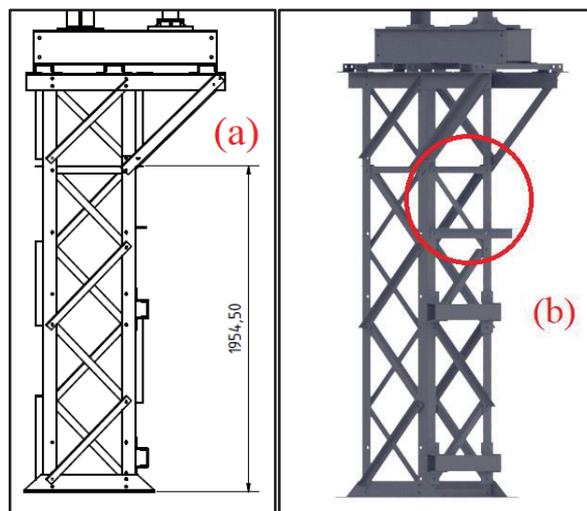
Figura 30 - Suporte do motovibrador na chave seccionadora BMKU-40A utilizado na pesquisa de Rech (2019).
Foto da montagem (a) e layout do suporte (b)



Fonte: adaptado de Rech (2019).

Contudo, uma vez que é almejada a montagem do suporte, evitando alterações na estrutura metálica, a posição escolhida para posicionar o suporte proposto está localizada a 254,50 mm acima do local utilizado por Rech (2019) e é mostrada na Figura 31 (a). Este local foi escolhido devido à presença de cantoneiras horizontais e verticais, possibilitando a fixação e apoio do suporte do motovibrador de forma mais acessível como pode ser observado na Figura 31 (b) circulado em vermelho.

Figura 31 - Posição do suporte do motovibrador na chave seccionadora BMKU-40A para a atual pesquisa. Vista lateral (a) e isométrica da posição do suporte (b). Unidades em mm

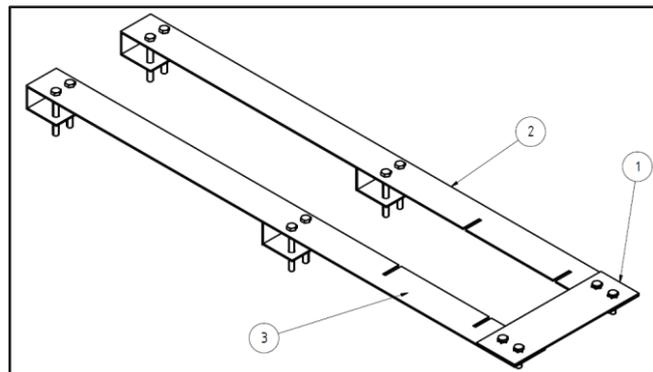


Fonte: o autor.

Considerando a lista de requisitos e a definição do local a ser montado o suporte do motovibrador unidirecional, o layout do suporte pode ser concretizado. Dessa forma, o suporte conta com duas submontagens, a primeira apresenta a função de suportar o equipamento horizontalmente e a segunda irá auxiliar verticalmente o suporte devido à massa do motovibrador.

A primeira submontagem apresenta três peças. Por meio de quatro parafusos, uma barra chata (1) é fixada em outras duas barras chatas dobradas em U (2 e 3) (Figura 32). As peças são dobradas em U com o objetivo de abranger a maior área da cantoneira da estrutura metálica do seccionador em que elas são montadas. Ainda, para que o motovibrador seja montado de forma modular, o suporte horizontal apresenta rasgos na base, possibilitando o posicionamento das cantoneiras da base do motovibrador.

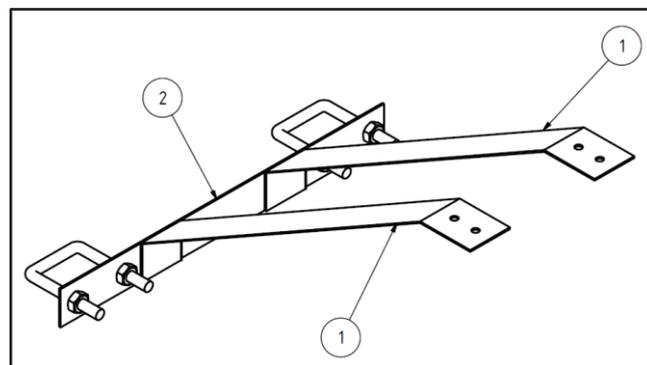
Figura 32 - Primeira submontagem do suporte do motorvibrador da chave seccionadora BMKU-40A



Fonte: o autor.

Considerando que o motorvibrador poderá ter uma massa considerável, a segunda submontagem exibe um suporte que servirá de apoio vertical. Ele é constituído por duas barras chatas dobradas (1) que são posicionadas em cima de uma chapa de travamento (2). A chapa de travamento é apoiada nas cantoneiras verticais da estrutura metálica do seccionador e fixada por meio de dois parafusos em U (Figura 33). A união entre as partes da segunda submontagem ocorre por meio do processo de soldagem.

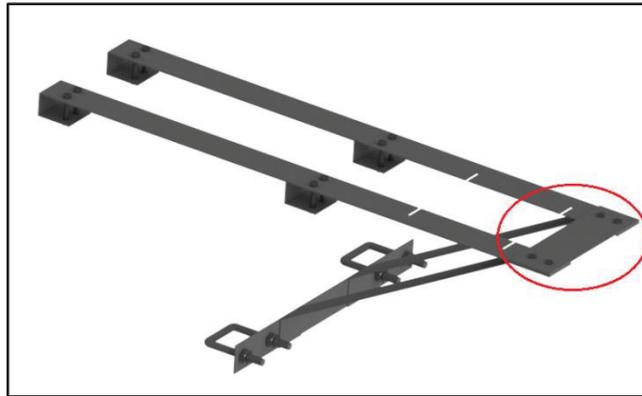
Figura 33 - Segunda submontagem do suporte do motorvibrador da chave seccionadora BMKU-40A



Fonte: o autor.

A montagem final do suporte do motorvibrador é realizada através da barra chata da primeira submontagem. Por meio desta peça, sinalizada em vermelho na Figura 34, quatro parafusos fazem a união entre a primeira e a segunda submontagem. Por fim, os perfis dobrados em U são parafusados por oito parafusos para fixar o suporte nas cantoneiras horizontais da estrutura metálica do seccionador. As dimensões totais do suporte são apresentadas no APÊNDICE B.

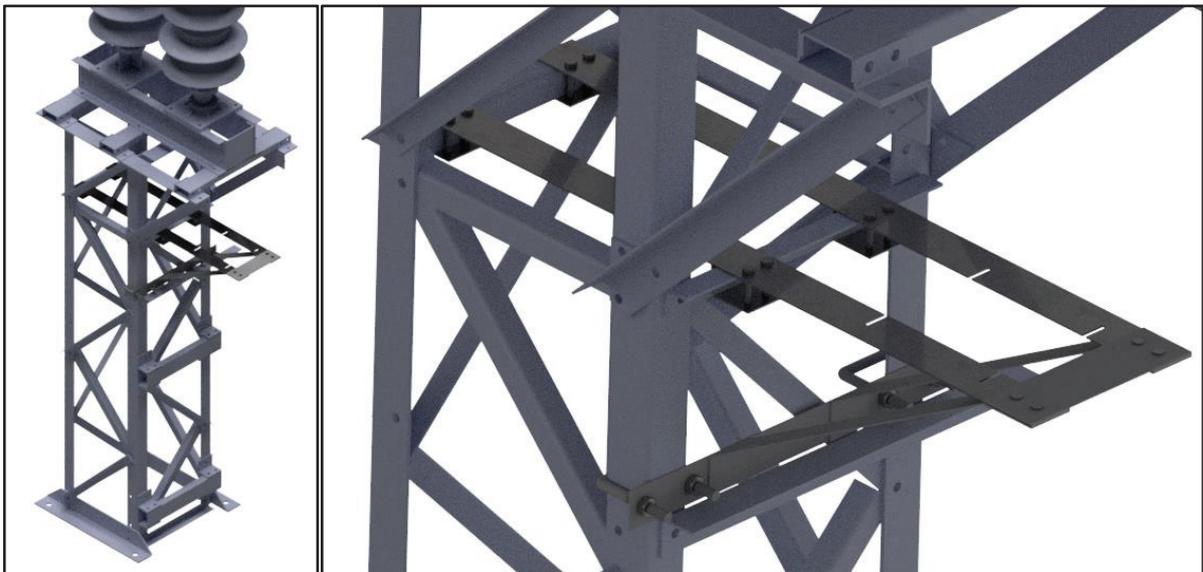
Figura 34 - Montagem final do suporte do motovibrador da chave seccionadora BMKU-40A



Fonte: o autor.

A montagem do suporte do motovibrador nas cantoneiras da estrutura metálica do seccionador pode ser observada na Figura 35. A cantoneira superior serve de apoio para a primeira submontagem e as cantoneiras verticais apoiam a segunda submontagem.

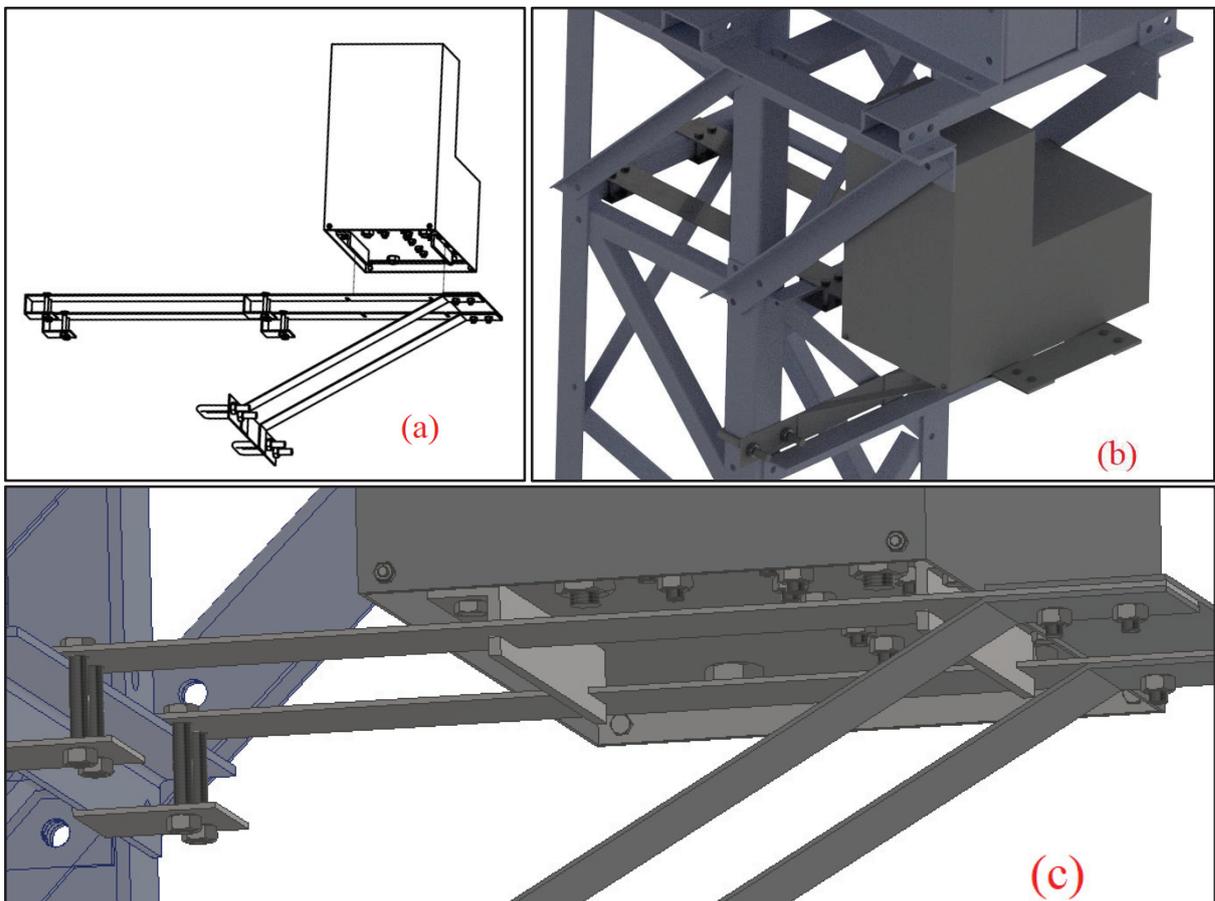
Figura 35 - Montagem do suporte na chave seccionadora BMKU-40A. Vista isométrica e aproximada da montagem do suporte



Fonte: o autor.

Na Figura 36 (a) é possível observar que, após a montagem do suporte, as cantoneiras de montagem modular do motovibrador são posicionadas logo acima dos rasgos do suporte. A conclusão da montagem entre o equipamento e o suporte é apresentada na Figura 36 (b). Isto apenas é possível em virtude dos rasgos do suporte que possibilitam a montagem do motovibrador de forma modular, ou seja, para que a montagem seja concluída, é necessário que as cantoneiras do equipamento sejam posicionadas nos rasgos do suporte e, dessa forma, o encaixe seja realizado como exibido na Figura 36 (c).

Figura 36 - Vista explodida da montagem modular entre o suporte da chave seccionadora BMKU-40A e o motovibrador (a). Montagem do motovibrador no suporte na chave seccionadora BMKU-40A (b). Encaixe entre o suporte e o motovibrador visto de baixo (c)



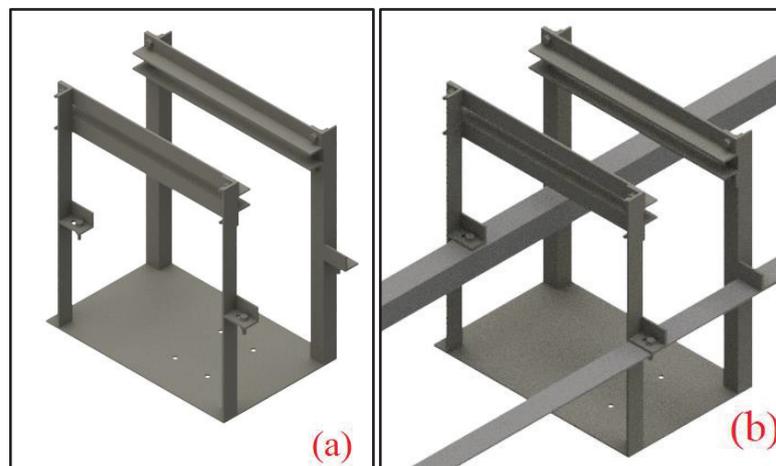
Fonte: o autor.

5.2.3 Concretização do suporte de fixação para chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV

A posição do suporte do motovibrador utilizado na pesquisa de Rech (2019) na chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV é apresentado no ANEXO A. Ele está posicionado a 300 mm da lateral da estrutura metálica direita da chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV e a 2331 mm de altura em relação a base dela.

Como os seccionadores apresentam formas construtivas distintas entre si, o suporte também foi adequado em relação ao local onde foi aplicado. O suporte do motovibrador da chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV pode ser visualizado na Figura 37. O suporte proposto por Rech (2019) é constituído de uma chapa base, onde o motovibrador é montado, e por quatro cantoneiras verticais que sustenta ele conforme a Figura 37 (a). Ele é fixado por parafusos nas cantoneiras horizontais da estrutura metálica da chave seccionadora como é apresentado na Figura 37 (b).

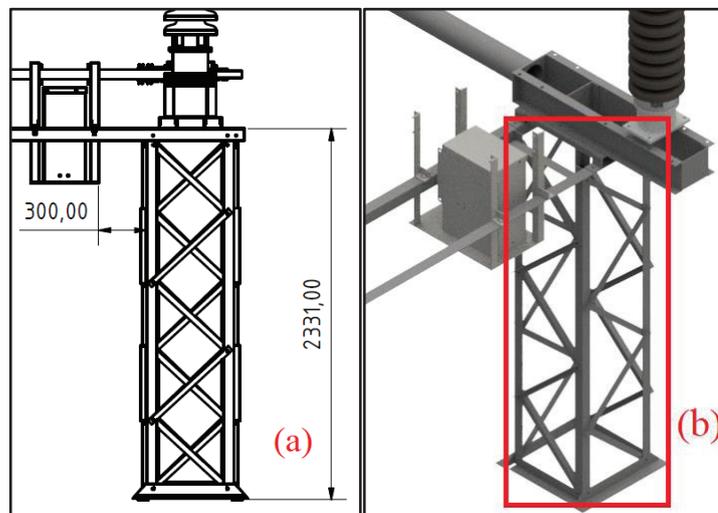
Figura 37 - Suporte do motovibrador na chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV utilizado na pesquisa de Rech (2019). Layout (a) e montagem do suporte (b)



Fonte: adaptado de Rech (2019).

A posição do suporte utilizado no estudo de Rech (2019) apresenta diversas possibilidades para a fixação do mesmo, visto que a estrutura metálica da chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV possui mais peças, como as cantoneiras horizontais em que o mesmo foi montado como pode ser observado na Figura 38 (a). Além disso, a estrutura metálica sinalizada em vermelho na Figura 38 (b) próxima ao suporte também pode ser utilizada para auxiliar nesta função. Assim sendo, evitando alterações nas estruturas metálicas das chaves seccionadoras, um suporte alternativo é proposto neste mesmo local.

Figura 38 - Posição do suporte do motovibrador na chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV para a atual pesquisa. Vista lateral (a) e isométrica da posição do suporte (b). Unidades em mm

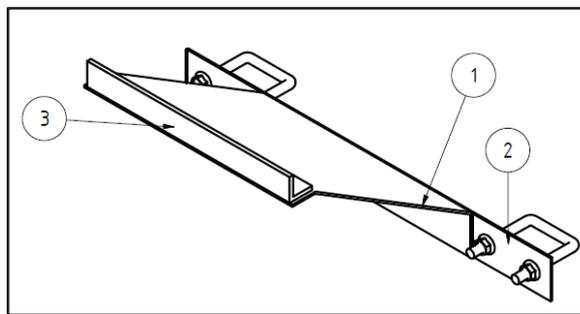


Fonte: o autor.

Dessa forma, é possível propor e concretizar o layout do suporte de fixação da chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV. Sendo assim, este suporte também apresenta duas submontagens. A primeira exibe a função de restringir o movimento relativo entre o equipamento e a estrutura metálica. A segunda submontagem é encaixada na primeira e realiza a fixação nas cantoneiras horizontais, realizando o apoio do motovibrador.

A primeira submontagem apresenta três peças que são soldadas entre si (Figura 39). A peça (1) é uma chapa dobrada. Ao lado direito da peça (1), ela é unida a uma barra chata de travamento (2) e ao lado esquerdo a uma cantoneira (3). A última peça tem a função de unir as duas submontagens. A primeira submontagem é fixada às cantoneiras verticais da estrutura metálica do seccionador por meio de dois parafusos em U através da barra chata de travamento (2) e, dessa forma, além de restringir o movimento relativo entre o suporte e as cantoneiras, possibilita a transmissão de vibração diretamente à estrutura metálica.

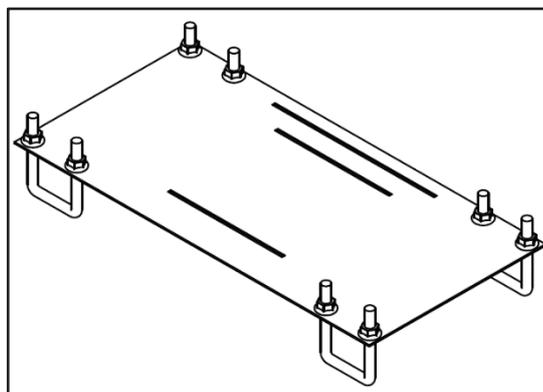
Figura 39 - Primeira submontagem do suporte do motovibrador da chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV



Fonte: o autor.

A segunda submontagem suporta a massa do equipamento e é constituída apenas por uma peça principal (Figura 40). A chapa apresenta rasgos que são utilizados na montagem modular do equipamento e a da primeira submontagem. As duas cantoneiras de montagem modular do motovibrador se encaixam nos rasgos menores e a cantoneira da primeira submontagem se encaixa no rasgo maior. A segunda submontagem é fixada nas cantoneiras horizontais da estrutura metálica por meio de quatro parafusos em U.

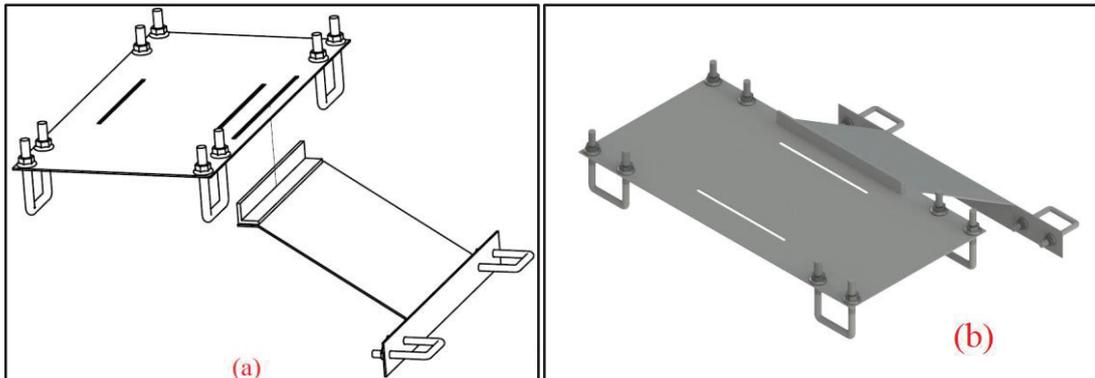
Figura 40 - Segunda submontagem do suporte do motovibrador da chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV



Fonte: o autor.

A montagem final do suporte é feita de forma modular entre as duas submontagens conforme apresentado na vista explodida na Figura 41 (a). A montagem final entre as duas submontagens do suporte pode ser visualizada na Figura 41 (b). As dimensões totais do suporte são apresentadas no APÊNDICE C.

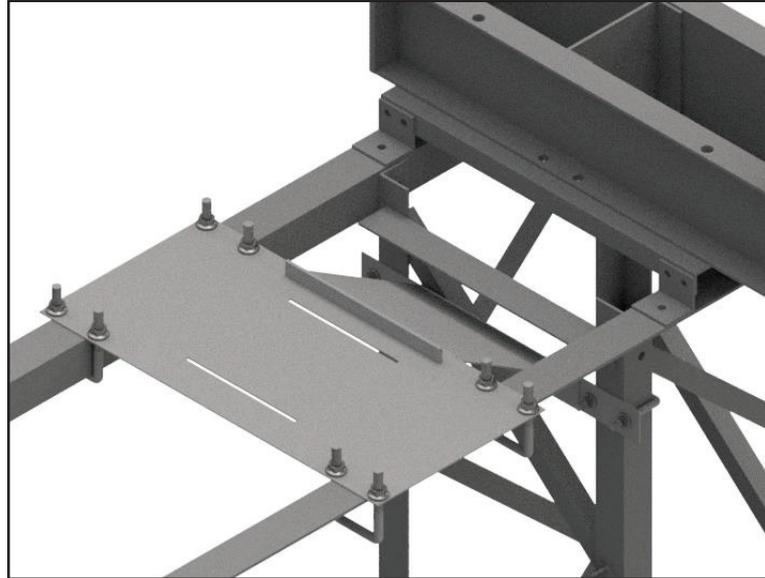
Figura 41 - Vista explodida da montagem modular entre as submontagens do suporte da chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV (a). Montagem final do suporte do motorvibrador (b)



Fonte: o autor.

A primeira submontagem é fixada nas cantoneiras verticais da estrutura metálica por meio dos parafusos em U e encaixada ao rasgo maior da segunda submontagem. Por fim, o suporte é fixado às cantoneiras horizontais e o motorvibrador pode ser posicionado em cima do suporte. Na Figura 42 é apresentada a montagem do suporte do motorvibrador nas cantoneiras da estrutura metálica do seccionador. As cantoneiras horizontais desempenham a função de apoiar o equipamento e as cantoneiras verticais impedem o deslocamento relativo entre o suporte e as cantoneiras.

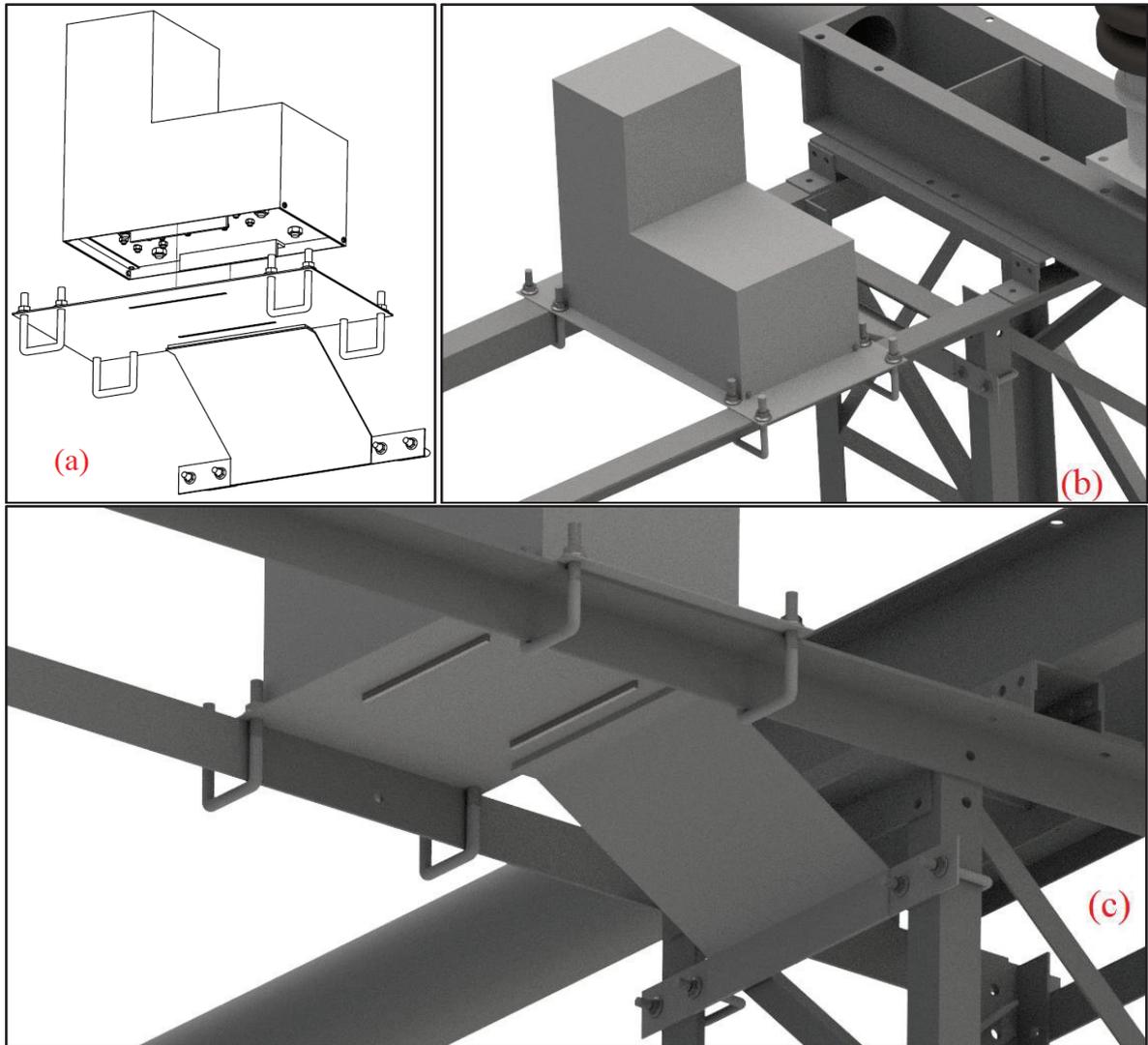
Figura 42 - Montagem do suporte na chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV. Vista isométrica e aproximada da montagem do suporte



Fonte: o autor.

Conforme proposto como alternativa de solução, os rasgos do suporte são utilizados para realizar a montagem do motovibrador de forma modular através das cantoneiras de montagem modular do equipamento como pode ser observado na vista explodida da Figura 43 (a). Após realizado o encaixe das cantoneiras e nos rasgos do suporte, o equipamento está pronto para uso conforme apresentado na Figura 43 (b). A Figura 43 (c) mostra a vista inferior da conclusão da montagem modular e auxilia na visualização da mesma.

Figura 43 - Vista explodida da montagem modular entre o suporte da chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV e o motovibrador (a). Montagem do motovibrador no suporte na chave seccionadora Lorenzetti EV 242 kV (b). Encaixe entre o suporte e o motovibrador (c)



Fonte: o autor.

5.3 Discussão dos resultados

O objetivo geral deste trabalho surgiu da problemática apresentada na dissertação de Rocha (2014). Tendo em vista a dificuldade de conclusão do fechamento dos contatos principais dos seccionadores em virtude do atrito presente, com o objetivo de auxiliar o fechamento da chave seccionadora, o autor obteve a patente N° BR 10 2013 020198 7, 2013 que se trata de um dispositivo que aplica vibração unidirecional na chave seccionadora.

A partir do trabalho de Rocha (2014), mais tarde, Rech (2019) e Setti (2019) realizaram estudos numéricos e experimentais de chaves seccionadoras de alta tensão submetidas à vibração mecânica. Os autores executaram diversos experimentos com o intuito de avaliar a influência da vibração mecânica nas chaves seccionadoras BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV. Após a validação da aplicação de vibração nos seccionadores e as sugestões realizadas por Rech (2019) e Setti (2019), os objetivos do atual estudo puderam ser determinados. Em consequência, a concepção de um dispositivo vibratório foi estudada, seguindo uma metodologia de desenvolvimento de produto e buscando a resolução do objetivo geral do trabalho.

A presente seção aborda uma discussão acerca dos assuntos que mais impactaram na definição das concepções finais, como a metodologia de desenvolvimento de produto de Pahl et al. (2005) que foi utilizada de forma a direcionar e orientar a presente dissertação, auxiliando no alcance dos objetivos e alternativas de solução diante aos desafios apresentados pela fase conceitual de um produto.

5.3.1 Aplicação de uma metodologia de desenvolvimento de produto

Tendo em vista que o foco do trabalho é o desenvolvimento conceitual de um produto, Pahl et al. (2005) sugere alguns métodos para o desenvolvimento da concepção que foram utilizados com o intuito de alcançar um conceito eficiente diante a problemática do estudo.

De acordo com a metodologia, nessa fase inicial do projeto, informações a respeito da problemática do trabalho devem ser esclarecidas. Dessa forma, a partir do problema da pesquisa, da patente N° BR 10 2013 020198 7 de Rocha (2013) e da fundamentação teórica sobre o assunto, a linha mestra foi criada e a lista de requisitos pode ser elaborada.

A partir das informações da lista de requisitos que norteou o desenvolvimento conceitual do motovibrador unidirecional, a função global do equipamento foi desenvolvida e desmembrada em subfunções. Assim, uma matriz morfológica foi criada, apresentando as subfunções e as alternativas de solução para cada uma delas.

Seguindo a metodologia (PAHL et al., 2005), as alternativas de solução foram combinadas, dando origem a doze variáveis que foram avaliadas em relação a lista de requisitos. Dessa maneira, as variáveis que não atenderam totalmente à lista de requisitos foram eliminadas, resultando em quatro variáveis que continuaram para a próxima etapa do projeto. Sendo assim, visto que o motovibrador unidirecional será aplicado nas chaves seccionadoras BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV, é realizado uma avaliação quantitativa por meio do organograma de objetivos, sendo “simples de operar” e “fácil de montar na estrutura” os critérios mais relevantes para a obtenção do resultado final. Finalmente, a variável mais adequada para cada situação foi obtida.

As variáveis selecionadas puderam ser concretizadas e as concepções finais são apresentadas, exibindo os requisitos exigidos e desejados da lista de requisitos em sua totalidade. Por fim, em decorrência do método de desenvolvimento de produto utilizado (PAHL et al., 2005), o layout do motovibrador unidirecional e de seus suportes são concretizados e a etapa referente à concepção do equipamento é finalizada.

5.3.2 Sistema vibratório unidirecional e a transmissão de movimento por correia

De acordo com a problemática do atual trabalho, as chaves seccionadoras apresentam dificuldade para realizar o fechamento dos contatos principais em virtude do atrito presente entre eles. Dessa maneira, Rocha (2014) desenvolveu um estudo acerca desse problema e obteve o depósito de patente N° BR 10 2013 020198 7, 2013 como forma de resolução do mesmo.

O modelo de utilidade de Rocha (2013) apresenta um dispositivo que vibra numa única direção e alivia o atrito entre os contatos principais das chaves seccionadoras, auxiliando na conclusão do fechamento da chave. O pesquisador propõe utilizar massas excêntricas que giram em sentidos opostos e velocidades iguais, dando origem à força centrífuga quando as massas estiverem na mesma direção e sentido e, em contrapartida, de acordo com Rocha (2014, apud. RAO, 2009), a força centrífuga será anulada quando as massas estiverem na mesma direção e em sentidos opostos.

Assim, duas subfunções do equipamento descritas na matriz morfológica foram essenciais na obtenção da força centrífuga unidirecional, a quinta subfunção “variar a quantidade de massas” e a oitava “transmitir o movimento”. As alternativas de solução para a subfunção “variar a quantidade de massas” é a quantidade de pares de massas excêntricas. A diferença do número de pares foi o fator de relevância na distinção da concepção do equipamento para a aplicação no seccionador BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV. Em virtude das frequências naturais de cada chave seccionadora, a BMKU-40A demandou três pares de massas excêntricas e a Lorenzetti EV 242 kV dois pares.

As alternativas de solução para a subfunção “transmitir o movimento” foram propostas mediante a um estudo referente aos equipamentos vibradores. A partir do estado da arte sobre o motovibrador no contexto comercial e acadêmico, foi verificado que os equipamentos atuais não possuem um sistema vibratório unidirecional, ou seja, o foco do produto é relacionado à intensidade do desbalanceamento rotativo gerado e não ao direcionamento da vibração. Portanto, almejando as rotações das massas em sentidos opostos e velocidade sincronizada entre elas, foi necessário estudar um novo tipo de transmissão de movimento às massas, visto que a vibração unidirecional é um fator inovador ao motovibrador.

A oitava subfunção do equipamento apresentou quatro alternativas de solução e a correia dentada e polias se destacaram dentre elas. Em comparação com os outros tipos de transmissão propostos, a correia e polias proporcionam menos ruído e uma manutenção menos frequente. Por fim, a correia tipo sincronizadora dupla foi escolhida. Este perfil de correia possibilita a oposição de rotação às polias movidas e, pelo fato dela ser sincronizadora, a velocidade entre as massas serão iguais. Dessa forma, a função global do equipamento “gerar vibração unidirecional, alternando a intensidade da força centrífuga originada, excitando a estrutura metálica do seccionador e sendo operado de forma segura” foi cumprida pela concepção concretizada do motovibrador unidirecional.

5.3.3 Sistema modular de fixação do motovibrador unidirecional

A patente de Rocha (2013) ainda prevê que o equipamento vibratório seja instalado na chave seccionadora com facilidade, permitindo a rápida substituição ou retirada para revisões e, para isso, ainda seja evitado a alteração do projeto estrutural do seccionador.

A partir dessas premissas, a segunda subfunção “fixar o equipamento” é originada e três alternativas de solução são propostas. As variáveis que apresentaram a estrutura modular e a chapa de fixação se destacaram diante as outras variáveis na lista de seleção das variantes de solução. No entanto, os critérios de avaliação das variáveis “simples de operar” e “fácil de montar na estrutura” foram significativos para o resultado final. Desse modo, as variáveis nove e onze se destacaram por apresentar a estrutura modular como a alternativa de solução para a segunda subfunção.

Considerando que o equipamento será fixado e aplicado nas chaves seccionadoras BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV, foi realizado um estudo prévio sobre o local em que o motovibrador foi posicionado e utilizado por Rech (2019), almejando aproveitar integralmente os resultados do estudo do autor. Assim sendo, o seccionador BMKU-40A apresentou limitações em sua geometria, impossibilitando o posicionamento do motovibrador no mesmo local utilizado na pesquisa de Rech (2019). Por outro lado, para a Lorenzetti EV 242 kV, foi possível aproveitar a mesma posição do motovibrador em razão de sua geometria apresentar mais peças, aumentando a possibilidade de montagem do equipamento.

Como as estruturas metálicas dos seccionadores apresentam geometrias e limitações distintas, foi proposto um suporte de fixação para cada chave seccionadora estudada, buscando a fixação do motovibrador de forma modular como objetivado pelas variáveis selecionadas. Sendo assim, dois suportes para a montagem modular do motovibrador unidirecional são concretizados. A montagem modular acontece de forma rápida e fácil, através de duas cantoneiras do motovibrador que se encaixam a dois rasgos existentes nos suportes.

6 CONCLUSÃO

Neste capítulo, as concepções são avaliadas em relação ao atendimento do objetivo geral e dos objetivos específicos, sendo abordados e discutidos. Ao final, a contribuição científica sobre o atual estudo é comentada e sugestões para trabalhos futuros são feitas.

6.1 Atendimento dos objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é de realizar o projeto conceitual de um motovibrador unidirecional utilizado no acionamento das chaves seccionadoras BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV e pode ser considerado realizado em sua totalidade. A concepção do motovibrador unidirecional e de sua proteção foram concretizadas ao final do trabalho. Além disso, os conceitos dos suportes para a fixação do motovibrador unidirecional nas chaves seccionadoras BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV também foram apresentados.

Através do estudo realizado acerca das vibrações mecânicas, estado da arte dos motovibradores e transmissão de movimento, somados à metodologia de desenvolvimento de produto (PAHL et al., 2005) utilizada, alternativas puderam ser propostas para garantir que o conceito realizasse a vibração numa única direção. Dessa forma, por meio de pares de massas excêntricas que giram em direções opostas, através do sistema de transmissão de movimento constituído por três polias e uma correia sincronizadora dupla, foi possível garantir que a vibração seja produzida de forma unidirecional e um conceito inovador fosse obtido. Ainda, em virtude da contribuição do método de projeto de Pahl et al. (2005), a concepção exibe um sistema de montagem modular e proteção conforme as normas NR-12 e IP 66.

Os objetivos específicos são analisados a seguir.

- a) A metodologia de projeto utilizada se mostrou apropriada desde o começo, esclarecendo os requisitos desejados e exigidos pelo projeto do motovibrador até ao final onde foram avaliadas as variáveis finais e concretizadas. A concepção final foi obtida através desta metodologia que se mostrou eficiente diante à problemática deste estudo, norteando todo o processo conceitual do equipamento.
- b) A concepção da proteção sob medida é resultante do conceito do motovibrador unidirecional. A proteção apresenta as medidas totais do equipamento e garante a segurança ao operador de acordo com à NR-12;

- c) Após a concretização do motovibrador unidirecional, alguns meios de fixação do equipamento na estrutura metálica do seccionador foram estudados. Em razão das geometrias dos seccionadores serem diferentes, concepções de suportes de fixação do equipamento foram propostas. A concepção final do suporte foi apresentada conforme o tipo de seccionador, possibilitando que o motovibrador unidirecional fosse montado de forma modular nas chaves seccionadoras BMKU-40A e Lorenzetti EV 242 kV.

Os objetivos foram atingidos, contudo, dois requisitos contidos na lista de requisitos exigem de mais detalhes para efetiva-los, são eles a massa máxima do motovibrador e a realização de medição de acelerações e deslocamentos nos componentes do motovibrador e suportes de fixação do mesmo. Estes requisitos são essenciais para obter um produto mais ergonômico e eficiente ao operador. No entanto, a fase de anteprojeto e detalhamento precisam ser realizadas para que todos os componentes do motovibrador sejam dimensionados e que a massa do equipamento seja estimada. Além disso, as medições do equipamento e seu suporte apenas devem ser feitas em protótipos, ou seja, nas fases seguintes ao projeto conceitual.

Ainda assim, a função global do equipamento de “gerar vibração unidirecional, alternando a intensidade da força centrífuga originada, excitando a estrutura metálica do seccionador e sendo operado de forma segura” foi atingida pelas concepções que foram concretizadas ao final deste estudo.

6.2 Contribuição científica

A intensidade do desbalanceamento rotativo pode ser variada nos equipamentos motovibradores atuais, alterando a excentricidade das massas excêntricas, quantidade de massas e/ou frequência de rotação. Por outro lado, o foco dos equipamentos vibradores muitas vezes é relacionado apenas à variação da intensidade da força centrífuga originada pelo equipamento.

A partir disto, o vibrador apresentado neste estudo apresenta uma alternativa particular em relação aos motovibradores atuais. Nesse caso, além da variação da intensidade do desbalanceamento rotativo que é feita por meio da montagem de pares de massas e da frequência de rotação, a vibração também pode ser direcionada conforme a posição em que o motovibrador unidirecional for montado.

Por mais que a aplicação da vibração unidirecional advém do modelo de utilidade N° BR 10 2013 020198 7 de Rocha (2013) que enfatiza o uso específico dela em seccionadores de alta tensão, o desenvolvimento conceitual do motovibrador unidirecional vem a contribuir para a área de estudo relacionada ao direcionamento da força centrífuga, vibração e ao projeto conceitual de vibradores.

Ainda, o presente trabalho pode servir como fundamento na busca de soluções para problemáticas, tendo em vista que o princípio de vibração unidirecional pode auxiliar na resolução do problema, como auxiliou na problemática apresentada na dissertação de Rocha (2014). Além disto, foram obtidas soluções eficientes para a montagem do suporte na estrutura metálica e para o encaixe modular entre o suporte e o motovibrador que podem ser utilizadas como sugestões para casos semelhantes.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir, são apresentadas sugestões com o objetivo de dar continuidade ao atual trabalho.

- a) Prosseguir com a metodologia de desenvolvimento de produto de Pahl et al. (2005), aplicando a metodologia de anteprojeto e detalhamento para o motovibrador unidirecional e seus suportes de fixação;
- b) Fabricar um protótipo do motovibrador unidirecional e de seus suportes de fixação;
- c) Realizar a medição de acelerações e deslocamentos nos componentes do motovibrador unidirecional e dos seus suportes de fixação;
- d) Fazer um estudo numérico e experimental do motovibrador unidirecional e dos seus suportes de fixação.

REFERÊNCIAS

AHRAMANOVA, Amina. Locating Centers of Mass with Image Processing. **Undergraduate Journal Of Mathematical Modeling: One + Two**. Florida, p. 1-26. 29 maio 2019. Disponível em: <<https://scholarcommons.usf.edu/ujmm/vol10/iss1/1>>. Acesso em: 29 out. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **6935**: Seccionador, chaves de terra e aterramento rápido. [s.i], 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **60694**: Especificações comuns para normas de equipamentos de manobra de alta-tensão e mecanismos de comando. [s.i], 2006.

BRISTOT, Vilson Menegon et al. DIMENSIONAMENTO DE DISPOSITIVO HIDRÁULICO PARA TENSIONAMENTO DE CORREIAS DE TRANSMISSÃO TRAPEZOIDAIS PERFIL A. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**, [s.i.], v. 19, n. 1, p.105-116, 4 ago. 2014. Disponível em: <<https://www2.uned.es/ribim/volumenes/Vol19N1Abril2015/V19N1A09%20Bristot.pdf>>. Acesso em: 29 set. 2019.

BUDYNAS, Richard G.; NISBET, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley**. 10. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. 1073 p. Tradução de: João Batista de Aguiar, José Manoel de Aguiar e José Benaque Rubert.

COSTA, Conceição António. **VIBRAÇÕES EM PONTES FERROVIÁRIAS DE ALTA VELOCIDADE: MÉTODO DA DECOMPOSIÇÃO DA EXCITAÇÃO EM RESSONÂNCIA**. 2015. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Algarve, Setúbal, 2015.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **7721-1**: Synchronous belt drives. metric pitch, synchronous belts. [s.i], 1989.

DONOHUE, Brian. **THE TRANSIENT BEHAVIOUR OF THE CO-AXIAL NON-SYNCHRONOUS ROTATING ASSEMBLY OF A DECANTING CENTRIFUGE**. 2013. 169 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica, University Of Canterbury, New Zealand, 2013.

GARCIA, Natália Gonçalves; LOPES, Priscila Eduarda Kraft; PIMENTA, Jean Senise. ANÁLISE DA CEMENTAÇÃO SÓLIDA EM ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS DE AÇO SAE 4320 – parte 1. **Revista Técnico Científica: DO CREA-PR**, [s.i.], p.1-20, 1 set. 2018. Disponível em: <<http://creaprw16.crea-pr.org.br/revista/Sistema/index.php/revista/article/view/381>>. Acesso em: 3 out. 2019.

HOLANDA, Samuel A. et al. Study of the Complex Stiffness of a Vibratory Mechanical System with Shape Memory Alloy Coil Spring Actuator. **Hindawi**. [s.i.], p. 1-11. 18 jun. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1155/2014/162781>>. Acesso em: 25 set. 2019.

KAVEH, Ali; GHAZAAN, Majid Ilchi. Vibrating particles system algorithm for truss optimization with multiple natural frequency constraints. **Acta Mechanica**. [s.i.], p. 307-322. 20 set. 2016. Disponível em: <<http://crossmark.crossref.org/dialog/?doi=10.1007/s00707-016-1725-z&domain=pdf>>. Acesso em: 25 set. 2019.

LIU, Hu; ZHANG, Weihong; GAO, Tong. Structural topology optimization under rotating load. **Structural And Multidisciplinary Optimization**, [s.l.], v. 53, n. 4, p.847-859, 21 nov. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-015-1356-3>.

LI, Wenbo et al. **Investigation of dynamic heat generation and transfer behavior and energy dissipation for nonlinear synchronous belt transmission**. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.080>. Acesso em: 20 ago. 2019.

MACCAMHAOIL, Macdara. **Static and Dynamic Balancing of Rigid Rotors**. [s.i.]: Brüel & Kjær, 2016. 20 p. Disponível em: <<https://www.bksv.com/media/doc/bo0276.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2019.

MAMEDE FILHO, João. Manual de Equipamentos Elétricos. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2019.

MERIAM, J. L.; KRAIGE, L. G.. **ENGINEERING MECHANICS: STATICS**. 5. ed. [s.i.]: Copyright, 2002.

MEVADA, Himanshu; PATEL, Dipal. Experimental determination of structural damping of different materials. In: 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON VIBRATION PROBLEMS, ICOVP 2015, 12., 2015, [s.i.]. **Procedia Engineering 144 (2016)**. [s.i.]: Elsevier, 2016. p. 110-115. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 25 set. 2019.

MVL VIBRADORES (São Paulo). **Produtos**. 2019. Disponível em: <<http://mvlvibradores.com.br/>>. Acesso em: 24 out. 2019.

NÓBREGA, Luiz Henrique Melo Silva. **DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO, BASEADA EM NURBS, PARA DETERMINAÇÃO DO DESVIO TOTAL DE PERFIL ($F\alpha$) DE ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS USANDO MMCs**. 2016. 189 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/8961>>. Acesso em: 15 out. 2019.

N.Y. GERGES, Sarnir. **RUIDO: Fundamentos e Controle**. Florianópolis: Copyright, 1992. 600 p.

PAHL, Gerhard; BEITZ, Wolfgang; FELDHUSEN, Jörg; GROTE, Karl-Heinrich. **Projeto na engenharia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda. 2005. 412 p.

POLICENA, Mauricio Rodrigo. **PROJETO PRELIMINAR DE UMA MÁQUINA DE SERRA FITA AUTOMÁTICA PARA CORTE DE PLACAS VISANDO À INDÚSTRIA 4.0**. 2016. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2016.

QUARESMA, Tatiane Costa. **APLICAÇÃO DE OZÔNIO E ULTRASSOM NA DESINFECÇÃO DAS MÃOS DE PROFISSIONAIS DA SAÚDE**. 2013. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Bioengenharia, Programa de Pós-graduação em Bioengenharia, Universidade Camilo Castelo Branco, São José dos Campos, 2013. Disponível em: <<http://www.ozonio.net/2013-aplicacao-de-ozonio-e-ultrassom-na-desinfeccao-das-maos.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2019.

RAMOS, Douglas Jhon. **Efeito da cavitação em mancais hidrodinâmicos no comportamento dinâmico de rotores**. 2019. 106 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

RAO, Singiresu S. **Vibrações mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009. 424 p.

RECH, Mauricio. **ESTUDO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE CHAVES SECCIONADORAS DE ALTA TENSÃO SUBMETIDAS À VIBRAÇÃO MECÂNICA PARA AUXÍLIO EM MANOBRAS DE FECHAMENTO**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2019.

RIJO, Marcos Giovane de Quevedo. **DESENVOLVIMENTO DA BASE E CONTROLE DO GRAU DE LIBERDADE ROTACIONAL DE UM ROBÔ CILÍNDRICO COM ACIONAMENTO PNEUMÁTICO**. 2013. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/75734>>. Acesso em: 26 out. 2019.

ROCHA, Luciano Favretto da. **IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA PARA MANOBRAS DE SECCIONADORES DE ALTA TENSÃO VISANDO SEU PROCESSO DE AUTOMAÇÃO**. 2014. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2014.

ROCHA, Luciano Favretto da. **DISPOSITIVO DE AUTOMAÇÃO DE SECCIONADOR DE ALTA TENSÃO**. BR n. 10 2013 020198 7. Concessão: 08 ago. 2013.

SAVANT, Chirag. **Design of Driveline Module for Mobile Robot Platform**. 2018. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engineering And Management Machine Design, Kth Industrial Engineering And Management Machine Design, [s.i.], 2018. Disponível em: <<https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1234113/FULLTEXT01.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2019.

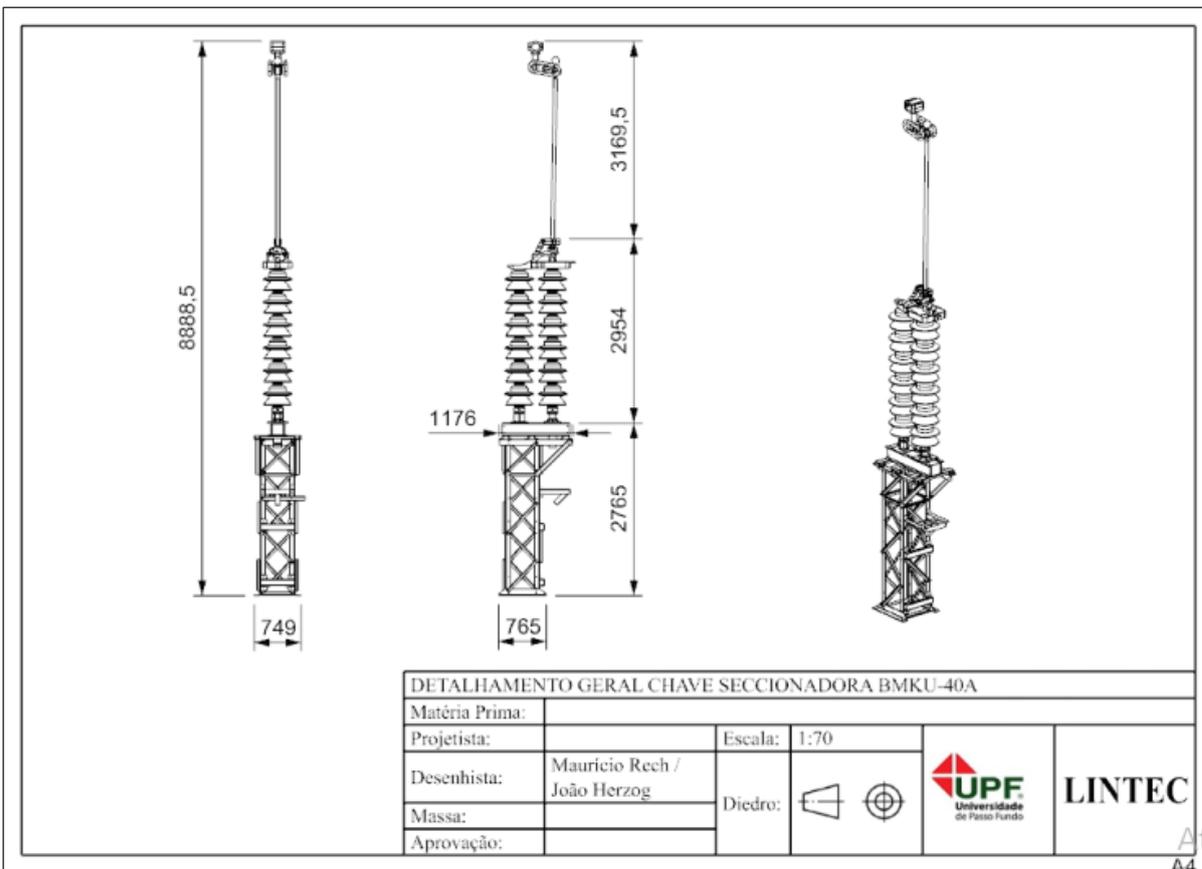
SETTI, Ademilson. **ESTUDO EXPERIMENTAL DA APLICAÇÃO DE VIBRAÇÃO MECÂNICA NO PROCESSO DE MANOBRA DE CHAVES SECCIONADORAS**.

2019. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2019.

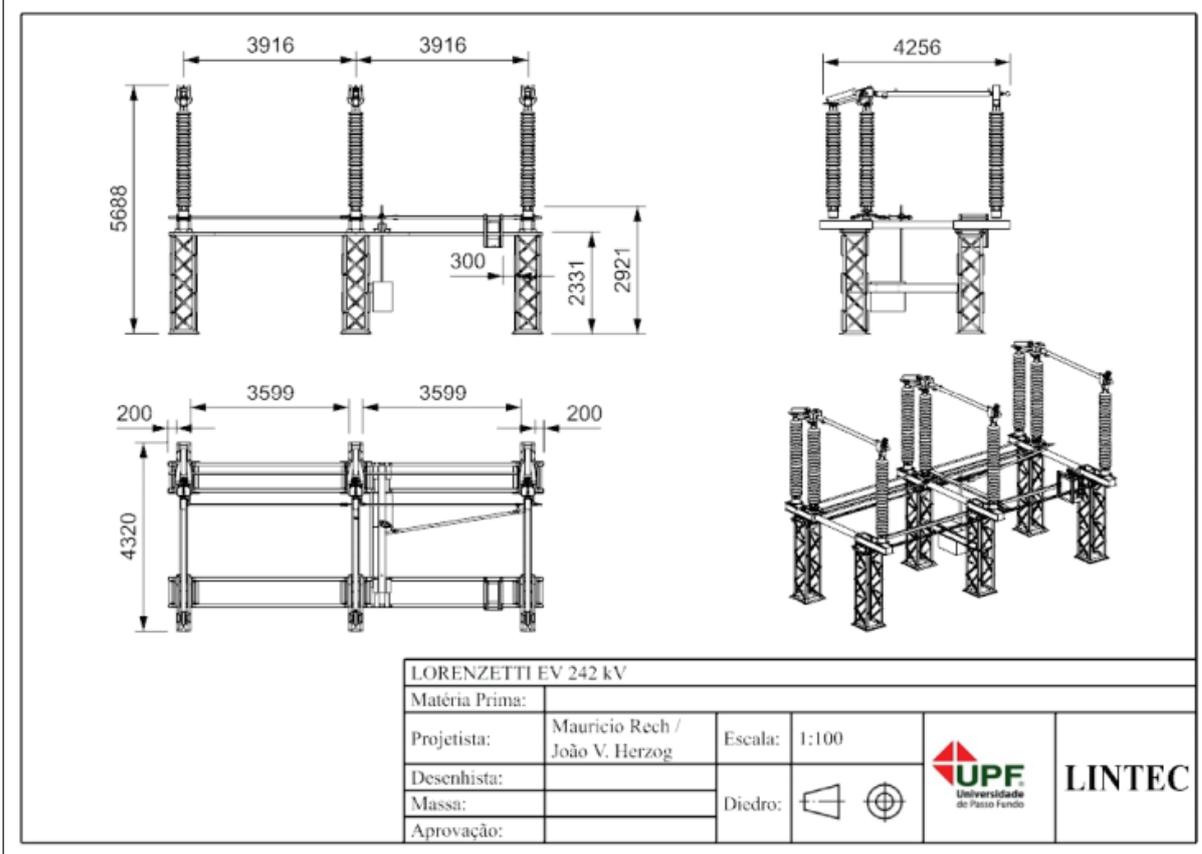
WERNECK, Marcelo M.; ALLIL, Regina Célia. **MONITORAMENTO REMOTO DE CHAVES SECCIONADORAS POR SENSORES A FIBRA ÓPTICA**. 2019. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/333783441>>. Acesso em: 26 out. 2019.

ZAIIONS, Douglas Roberto. **PROJETOS DE SISTEMAS MECÂNICOS**. Joaçaba, 2014. 122 p. Apostila.

ANEXO A – DETALHAMENTOS GERAIS DAS CHAVES SECCIONADORAS



Ati
A4





UPF
UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

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