

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA - CAMPUS JARAGUÁ DO SUL - RAU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA

EVERTON SOARES PIVOTTO

PROJETO DE UM DISPOSITIVO ELETROMECHANICO PARA ESTUDO
EXPERIMENTAL DA INTERRUÇÃO DE CIRCUITOS ELÉTRICOS NA ATUAÇÃO DE
DISJUNTORES DE BAIXA TENSÃO

JARAGUÁ DO SUL

Outubro de 2022

EVERTON SOARES PIVOTTO

PROJETO DE UM DISPOSITIVO ELETROMECAÂNICO PARA ESTUDO
EXPERIMENTAL DA INTERRUÇÃO DE CIRCUITOS ELÉTRICOS NA ATUAÇÃO DE
DISJUNTORES DE BAIXA TENSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica do Campus Jaraguá do Sul – Rau, do Instituto Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do diploma de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Orientador: Cassiano Rodrigues Moura, Mestre.

Coorientador: Fabio Decker de Souza, Mestre.

JARAGUÁ DO SUL

Outubro de 2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
por meio do programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

Pivotto, Everton Soares.

Projeto de um Dispositivo Eletromecânico para Estudo Experimental da Interrupção de Circuitos Elétricos na Atuação de Disjuntores de Baixa Tensão / Everton Soares Pivotto; orientação de Cassiano Rodrigues Moura; coorientação de Fabio Decker de Souza - Jaraguá do Sul, SC, 2022.

122 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul - RAU.

Tecnologia em Fabricação Mecânica.

Inclui referências.

1. Curto-circuito. 2. Disjuntor de Baixa Tensão.
3. Desenvolvimento de Produto. 4. Protótipo Eletromecânico.
5. *Design Thinking*. I. Moura, Cassiano Rodrigues. II. Souza, Fabio Decker de. III. Instituto Federal de Santa Catarina. IV. Título.

EVERTON SOARES PIVOTTO

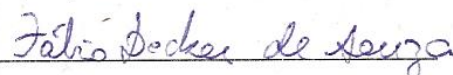
PROJETO DE UM DISPOSITIVO ELETROMECAÂNICO PARA ESTUDO
EXPERIMENTAL DA INTERRUÇÃO DE CIRCUITOS ELÉTRICOS NA ATUAÇÃO DE
DISJUNTORES DE BAIXA TENSÃO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

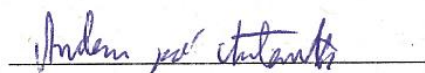
Jaraguá do Sul, 27 de outubro de 2022.



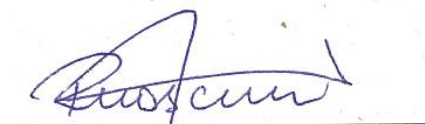
Prof. Cassiano Rodrigues Moura, Me.
Orientador
IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU



Fabio Decker de Souza, Me.
Coorientador



Prof. Anderson José Antonietti, Me.
IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU



Prof. Rogério Luiz Nascimento, Me.
IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU

AGRADECIMENTOS

Meu sincero agradecimento à minha esposa Raquel Cristiane Bays, à minha filha Beatriz Bays Pivotto, a meu filho Antônio Bays Pivotto e à minha família por me apoiarem incondicionalmente, sendo referências na minha vida.

Ao professor Cassiano Rodrigues Moura, pela orientação, por não medir esforços para ajudar, pela objetividade e clareza na transmissão de seus conhecimentos.

Ao Me. Eng. Fabio Decker de Souza, pela coorientação, compartilhando suas ideias, críticas, reflexões e principalmente seu profundo conhecimento sobre o tema, o que contribuiu de forma ativa aos estudos propostos.

Ao Grupo WEG e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina por fornecerem um ambiente e recursos de trabalho que foram essenciais ao desenvolvimento desta monografia.

Aos colegas do Setor de Desenvolvimento de Componentes da WEG Drives & Controls pelo companheirismo, auxílio técnico e troca de conhecimento imprescindível para a conclusão deste trabalho.

Por fim, a todos que colaboraram para a realização desta pesquisa.

A todos vocês, muito obrigado.

Procure não se tornar um homem bem-sucedido,
contudo, procure se tornar um homem de valor.

(Albert Einstein, 1955)

RESUMO

O processo de interrupção de corrente é a tecnologia principal dos disjuntores de baixa tensão e é caracterizada pela presença de um arco elétrico. Diante disso, este trabalho tem como objetivo projetar e desenvolver um dispositivo para estudo do comportamento de arcos elétricos no decorrer de uma interrupção de corrente em disjuntores de baixa tensão, com isso busca-se fornecer uma contribuição para a compreensão de um fenômeno tão complexo via obtenção de dados elétricos e mecânicos que retratem o seu comportamento. Como metodologia de trabalho, empregou-se o conceito *Design Thinking*, para o desenvolvimento do projeto do produto, sendo o mesmo dividido em quatro etapas: Imersão; Análise e Síntese; Ideação e Prototipação. A problemática é abordada do ponto de vista experimental pela implementação de ferramentas de diagnóstico e um dispositivo de teste. Um dispositivo experimental eletromecânico dedicado a este estudo foi projetado, simulado e implementado. Sua estrutura consiste de uma fonte de alimentação gerando uma corrente de curto-circuito; um modelo que reproduz a câmara de extinção de um disjuntor de baixa tensão; um sistema para abrir o contato no instante e velocidade desejados; bem como a instrumentação do experimento, incluindo o controle e as ferramentas de diagnóstico. O dispositivo experimental apresentou resultados expressivos e a análise combinada das respostas obtidas durante os testes do protótipo permitiram uma fidedigna reprodução dos principais subsistemas de um disjuntor de baixa tensão empregado como modelo, tais como: força entre contatos de aproximadamente 60 N e ápice de velocidade de deslocamento do contato móvel análogo ou superior 4 m/s. Desta forma, tanto o objetivo geral como os objetivos específicos propostos para este estudo foram considerados como alcançados.

Palavras-Chave: Curto-circuito. Disjuntor de baixa tensão. Desenvolvimento de produto. Protótipo eletromecânico. *Design Thinking*.

ABSTRACT

The current interruption process is the main technology of low voltage circuit breakers and is characterized by the presence of an electrical arc. Therefore, this paper aims to design and develop a device to study the behavior of electric arcs during a current interruption in low voltage circuit breakers, with this it seeks to provide a contribution to the understanding of such a complex phenomenon by obtaining electrical and mechanical data that retrace its behavior. As a working methodology, the Design Thinking concept was used for the development of the product project, which is divided into four stages: Immersion; Analysis and Synthesis; Ideation and Prototyping. The problematic is approached from an experimental point of view by implementing diagnostic tools and a test device. An electromechanical experimental device dedicated to this study was designed, simulated and implemented. Its structure consists of a power supply generating a short-circuit current; a model that reproduces the extinguishing chamber of a low voltage circuit breaker; a system for opening the contact at the desired time and speed; as well as experiment instrumentation, including control and diagnostic tools. The experimental device presented expressive results and the combined analysis of the responses obtained during the prototype tests allowed a reliable reproduction of the main subsystems of a low voltage circuit breaker used as a model, such as: force between contacts of approximately 60 N and apex of displacement velocity of the mobile contact analogous or higher than 4 m/s. In this way, both the general objective and the specific objectives proposed for this study were considered as achieved.

Keywords: Short circuit. Low voltage circuit breaker. Product development. Electromechanical prototype. Design Thinking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – Corrente presumida em um curto-circuito.	23
Figura 2-2 – Equipamento utilizado por Davy para seu ensaio de arco elétrico.	24
Figura 2-3 – Esquemático de um arco elétrico e sua distribuição potencial originado pela separação de contatos durante o seccionamento do circuito condutor de corrente.	26
Figura 2-4 – Arco elétrico sendo direcionado para a câmara de extinção em estrutura de divisão.	27
Figura 2-5 – Disjuntor trifásico em caixa moldada termomagnético: A) terminal de cabos; B) bimetal; C) eixo de desarme; D) botão de teste; E) mecanismo de operação; F) manípulo; G) câmara de extinção; H) plaqueta de extinção; I) contato fixo; J) pastilha de contato (prata); K) contato móvel; L) disparador magnético.	29
Figura 2-6 – Mecanismo de operação.	31
Figura 2-7 – Mecanismo de operação: (a) manípulo na posição ligado; (b) manípulo na posição desligado; (c) manípulo na posição desarmado.	32
Figura 2-8 – Possíveis estados de energia: (A) e (D) são estáveis; (B) é instável; (C) e (F) são estáveis através de restrições externas; (E) é neutramente estável; e (G) está em um estado neutro, mas próximo a uma transição instável.	33
Figura 2-9 – Disjuntor com circuito de corrente reversa: (a) sob condições normais de operação; (b) sob severos valores de curto-circuito.	34
Figura 2-10 – Representação monofásica simplificada da rede para uma operação de disjuntor sob condições de curto-circuito.	35
Figura 2-11 – Curvas características de tensão e corrente na abertura dos contatos de um disjuntor limitador de corrente.	37
Figura 2-12 – Bancada de ensaios de modelo de Quemeneur.	40
Figura 2-13 – Esquema representativo das etapas do processo de <i>Design Thinking</i>	41
Figura 3-1 – Fluxo metodológico adotado neste trabalho.	44
Figura 3-2 – Fluxograma de inspeções e ensaios.	49
Figura 4-1 – Representação esquemática dos componentes essenciais da bancada de ensaios.	52
Figura 4-2 – Representação do contato móvel com pastilha de prata: (a) tridimensional; (b) corte aplicado em vista bidimensional; e (c) vista bidimensional pronta para ser exportada para o programa <i>Working Model 2D</i>	57

Figura 4-3 – Modelo em <i>Working Model 2D</i> de um disjuntor em caixa moldada: (a) desligado; (b) ligado; e (c) processo de atuação do mecanismo de disparo provocado pelo disparador magnético.	58
Figura 4-4 – Simulação do mecanismo de disparo de um disjuntor em caixa moldada a partir de um disparo magnético em <i>Working Model 2D</i>	60
Figura 4-5 – Detalhe da simulação do mecanismo de disparo de um disjuntor em caixa moldada a partir de um disparo magnético em <i>Working Model 2D</i>	62
Figura 4-6 – Comportamento dinâmico de elementos elétricos e mecânicos de um disjuntor sob curto-circuito.	63
Figura 4-7 – Malha de elementos finitos para o contato móvel com pastilha de prata: (a) Visão geral; e (b) detalhe da malha na superfície.	64
Figura 4-8 – Preparação do modelo para simulação no <i>ANSYS Mechanical</i>	65
Figura 4-9 – Tensão de <i>von Mises</i> atuantes no contato móvel com partilha de prata.	65
Figura 4-10 – Esquemático do subsistema de disparo: 1 - atuador pneumático; 2 - disparador; 3 - massa/martelo; 4 - mola; 5 - eixo principal de abertura.	67
Figura 4-11 – Modelo em <i>Working Model 2D</i> do subsistema de disparo: (a) estado de prontidão e (b) processo de atuação do subsistema de disparo.	68
Figura 4-12 – Condições de contorno aplicadas nas geometrias dos componentes do subsistema de disparo.	70
Figura 4-13 – Tensão de <i>von Mises</i> atuante nos componentes do subsistema de disparo.	71
Figura 4-14 – Fator de segurança para os componentes do subsistema de disparo.	71
Figura 4-15 – Componentes básicos do subsistema de disparo.	72
Figura 4-16 – Modelo em <i>Working Model 2D</i> do subsistema de acionamento: (a) estado de prontidão e (b) processo de atuação do subsistema de acionamento.	73
Figura 4-17 – Formas de onda de forças e velocidade de abertura versus tempo obtidas via simulação do subsistema de acionamento em <i>Working Model 2D</i>	76
Figura 4-18 – Formas de onda de velocidade de abertura e deslocamento versus tempo obtidas via simulação do subsistema de acionamento em <i>Working Model 2D</i>	77
Figura 4-19 – Condições de contorno aplicadas nas geometrias dos componentes do subsistema de acionamento.	78
Figura 4-20 – Tensão de <i>von Mises</i> atuante nos componentes do subsistema de acionamento.	79
Figura 4-21 – Fator de segurança para os componentes do subsistema de acionamento.	79
Figura 4-22 – Componentes básicos do subsistema de acionamento.	80

Figura 4-23 – Comportamento dinâmico de um disjuntor e do dispositivo em estudo sob curto-circuito e tempos envolvidos para abertura (desconexão) dos contatos.....	81
Figura 4-24 – Protótipo para teste de conceito do subconjunto eixo de retenção e elemento de restrição externa.....	88
Figura 4-25 – Dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão montado.....	89
Figura 4-26 – Arranjo para medição de tempo de resposta ($t_{OAP} + t_{RSD}$) do subsistema de disparo vs carga.....	90
Figura 4-27 – Mensuração do tempo de resposta ($t_{OAP} + t_{RSD}$) do subsistema de disparo vs carga.....	91
Figura 4-28 – Tempo de resposta ($t_{OAP} + t_{RSD}$) do subsistema de disparo vs carga.....	92
Figura 4-29 – Arranjo para medição da força de contato vs deflexão.....	94
Figura 4-30 – Força de contato vs deflexão.....	95
Figura 4-31 – Resposta de tensão vs ângulo resultante da rotação do elemento móvel do sensor Atek RCS 2220.....	97
Figura 4-32 – Mensuração da posição angular do contato móvel acoplado ao eixo principal de abertura.....	98
Figura 4-33 – Relação ângulo de abertura vs deslocamento do contato móvel.....	99
Figura 4-34 – Deslocamento realizado na extremidade do contato móvel.....	100
Figura 4-35 – Velocidade de abertura do contato móvel.....	101
Figura 4-36 – Comparação entre distintas configurações de ajuste de carregamento (313,6 N; 376,3 N e 439,0 N) para mensuração de deslocamento na extremidade do contato móvel.....	102
Figura 4-37 – Dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão: (a) pré curto-circuito; (b) pós curto-circuito e (c) no decorrer do curto-circuito.....	104
Figura 4-38 – Formas de onda obtidas via ensaio de curto-circuito no dispositivo em estudo.....	105
Figura 4-39 – Tempo de resposta global do dispositivo em ensaio de curto-circuito.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Visão geral das bancadas de ensaio de modelo.	21
Tabela 4-2 – Especificação técnica dos componentes do dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos.	83
Tabela 4-3 – Tempo de resposta ($t_{OAP} + t_{RSD}$) do subsistema de disparo vs carga.	92
Tabela 4-4 – Força de contato vs deflexão.	95
Tabela 4-5 – Relação entre variáveis do sensor Atek RCS 2220 e do dispositivo em estudo. .	99
Tabela A – Fator n entre a capacidade de estabelecimento em curto-circuito e a capacidade de interrupção em curto-circuito e respectivo fator de potência (para disjuntores de corrente alternada).	121
Tabela B – Níveis de tensões nominais recomendados entre 100 V e 1000 V em sistemas de corrente alternada.	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CA – Corrente Alternada

CAD – Computer Aided Design (Desenho Assistido por Computador)

CO – Close-Open (Fechamento-Abertura)

IEC – International Electrotechnical Commission

IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

LFVRP – Laminado em Fibra de Vidro com Resina Poliéster

MCCB – Molded Case Circuit Breaker (Disjuntor em Caixa Moldada)

NBR – Norma Brasileira

O – Open (Abertura)

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento

SAE – Society of Automotive Engineers

LISTA DE SÍMBOLOS

- B – Campo magnético [T]
d – Diâmetro do arame da mola [mm]
De – Diâmetro externo do enrolamento da mola [mm]
 di / dt_0 – Taxa de variação no tempo (derivada) inicial da corrente de curto-circuito [A/s]
E – Módulo de elasticidade [GPa]
F – Força (magnética / mecânica) [N]
 F_{falta} – Falta [Adimensional]
 F_m – Força mecânica exercida pela mola [N]
 F_r – Força magnética de repulsão dos contatos [N]
i – Intensidade da corrente elétrica [A]
 I^2t – Integral de Joule [$A^2.s$]
 I_{cu} – Capacidade de interrupção máxima (última) em curto-circuito [kA]
 I_{cs} – Capacidade de interrupção de curto-circuito em serviço [kA]
 I_k – Valor eficaz da corrente de curto-circuito simétrica [A]
 i_k – Corrente de curto-circuito limitada [A]
 i_p – Corrente de curto-circuito presumida [A]
 $j\omega L$ – Reatância indutiva da fonte + linha e rede de distribuição [Ohms]
 $j\omega L_L$ – Reatância indutiva da carga [Ohms]
 L_0 – Comprimento da mola sem carga [mm]
 L_1 – Comprimento da mola pré-tensionada [mm]
 L_2 – Comprimento da mola sob carga [mm]
LE – Limite de escoamento [MPa]
LRT – Limite de resistência à tração [MPa]
n – Número de espiras da mola [espiras]
R – Resistência da fonte + linha e rede de distribuição [Ohms]
 R_L – Resistência da carga [Ohms]
S – Deslocamento [mm]
t – Tempo [ms]
 t_a – Tempo de arco [ms]
 t_c – Momento da interceptação entre as tensões “ u_a ” e “ u_n ” [ms]
 t_{DCM} – Tempo de deslocamento do contato móvel [ms]
 t_i – Tempo de interrupção [ms]

t_k – Tempo de duração do curto-circuito [ms]
 t_o – Momento em que ocorre a levitação dos contatos [ms]
 t_{OAP} – Tempo de operação do atuador magnético [ms]
 t_r – Tempo de transitório da tensão de reestabelecimento [ms]
 t_{RDD} – Tempo de resposta dinâmica do disparador magnético [ms]
 t_{RDM} – Tempo de resposta dinâmica do mecanismo de desarme [ms]
 t_{RSD} – Tempo de resposta dinâmica do subsistema de disparo [ms]
 t_s – Momento em que ocorre a ignição arco [ms]
 u_a – Tensão de arco [V]
 u_n – Tensão nominal da fonte de alimentação [V]
 ρ – Densidade [kg/m³]
 ν – Coeficiente de Poisson [Adimensional]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objetivos.....	18
1.1.1 Objetivo geral	18
1.1.2 Objetivos específicos.....	18
2 DESENVOLVIMENTO	20
2.1 Estado da arte.....	20
2.2 O curto-circuito.....	22
2.3 O arco elétrico	24
2.4 Dispositivos de proteção contra curto-circuitos	28
2.4.1 Disjuntores.....	28
2.4.1.1 Mecanismos de operação.....	31
2.4.1.2 Levitação dos contatos	34
2.5 Ensaios de curto-circuito em disjuntores de baixa tensão	38
2.6 Projeto do produto	39
2.6.1 <i>Design Thinking</i>	40
3 METODOLOGIA.....	44
3.1 Imersão	45
3.2 Análise e Síntese.....	46
3.3 Ideação.....	47
3.4 Prototipação	48
4 DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	50
4.1 Imersão, análise e síntese.....	50
4.2 Ideação.....	52
4.2.1 Conceito do produto	53
4.2.2 Obtenção do modelo dinâmico e análise estrutural dos subsistemas mecânicos do disjuntor via simulação computacional.....	56
4.2.2.1 Subsistema de disparo	66
4.2.2.2 Subsistema de acionamento.....	73
4.2.3 Especificações	82
4.3 Prototipação	88
4.4 Ensaios e resultados.....	90

5 CONCLUSÃO.....	108
REFERÊNCIAS	110
APÊNDICE A – Projeto do dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão.	116
APÊNDICE B – Mola parametrizada via Gutekunst Federn website.	117
APÊNDICE C – Registro do oscilograma de calibração em laboratório dos parâmetros de curto-circuito – 10kA@220V – FP 0,48.	118
APÊNDICE D – Registro do oscilograma de performance apresentado pelo dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão em seu primeiro ensaio de curto-circuito.	119
APÊNDICE E – Solicitação de autorização para pesquisa	120
ANEXO A – Relações padronizadas entre capacidade de estabelecimento e de interrupção em curto-circuito e respectivos fatores de potência, para disjuntores de corrente alternada	121
ANEXO B – Sistemas de corrente alternada com uma tensão nominal entre 100 V e 1000 V e equipamento relacionados	122

1 INTRODUÇÃO

Os dispositivos de chaveamento foram projetados e desenvolvidos como medida de proteção aos circuitos elétricos, nos casos de sobrecargas e curto-circuitos. Conforme os sistemas de distribuição de energia elétrica cresceram em tamanho e complexidade, houve o aumento nos níveis das correntes de curto-circuito e, conseqüentemente, equipamentos que possuíssem maiores capacidades de interrupção foram requeridos (VED, 2005; GONZALEZ *et al.*, 2015). A capacidade de interrupção representa o valor de corrente de curto-circuito que um disjuntor pode suportar com relação a um especificado nível de tensão, mantendo a sua função primária com o mínimo de perdas, ou seja, estabelecimento, condução, monitoramento e interrupção de fornecimento de corrente aos equipamentos a si conectados (NBR IEC 60947-2, 2013).

A constante busca por redução no tamanho e aumento na capacidade de interrupção destes equipamentos, são atualmente os principais objetivos das empresas que atuam nesta atividade. As funções exercidas por estes dispositivos são executadas por elementos que atuam sob princípios mecânicos, térmicos, elétricos, químicos, fluido dinâmicos e magnéticos, interagindo entre si. Esta interação exige destas corporações um contínuo aprimoramento dos mecanismos de disparo, uma detalhada investigação do comportamento do arco elétrico e, além disso, da disposição interna dos componentes no dispositivo de modo a auxiliar na extinção do referido arco elétrico por meio de efeitos magnéticos (BROWNE JR, 1984).

Partindo-se deste cenário, este trabalho visa apresentar um detalhado estudo multidisciplinar referente ao projeto e implementação de um dispositivo protótipo de testes. Este estágio trata-se de uma relevante etapa do *Design Thinking*, o qual é geralmente definido como um processo analítico e criativo que possibilita a seus adeptos a oportunidades de experimentar, desafiar suposições, discutir ideias, redefinir problemas, inovar, prototipar, testar, coletar feedback, redesenhar e melhorar a solução (RAZZOUK e SHUTE, 2012; MÜLLER-ROTERBERG, 2018). Desta forma, por se tratar de uma abordagem que permite uma ágil e constante retroalimentação de informações e conceitos, o *Design Thinking* foi escolhido como a metodologia de projetos a ser seguida. Tal seleção visa gerar uma maior celeridade no processo de desenvolvimento do presente trabalho, bem como, garantir o seu contínuo aperfeiçoamento.

A prototipagem trata-se de uma instância muito relevante de qualquer processo de criação. Os protótipos servem a vários propósitos, sendo utilizada, no ponto de vista da engenharia, para fornecer dados de fabricação e montagem, investigar problemas de integração

de sistemas e desenvolver estratégias de análise e teste. Em alguns casos, a prototipagem também é usada na fase de geração de conceito do processo de design para ajudar os projetistas a expandir ou contrair o conjunto de conceitos possíveis (CHRISTIE *et al.*, 2012).

Este estudo possui como objeto foco o disjuntor em caixa moldada (MCCB), habitualmente empregado tanto no campo residencial como no industrial. O desenvolvimento de um dispositivo protótipo que reproduza as principais características e subsistemas desse disjuntor sob a condição de curto-circuito revela muitos obstáculos tecnológicos, uma vez que se trata de uma ciência muito restrita. Isto se dá em função dos elevados custos envolvidos para a execução dos ensaios, da necessidade de um laboratório que execute testes de curto-circuito com elevados níveis de tensão e corrente, do grande número de fenômenos físico-químicos envolvidos e interagindo entre si, bem como, pela imensa gama de segredos industriais referentes ao tema. Além disso, trata-se de um fenômeno de curtíssima duração – algumas dezenas de milissegundos – requerendo assim sistemas de medição de altíssima resolução. Assim sendo, constata-se o porquê da existência de uma pequena gama de estudos referentes ao assunto no meio acadêmico, bem como, o porquê da maioria desses trabalhos serem realizados em conjunto a empresas do ramo.

A problemática, aqui apresentada, será abordada a partir de um ponto de vista teórico, por meio da elaboração de um projeto detalhado referente a este equipamento, simulações de interações envolvidas no mecanismo de testes e demais estudos técnicos necessários para definir a sua viabilidade. Bem como, de um ponto de vista experimental, através da implementação de ferramentas de diagnóstico e do dispositivo protótipo de testes.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos em curto-circuitos de modo a representar o desempenho característico de um disjuntor de baixa tensão sob tal condição.

1.1.2 Objetivos específicos

- Apresentar a definição do conceito do equipamento;
- Desenvolver e esmiuçar o projeto do equipamento;

- Reproduzir a força de contato característica de um disjuntor de baixa tensão e possibilitar a sua variação;
- Reproduzir a velocidade de abertura de contatos característica de um disjuntor de baixa tensão e possibilitar a sua variação e sua abertura no instante desejado;
- Possibilitar a medição da posição angular do eixo de suporte do contato móvel, corrente conduzida pelo circuito e tensão sobre os contatos (móvel e fixo) do dispositivo eletromecânico, sob a condição de curto-circuito.

2 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo serão introduzidos alguns conceitos fundamentais a respeito do estado da arte de bancadas experimentais aplicadas à estudos de interrupção de corrente alternada em baixa tensão, do curto-circuito, do arco elétrico e de dispositivos de proteção de baixa tensão com ênfase em disjuntores, sua estrutura construtiva e seus princípios de funcionamento. São abordados também: quais são e como são executados os principais ensaios de curto-circuito em disjuntores de baixa tensão e a metodologia de projeto utilizada para concepção do referido dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão. Essas definições são apresentadas com o objetivo de facilitar o entendimento dos capítulos seguintes.

2.1 Estado da arte

Dispositivos de chaveamento de baixa tensão devem ser continuamente desenvolvidos e adaptados aos novos requisitos das redes elétricas, bem como às novas áreas de uso e aplicação. Uma otimização holística só é possível a este respeito se toda a construção do disjuntor, incluindo os sistemas de extinção de arco, mecanismo de desarme, materiais de contato e isolantes em interação com as fontes elétricas, forem considerados no que diz respeito ao estabelecimento, condução e interrupção da corrente elétrica empregada entre os terminais de conexão deste dispositivo (VED, 2005; GONZALEZ *et al.*, 2015).

Alguns parâmetros impactam de forma mais significativa no desempenho dos dispositivos de proteção como, por exemplo, o comportamento da resistência de contato e a geometria e materiais dos elementos que compõem o sistema de extinção de arco. O aperfeiçoamento destes parâmetros ocorre por um lado, através do uso cada vez mais frequente do método de modelagem e simulação matemática para cálculo de campo acoplado das cargas mecânicas, térmicas, magnéticas e físico-plasma, e por outro lado, através de investigações experimentais indispensáveis em bancadas de ensaio de modelo.

Um dispositivo de chaveamento reproduzido via bancada de ensaio consiste essencialmente na implementação de um sistema de contato, um sistema de extinção de arco elétrico e um sistema de acionamento para gerar o movimento de fechamento e abertura do sistema de contato. Para realizar uma ampla variedade de investigações experimentais, circuitos de carga apropriados, bem como sistemas de controle e medição são necessários para realizar, registrar e avaliar os testes (GONZALEZ *et al.*, 2015).

Essas estruturas complexas, juntamente com a troca de modelo, são chamadas de bancadas de ensaio de modelo. Sua utilização permite a separação dos complexos fenômenos de interrupção e, graças à sua estrutura flexível, possibilita a análise de diversas variações de parâmetros dos materiais de contatação, geometria dos contatos fixos e móveis, isolantes utilizados, bem como, as geometrias e materiais empregados no sistema de extinção de arco, dentre outros (GONZALEZ *et al.*, 2015; PIVOTTO, *no prelo* 2016).

Devido à ampla gama de estruturas e efeitos físico-químicos a serem consideradas para incremento na capacidade de interrupção de um dispositivo de proteção, diferentes modelos de bancadas de ensaio foram configurados para fins de pesquisa e desenvolvimento no campo de disjuntores de baixa tensão. A Tabela 2-1 apresenta uma visão geral das várias instalações experimentais.

Tabela 2-1 – Visão geral das bancadas de ensaio de modelo.

Autor (Ano)	Drive do sistema de acionamento	Objetivo da investigação
Belbel e Lauraire (1985)	Mecanismo solenoide	Influência dos materiais de contato (pastilhas de contatação) e tempo de estagnação do arco elétrico (tempo de imobilidade) na limitação de corrente.
Hochhaus (1985)	Ar comprimido	Influência do arco através de paredes poliméricas da câmara de extinção de arco.
Weichert (1990)	Não indicado	Influência das ondas de pressão na limitação de corrente.
Huang (1992)	Ar comprimido	Limitação de corrente.
Shea, DeVault e Chien (1993)	Sistema de molas	Levitação de contatos e pressão gerada via coluna de arco.
Degui, Yong e Haiwen (1996)	Disjuntor modificado	Influência da geometria da câmara de extinção no fenômeno de reignição de arco.
Wachholz (1999)	Disjuntor modificado	Paredes poliméricas da câmara de extinção.
McBride e Jeffery (1999)	Mecanismo solenoide	Influência da geometria da câmara de extinção e da velocidade de abertura dos contatos na movimentação do arco.
Shea (2000)	Mecanismo solenoide	Influência do arco através das paredes poliméricas da câmara de extinção de arco.
Pechrach, McBride e Weaver (2001)	Mecanismo solenoide	Efeitos do fluxo de gás e de sua composição no movimento do arco.
Pechrach, McBride e Weaver (2002)	Mecanismo solenoide	Correlação dos efeitos magnéticos, dinâmicos do gás e térmicos na mobilidade do arco.
André <i>et al.</i> (2002)	Fixo (efeito fusível)	Efeitos do material dielétrico na pressão da coluna de arco.
Onchi, Isozaki e Wada (2003)	Fixo (efeito fusível)	Correlação entre campo elétrico, pressão e corrente na mobilidade do arco.

Weaver, Pechrach e McBride (2004)	Mecanismo solenoide	Comportamento energético do fluxo de gás e erosão de contato.
Shea (2004)	Mecanismo solenoide	Influência dos gases oriundos da ablação dos materiais das paredes da câmara de extinção no fenômeno de reignição de arco.
Wang <i>et al.</i> (2010)	Disjuntor modificado	Efeitos da configuração da saída de gases no movimento do arco.
Kwon <i>et al.</i> (2011)	Não indicado	Influência do material dielétrico e estrutura de extinção de arco na pressão e tensão de arco.
Rodriguez (2016)	Disjuntor modificado	Representação volumétrica do processo de divisão do arco.
Quemeneur (2017)	Mecanismo solenoide	Estudo das forças na origem do deslocamento de um arco elétrico.
Dong <i>et al.</i> (2020)	Fixo (efeito fusível)	Replicação da densidade de corrente do arco elétrico via medição de campo magnético.

Fonte: Adaptado de Gonzalez *et al.* (2015).

Como pode ser visto na Tabela 2-1, uma ampla gama dos modelos de bancada, acima apresentados, foram projetados de modo a investigar a performance dos sistemas de extinção de arco na limitação e extinção de corrente. Nota-se também, que se tratam de diferentes abordagens experimentais com o intuito em comum de estudar o comportamento do arco – foco deste estudo – via medições elétricas e técnicas de diagnóstico óptico e magnético. Tais trabalhos visam originar uma abundante quantidade de dados (elétricos, mecânicos e magnéticos – majoritariamente), bem como, correlacionar os diversos fenômenos físico-químicos envolvidos na interrupção de corrente fornecida à uma carga conectada ao dispositivo de chaveamento. Estes estudos servirão de base para o desenvolvimento deste trabalho, como poderá ser verificado no decorrer deste capítulo.

2.2 O curto-circuito

Curto-circuito ou falta é uma conexão anormal entre dois ou mais pontos - um condutor e outro(s) condutor(es), neutro ou um condutor de terra - que apresentem diferentes potenciais, que tenha sido gerada acidentalmente ou intencionalmente, sendo caracterizado por possuir uma impedância relativamente baixa e que acarrete no desenvolvimento de um nível muito elevado de sobrecorrente (maior que a corrente de sobrecarga do circuito), conforme definem IEEE Std 551 (2006) e a norma NBR IEC 60947-1 (2013).

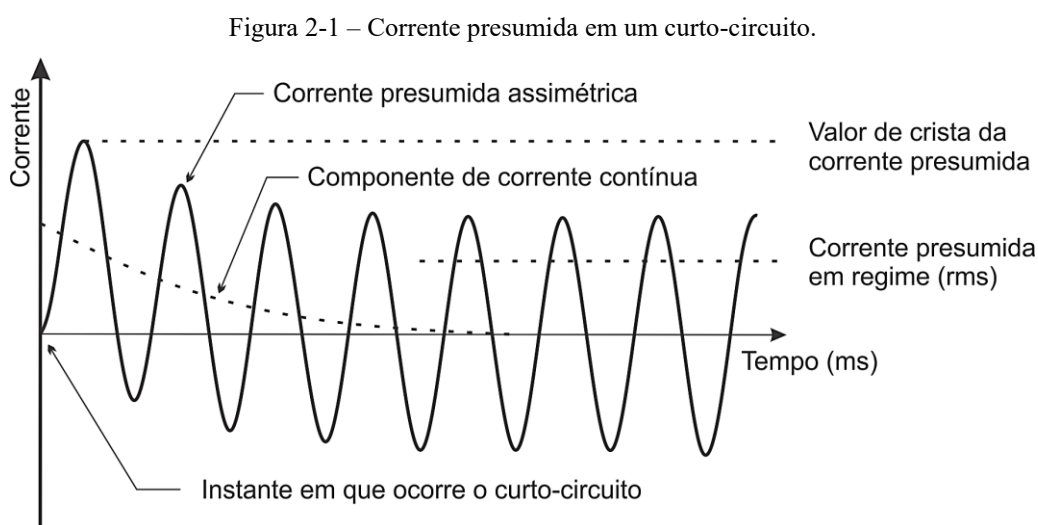
Schmelcher (1988) expõe que manobras inadvertidas e falhas de isolamento nos equipamentos ou outras partes que compõem o sistema elétrico são algumas das causas de um curto-circuito, o qual está comumente associado a um arco elétrico (ou arco voltaico) no ponto

de falta e que pode ser profundamente destrutivo em casos onde seus efeitos são prolongados. Assim sendo, evidencia-se que esta falta deve ser rapidamente removida do sistema de potência, e este é o trabalho dos dispositivos de proteção do circuito.

A determinação das correntes de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia é tão básica e importante como a determinação das correntes de carga para efeitos de aplicação de disjuntores, fusíveis e partidas de motores. Procedimentos de cálculo foram intensamente estudados e tão simplificados que atualmente somente a simples aritmética é necessária para determinar as correntes de curto-circuito, mesmo nos mais complexos sistemas de potência (BEEMAN, 1955).

Uma vez que o equacionamento, a dinâmica e a análise do curto-circuito não se tratam do foco deste trabalho, este tópico não será minuciosamente apresentado nesta revisão. Este tema é abordado de forma detalhada por Beeman (1955) e Schlabbach (2005), onde as particularidades e demais informações sobre o assunto podem ser obtidas.

A Figura 2-1 representa o comportamento da corrente de curto-circuito, onde se verifica a atuação da componente transitória (corrente presumida assimétrica) do mesmo, responsável por proporcionar valores de crista ou pico, no primeiro semiciclo, muito maiores do que em regime. Os dispositivos de proteção são desenvolvidos com o propósito de suportar tais grandezas, as quais podem atingir em seu pico, respeitando certas configurações do sistema, valores de até 2,2 vezes o valor da corrente eficaz de curto-circuito, de acordo com a Tabela 2 da norma NBR IEC 60947-2 (2013), apresentada neste trabalho pela Tabela A - Anexo A.

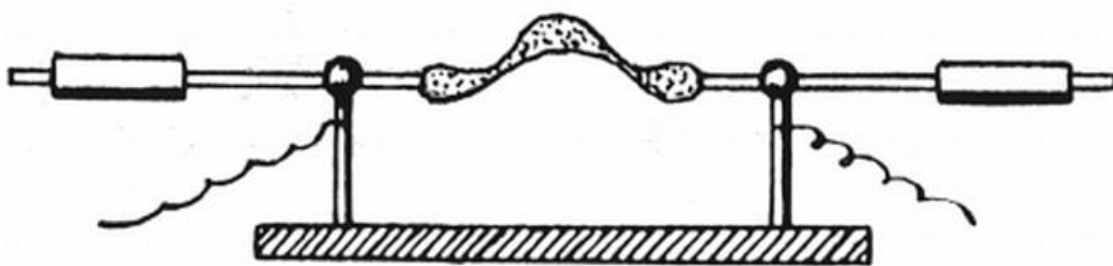


Fonte: Adaptado de Cotrim (2009).

2.3 O arco elétrico

Maecker (2009) descreve em seu trabalho que a invenção do arco elétrico está intimamente relacionada com o desenvolvimento da fonte de energia elétrica, ou seja, do elemento galvânico de Volta em 1800. Desde então, as experiências com correntes contínuas foram possíveis. Esses ensaios levaram em primeiro momento à observação de uma descarga transitória, a qual foi inicialmente nomeada como "*spark*" – que em tradução livre significa “centelha” ou “faísca” – durante a abertura e fechamento do circuito elétrico. Este fenômeno foi relatado, na época, por diversos cientistas que realizaram experimentos a fim de compreender o efeito “*spark*” no ar e no vácuo com metais e carbono como eletrodos. Em 1812 é relatado o primeiro trabalho com ampla abordagem referente ao tema. Davy realiza um estudo sobre arco elétrico operado entre eletrodos de carbono, conforme ilustra a Figura 2-2, sendo o mesmo alimentado por 2000 elementos galvânicos. Desde então, elevados esforços foram deflagrados a fim de modelar o comportamento deste fenômeno atuante na imensa maioria das interrupções de circuitos condutores de corrente. Estes modelos estão em constante evolução e, como pode ser verificado no item 2.1, continuam como foco de diversos estudos até os dias atuais (MAECKER, 2009).

Figura 2-2 – Equipamento utilizado por Davy para seu ensaio de arco elétrico.



Fonte: Maecker (2009).

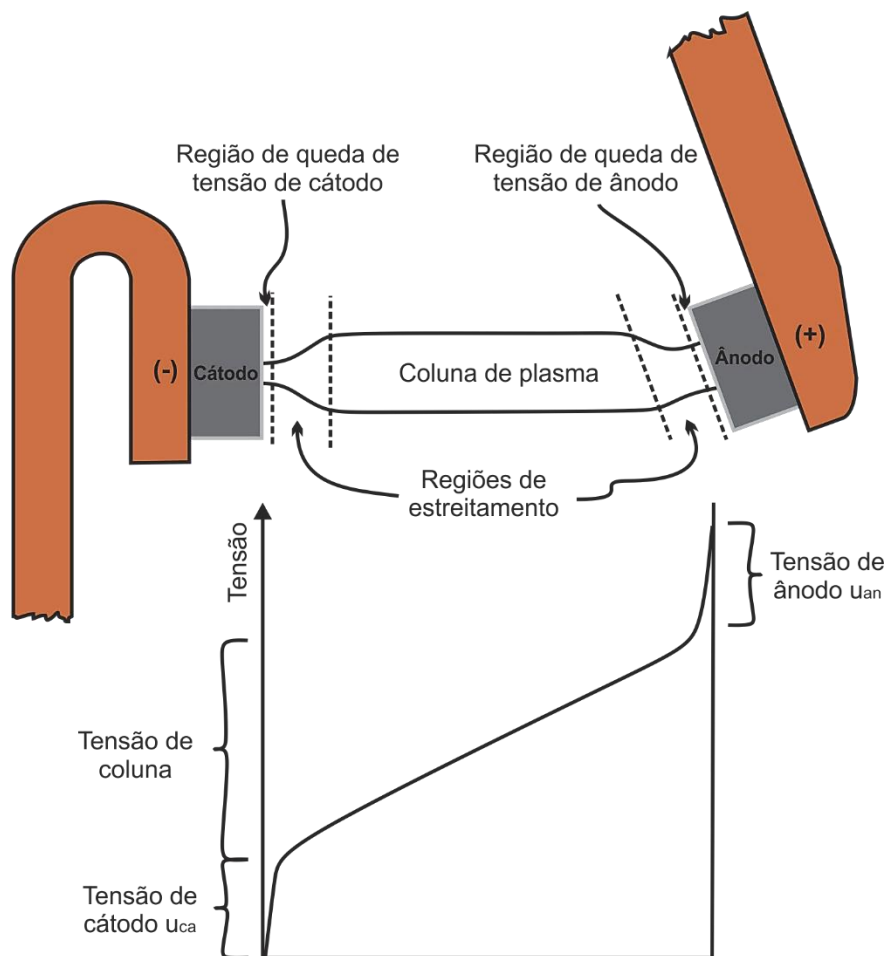
Nesta seção, serão resumidas as características importantes de arcos elétricos em dispositivos de interrupção de modo a fornecer uma visão geral da sua efetiva relevância para a limitação da corrente por meio destes equipamentos.

Durante operações de interrupção de corrente em um disjuntor, o arco elétrico se encontra num contínuo estado de mudança. É originado quando dois contatos conduzindo corrente são fisicamente afastados em um meio isolante, sendo dinamicamente alongado por esta separação e por forças eletromagnéticas que o empurram a locais especialmente projetados

para aumentarem rapidamente a tensão de arco entre os terminais do disjuntor (detalhes no decorrer deste item), e auxiliar na sua extinção após esta tensão superar a tensão de rede. O arco elétrico é dinamicamente aquecido em sua área de seção transversal pela corrente disponibilizada pela fonte de potência ao qual o dispositivo de proteção está conectado. Ao mesmo tempo, o mesmo é arrefecido por seu ambiente e, por vezes, através de outros meios auxiliares (fluxo de gás forçado, paredes frias de contenção, etc.). A evaporação dos materiais em contato com o arco é outro fator que contribui para a taxa de remoção de energia na coluna de plasma do arco. De acordo com Scotti *et al.* (2012): “a perda de calor na coluna de plasma ocorre por advecção (devido ao movimento de gás, natural ou forçado), difusão (também chamada de condução) e radiação”. Em um arco constante, o equilíbrio é efetuado entre a geração e as perdas de energia. O arco fica instável quando há perturbação neste equilíbrio, ou seja, a conservação do arco elétrico é amplamente dependente desta taxa líquida de absorção de energia (seu aquecimento menos o seu arrefecimento). Para que a interrupção da corrente ocorra de maneira efetiva, dois fatores são decisivos: primeiramente, a tensão de arco obrigatoriamente deve ser maior que a tensão de rede; em segundo lugar, o local destinado à extinção do arco elétrico necessita impreterivelmente remover mais energia por meio dos elementos anteriormente citados que a energia gerada pelo fenômeno voltaico. Este resfriamento do ambiente possui como objetivo a desionização do local de forma a inviabilizar o restabelecimento do arco.

O arco elétrico, de acordo com Slade (1999) e Browne Jr. (1984) é composto por três divisões principais: o cátodo, o ânodo e a coluna de plasma. A Figura 2-3 ilustra a separação entre os contatos de um disjuntor, a formação do arco elétrico entre ambos e a queda de tensão em cada região provida pelo mesmo. Os contatos elétricos são referidos como o cátodo e o ânodo e entre estes é localizada a região do arco elétrico, onde se encontram a coluna de plasma, a região de queda de tensão do cátodo, a região de queda de tensão do ânodo e as regiões de estrangulamento. Elétrons são injetados no arco pelo cátodo a uma taxa proporcional à corrente de arco, sendo coletados pelo ânodo ao mesmo ritmo, uma vez que a corrente deve ser contínua.

Figura 2-3 – Esquemático de um arco elétrico e sua distribuição potencial originado pela separação de contatos durante o seccionamento do circuito condutor de corrente.



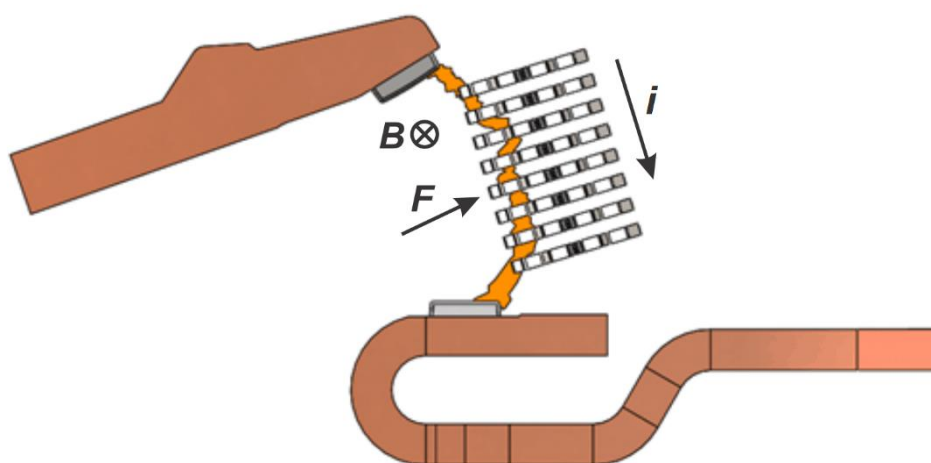
Fonte: Adaptado de Slade (1999).

O efeito originado na abertura dos contatos é uma queda de tensão de cátodo de, aproximadamente, 8 a 20 V e uma menor queda de tensão de ânodo entre 1 e 12 V, de acordo com Slade (1999), ou entre 0 e 5 V, conforme Browne Jr. (1984). Browne Jr. também relata que ambas as regiões de queda de tensão se estendem ao longo de uma zona com cerca de 10^{-3} mm e que as duas contribuições são consideradas pouco dependentes da corrente que alimenta o arco. Desta forma, Ghezzi e Balestrero (2010) descrevem que qualquer par ânodo-cátodo é responsável por uma queda de tensão em torno de 20 V, a qual é aplicada em oposição a uma tensão de rede que possui algumas centenas de volts.

Um método comum de aumentar a tensão total do arco entre os contatos principais, utilizado em muitos projetos de disjuntores, é forçar o arco por meio de forças eletromagnéticas intrínsecas ao sistema de forma que o mesmo altere sua trajetória para o interior de uma estrutura de divisão, conforme Figura 2-4. A câmara de extinção de arco, projetada por meio deste conceito, inseriu no equipamento de proteção várias lâminas de material ferromagnético

empilhadas uma sobre as outras com pequenos espaçamentos entre elas e posicionada estrategicamente próxima dos contatos elétricos. Esta estrutura permite à câmara de extinção dividir em diversos pares ânodo-cátodo o arco elétrico expelido por meio de forças magnéticas para o seu interior, formando assim uma ligação em série destas pequenas porções de arco, cada uma com seu próprio par ânodo-cátodo e sua intrínseca queda de tensão de 20 V em cada um destes. Na Figura 2-4, uma câmara de extinção composta por oito lâminas separadoras se encontra ilustrada, a mesma apresentará como resultado um total de nove pequenos arcos elétricos. Como já salientado, a queda de tensão por par ânodo-cátodo possui a capacidade de contribuir para o incremento da tensão de arco de maneira praticamente independente da corrente que percorre o fenômeno, desta forma a queda de tensão será multiplicada em nove vezes à tensão de 20 V gerada em cada par ânodo-cátodo, chegando-se assim ao nível de aproximadamente 180 V de tensão de arco. Este valor é bastante expressivo e contribui de forma muito eficaz para a limitação de corrente por parte do disjuntor em níveis de tensão mais baixos, porém tal limitação nem sempre é obtida quando a tensão de alimentação for mais elevada.

Figura 2-4 – Arco elétrico sendo direcionado para a câmara de extinção em estrutura de divisão.



Fonte: Adaptado de Ericsson (2014).

Sendo:

- i intensidade da corrente elétrica, em (A);
- B campo magnético, em (T);
- F força magnética no arco, em (N).

Diversas técnicas já foram implementadas com a finalidade de se obter maiores tensões de arco, no entanto as estratégias mais comuns são dadas através do prolongamento e resfriamento do arco. Estes procedimentos visam o aumento da tensão da coluna do arco e a divisão do arco em partes, tendo a divisão do arco maior efetividade em relação ao seu prolongamento, em razão da utilização dos pares ânodo-cátodo como forma de incrementar rapidamente a tensão do arco (GÜNTHER, 2005).

2.4 Dispositivos de proteção contra curto-circuitos

Sistemas de potência em instalações industriais, edifícios comerciais e institucionais são projetados para suprir cargas de forma segura e confiável. Uma das principais considerações na concepção de um sistema de potência é o controle adequado de curto-circuitos, de modo a minimizar os efeitos nocivos que os mesmos podem causar aos equipamentos e às pessoas que trabalham no ambiente em que estão instalados. Para tanto, a falta deve ser eliminada o mais rápido possível por meio de equipamentos capazes de detectar as elevadas correntes e interromper sua circulação, condição desempenhada pelos fusíveis e disjuntores.

2.4.1 Disjuntores

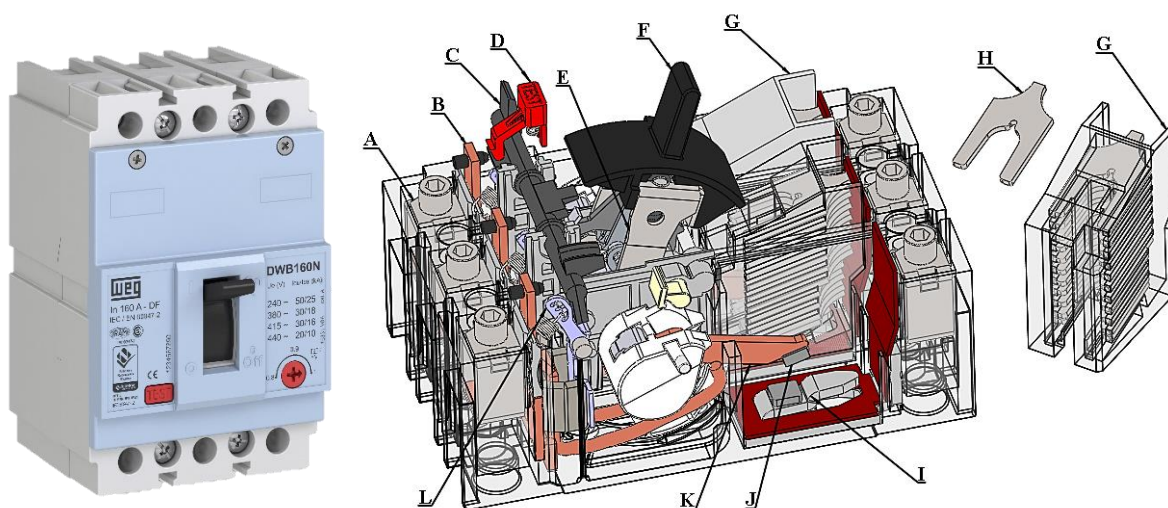
O disjuntor é definido como: “um dispositivo mecânico de manobra capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais do circuito, assim como estabelecer, conduzir por tempo especificado e interromper correntes em condições anormais especificadas do circuito, como as de curto-circuito” (NBR IEC 60947-2, 2013).

A norma IEC 60038 (2009), de acordo com sua Tabela 1, apresentada neste trabalho pela Tabela B - Anexo B, delimita tensões nominais usuais entre 100 V e 1000 V para sistemas elétricos de corrente alternada (CA) em 50 ou 60 Hz, incluindo equipamentos e produtos relacionados, sendo por convenção 1000 Vca amplamente aceita como a tensão limite da baixa tensão para operação dos sistemas de distribuição. Desta forma, disjuntores de baixa tensão são aqueles equipamentos que proporcionam proteção para circuitos dentro destes níveis de alimentação, sendo as classificações mais elevadas abrangidas pelo âmbito de disjuntores de média e alta tensão. Ghezzi e Balestrero (2010) retratam que a distinção entre os disjuntores não está relacionada apenas por uma simples divisão convencional, mas em função das diferentes e peculiares soluções tecnológicas que são utilizadas para interromper os arcos elétricos gerados em baixa, média e alta tensão.

Zhang (2005) expõem em seu trabalho um apanhado histórico referente ao desenvolvimento e a evolução dos disjuntores, revelando em ordem cronológica todo o processo evolutivo destes dispositivos, desde os primeiros disjuntores a óleo, alguns aspectos que resultaram na produção dos disjuntores a vácuo, a gás e demais disjuntores utilizados com o avanço dos sistemas de proteção das redes de distribuição de baixa tensão. Zhang finda sua revisão com o disjuntor em caixa moldada limitador de corrente, objeto que será utilizado como modelo a ser representado via protótipo neste trabalho.

A NBR IEC 60947-2 (2013) define o disjuntor em caixa moldada como um “disjuntor tendo alojamento de sustentação montado em material isolante moldado, formando parte integral do disjuntor”, e disjuntor limitador de corrente como um “disjuntor que, ao interromper uma determinada corrente especificada, impede a corrente interrompida limitada de atingir um valor de crista presumido e que o limite à energia limitada (I^2t) a um valor inferior de energia-limite de um meio ciclo da corrente presumida simétrica”. A Figura 2-5 apresenta um disjuntor em caixa moldada limitador de corrente trifásico, o mesmo é amplamente conhecido internacionalmente pela sigla MCCB, do inglês “*Molded Case Circuit Breaker*”.

Figura 2-5 – Disjuntor trifásico em caixa moldada termomagnético: A) terminal de cabos; B) bimetálico; C) eixo de desarme; D) botão de teste; E) mecanismo de operação; F) manipulador; G) câmara de extinção; H) plaqueta de extinção; I) contato fixo; J) pastilha de contato (prata); K) contato móvel; L) disparador magnético.



Fonte: WEG Drives & Controls (2022).

Este equipamento tem seu nome originado pelo fato do dispositivo ser enclausurado em uma caixa moldada de material termoplástico ou termofixo. O mesmo utiliza-se de unidades de disparo termomagnéticas ou eletrônicas que podem ser fixas ou intercambiáveis. A unidade de disparo termomagnética fornece proteção ao sistema elétrico combinando um dispositivo sensível à temperatura (unidade de disparo térmico), com um dispositivo eletromagnético sensível a corrente (unidade de disparo magnético), sendo que ambos os dispositivos atuam mecanicamente sobre o eixo de desarme (mecanismo de disparo). Já a unidade de disparo eletrônica, remove ambos os dispositivos acima referidos e institui um microprocessador em seus lugares, o qual possui a atribuição de processar o sinal de corrente e operar a abertura do disjuntor via bobina de disparo em casos de sobrecarga ou falta. Por processamento digital do sinal, ela fornece as seguintes funções de proteção: disparo de tempo longo, disparo de tempo curto, disparo instantâneo e disparo por detecção de falta à terra (PIVOTTO, *no prelo* 2016).

Estes dispositivos de proteção possuem três funções principais: Devem conduzir a corrente da maneira mais eficiente possível, quando fechado. Quando abertos, devem isolar os contatos (fixos e móveis) da forma mais eficaz possível. E, no caso de falhas no circuito elétrico monitorado, eles devem interromper a corrente de falta o mais rápido e confiável possível, protegendo assim todos os equipamentos subsequentes.

Os disjuntores em caixa moldada limitadores de corrente apresentam, em situações de curto-circuito, algumas técnicas de operação intrínsecas às suas características construtivas. Quando uma falta é ocasionada, se a força repulsiva eletrodinâmica exceder a força da mola, em detalhes no item 2.4.1.2, os contatos (móvel e estacionário) se separarão e um arco elétrico será gerado entre ambos. Ao mesmo tempo, uma força, denominada “*blow-open force*” (sem tradução em português), que é produzida por uma rede de pressão no contato móvel em função do gás ionizado pela coluna de arco, atuará no sistema. O distanciamento entre os contatos continuará a aumentar uma vez que a pressão do gás entre estes seja suficiente para os afastar ainda mais, juntamente com a ação da força de repulsão eletrodinâmica. Então, o mecanismo de operação começará a se movimentar após um curto intervalo para o processo de disparo (via dispositivo eletromagnético ou eletrônico) e conduzirá o contato móvel para sua posição final (LI *et al.*, 2007; SHEA, DEVAULT e CHIEN, 1993).

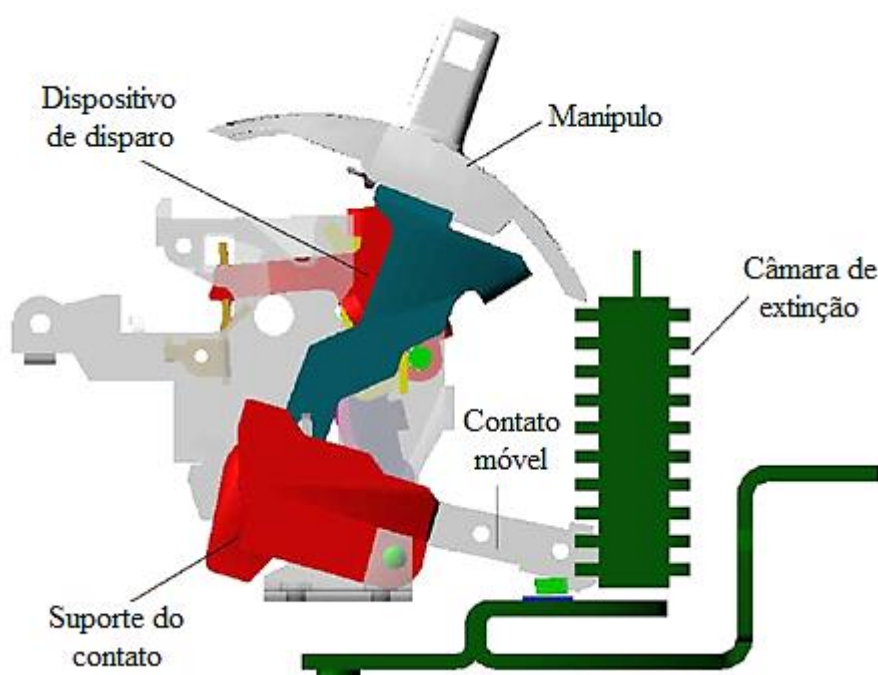
Durante o processo de afastamento dos contatos, o arco se alongará e será direcionado ao interior da câmara de extinção com a ajuda da força de Lorentz e / ou da força dinâmica do gás, acarretando em um rápido incremento na tensão de arco de modo a acelerar a sua extinção. Verifica-se, deste modo, que o processo de interrupção do MCCB é um fenômeno acoplado de elevada complexidade e interatividade entre o circuito elétrico, o campo eletromagnético e o

sistema de movimento do mecanismo. Além disso, evidencia-se que o status de movimento do contato móvel determina, com grande expressão, o desempenho de interrupção de um disjuntor em caixa moldada. Portanto, nota-se a relevância de uma profunda investigação sobre o processo de interrupção para analisar e projetar novos produtos MCCB (LI *et al.*, 2007).

2.4.1.1 Mecanismos de operação

O mecanismo de operação ou acionamento, apresentado através da Figura 2-6, trata-se de um dos mais relevantes componentes de um dispositivo de chaveamento. O mesmo é incumbido de efetuar a interface com o usuário (meio externo) e aplicar a força necessária para abrir os contatos do disjuntor ou mantê-los fechados (meio interno).

Figura 2-6 – Mecanismo de operação.

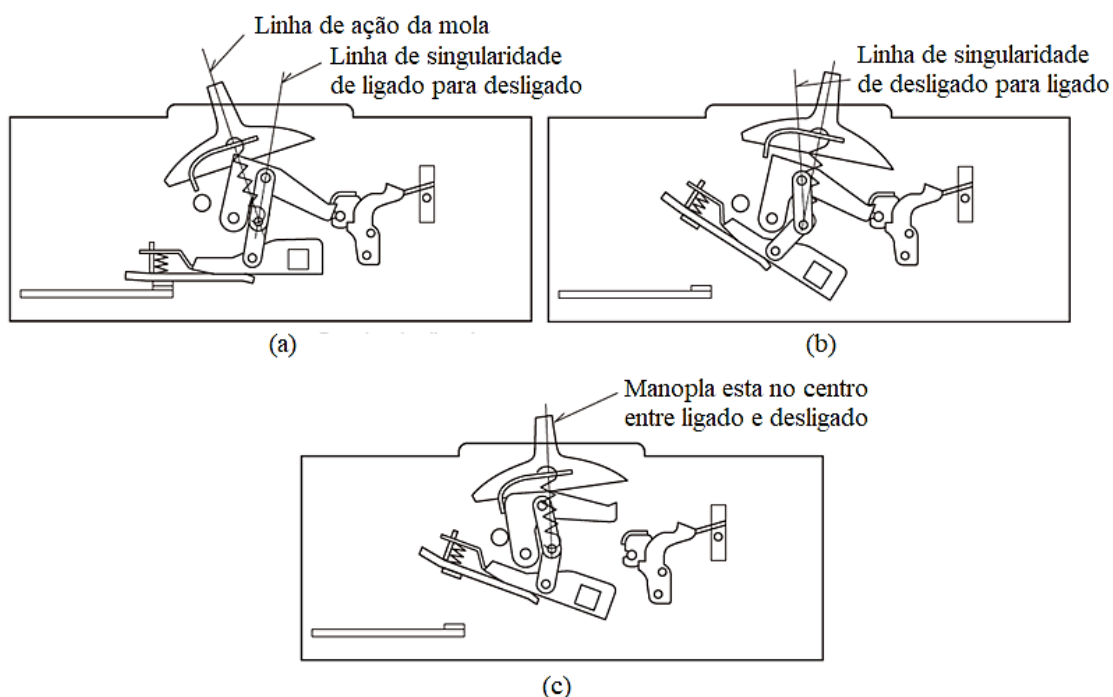


Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2007).

A força do mecanismo de operação deve ser suficiente para alterar a posição do braço de contato em um evento de interrupção e também para carregar a mola do braço de contato móvel de modo a manter a pressão de contatação. Durante um curto-circuito ou um evento de sobrecarga, a unidade de disparo destrava o mecanismo de operação, fazendo com que ele abra o disjuntor, separando os contatos (ou mantê-los separados quando eles abrirem – caso da levitação de contatos) de modo a interromper o fluxo de corrente (EATON, 2018).

A velocidade de abertura ou fechamento dos contatos é independente da velocidade com que o manípulo é movimentado. Isso é conhecido como rápido fechamento e rápida abertura, do inglês “*quick-make*” e “*quick-break*”. O “*trip-free*” (sem tradução em português), trata-se de um atributo funcional do disjuntor, o qual impossibilita que a retenção do manípulo na posição LIGADO impeça o dispositivo de proteção de abrir seus contatos em casos de anormalidades no circuito elétrico. A posição do manípulo indica o estado dos contatos – fechado, aberto ou desarmado. Quando os contatos estão na posição desarmado, o manípulo se encontra em uma posição intermediária entre ligado e desligado. Para restaurar o serviço depois que o disjuntor desarmar, o manípulo deve ser movido primeiramente para a posição desligado, partindo-se de sua posição central desarmada. Em seguida, o manípulo deve ser movido para a posição ligado. A posição distinta do manípulo busca indicar claramente que o circuito ao qual o disjuntor está conectado se encontra com falha. Os três estados possíveis dos contatos – fechado, aberto ou desarmado – são apresentados na Figura 2-7.

Figura 2-7 – Mecanismo de operação: (a) manípulo na posição ligado; (b) manípulo na posição desligado; (c) manípulo na posição desarmado.



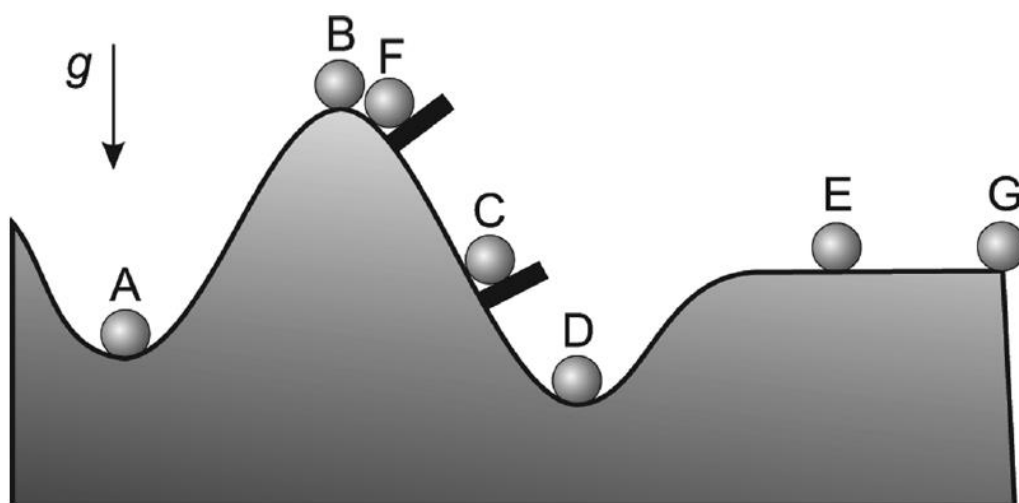
Fonte: Adaptado de Mitsubishi Electric (2013).

Quando o manípulo é deslocado para a posição ligado ou desligado, a linha de ação das molas retráteis (molas principais) irá passar pela singularidade (ponto morto) do limite da articulação de alternância do mecanismo, a articulação de alternância bruscamente se estenderá

quando o manípulo for movimentado para a posição ligado ou se fletirá quando o manípulo for conduzido para a posição desligado, sendo que os contatos irão ser rapidamente operados, independentemente da velocidade de operação do manípulo. No caso de disparo por sobrecorrente, o gatilho girará, o engate será liberado, o fulcro superior da articulação de alternância ultrapassará a linha de ação da mola retrátil e a articulação de alternância se fletirá rapidamente para abrir os contatos. Uma vez que o rápido movimento do mecanismo de articulação de alternância é usado como um mecanismo de abertura e fechamento, os contatos podem efetuar rápidas ações de abertura e fechamento, independentemente da velocidade de operação do manípulo por parte do usuário. Isso é eficaz na prevenção da deposição dos contatos durante a comutação e no fechamento simultâneo de polos (MITSUBISHI ELECTRIC, 2013).

Em suma, conforme Pucheta *et al.* (2012), a operação de um mecanismo de acionamento consiste basicamente em abrir e fechar contatos elétricos entre dois estados estáveis de energia (armazenada e liberada através das molas principais vinculadas ao manípulo – observar Figura 2-7). Estes estados de energia podem ser verificados por meio da Figura 2-8. Tal conceito terá grande relevância no detalhamento do processo de concepção e funcionamento do subsistema de acionamento do dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão (item 4.2.2.2).

Figura 2-8 – Possíveis estados de energia: (A) e (D) são estáveis; (B) é instável; (C) e (F) são estáveis através de restrições externas; (E) é neutramente estável; e (G) está em um estado neutro, mas próximo a uma transição instável.

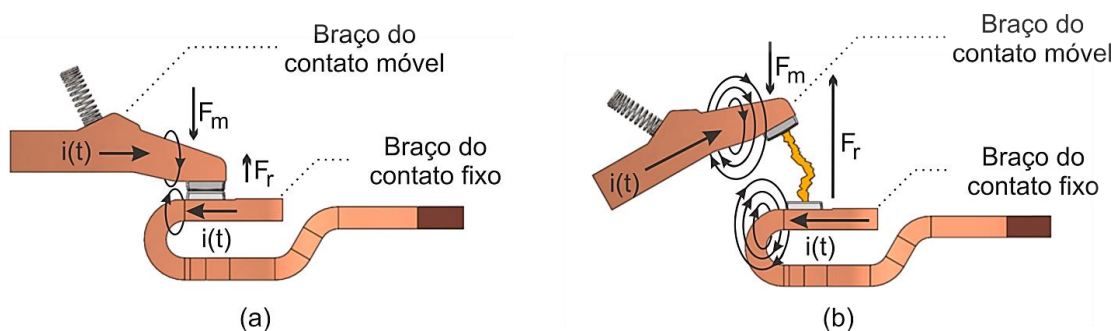


Fonte: Pucheta *et al.* (2012).

2.4.1.2 Levitação dos contatos

Valdes *et al.* (2009) retratam um formato geométrico de contatos muito utilizado em disjuntores e conhecido como circuito de corrente reversa, mostrado na Figura 2-9.

Figura 2-9 – Disjuntor com circuito de corrente reversa: (a) sob condições normais de operação; (b) sob severos valores de curto-circuito.



Fonte: Autoria própria (2022).

Na qual:

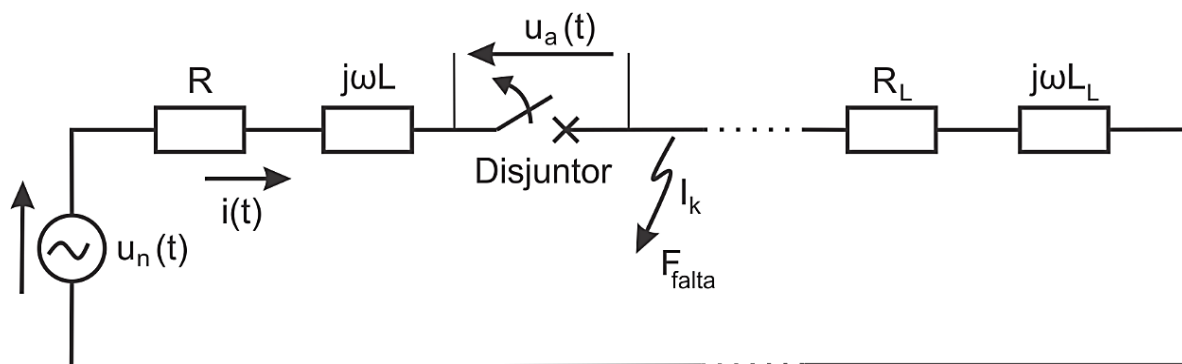
- $i(t)$ intensidade da corrente elétrica, em (A);
- F_m força exercida pela mola, em (N);
- F_r força exercida pela repulsão dos contatos (magnética), em (N).

Neste projeto, a corrente é encaminhada através de braços de contatos paralelos para que as forças magnéticas formadas sejam opostas. À medida que a corrente flui através destes braços de contato, campos magnéticos são formados em torno de cada braço, como ilustra a Figura 2-9.a. Uma vez que o fluxo de corrente num braço é na direção oposta ao fluxo de corrente no outro braço, os dois campos magnéticos se opõem um ao outro, ou seja, forças repulsivas são criadas entre ambos. Forças de mola do mecanismo devem obrigatoriamente manter os contatos fechados para correntes dentro da faixa de operação do disjuntor. Durante condições de alta corrente de falta, as forças de repulsão magnéticas (eletrodinâmicas) rapidamente aumentam para valores que obrigam os contatos a superar as forças da mola que mantém os contatos juntos, fazendo que eles se separem um do outro de maneira extremamente rápida (Figura 2-9.b). Esta ação é chamada de levitação (*lifting*) dos contatos.

De acordo com os próprios nomes dos componentes, o braço do contato fixo é projetado e posicionado no disjuntor de forma a permanecer sempre inerte, ficando a cargo do braço do contato móvel realizar o deslocamento para a obtenção do seccionamento do circuito. Antes do

disparo magnético ou outro disparo instantâneo iniciar qualquer ação para destravar o disjuntor, as forças de repulsão podem causar um significativo afastamento entre os contatos, provocando desta forma o início do desenvolvimento de uma tensão de arco “ u_a ” – que será apresentada na Figura 2-10 – e conseqüentemente, um efeito limitador da corrente e da energia antes dos contatos serem conduzidos e mantidos em sua posição de repouso no estado de contato aberto pelo mecanismo de desarme do equipamento. Muitos disjuntores possuem formas de manter esses contatos abertos por meio de travas, de modo a sustentar esse distanciamento ocasionado pela levitação até o momento em que o mecanismo de desarme cesse sua inércia e comece a operar para a definitiva abertura de seus contatos. A combinação de forças que atuam diretamente nos braços de contato e o mecanismo de disparo instantâneo criam as características dos disjuntores limitadores de corrente.

Figura 2-10 – Representação monofásica simplificada da rede para uma operação de disjuntor sob condições de curto-circuito.



Fonte: Adaptado de Bayliss e Hardy (2007).

Sendo:

- $i(t)$ intensidade da corrente elétrica, em (A);
- I_k valor eficaz da corrente de curto-circuito simétrica, em (A);
- $u_n(t)$ tensão nominal da fonte de alimentação, em (V);
- R resistência da fonte + linha e rede de distribuição, em (Ohms);
- $j\omega L$ reatância indutiva da fonte + linha e rede de distribuição, em (Ohms);
- R_L resistência da carga, em (Ohms);
- $j\omega L_L$ reatância indutiva da carga, em (Ohms);
- $u_a(t)$ tensão de arco, em (V);
- F_{falta} falta.

Esta configuração de posicionamento dos braços de contato em combinação a outros fatores, que serão descritos posteriormente, produz de forma extremamente rápida e em elevada magnitude a tensão de arco “ u_a ”, que também pode ser descrita como uma queda de tensão ou força eletromotriz reversa, segundo Günther (2005). Esta tensão de arco é inserida ao circuito da Figura 2-10 no instante de abertura dos contatos e, por consequência, inicia a formação do arco elétrico entre ambos os contatos, fato que acontece em qualquer abertura de contatos envolvendo elevados valores de corrente.

Assim que o disjuntor inicia o processo de abertura de seus contatos, a tensão de arco “ u_a ” é gerada em seus terminais de forma a se opor a tensão de alimentação “ u_n ”, sendo regida pela Equação 2-1:

$$u_n = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + u_a \quad (V) \quad (2-1)$$

Considerando a representação apresentada através da Figura 2-10 como um circuito indutivo puro, uma vez que para faltas acima de 10 kA a resistência do circuito não supera alguns miliohms ($m\Omega$), resulta-se na Equação 2-2:

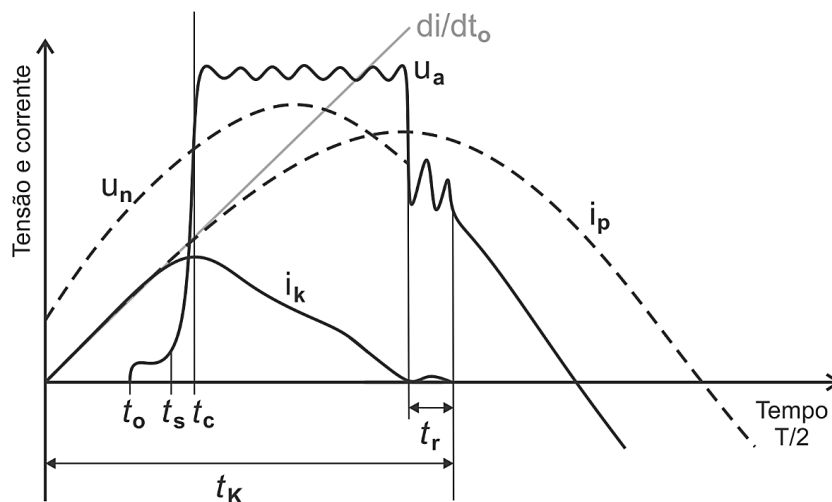
$$u_n = L \frac{di}{dt} + u_a \quad (V) \quad (2-2)$$

Na máxima corrente de curto-circuito: $di / dt = 0$; desta forma tem-se a Equação 2-3:

$$u_n = u_a \quad (V) \quad (2-3)$$

Estes fatores são verificados por meio da Figura 2-11, na qual são identificados os principais tempos e etapas nas curvas de corrente e tensão em função do tempo. Também se evidencia de forma bastante clara o exato momento em que as tensões “ u_n ” e “ u_a ” se interceptam, tendo como resultado a limitação da corrente de curto-circuito e, por consequência, o máximo valor de corrente registrado exatamente neste ponto.

Figura 2-11 – Curvas características de tensão e corrente na abertura dos contatos de um disjuntor limitador de corrente.



Fonte: Adaptado de Bayliss e Hardy (2007) e NHP Electrical Engineering Products (2000).

Onde:

u_a tensão de arco, em (V);

u_n tensão nominal da fonte de alimentação, em (V);

i_p corrente de curto-circuito presumida, em (A);

i_k corrente de curto-circuito limitada, em (A);

di/dt_o taxa de variação no tempo (derivada) inicial da corrente de curto-circuito, em (A/s);

t_o momento em que ocorre a levitação dos contatos, em (ms);

t_s momento em que ocorre a ignição arco, em (ms);

t_c momento da interceptação entre as tensões “ u_a ” e “ u_n ”, em (ms);

t_r tempo de transitório da tensão de reestabelecimento, em (ms);

t_k tempo de duração do curto-circuito, em (ms).

A tensão de restabelecimento ocorre no momento em que o disjuntor interrompe um curto-circuito cessando a corrente. Neste instante a tensão de alimentação “ u_n ” possui uma significativa diferença em relação à tensão de arco “ u_a ”. Assim, a tensão de recuperação tende a fazer com que ambas se igualem, de forma que a tensão de arco – uma vez que o arco elétrico já foi extinto – alcance e “siga” a tensão de alimentação, por meio de um transiente de alta frequência.

2.5 Ensaio de curto-circuito em disjuntores de baixa tensão

Os ensaios de curto-circuito em disjuntor são essenciais para garantir o desempenho seguro e confiável desse elo chave na cadeia de ativos de energia. Os disjuntores são submetidos a curtos-circuitos em laboratórios de ensaio e oscilogramas são utilizados para o registro e melhor compreensão do comportamento dos disjuntores no momento da formação do arco, durante a interrupção e após a sua extinção (PIVOTTO, *no prelo* 2016).

A NBR IEC 60947-2 (2013) define a capacidade de interrupção máxima (última) em curto-circuito (Icu), como a “capacidade de interrupção para a qual as condições prescritas de acordo com a sequência de ensaios especificada não inclui a aptidão do disjuntor conduzir a corrente nominal continuamente”, ou seja, não é garantido que o mesmo será capaz de operar em sua plena capacidade. Entretanto, o mesmo deve ser seguro nesta condição durante e após a interrupção de uma corrente de curto-circuito e para esta comprovação é também submetido a um teste de isolamento elétrica após o ensaio de Icu. Esta sequência de teste é finalizada através da verificação dos disparadores de sobrecarga do disjuntor.

A capacidade de interrupção de curto-circuito em serviço (Ics), de acordo com a NBR IEC 60947-2 (2013), é definida como a “capacidade de interrupção para a qual as condições prescritas de acordo com a sequência de ensaios especificada incluem a aptidão do disjuntor conduzir a corrente nominal continuamente”. Esta sequência de teste inclui a verificação da capacidade operacional do disjuntor na corrente nominal, teste de isolamento elétrica, teste de elevação de temperatura e verificação dos disparadores de sobrecarga (NBR IEC 60947-2, 2013).

A sequência de teste para Icu é “O - t - CO” e “O - t - CO - t - CO” para Ics. O tempo t entre as operações é de 3 minutos (em geral). Para a abertura na operação “O”, a corrente de curto-circuito é iniciada em um ângulo de fase de tensão especificamente definido para que culmine no ângulo em que a corrente de pico é atingida. Para ambos os testes, “O” significa abertura dos contatos do disjuntor via disparador eletrônico ou magnético uma vez que o curto (conexão de baixa resistência) entre seus terminais de carga é identificado. Enquanto que, “CO” trata-se do fechamento mecânico de seus contatos sob seus polos de carga em curto, gerando sua abertura praticamente instantânea assim que o disparador eletrônico ou magnético percebe a referida falta.

Em resumo, a diferença fundamental entre Icu e Ics trata-se da obrigatoriedade do disjuntor, na sua tensão de operação, manobrar normalmente e conduzir sua corrente nominal

após a sequência de testes para certificação da capacidade de interrupção de curto-circuito em serviço (Ics).

Salienta-se que, para a fase de desenvolvimento de um disjuntor, uma vasta demanda de amostras para ensaios é requerida, visto que se tratam de testes muitas vezes destrutivos (dispositivo de proteção em avaliação é seriamente avariado) e em longas sequências de verificação. Além destes fatores, podem requerer um elevado número de distintas configurações (materiais e geometrias) para a obtenção dos resultados almejados, gerando por consequência, uma considerável ampliação, principalmente, nos custos e tempo de projeto. Neste contexto, evidencia-se o elevado nível de conhecimento e redução de tais variáveis de projeto que uma bancada experimental de modelo poderá gerar no processo de desenvolvimento de novos produtos. Isto é possível, tendo em vista a reduzida complexidade para alterações em suas configurações de ensaio em associação a grande agilidade proporcionada para tais variações, como será verificado nas próximas seções.

2.6 Projeto do produto

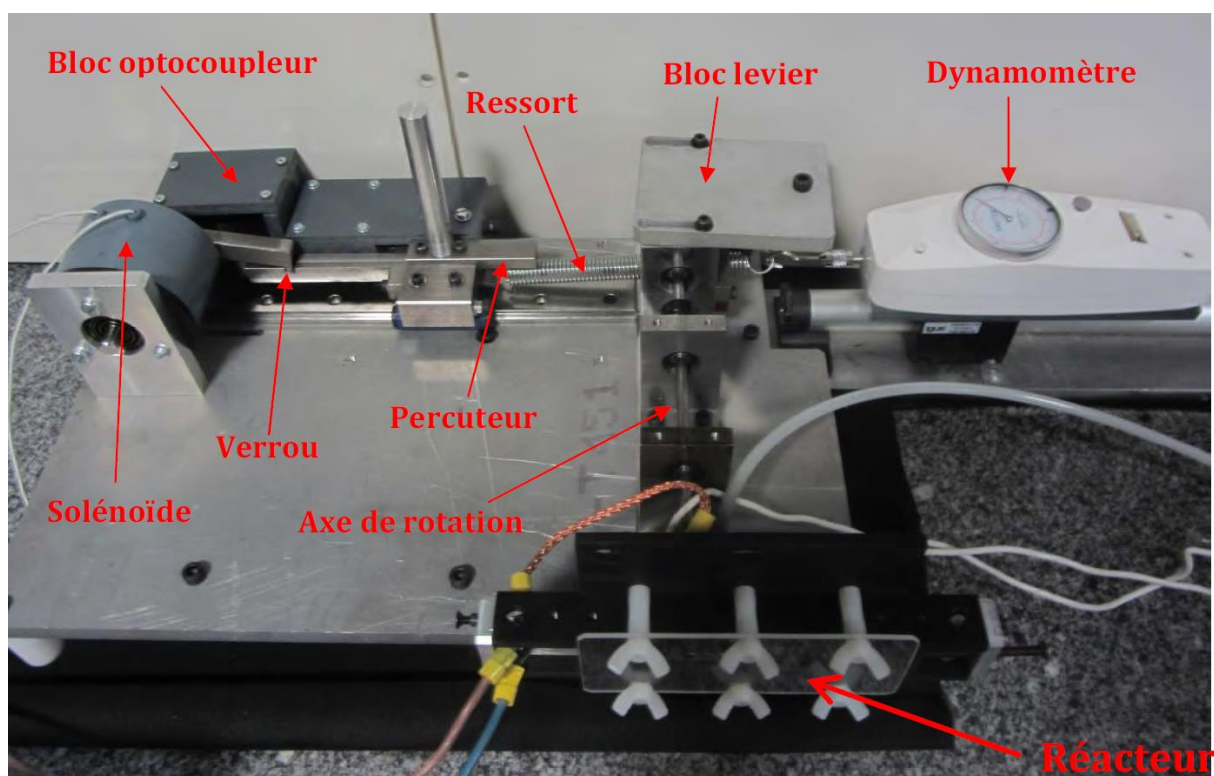
Projeto de engenharia, conforme Norton (2013), pode ser conceituado como: “O processo de aplicação das várias técnicas e princípios científicos com o intuito de definir um dispositivo, um método ou um sistema suficientemente pormenorizado para permitir sua realização”, ou seja, trata-se da criação de uma máquina que funcione bem, com segurança e confiabilidade. Assim sendo, é de responsabilidade dos engenheiros responsáveis pelo projeto a definição e cálculos de movimentos, forças e mudanças de energia de modo a determinar as dimensões, as formas e os materiais necessários para cada uma das peças que compõem o dispositivo em desenvolvimento.

Ao longo das últimas décadas, como destacado no estado da arte, uma vasta gama de bancadas de ensaios experimentais fora utilizada a fim de estudar as mais distintas características construtivas envolvidas no estabelecimento, condução e interrupção de corrente em circuitos elétricos de baixa tensão. Estes estudos visam ampliar o conhecimento empírico referente ao assunto e o aplicar em conjunto com fundamentação teórica, modelagem e simulações numéricas no aperfeiçoamento dos referidos dispositivos de proteção e, conseqüentemente, no incremento da capacidade de interrupção de curto-circuito.

Variadas estruturas e distintos sistemas de acionamento foram desenvolvidos com o intuito de replicar as particularidades observadas nos diferentes sistemas que atuam em congruência para seccionar um circuito elétrico da forma mais segura e rápida possível. Em sua

tese de Doutorado, Quemeneur (2017) realizou um aprofundado estudo referente ao deslocamento do arco elétrico e suas forças em disjuntores de baixa tensão. Além disso, apresentou de forma esmiuçada sua bancada de ensaios, a qual se encontra ilustrada através da Figura 2-12.

Figura 2-12 – Bancada de ensaios de modelo de Quemeneur.



Fonte: Quemeneur (2017).

Devido a relevância do trabalho e do elevado nível de detalhamento referente ao projeto da bancada de ensaios para estudo de arcos elétricos, o mesmo será empregado como base técnica para o desenvolvimento do dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão. As especificidades do projeto serão apresentadas no Capítulo 4.

2.6.1 Design Thinking

O *Design Thinking* é um método específico para resolução de complexos problemas e geração de soluções inovadoras, baseado em uma abordagem centrada no usuário com equipes multidisciplinares. O *Design Thinking* - embora introduzido e moldado pela consultoria de design IDEO - está se tornando cada vez mais popular entre as escolas de negócios e é aplicado

nos departamentos de P&D das empresas para fomentar a inovação. Ao contrário do processo de design criativo típico, que geralmente é um processo intuitivo e individual, o *Design Thinking* consiste em uma sequência flexível de etapas de processo e loops de iteração, cada um incluindo várias ferramentas e resultando em diferentes artefatos (THORING e MÜLLER, 2011). Esta característica também é ressaltada por Lima *et al.* (2014), que destaca que as fases do *Design Thinking* são aplicadas em ciclos de iteração não lineares e versáteis, apesar de serem representadas de forma linear através da Figura 2-13. Isso se deve ao fato de que suas etapas podem ser ajustadas, durante o seu processo de execução, de acordo com as necessidades do projeto e o contexto do problema. Tais ações podem ocorrer de maneira independente, sem a necessidade de se esperar pelo término de uma etapa para se iniciar outra.

Figura 2-13 – Esquema representativo das etapas do processo de *Design Thinking*.



Fonte: Lima *et al.* (2014).

O ciclo de aplicação de *Design Thinking*, segundo Lima *et al.* (2014), é dividido entre as seguintes fases:

Fase de imersão – A fase de imersão é dividida em uma etapa preliminar e uma etapa de aprofundamento. Na aprendizagem imersiva preliminar, a equipe busca compreender a abrangência do problema e do tema a ser pesquisado sob diversas perspectivas, de modo a se obter diferentes pontos de vista. São realizadas pesquisas exploratórias de campo e documentais, nas quais se buscam referências e fontes de informação em livros, na Internet, dentre outras. Nesta etapa, além de definir o escopo, as restrições e as limitações do planejamento e execução do projeto, também são identificados os principais participantes da área do projeto.

A imersão em profundidade começa com um levantamento baseado em entrevistas estruturadas e não estruturadas com os principais interessados, com o objetivo de explorar diferentes perspectivas do contexto do problema. O objetivo é considerar os aspectos positivos e negativos, de modo a determinar o seu significado direto e / ou indireto na vida das pessoas. Desta forma, reflexões são geradas e registradas e, a partir destas, *insights* e conclusões preliminares são extraídos sobre o tema trabalhado.

Fase de análise e síntese – Como o próprio nome indica, na etapa de análise e síntese, as informações coletadas na etapa de imersão são analisadas e sintetizadas. O objetivo é identificar os principais problemas e pessoas inerentes à esfera abrangida pelo estudo. Ademais, estabelecem-se as primeiras ideias de solução a serem prototipadas. Em resumo, busca-se a compreensão, parcial ou total, do que é abordado no projeto.

Fase de ideação – Nesta fase, as ideias originadas via brainstorming são utilizadas para a elaboração de soluções inovadoras para o contexto estudado. Para auxiliar nesta etapa, sessões de *brainstorming*, *workshops* de co-criação e matrizes de posicionamento, dentre outras técnicas, são empregadas.

Fase de prototipação – Trata-se da etapa de materialização da abstração idealizada na fase de ideação, com base nas suposições de soluções apontadas como satisfatórias para sanar ou mitigar os problemas dos usuários. Portanto, devem ser construídos protótipos de artefatos que representem os produtos e serviços criados para satisfazer os problemas identificados. Esta trata-se da fase final deste trabalho, bem como, do objetivo deste estudo. Uma vez que, culmina-se aqui na materialização do almejado dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão.

Em relação a este ponto, Christie *et al.* (2012) definem a estratégia de prototipagem como o conjunto de decisões que ditam quais ações serão tomadas para realizar o desenvolvimento do(s) protótipo(s). As estratégias de prototipagem incluem uma variedade de opções diferentes. No sentido mais amplo, os protótipos podem ser físicos ou virtuais. Os protótipos virtuais podem incluir simulações de computador e / ou análise de engenharia. Os protótipos físicos podem ser desenvolvidos para um subsistema ou para todo o sistema. Além disso, os protótipos físicos podem ser em tamanho real ou dimensionalmente escalados e podem ser totalmente funcionais ou criados para exibir apenas funcionalidade parcial. As escolhas adicionais que fazem parte de uma estratégia de prototipagem incluem aos responsáveis a opção pelo desenvolvimento de protótipos para uma série de conceitos em paralelo e se possuem planos para a concepção de uma sequência de protótipos de um conceito. As escolhas feitas

para as variáveis de prototipagem identificadas acima podem fazer tremendas diferenças no período de tempo, custo e eficácia do trabalho de prototipagem.

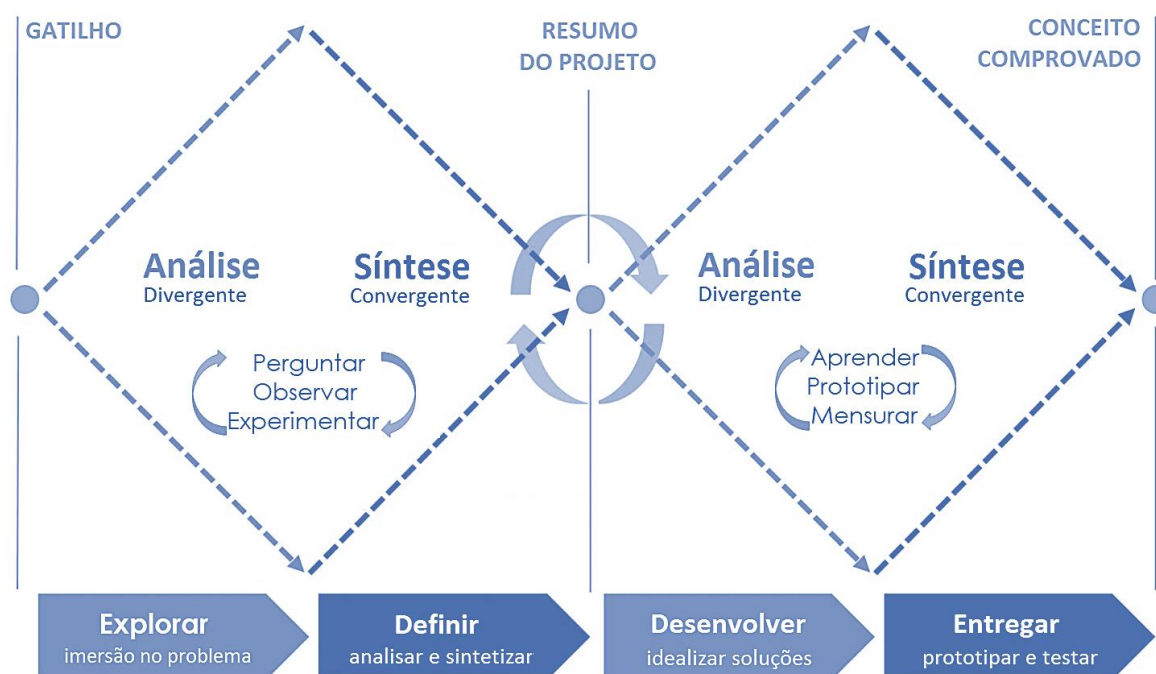
Averigua-se, no desenrolar deste trabalho, a saliente quantidade de variáveis físico-químicas envolvidas em uma interrupção de elevadas correntes. Desta forma, a conciliação dessa pluridisciplinaridade e flexibilidade entre o modelo de gestão de projeto e o próprio projeto em si, como será verificado, tratou-se do fator primordial para a definição do emprego do conceito *Design Thinking* neste estudo. Sua aplicação será esmiuçada e apresentada ao longo deste estudo.

3 METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste trabalho caracteriza-se por meio de pesquisa tecnológica, que busca a geração de um novo produto, especificamente um dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão. Esta em termos objetivos, pode ser definida como uma pesquisa exploratória, pois visa compreender o problema a ser analisado e propor soluções (FREITAS JUNIOR *et al.*, 2014; GERHARDT e SILVEIRA, 2009). Os procedimentos utilizados incluem pesquisa bibliográfica, experimental, levantamentos de dados através de entrevistas e *brainstorming* com especialistas de diferentes áreas (mecânica, elétrica, produção e materiais) a respeito de seccionamento de circuitos elétricos em baixa tensão.

O procedimento metodológico adotado neste trabalho será delimitado por quatro etapas provenientes do conceito *Design Thinking*, as quais se encontram ilustradas no diagrama de duplo diamante da Figura 3-1.

Figura 3-1 – Fluxo metodológico adotado neste trabalho.



Fonte: Adaptado de Buckley (2018).

O desenvolvimento do projeto acontece baseado no conceito *Design Thinking*, onde a imersão caracteriza a etapa inicial. Nesta são realizadas a avaliação / exploração do problema

aplicando-se métodos de pesquisa primária (campo), como entrevistas e *brainstorming* com especialistas de modo a delinear o processo de seccionamento de circuitos elétricos em baixa tensão e extinção de arcos elétricos provenientes de tal operação; e pesquisa secundária no contexto documental. Com estes procedimentos geram-se uma elevada quantidade de resultados de pesquisas não estruturadas que serão analisados para dar andamento ao desenvolvimento do equipamento (BUCKLEY, 2018).

Na sequência inicia-se a etapa de análise e síntese, onde busca-se dar sentido a estas descobertas via condensação dos dados, compartilhamento de informações e definição das potenciais áreas de atuação, ou seja, busca-se a convergência deste amplo conjunto de informações em uma linha de ação. Ao final desta fase, uma ou um pequeno número de ideias passíveis de prototipação e testes posteriores deverá ser alcançada, com o intuito de se encontrar a melhor resposta ou solução para a pergunta / problema inicial.

O segundo diamante é composto pelas etapas de ideação e prototipação. Onde, após a apresentação das soluções potenciais (conjunto de ideias), busca-se avaliar a solução final, determinar as especificações do produto e planejar sua implementação. Estas etapas irão, basicamente, consistir na idealização; desenvolvimento da solução, construção do protótipo, testes; análise dos resultados obtidos e iteração dos procedimentos a fim de refinar os resultados.

Por se tratar de um desenvolvimento com finalidade de avaliação de conceitos e geração de conhecimento, busca-se através do *Design Thinking* uma maior flexibilidade e agilidade para a geração das soluções, bem como, para a análise e adequação das mesmas para o contexto do problema. Este caminho será trilhado tendo em vista o anseio de representação do desempenho característico de um disjuntor de baixa tensão sob curto-circuito via bancada. Tal estrutura, além de ser pouco abordada na literatura, traz uma enorme necessidade de adaptabilidade na gestão do projeto, a qual é melhor representada através do processo criativo do *Design Thinking* em comparação, por exemplo, ao processo de desenvolvimento de produto apresentado por outros autores (ULRICH e EPPINGER, 2004; PAHL *et al.*, 2005; ROZENFELD *et al.*, 2006; BACK *et al.*, 2008). A descrição desse procedimento metodológico será melhor abordada na sequência desta seção.

3.1 Imersão

A fase de imersão busca uma maior aproximação do problema, através de um aprofundamento nas implicações do desafio, estudando-o de modo a identificar as necessidades

e oportunidades que nortearão a geração das possíveis soluções. A etapa preliminar teve como base a pesquisa secundária no contexto documental apresentada no estado da arte (item 2.1) e o *know-how* – expressão em inglês que pode ser traduzida por “saber como” – obtido via pesquisa e desenvolvimento de dispositivos de proteção de baixa tensão precedentes. Enquanto que, a etapa de imersão em profundidade será delineada por entrevistas e *brainstorming* com profissionais especialistas na área de seccionamento de circuitos elétricos em baixa tensão.

Assim, o objetivo da imersão preliminar foi a definição do escopo do projeto, bem como, seus limites e a identificação dos atores-chave que devem ser abordados. Desta forma, as áreas de interesse que requerem exploração foram aqui levantadas, de modo a fornecerem insumos para o desenvolvimento dos temas a serem investigados na imersão em profundidade. Nesse segundo ponto, entrevistas individuais e reuniões para *brainstorming* foram realizadas com o objetivo de se explorar diferentes perspectivas do contexto do problema. Visa-se assim, permear o assunto em pesquisa seguindo-se um protocolo predeterminado que pode ser flexibilizado em função da conversa. Ao mergulhar no ponto de vista de cada pessoa, diferentes perspectivas de um todo podem ser discernidas, sendo possível identificar polaridades que ajudarão no desenvolvimento, fornecendo assim matéria-prima para a geração de ideias na fase de ideação (VIANNA *et al.*, 2012).

3.2 Análise e Síntese

Nesta etapa a análise consiste em quebrar conceitos e problemas complexos em constituintes menores e mais fáceis de serem entendidos, ou seja, trata-se da divisão do todo – *problem statement* (em tradução livre, declaração do problema) – em partes menores, de modo a estudar cada um desses fragmentos separadamente (DAM e SIANG, 2020). Assim sendo, nessa etapa, os diferentes componentes menores do problema (subsistemas de um dispositivo de chaveamento e proteção) foram examinados, partindo-se da fundamentação gerada na etapa de imersão. Nesse ponto, verificou-se a necessidade de uma maior elucidação em alguns subsistemas e buscas a documentos bibliográficos acerca desses temas foram realizadas. Em seguida, soluções para cada um desses “pequenos problemas” foram pensadas e novas reuniões de *brainstorming* foram efetuadas sobre cada uma dessas soluções. Posteriormente, uma verificação de viabilidade para incluir as soluções viáveis e executáveis foi realizada. As soluções que não se mantiveram firmes com base na exequibilidade e viabilidade foram excluídas do conjunto de soluções consideradas relevantes.

A síntese, por outro lado, envolve a combinação dessas partes fragmentadas em um todo agregado. É uma atividade realizada no final da investigação científica ou criativa. Este processo leva à criação de uma entidade maior e coerente (DAM e SIANG, 2020). Durante a síntese, é garantido que as diferentes ideias estejam em sincronia entre si e não gerem conflitos.

Em resumo, esta fase inicia-se com a divisão do *problem statement* em fragmentos menores. Cada fragmento é examinado e as diferentes soluções menores são então colocadas juntas para formar uma solução final coerente. Ou seja, buscou-se aqui as possíveis soluções (teóricas) para os diferentes subsistemas a serem implementados no dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão, as quais foram avaliadas e sua viabilidade analisada a fim de se gerar uma solução integralizada e coesa.

3.3 Ideação

A fase de ideação engloba o período de elaboração posterior a análise e síntese: o objetivo desta etapa é a elaboração de ideias e soluções (práticas) por meio de ferramentas (técnicas de ideação) como esboços, prototipagem virtual (computacional) e *brainstorming*. Conforme Vianna *et al.* (2012), a ideação representa um processo de “ampliação” em termos de conceitos e resultados, tendo como foco principal a geração de uma grande quantidade de ideias. Essas criações foram filtradas e classificadas entre as melhores e mais práticas de modo a selecionar as soluções mais promissoras para a prototipagem final.

Dam e Siang (2021) reportam em seu trabalho que “não se trata de se ter a ideia ‘certa’, mas de gerar a mais ampla gama de possibilidades”. As mesmas inspiram o valor de que a primeira resolução do problema nem sempre é a solução certa - e que às vezes as melhores soluções surgem da combinação de múltiplas ideias e do compartilhamento de diferentes perspectivas.

Buscou-se assim, novamente, a colaboração de especialistas de diferentes áreas a respeito de seccionamento de circuitos elétricos em baixa tensão no processo de geração de ideias, de modo a formar uma equipe multidisciplinar (mecânica, elétrica, produção e materiais). O propósito de se integrar diversas áreas de conhecimento é a contribuição com variadas perspectivas que as mesmas originam, o que tornou o resultado final mais promissor e abrangente. Ou seja, buscou-se ir além das soluções amplamente difundidas, aproveitando-se da criatividade coletiva da equipe de modo a descobrir-se novas frentes para se explorar.

Observa-se no conceito de projeto via *Design Thinking* uma significativa sobreposição de atividades entre os estágios de análise e síntese; e ideação. Essa sobreposição é representada através dos métodos (ferramentas) empregados durante esses dois estágios. O *brainstorming*, por exemplo, é comumente utilizado em ambos, tendo em vista que para as duas fases existe a necessidade de que informações sejam interpretadas e o problema seja definido e idealizado de modo a conduzirem à geração de soluções. Tal sobreposição também é verificada entre as etapas de ideação e prototipagem, onde a prototipagem virtual via simulação, por exemplo, é aplicada a ambas as fases.

Para a análise do comportamento estrutural do dispositivo eletromecânico em estudo, a ferramenta computacional de análise estrutural *ANSYS Mechanical 2022 R1*, licenciada pelo Grupo WEG, foi empregada. Esta trata-se de um programa de análise de estruturas com relação ao seu comportamento mecânico e físico em termos de suas características geométricas, físicas e mecânicas. Para a prototipagem virtual da dinâmica do dispositivo, empregou-se o *Working Model 2D 2005 Versão 8.0.1.0*, licenciado pelo Grupo WEG. O mesmo permite a simulação de movimento e análise de sistemas mecânicos, bem como, a medição de forças, velocidades, acelerações, colisões e outras grandezas mecânicas. Além disso, possibilita, de modo fidedigno, a criação, execução e refino do projeto preliminarmente a sua prototipagem ou implementação. Ambas as ferramentas computacionais foram utilizadas em função de sua vasta gama de funcionalidades e da elevada confiabilidade de seus resultados, tal qual, à vista da familiaridade deste pesquisador com os mesmos. Os resultados destas simulações foram confrontados com os resultados mensurados via testes em bancada após a finalização de sua montagem, de modo a comparar tais valores.

3.4 Prototipação

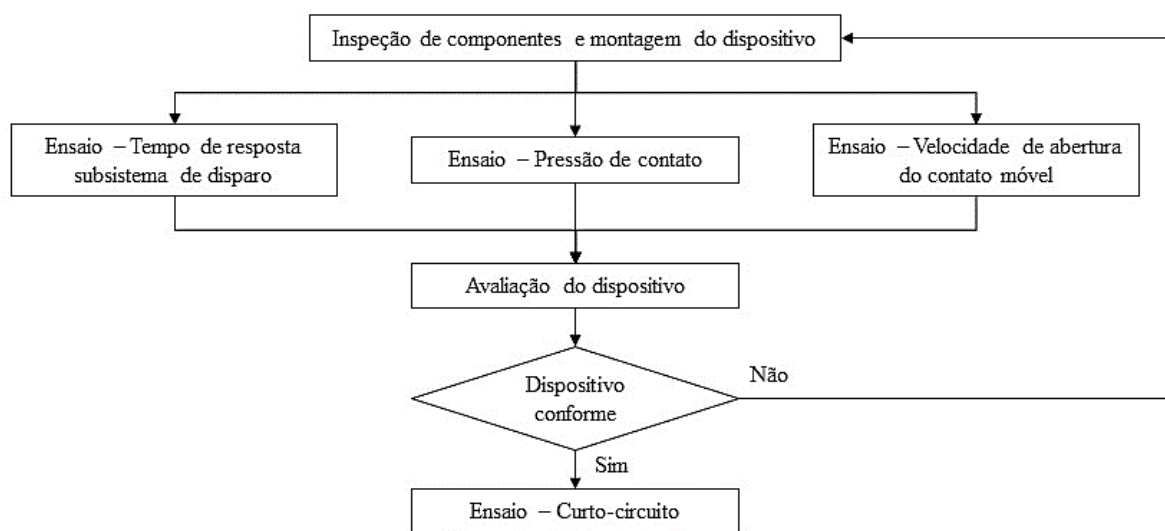
A função da prototipação é auxiliar na validação das ideias geradas e, embora se apresente como a última fase do processo de *Design Thinking*, pode ocorrer simultaneamente, ao longo do projeto, com a imersão e a ideação. Esta etapa trata da construção das ideias e da verificação de sua viabilidade para se chegar à solução final.

Prototipar é o ato de tornar uma ideia mais tangível; a passagem do abstrato para o físico de forma a representar a realidade - mesmo que de forma simplificada - e propiciar validações, trata-se de um instrumento de aprendizagem. Um protótipo pode ser qualquer coisa que vai desde uma representação conceitual ou análoga da solução (baixa fidelidade); à assimilação de aspectos da ideia; à construção de algo o mais próximo possível da ideia final (alta fidelidade).

O teste de um protótipo pode ou não envolver usuários finais, sendo realizado em laboratório ou no ambiente onde o produto ou serviço será utilizado. A prototipagem busca reduzir as incertezas de um projeto, como forma ágil de abandonar alternativas que não seriam bem recebidas, apontando o caminho para um arranjo final mais definitivo. A prototipagem, portanto, nada mais é do que uma série de simulações para antecipar problemas, testar hipóteses e exemplificar ideias de modo a trazê-las à realidade para abrir discussões (VIANNA *et al.*, 2012).

Desta forma, essa trata-se da fase em que a solução final foi prototipada, executada e testada em escala real. Protótipos rápidos (impressões 3D) e virtuais (computacionais) foram utilizados com o propósito de validar alguns conceitos estudados e algumas possíveis soluções para a implementação dos subsistemas de um disjuntor, em especial, de contatação e de acionamento (movimento de fechamento e abertura do sistema de contato). Seus componentes foram modelados e especificados via *software* de desenho mecânico 3D (*SolidWorks Professional 2018 SP5.0*, licenciado pelo Grupo WEG). Testes e medições foram executados em laboratório conforme fluxograma exposto via Figura 3-2 e seus resultados obtidos, registrados e analisados. Posteriormente, tendo-se em vista o desfecho positivo alcançado, o processo de projeto adotado via *Design Thinking* foi finalizado.

Figura 3-2 – Fluxograma de inspeções e ensaios.



Fonte: Autoria própria (2022).

4 DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este trabalho busca o desenvolvimento de um dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão. Desta forma, pretende-se, como principal objetivo, representar o desempenho característico de um disjuntor de baixa tensão sob tal condição. O conceito *Design Thinking*, suas ferramentas e técnicas de gestão do processo de desenvolvimento de produtos foram empregadas de modo a conferir maior celeridade e efetividade a este trabalho, bem como, um maior entendimento a respeito desta ferramenta de inovação. Uma ampla pesquisa de estado da arte foi realizada de modo a se obter um conhecimento crítico acerca deste tema. Para o desenvolvimento deste equipamento, os seguintes recursos computacionais foram utilizados: *SolidWorks* – aplicado para a obtenção do projeto mecânico tridimensional e bidimensional; *Working Model 2D* – utilizado para simulação das interações mecânicas; e *ANSYS Mechanical* – empregado na análise estrutural via elementos finitos. Tais análises e procedimentos serão apresentados nas decorrentes seções deste capítulo.

4.1 Imersão, análise e síntese

Como passo inicial da fase de imersão do *Design Thinking* a pesquisa de estado da arte, apresentada no item 2.1, foi adotada como base teórica. Verificou-se através dessa uma considerável variedade de estudos a respeito dos principais parâmetros construtivos e sua influência no desempenho dos dispositivos de proteção na condição de curto-circuito. No entanto, poucas foram as referências encontradas que procuraram detalhar as estruturas experimentais empregadas para a realização de seus ensaios.

Dentre estas referências, Gonzalez *et al.* (2015) buscou direcionar seu estudo nos efeitos decorrentes do arco elétrico proveniente da comutação (fechamento e abertura de contatos em corrente nominal) em dispositivos de chaveamento de baixa tensão (contatores, disjuntores e relés). Esta característica trata-se de outro ramo muito estudado no campo dos dispositivos de chaveamento e proteção. Entretanto, o autor procurou também dar ênfase à sua bancada de ensaio de modelo, sendo a mesma constituída, essencialmente, por três componentes principais: um sistema de contatos (fixo e móvel), uma unidade de acionamento (cilindro de ar comprimido) para a execução do movimento de fechar e abrir os contatos e uma unidade de medição. Contudo, embora tal pesquisa apresente um equipamento com princípio de

funcionamento muito similar ao dispositivo que se pretende implementar, tal estrutura possui certas restrições de aplicabilidade. Este fato se dá, principalmente, em decorrência da elevada distinção entre os níveis de corrente empregados no dispositivo em corrente nominal e em curto-circuito. Enquanto no primeiro caso a corrente pode chegar a pouco mais de um milhar de amperes, no segundo fenômeno, tal grandeza pode ultrapassar uma centena de milhar.

Por outro lado, Quemeneur (2017) concentra sua tese no estudo do comportamento do arco elétrico no disjuntor de baixa tensão quando submetido à condição de curto-circuito. Este buscou implementar um dispositivo de testes e ferramentas de diagnóstico, bem como, desenvolver um modelo de fluido que permitisse a simulação do arco elétrico. O autor embasa e apresenta sua bancada de ensaios ao longo de todo um capítulo de seu trabalho, sendo a mesma dividida em: um sistema de contatos (fixo e móvel), um sistema de acionamento (mecanismo solenoide) com o propósito de efetuar o movimento de afastamento (abertura) dos contatos, câmara de extinção e unidades de medição e controle.

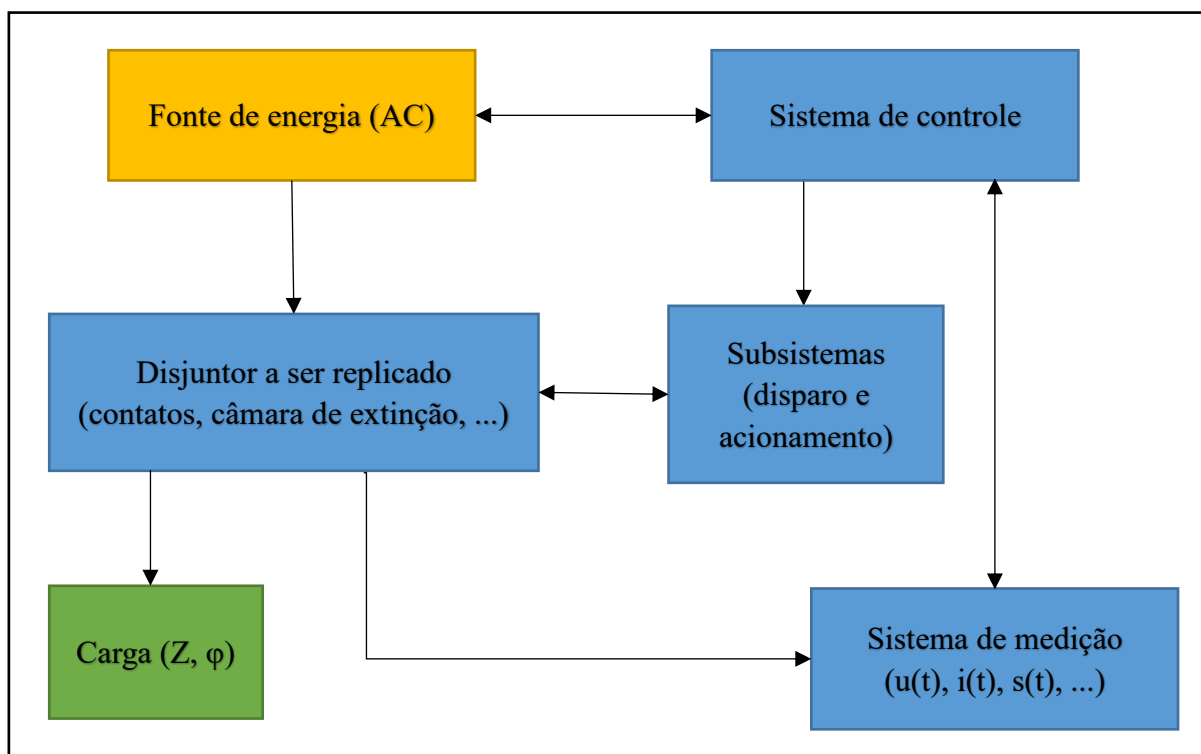
Dando-se prosseguimento à etapa de imersão e, concomitantemente, desenvolvendo a etapa de análise e síntese, ambos os trabalhos e suas estruturas foram apresentados a profissionais especialistas na área de seccionamento de circuitos elétricos em baixa tensão. Entrevistas individuais foram realizadas de modo a se debater quais os pontos fortes e possibilidades de aprimoramento de cada dispositivo, suas experiências em relação ao seccionamento de circuitos elétricos e quais subsistemas cada um dos entrevistados julgava como cruciais para implementação, visando-se melhor representar um disjuntor sujeito a condição de curto-circuito.

Por meio da etapa de entrevistas, de modo a fragmentar o “*problem statement*”, os seguintes subsistemas a serem aplicados no dispositivo em desenvolvimento foram elencados:

- Subsistema de disparo;
- Subsistema de acionamento – contemplando o referido subsistema e um subsistema de pressão e levitação (*lifting*) de contatos;
- Subsistema de contatos e câmara de extinção (análogos ao disjuntor a ser replicado);
- Unidades de controle e medição.

A Figura 4-1 mostra a representação esquemática dos componentes essenciais do dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão.

Figura 4-1 – Representação esquemática dos componentes essenciais da bancada de ensaios.



Fonte: Adaptado de Gonzalez *et al.* (2015).

Uma vez que os atores-chave do escopo do projeto foram definidos e delimitados, novas consultas a documentos bibliográficos foram efetuadas de modo a esclarecer alguns pontos e produzir conhecimento crítico acerca destes. Simultaneamente, reuniões de *brainstorming* foram realizadas a fim de se explorar a capacidade criativa do referido grupo de especialistas em busca de possíveis soluções em relação a cada um destes subsistemas. Sendo averiguado, na sequência, a viabilidade de suas implementações. Por fim, cada subsistema foi examinado e as distintas soluções fragmentadas foram agrupadas de modo a formar a solução final que será apresentada ao longo deste capítulo.

4.2 Ideação

Uma vez que a essência do escopo do projeto no contexto da situação apresentada se encontra estruturada, buscou-se nesta etapa a concepção de ideias que levassem a soluções abrangentes, viáveis e eficazes. Assim sendo, o conhecimento adquirido nas etapas anteriores foi aplicado de modo a gerar melhores caminhos ou respostas frente às soluções existentes, bem como, para o desenvolvimento de ideias disruptivas.

Empregou-se nesta fase um processo ativo de *brainstorming* com a finalidade de se propiciar o maior número de alternativas possíveis para a elaboração de esboços tridimensionais e posterior prototipagem virtual. Tais procedimentos serão apresentados no decorrer dos próximos itens.

4.2.1 Conceito do produto

O conceito do produto traz como essência a obtenção do resultado desejado por meio dos atributos do produto. Buscou-se aqui uma análise crítica do dispositivo em desenvolvimento de modo que as necessidades de cada um de seus subsistemas fossem analisadas e caracterizadas, bem como, suas possíveis variações de soluções compiladas. Assim sendo, aspirou-se neste ponto a reprodução, o mais fidedignamente possível, das funções de estabelecimento, condução e interrupção de corrente de um disjuntor em caixa moldada. Além de possibilitar, em conjunto, o monitoramento e registro de grandezas físicas referentes à elétrica e mecânica.

Esta seção possui como enfoque a exposição da estrutura mecânica por trás deste estudo, no entanto, buscou-se também, apresentar de forma clara e sintetizada a sua interação com os demais fenômenos físico-químicos envolvidos em um processo de interrupção de corrente. Neste contexto, Rattan (2009) descreve um mecanismo como sendo um conjunto de vários corpos montados de tal forma que o movimento de um cause movimento restrito e previsível para os outros. Este trata-se de um instrumento que transmite e modifica um movimento. O autor define uma máquina como sendo um mecanismo ou uma combinação de mecanismos que, além de transmitir movimento definido às partes, também transmite e modifica a energia mecânica disponível em algum tipo de trabalho desejado. Portanto, o mecanismo trata-se de uma unidade fundamental para a transmissão do movimento. Geralmente, o mecanismo usado em uma máquina / dispositivo é responsável pelo desempenho da mesma e pela saída necessária.

Nesta conjuntura, conforme apresentado no item 4.1, Quemeneur (2017) proporciona o conceito base para a elaboração do referido equipamento. Em seu trabalho, o autor apresenta com consistente detalhamento, os principais componentes que integram sua bancada de ensaios de modelo, seus atributos elementares de projeto e dados mensurados pós implementação do dito dispositivo. Desta forma, cabe aqui se evidenciar, a sua expressiva contribuição para a estruturação do dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão.

Diante do exposto, no decorrer deste e dos próximos itens, a interação dos principais componentes do dispositivo e fenômenos físico-químicos observados no processo de interrupção de corrente serão sucintamente apresentados, sendo conferida a partir deste ponto total prioridade a estruturação mecânica da bancada, foco deste trabalho. Objetiva-se retratar a concepção do produto, partindo-se dos conceitos expostos por Rattan (2009) e Quemeneur (2017), de modo a tipificar os principais atores que compõem o dispositivo em construção. As principais variações de soluções serão idealizadas e compiladas, tridimensionalmente esboçadas e computacionalmente simuladas de modo a fornecer uma resolução tecnicamente viável e passível de execução fabril. Como resultante o modelo dinâmico dos subsistemas mecânicos de um disjuntor em caixa moldada será caracterizado e implementado.

Destarte, como já exposto, os disjuntores em caixa moldada são compostos por uma elevada diversidade de componentes, os quais interagem entre si para executar de modo preciso a sua função de proteção. Esta grande diversidade de itens, aliada a alta quantidade de fenômenos físico-químicos envolvidos em um processo de interrupção de corrente (elétricos, fluido dinâmicos, magnéticos, mecânicos, térmicos e químicos – representados pela ablação de componentes internos do dispositivo de proteção), o que acarreta em uma considerável complexidade para a obtenção dos parâmetros necessários à apropriada representatividade de seus subsistemas.

Os efeitos elétricos durante uma interrupção de corrente são atribuídos aos níveis de tensão e corrente vinculados ao circuito elétrico, o qual será seccionado por meio da abertura dos contatos do disjuntor. Correlacionam-se a estes elementos (tensão e corrente), o ângulo de fechamento do curto-circuito sobre a onda de tensão no momento da falta e os valores de reatâncias e resistências imputados ao circuito elétrico. A união de todas essas características possibilita a produção de valores até 2,2 vezes o valor da corrente eficaz de curto-circuito na primeira crista de corrente assimétrica (ver Figura 2-1). Estes parâmetros são normalizados de acordo com a Tabela 2 da norma NBR IEC 60947-2 (2013), apresentada neste trabalho pela Tabela A - Anexo A.

Efeitos fluidodinâmicos – para a mesma conjuntura – são produzidos através da ignição e manutenção do arco elétrico; do aumento da energia do arco; do aquecimento e expansão do gás; da ablação dos contatos, das plaquetas de extinção e das paredes da câmara de extinção; entre outros. Estes fenômenos, ocasionados durante uma abertura de contatos, são os grandes responsáveis pelo aumento da pressão no interior da câmara.

Os princípios magnéticos estão presentes nos disparadores magnéticos e na levitação de contatos, além dos esforços dinâmicos entre os condutores ou entre componentes do

equipamento. O referido efeito de levitação de contatos, como foi mostrado, está vinculado à geometria dos contatos, os quais são dispostos de maneira que a corrente seja conduzida em sentidos opostos em trechos específicos, conforme pode-se observar na Figura 2-9. Esta força de repulsão magnética – proporcional ao quadrado da corrente conduzida – está sempre presente durante o funcionamento do disjuntor, entretanto, para correntes nominais, as forças elásticas das molas (contrárias às forças de repulsão), são muito maiores que as forças de levitação, mantendo assim os contatos do disjuntor pressionados na posição fechada.

Os fenômenos térmicos são ocasionados em um disjuntor através do aquecimento por efeito *Joule* (ocasionado pela condução de corrente pelos condutores), e pela ação de desarme do disjuntor, a qual é desencadeada pelo aquecimento dos elementos bimetálicos presentes em dispositivos termomagnéticos.

Como fator mecânico (foco deste trabalho), designam-se os mecanismos de acionamento (abertura e fechamento dos contatos) e disparo dos disjuntores supracitados. Estes mecanismos são projetados para responderem o mais rápido possível a comandos térmicos (bimetálico) em casos de sobrecorrente e, especialmente, a comandos magnéticos (disparador magnético), em casos de curto-circuito, além de comandos eletrônicos para ambos os casos. Estes possuem como objetivo efetuar a rápida abertura dos contatos e, por consequência, o seccionamento do circuito elétrico (caso não ocorram reignições do arco elétrico). A verificação de desempenho e a obtenção dos tempos de resposta dinâmica do dispositivo eletromecânico em desenvolvimento são possibilitados pelo *software Working Model 2D*, o qual combina uma avançada tecnologia de simulação computacional à uma elevada flexibilidade na montagem de estruturas mecânicas, o que o coloca como uma ferramenta confiável para investigação deste equipamento. Tais resultados foram comparados a um dispositivo de proteção modelo, buscando-se assim a reprodução de seu desempenho dinâmico. As características geométricas, físicas e mecânicas empregadas na bancada de ensaios foram analisadas estruturalmente através da ferramenta computacional *ANSYS Mechanical* de modo a garantir que sua composição seja capaz de suportar todas as cargas (admissíveis) aplicadas a esta.

Por fim, o arco elétrico, que engloba boa parte dos fenômenos acima citados, trata-se do elemento protagonista em uma interrupção de corrente para disjuntores de baixa tensão. Através da sua ignição, inicia-se o processo de formação do potencial elétrico conhecido como tensão de arco, o qual se opõe à tensão de rede (item 2.4.1.2 / Figura 2-11) e limita a corrente conduzida pelo circuito elétrico muito antes da sua passagem natural por zero no sistema senoidal. Em contrapartida, o arco, se não extinto rapidamente produz danos extremamente prejudiciais ao

disjuntor, podendo até mesmo gerar a perda total da função primária do dispositivo de proteção, bem como possíveis danos à instalação.

Desta forma, o dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão proposto por este trabalho busca reproduzir estas interações dos elementos acima descritos. Sendo que uma maior ênfase foi destinada à pressão e levitação (*lifting*) de contatos; e aos mecanismos de acionamento e disparo de um disjuntor em caixa moldada. A concepção e obtenção do modelo dinâmico destes dois últimos subsistemas via análise computacional serão detalhadas na sequência.

4.2.2 Obtenção do modelo dinâmico e análise estrutural dos subsistemas mecânicos do disjuntor via simulação computacional

Atualmente, o projetista se encontra provido de uma grande variedade de ferramentas e recursos computacionais que irão auxiliá-lo na concepção de um novo projeto. Microcomputadores contemporâneos munidos de uma considerável capacidade de processamento aliados a pacotes de programas computacionais robustos fornecem ferramentas de amplo potencial para o projeto, no que tange à análise e simulação de componentes mecânicos, elétricos, magnéticos, dentre outros.

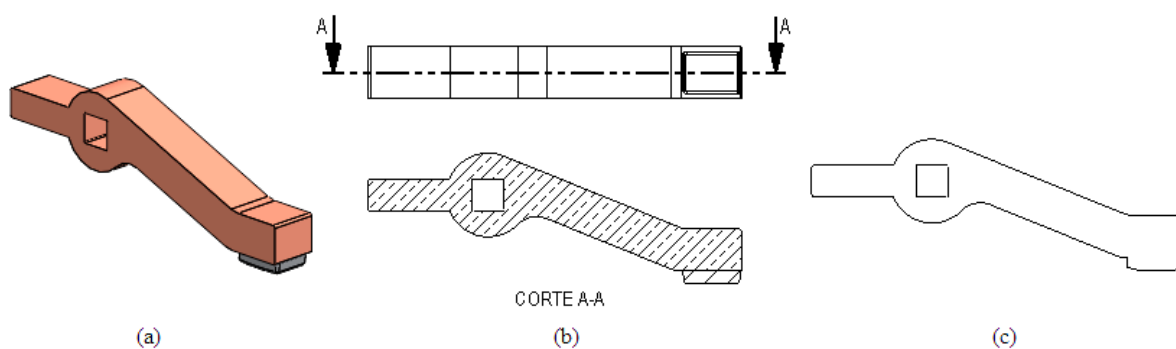
Os programas atuais de projeto com o auxílio de computador permitem o desenvolvimento de modelos tridimensionais (3D) dos quais podem ser geradas vistas ortogonais bidimensionais convencionais (2D) com dimensionamento automático, conforme apresenta Budynas e Nisbett (2006). Uma das grandes vantagens da utilização dos modelos 3D (também conhecidos como modelos sólidos) é a possibilidade de se projetar e fabricar ferramentas de injeção (plásticos e similares), estampagem de metais e outros, diretamente a partir dos referidos modelos. Esta condição possibilita, dentre outras vantagens, uma considerável redução no tempo desta etapa do processo de manufatura. Tais *softwares* também possibilitam a montagem destes modelos em conjuntos, permitindo a conferência de folgas, interferências e funcionamento dos mesmos, sendo de grande utilidade para a avaliação do projeto.

Além dos fatores acima citados, os modelos tridimensionais também apresentam os seguintes benefícios: elevada facilidade na obtenção de propriedades geométricas como áreas e distâncias entre pontos; rápidos e precisos cálculos de propriedades de massa (visto o banco de dados das propriedades físicas dos materiais se encontrar incluído no *software*); posição do centro de gravidade; momentos de inércia da massa, dentre outros aspectos. Os sistemas de

modelos sólidos, em geral, também oferecem uma interface para um ou mais programas de análise de elementos finitos e permitem transferência direta da geometria do modelo para estes programas com a finalidade de analisar, no caso deste trabalho, as características mecânicas do componente em avaliação.

Para a obtenção e análise do modelo dinâmico dos subconjuntos mecânicos em estudo, o *software* comercial de desenho assistido por computador *SolidWorks* será utilizado para a obtenção das projeções bidimensionais dos modelos sólidos tridimensionais. Esta ferramenta da plataforma CAD (do inglês: *computer aided design*) baseia-se em computação paramétrica, criando formas tridimensionais a partir de formas geométricas elementares. A obtenção das projeções 2D das distintas partes integrantes do dispositivo em desenvolvimento, possui como finalidade fornecer os dados necessários para a implementação de seu modelo mecânico interativo por meio do programa de simulação bidimensional denominado *Working Model 2D*. A Figura 4-2 ilustra o processo de obtenção das vistas bidimensionais a partir de um modelo sólido.

Figura 4-2 – Representação do contato móvel com pastilha de prata: (a) tridimensional; (b) corte aplicado em vista bidimensional; e (c) vista bidimensional pronta para ser exportada para o programa *Working Model 2D*.



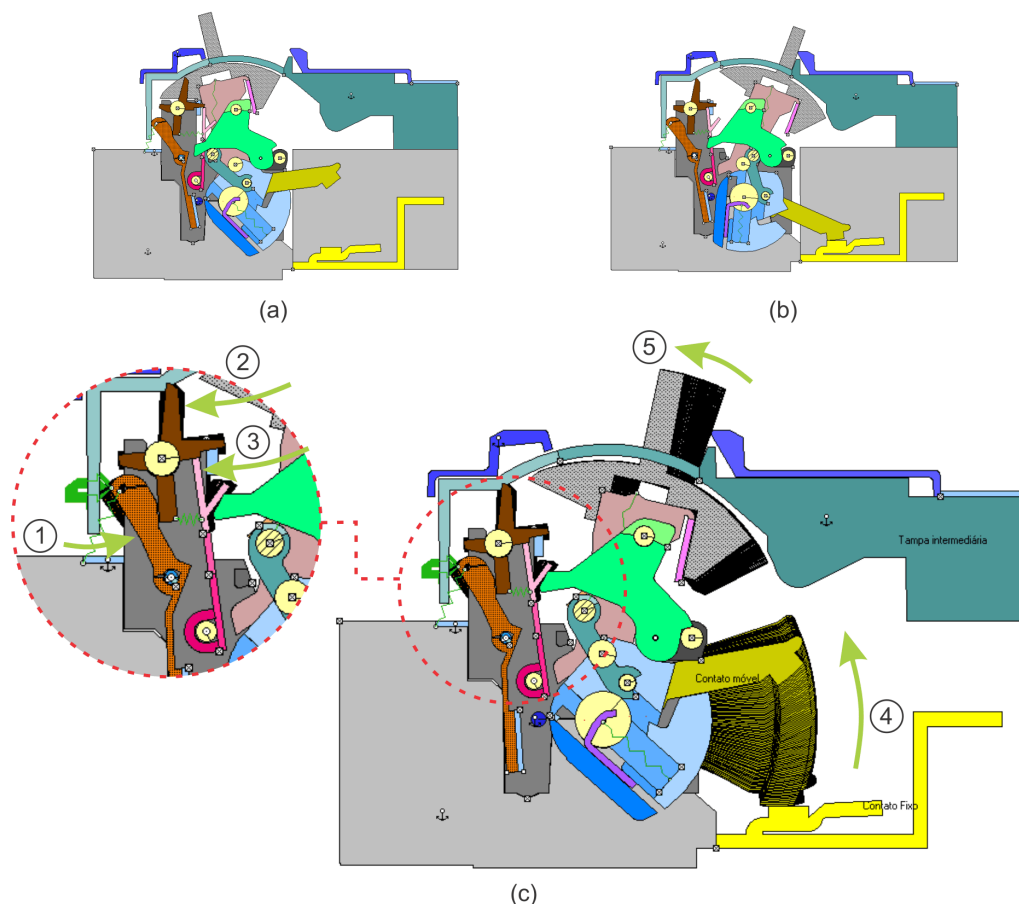
Fonte: Autoria própria (2022).

Como já salientado, simulações da dinâmica dos mecanismos com o intuito de se estudar a interação entre os corpos podem ser geradas por meio do *Working Model 2D*. Este programa é capaz de simular a influência mútua das partes do modelo construído e também as representar através de gráficos, possibilitando a observação e determinação dos movimentos e forças de qualquer elemento do projeto. O mesmo é empregado para a elaboração de modelos virtuais de projetos mecânicos, delineando o movimento de corpos rígidos num espaço de trabalho bidimensional, os quais se encontram conectados por uma variedade de articulações e restrições, atuadores (cilindros, engrenagens, motores, etc.), conectores (molas e

amortecedores) e efeitos do ambiente, tal como a gravidade. Dentre os parâmetros considerados pelo *software* se destacam: a massa dos corpos, a constante elástica das molas, os coeficientes de atrito estático e dinâmico, a inércia (geometria e massa) e a gravidade. Este processo possibilita uma melhor percepção de como os sistemas mecânicos funcionam e se comportam sem a necessidade da construção de um protótipo físico para tal fim. Assim sendo, trata-se de uma ferramenta computacional muito útil, podendo ser conceituado como um expressivo instrumento para a análise de geometrias dinâmicas (PEREIRA, 2013; BALASTRERO JR., 2010; GÜNTHER, 2005).

Assim sendo, a integração destes *softwares* proporciona condições favoráveis à preparação do conjunto de dados que irão endossar a concepção do dispositivo em desenvolvimento, bem como, permite a representação de situações reais complexas de difícil predição e mensuração por meio de estruturas físicas. Neste tocante, a Figura 4-3 busca apresentar, de modo didático, a área de trabalho do *software* de simulação computacional *Working Model 2D*.

Figura 4-3 – Modelo em *Working Model 2D* de um disjuntor em caixa moldada: (a) desligado; (b) ligado; e (c) processo de atuação do mecanismo de disparo provocado pelo disparador magnético.



Fonte: Autoria própria (2022).

Em virtude da elevada quantidade de elementos utilizados para a montagem de um disjuntor em caixa moldada, apenas as partes que efetuam a retenção dos contatos na posição “fechado” (ligado) e desencadeiam o deslocamento destes contatos para a posição “aberto” (desligado) serão identificadas e nomeadas, sendo as demais peças que compõe o mecanismo de disparo tratadas genericamente como “mecanismo de disparo”.

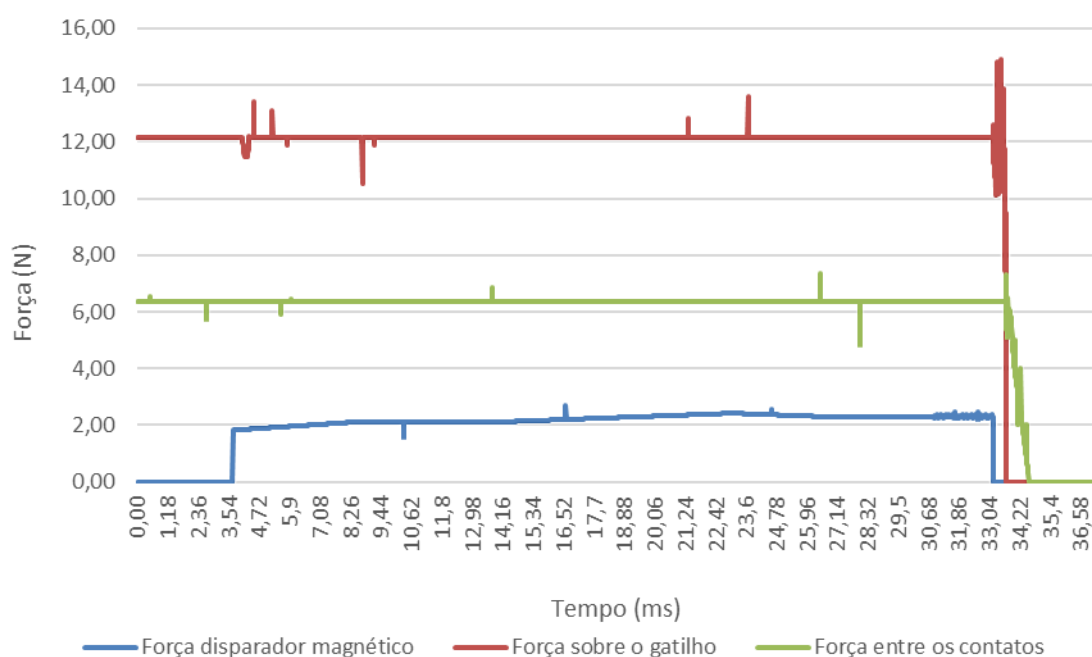
A Figura 4-3.a ilustra o disjuntor em modo desligado, sendo a comprovação desta afirmação efetuada através da observação da não união entre o contato móvel (peça em amarelo escuro) e contato fixo (item em amarelo). Esta comprovação do estado de funcionamento é identificada ao usuário do dispositivo através da posição do manípulo (peça em cinza hachurado), devendo as posições finais de cada estado estar devidamente identificadas na tampa do dispositivo. Este item, denominado manípulo, se trata da interface entre o mecanismo e o usuário, sendo o comando de ligar e desligar o disjuntor efetuado por meio desta peça. Por sua vez, a Figura 4-3.b representa o disjuntor em seu estado ligado, sendo caracterizado pela conexão de seus contatos e pela posição do manípulo. Nesta posição, o disjuntor se encontra apto a realizar a função de conduzir a corrente às cargas a serem protegidas pelo mesmo.

Já a Figura 4-3.c representa o processo de atuação do mecanismo de disparo provocado pelo disparador magnético. Esta ação se inicia em (1), sendo originada pela rápida ascensão da corrente circulante pelos condutores em um curto-circuito, fator responsável pelo aumento dos campos magnéticos no entorno deste condutor e, por consequência, o aumento da atração entre o núcleo móvel ferromagnético (componente em laranja) e núcleo fixo ferromagnético (não representado). Esta atração magnética entre os núcleos tende a vencer a força de mola de tração (representada em verde) que interliga o núcleo móvel e a base do disjuntor (item em cinza, dividida em dois elementos a fim de simplificação) e mantém os núcleos ferromagnéticos separados até o nível de corrente determinado via projeto do produto. Desta forma, uma vez que o deslocamento do núcleo móvel é ocasionado, o mesmo irá se chocar com o eixo de desarme (peça em marrom) o fazendo rotacionar (2), e por consequência, liberando a trava do gatilho [(3) - item em rosa] que se encontra encostada no referido eixo. Esta sequência de eventos determina o desbloqueio do mecanismo de desarme, de modo que suas partes integrantes interajam entre si e culminem na abertura dos contatos (4) e deslocamento do manípulo (5) para a posição de *trip* (desarme). Cabe ressaltar aqui o relato da existência de uma segunda mola, que neste caso, interliga o eixo de desarme e a trava do gatilho. Esta mola em questão possui a função de posicionar a trava do gatilho, a qual necessariamente deve sempre exercer certa força em direção ao eixo de desarme.

São representadas ainda, na Figura 4-3, a tampa intermediária (peça em verde escuro) e a tampa de acessórios (componente em lilás, dividida em duas peças a fim de simplificação). Nota-se que, ligado a estes componentes, se encontra o símbolo de uma pequena âncora. Esta âncora significa que estas partes permanecerão estáticas durante a simulação. Também, com o pretexto de melhor ilustrar o movimento do contato móvel na Figura 4-3.c, uma região à esquerda da base do disjuntor acabou-se por ser suprimido. Para que a ilustração apresente o menor nível de poluição visual possível, apenas as partes móveis acima citadas foram atribuídas com a opção de sombra, a qual acompanha e marca todos os movimentos dos componentes, conforme se observa na Figura 4-3.c. Esta configuração pode ser nitidamente observada através do contato móvel, o qual se desloca do ponto inicial de conexão com o contato fixo, eleva-se acima do seu ponto de repouso e retorna para a sua posição final.

Uma vez estruturada a modelagem da dinâmica do mecanismo do disjuntor – apresentado na Figura 4-3 – a mesma possibilita a averiguação do tempo de resposta do mecanismo do referido disjuntor a partir de um comando de disparo por curto-circuito (por exemplo). A Figura 4-4 ilustra graficamente, a fim de exemplificação de alguns resultados, o intervalo de tempo e as forças envolvidas em um processo de desarme do referido disjuntor a partir de um disparo magnético.

Figura 4-4 – Simulação do mecanismo de disparo de um disjuntor em caixa moldada a partir de um disparo magnético em *Working Model 2D*.



Fonte: Autoria própria (2022).

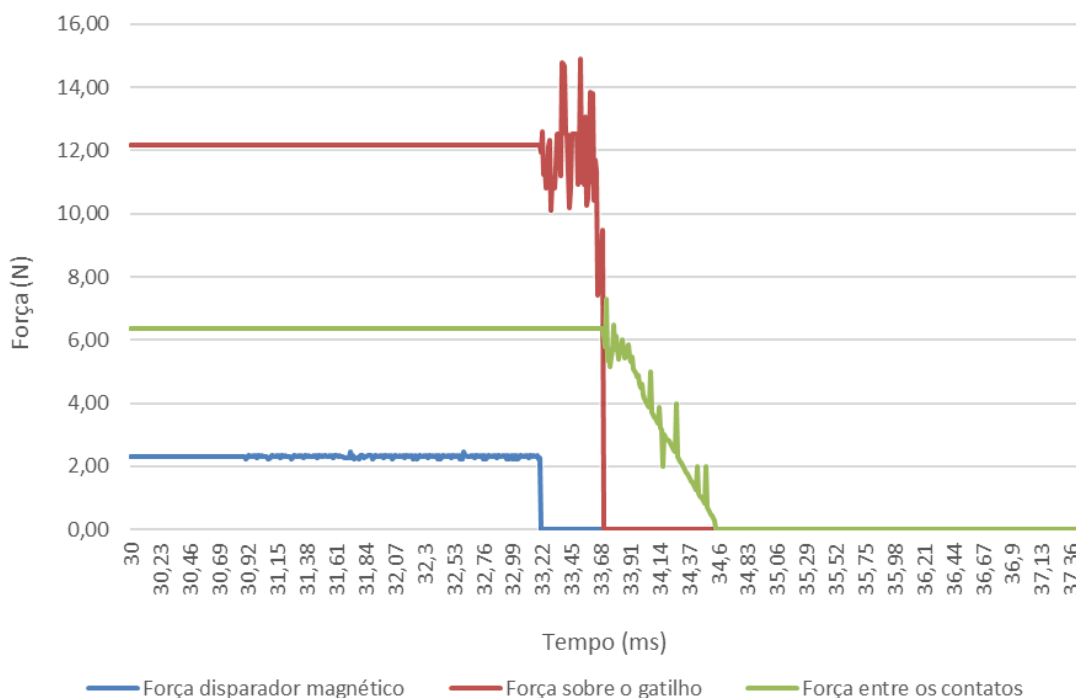
As formas de onda apresentadas através da Figura 4-4 representam as forças de contato entre as partes que compõe a simulação. Desta forma: a força de contato entre o núcleo móvel e o eixo de desarme é representada pela forma de onda em azul; entre a trava do gatilho e o eixo de desarme é apresentada em vermelho; já a curva em verde representa a força de contato entre os contatos móvel e fixo. Revela-se assim o porquê da explanação, neste item, com maior ênfase destas peças.

Nota-se que em aproximadamente 3,54 ms a força de contato entre o núcleo móvel e o eixo de desarme inicialmente igual a zero (sem contato) sofre um incremento. Tal incremento de força de contato caracteriza o instante em que o núcleo móvel já está em movimento e entra em contato com o eixo de desarme. Caso a força efetuada pelo núcleo móvel (fisicamente de proveniência magnética) sobre o eixo de desarme seja suficientemente elevada, gera-se a rotação desse eixo e o desengate da trava do gatilho. Tal força, como já destacado, está proporcionalmente vinculada a amplitude de corrente elétrica conduzida através do circuito de potência do disjuntor, ou seja, quanto maior for a corrente circulante maior será a força de atração entre os núcleos fixo e móvel (respeitando-se a característica física de saturação de materiais ferromagnéticos). O modelo dinâmico do disparador magnético, tendo em vista o seu princípio físico de funcionamento estar orientado à área da eletricidade, não será apresentado neste trabalho, ficando-se o mesmo restrito a apresentação de alguns dados necessários para a execução de simulações e ensaios.

Verifica-se também, por meio da Figura 4-4, que o instante de tempo 33,22 ms caracteriza o decréscimo a zero da força de contato entre o núcleo móvel e o eixo de desarme, tal fato é resultado do desengate da trava do gatilho (que em função de sua inércia não ocorre de maneira instantânea) e do início da movimentação do mecanismo de desarme de modo a culminar no afastamento dos contatos do disjuntor.

Para a execução deste estudo dinâmico do mecanismo, obtenção da sua representação gráfica e determinação dos tempos de atuação do disjuntor via simulação, a opção de rotação sobre o eixo com velocidade constante foi aplicada ao núcleo móvel a fim de simplificar o modelo e representar a força de atração entre os núcleos ferromagnéticos. Esta opção de procedimento, em específico, visa mensurar as forças envolvidas no desarme e, sobretudo, para este exemplo, os tempos decorridos entre o instante em que o disparador magnético (núcleo móvel ferromagnético) cessa a aplicação de força sobre o eixo de desarme, e o instante em que as forças de contato entre os contatos móvel e fixo são anuladas (abertura dos contatos), o detalhamento desse intervalo de tempo é ilustrado por meio da Figura 4-5.

Figura 4-5 – Detalhe da simulação do mecanismo de disparo de um disjuntor em caixa moldada a partir de um disparo magnético em *Working Model 2D*.

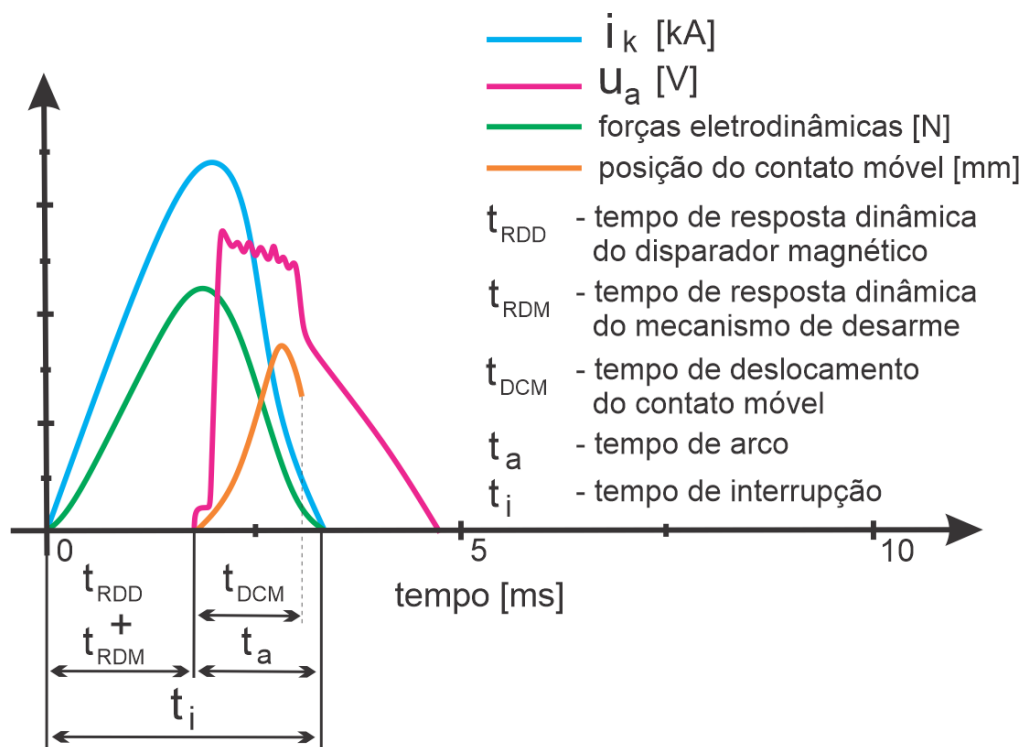


Fonte: Autoria própria (2022).

Verifica-se através da Figura 4-5 que o intervalo de tempo a ser determinado nesta simulação se inicia em $t = 33,22$ ms, momento em que ocorre um degrau na variável “Força disparador magnético” e se encerra em $t = 34,60$ ms, quando a “Força entre os contatos” se anula. Logo, para o disjuntor em análise, obtêm-se um tempo fixo de disparo do mecanismo de $1,38$ ms ($t_{RDM} = 1,38$ ms). Sendo t_{RDM} o tempo de resposta dinâmica do mecanismo de desarme ou, em outras palavras, o tempo para início da movimentação dos contatos.

O tempo empregado para o deslocamento do contato móvel (t_{DCM}) de seu estado inercial de repouso na condição de disjuntor ligado (ver Figura 4-3.b) até sua posição final em seu estado desligado (ver Figura 4-3.a), trata-se de outra variável de considerável relevância em um processo de interrupção de corrente em disjuntores. A mesma é diretamente responsável pelo incremento da tensão da coluna do arco proporcionada pelo prolongamento (alongamento) do arco via separação dos contatos em conjunto com a divisão do arco em partes na câmara de extinção, como representado na Figura 2-3 e Figura 2-4 (item 2.3). Esta característica é definida e delimitada, basicamente, pela velocidade angular que se é aplicada ao dito contato móvel. Neste contexto, a Figura 4-6 ilustra o comportamento elétrico e mecânico de um disjuntor limitador de corrente típico com acionamento via mecanismo (considerando-se que não haverá levitação de contatos).

Figura 4-6 – Comportamento dinâmico de elementos elétricos e mecânicos de um disjuntor sob curto-circuito.



Fonte: Autoria própria baseado em Roschke (no prelo 2002).

Nota-se que, a agilidade no comando de disparo para a abertura dos contatos por parte do disparador magnético (t_{RDD}) e a menor inércia possível do mecanismo, acarretam em um menor tempo para o início da movimentação dos contatos e, por consequência, menor pico da corrente de falta e menor tempo de interrupção da mesma. Neste mesmo sentido, verifica-se que uma rápida abertura dos contatos e, conseqüente, um ágil alongamento do arco promovem e garantem tais benefícios em conjunto com os pontos acima citados. Portanto, a determinação com precisão destas variáveis é indispensável para a obtenção de resultados confiáveis em relação ao equipamento em estudo.

Desta forma, baseando-se em um disjuntor em caixa moldada de carcaça intermediária, os seguintes dados serão utilizados como valores de referência para o desenvolvimento da bancada em elaboração:

$$t_{RDD} = 3,09 \text{ ms para uma corrente de curto-circuito de } 10 \text{ kA eficaz};$$

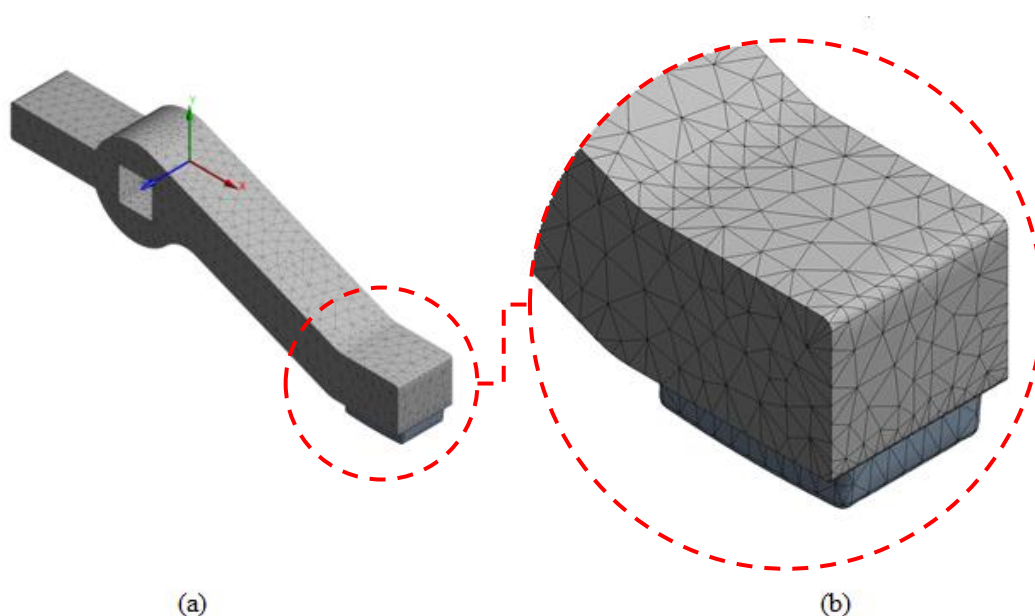
$$t_{RDM} = 3,67 \text{ ms};$$

$t_{DCM} = 5,72 \text{ ms}$ para um deslocamento no eixo vertical mensurado na extremidade do contato móvel de 19,5 mm.

Como pode ser verificado, a integração destes *softwares* garantiu condições favoráveis à preparação de um relevante conjunto de dados, os quais auxiliaram ativamente na especificação dos distintos componentes do dispositivo eletromecânico em elaboração, bem como permitiram a representação de situações reais complexas de difícil predição e mensuração por meio de estruturas físicas. Por fim, uma análise estrutural via elementos finitos (via *ANSYS Mechanical*) foi empregada de modo a se verificar como o equipamento projetado reage sob condições de carregamento e se determinar os possíveis pontos fracos existentes no projeto. Desta forma, buscou-se por meio dessa interação entre ferramentas computacionais uma melhora na confiabilidade, segurança, geometria e desempenho dos componentes do dispositivo, bem como, a tomada de uma decisão mais robusta com relação a esta fase de concepção do produto.

Neste âmbito, a Figura 4-7 apresenta a malha de elementos finitos gerada pelo programa *ANSYS Mechanical* para o componente ilustrado na Figura 4-2. Apesar deste refinamento não ser elevado, o erro final nos resultados obtidos é de apenas 0,05%, conforme configuração atribuída no *software*. Por se tratar de um tema amplamente difundido na esfera acadêmica, o tópico referente a malha de elementos finitos não será detalhadamente retratado neste trabalho. Este tema é apresentado de forma minuciosa por Lee (2017) e Gil (2015), onde as particularidades e demais informações sobre o assunto podem ser obtidas.

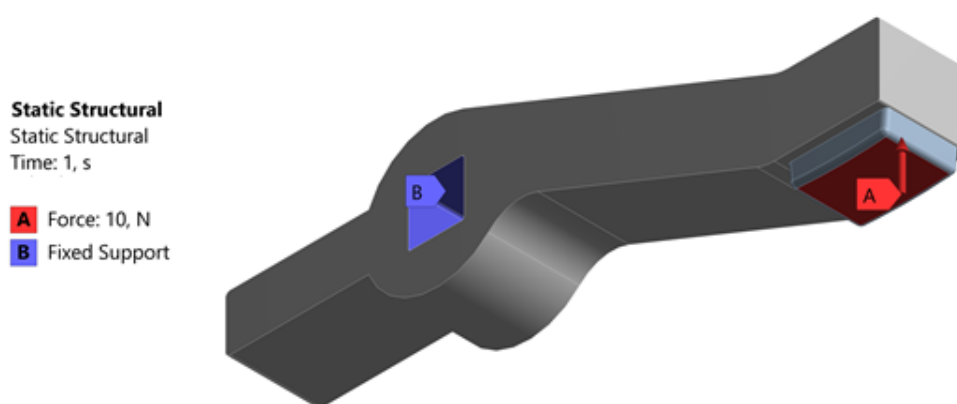
Figura 4-7 – Malha de elementos finitos para o contato móvel com pastilha de prata:
(a) Visão geral; e (b) detalhe da malha na superfície.



Fonte: Autoria própria (2022).

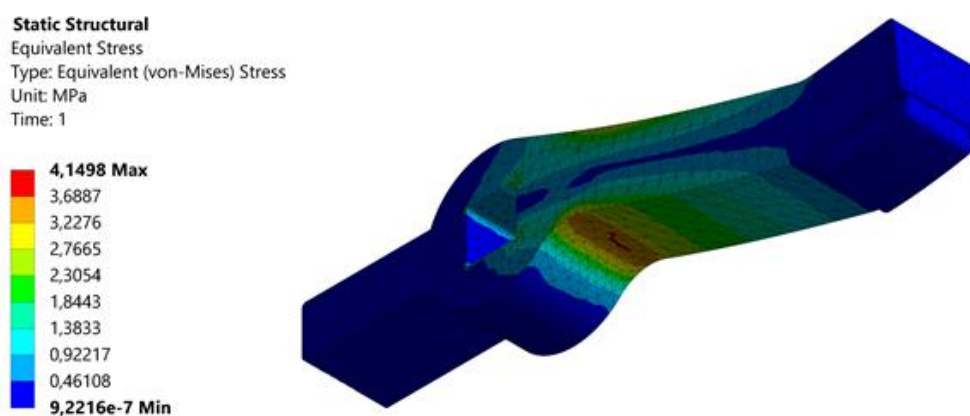
A título ilustrativo, a Figura 4-9 apresenta a distribuição das tensões de *von Mises* (um dos critérios de avaliação empregados neste estudo) para o referido modelo de contato móvel, através da aplicação de uma carga hipotética de 10 N aplicada em sua extremidade inferior (Área A – superfície de contato da pastilha de prata), conforme Figura 4-8. Observa-se que, para fins de simulação, as faces em azul (Área B – *Fixed Support*) se encontram com a totalidade de seus graus de liberdade bloqueados, ou seja, esta parte selecionada do modelo será incapaz de se movimentar.

Figura 4-8 – Preparação do modelo para simulação no *ANSYS Mechanical*.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 4-9 – Tensão de *von Mises* atuantes no contato móvel com partilha de prata.



Fonte: Autoria própria (2022).

De acordo com Karmankar (2017), a tensão de *von Mises* é uma tensão equivalente ou efetiva na qual se prevê que ocorra escoamento em materiais dúcteis sob condições de carregamento multiaxial usando resultados de testes de tração uniaxial simples. Segundo o

mesmo autor, Hencky (1924) ofereceu uma interpretação física do critério de *von Mises*, sugerindo que o escoamento se inicia quando a energia elástica de distorção atinge um valor crítico, ou seja, onde a tensão de *von Mises* se torna igual ao limite de tensão.

Assim sendo, o mesmo trata-se de uma condição utilizada para se prever o escoamento de materiais e determinar se estes irão ceder ou fraturar sob certas condições de carregamento. Neste contexto, nota-se através da Figura 4-9, que o valor máximo de tensão de *von Mises* para o referido exemplo é igual a 4,1498 MPa, sendo o mesmo localizado na parte inferior do contato móvel (próximo a seu ponto de ancoragem). Desta forma, uma vez que o limite de escoamento para barras de cobre eletrolítico em temperatura ambiente é igual a 55 MPa, verifica-se que o modelo analisado não apresenta regiões com probabilidade de falhar estruturalmente durante a sua utilização.

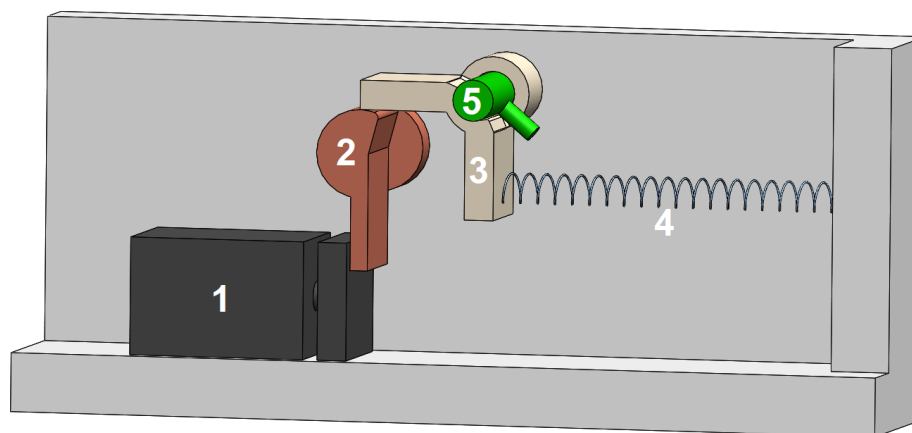
Isto posto, averiguar-se-á no andamento dos próximos subitens o processo de pesquisa, análise e desenvolvimento dos subsistemas de disparo e acionamento do dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão, aplicando-se os fundamentos aqui apresentados e alguns parâmetros base direcionados por Quemeneur (2017). O referido autor descreve em seu trabalho que a velocidade de abertura dos contatos deve ser bastante elevada para que o disjuntor apresente um funcionamento apropriado. Para avaliar o efeito desta variável, almeja-se que o dispositivo em desenvolvimento seja capaz de variar este valor entre 1 e 5 m/s sincronizado com a onda de corrente fornecida pela fonte de alimentação. Um ápice de velocidade de deslocamento (linear) do contato móvel de aproximadamente 4 m/s será empregado a fim de representar o disjuntor em caixa moldada utilizado como modelo. Além disso, de acordo com Quemeneur (2017), o equipamento também deve garantir uma força de retenção no estado fechado para ter baixa resistência de contato e evitar a abertura prematura sob efeito de estrição eletromagnética (*lifting* de corrente). Tais subsistemas, como verificado, tratam-se de dois subconjuntos mecânicos com funções bem distintas e que são englobados pelo referido disjuntor em caixa moldada. Os mesmos serão modelados e apresentados a seguir.

4.2.2.1 Subsistema de disparo

O subsistema de disparo, a ser empregado no dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão, possui como principal propósito a representação mecânica do disparador magnético do disjuntor em caixa moldada tomado como modelo. Sendo que tal representação deve estar

devidamente sincronizada com a onda de corrente provida pela fonte de alimentação aos terminais de conexão do referido equipamento em desenvolvimento. Como já salientado, tendo-se em vista a relevância do trabalho e o elevado nível de detalhamento referente ao projeto da bancada de ensaios para estudo de arcos elétricos formulada por Quemeneur (2017), o mesmo fora utilizado como base técnica para a elaboração do projeto proposto. No entanto, apesar da referida bancada ser um excelente referencial, tal modelo fora avaliado e algumas estruturas foram remodeladas de modo a tornar as representações do dispositivo em ideação mais fidedignas as características de funcionamento de um disjuntor em caixa moldada. Neste cenário, o esquemático da solução arquitetada é ilustrado através da Figura 4-10.

Figura 4-10 – Esquemático do subsistema de disparo: 1 - atuador pneumático; 2 - disparador; 3 - massa/martelo; 4 - mola; 5 - eixo principal de abertura.



Fonte: Autoria própria baseado em Quemeneur (2017).

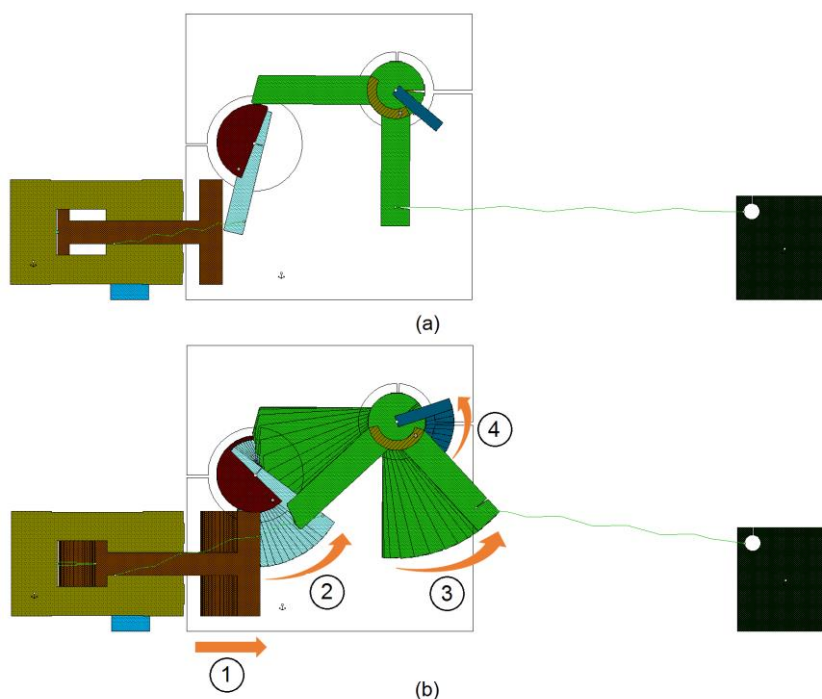
Seu princípio de funcionamento é estabelecido através do acionamento de um eixo disparador (2) por meio de um atuador pneumático (1), este acionamento libera uma massa (3), também conhecida como martelo, que é posta em movimento através de uma mola (4) helicoidal de tração (o formato helicoidal será empregado em todas as molas utilizadas neste dispositivo). Essa massa atinge uma alavanca (5) acoplada ao eixo principal de abertura – bem como ao contato móvel – a qual produz o movimento rotacional de abertura do contato. Tal solução, firmada via sessões de *brainstorming* realizadas com especialistas de diferentes áreas técnicas, tem o intuito de proporcionar ao subsistema de disparo, por meio do referido atuador pneumático (1), alta força e velocidade de ação em um espaço reduzido. Este requisito é imposto em função da elevada energia potencial elástica aplicada sobre o eixo disparador (2) via mola (4), sendo a velocidade de abertura de contato – almejada para o dispositivo – originada através desta energia armazenada. Além deste ponto, destaca-se também a imperativa

necessidade de repetibilidade no tempo de atuação do subsistema em desenvolvimento de acordo com a carga mecânica empregada.

Nesta perspectiva, conforme apresentado no item 4.2.1 e 4.2.2, a harmonia entre o sistema de controle, sistema de medição e o subsistema de acionamento é fundamental para garantir a sincronização da abertura de contato com um ângulo de tensão específico (ângulo de fechamento do curto-circuito). Günther (2005) expõem em seu trabalho que o referido ângulo de fechamento representa o instante de tempo em que é fechado o circuito relativamente à curva senoidal que representa a tensão no circuito. Um ângulo de fechamento “0°” representa o fechamento na passagem por zero e com tensão crescente. Este ângulo de fechamento em conjunto com um determinado arranjo de cargas resistivas e indutivas (responsáveis pela obtenção do fator de potência estabelecido em norma) e o nível de tensão a ser ensaiado, asseguram a obtenção do valor de crista da corrente presumida, conforme Figura 2-1. Desta forma, além das simulações mecânicas para validação de performance e comprovação da robustez estrutural do dispositivo, o modelo final ainda será averiguado quanto a sua repetibilidade de desempenho via testes práticos.

Assim sendo, de modo a investigar e aperfeiçoar o referido conceito primário formulado, tal estrutura foi modelada e simulada em *Working Model 2D*, sendo seu modo de operação ilustrado através da Figura 4-11.

Figura 4-11 – Modelo em *Working Model 2D* do subsistema de disparo: (a) estado de prontidão e (b) processo de atuação do subsistema de disparo.



Fonte: Autoria própria (2022).

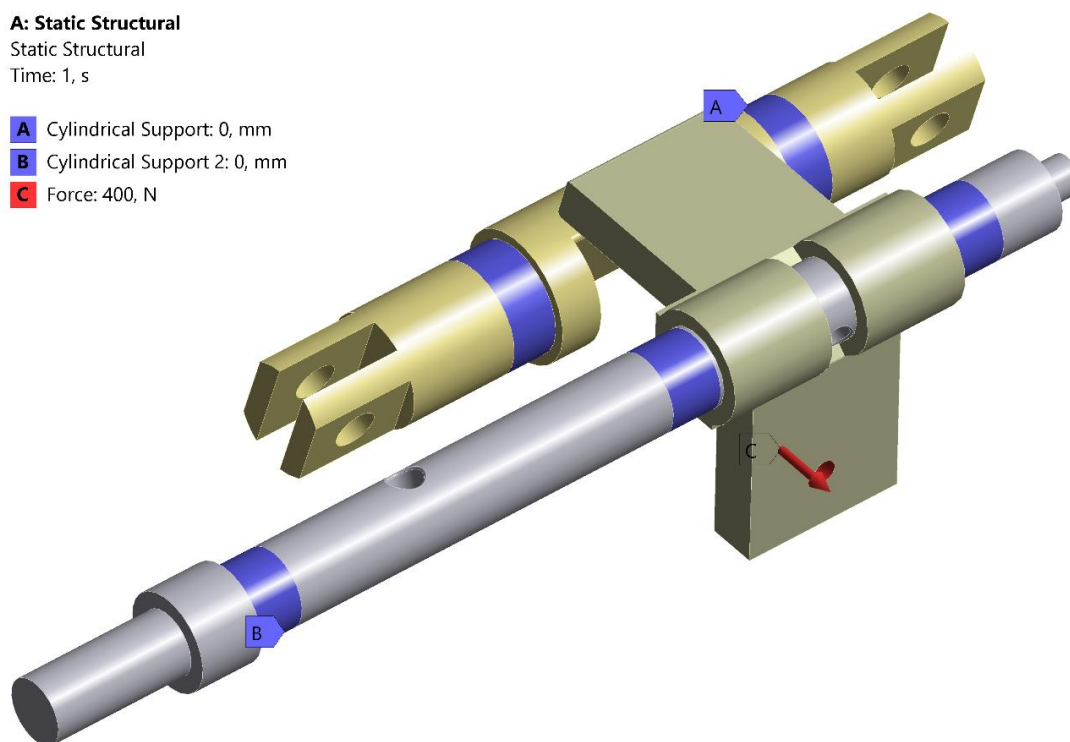
A Figura 4-11.a apresenta o subsistema de disparo em estado de prontidão, ou seja, o mesmo se encontra preparado para atuar sobre a alavanca acoplada ao contato móvel e originar o movimento rotacional de abertura do contato. Por sua vez, a Figura 4-11.b caracteriza o processo de disparo do dispositivo via atuador pneumático. Esta ação se inicia em (1), sendo originada pelo célere deslocamento linear do pistão do referido equipamento (componente em marrom) promovido por um comando elétrico em sincronia com o sistema de controle, visando-se a obtenção de um ângulo de fechamento do curto-circuito e um instante de abertura do contato específicos. Uma vez que o deslocamento do pistão é produzido, o mesmo irá atuar sobre o eixo disparador (componente representado pelas peças em azul claro e vermelho escuro) o fazendo rotacionar (2), e por consequência, liberando a massa (item em verde), que se encontra apoiada em uma de suas extremidades sobre o referido eixo, a iniciar a sua movimentação angular (3). A rotação deste corpo é proporcionada pela energia potencial elástica armazenada na mola (componente representado em forma de onda triangular em verde claro) conectada à sua outra extremidade. Por fim, o segmento integrante da massa (elemento em verde musgo) se choca contra a alavanca (item em azul escuro) acoplada ao eixo principal de abertura – bem como ao contato móvel – e produz o movimento rotacional (4) de abertura do contato. Cabe ressaltar aqui a existência de uma segunda mola, conectada ao eixo disparador, que possui a função de o posicionar / reter em sua posição inicial.

Verifica-se assim, por meio desta simulação introdutória, que o conceito primariamente formulado se demonstrou eficaz. Portanto, na medida em que a concepção global do subconjunto se encontra encaminhada, os esboços iniciais dos modelos 3D de tais componentes foram submetidos a um refinamento de projeto e posteriormente encaminhados à uma análise estrutural sob uma condição de carregamento de 400 N. Tal grandeza é usualmente empregada em mecanismos de disjuntores em caixa moldada e retratará o limite superior de carregamento que será empregado neste trabalho, sendo tal valor rerepresentado e detalhado no item 4.2.2.2. Além disso, as especificações técnicas e demais particularidades da referida estrutura serão determinadas e exibidas no decorrer das próximas seções.

Assim sendo, a Figura 4-12 expõem as condições de contorno utilizadas no programa *ANSYS Mechanical* para simulação e análise estrutural estática dos componentes associados ao subsistema de disparo com maior criticidade. Visa-se aqui a determinação das tensões geradas sob este tipo de carregamento. A fixação adotada foi do tipo suporte cilíndrico (faces em azul), sendo o *Cylindrical Support “A”* atribuído ao eixo disparador enquanto que o *Cylindrical Support “B”* foi conferido ao eixo principal de abertura. Tal opção possibilita a condição de restringir os graus de liberdade para movimentação nas direções radial e axial; e permitir os

movimentos na direção tangencial destas faces cilíndricas. Estas áreas (faces em azul) representam os assentamentos empregados para acomodação destes elementos na montagem do equipamento.

Figura 4-12 – Condições de contorno aplicadas nas geometrias dos componentes do subsistema de disparo.



Fonte: Autoria própria (2022).

Para esta simulação, o aço SAE 1045 foi utilizado como matéria-prima nos três componentes em estudo. As propriedades mecânicas de densidade (ρ), módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν), limite de escoamento (LE) e limite de resistência à tração (LRT) empregadas para o referido material são exibidas na Tabela 4-1.

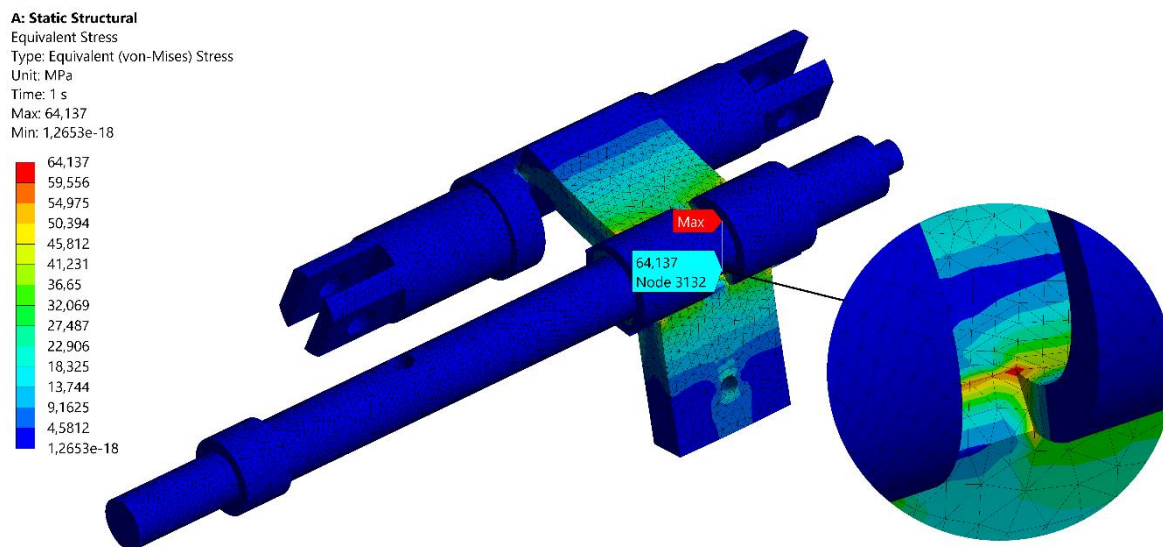
Tabela 4-1 – Propriedades do material SAE 1045 utilizado nas simulações.

Material	ρ (kg/m ³)	E (GPa)	ν	LE (MPa)	LRT (MPa)
SAE 1045	7850	205	0,29	530	625

Fonte: Autoria própria baseado em Batista (2018).

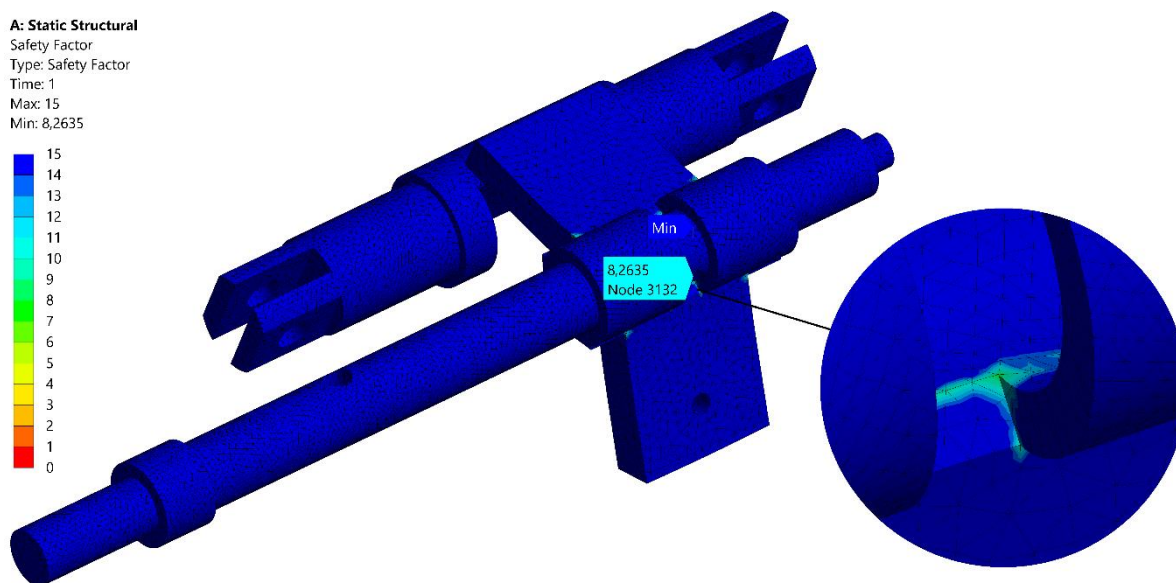
Isto posto, ilustram-se por meio da Figura 4-13 e Figura 4-14, respectivamente, a distribuição das tensões de *von Mises* e o fator de segurança para os componentes do subsistema de disparo.

Figura 4-13 – Tensão de *von Mises* atuante nos componentes do subsistema de disparo.



Fonte: Aatoria própria (2022).

Figura 4-14 – Fator de segurança para os componentes do subsistema de disparo.

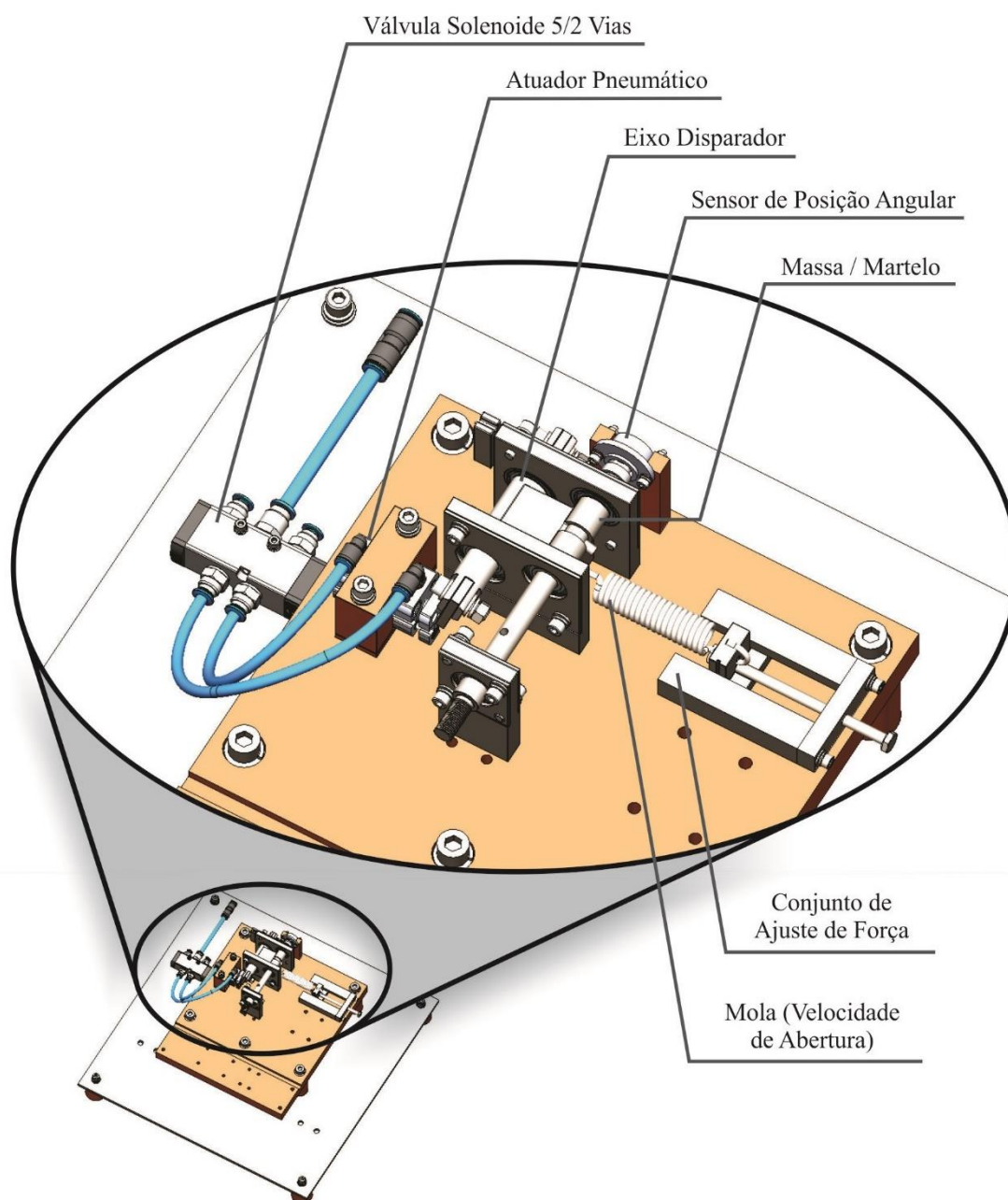


Fonte: Aatoria própria (2022).

Por meio destas figuras é possível se concluir que os componentes analisados não apresentam regiões com probabilidade de falhar estruturalmente durante a sua utilização. Tal afirmação é possibilitada tendo-se em vista que, para esta simulação, o máximo valor de tensão de *von Mises* (Figura 4-13) obtido é igual a 64,137 MPa, logo, muito inferior ao limite de escoamento para o aço SAE 1045 que é igual a 530 MPa. Além disso, o fator de segurança mínimo (relação entre a carga de ruptura e a carga admissível - Figura 4-14) igual a 8,2635

reafirma tal aspecto. Um fator de segurança de 1, em resumo, significa que o material está em um ponto de escoamento. Visou-se para etapa a obtenção de um subsistema estruturalmente robusto, seguro ao operador e apto a promover a velocidade de abertura de contato almejada para o dispositivo. Assim sendo, a Figura 4-15 busca ilustrar e identificar os principais componentes que compõem o subsistema de disparo.

Figura 4-15 – Componentes básicos do subsistema de disparo.



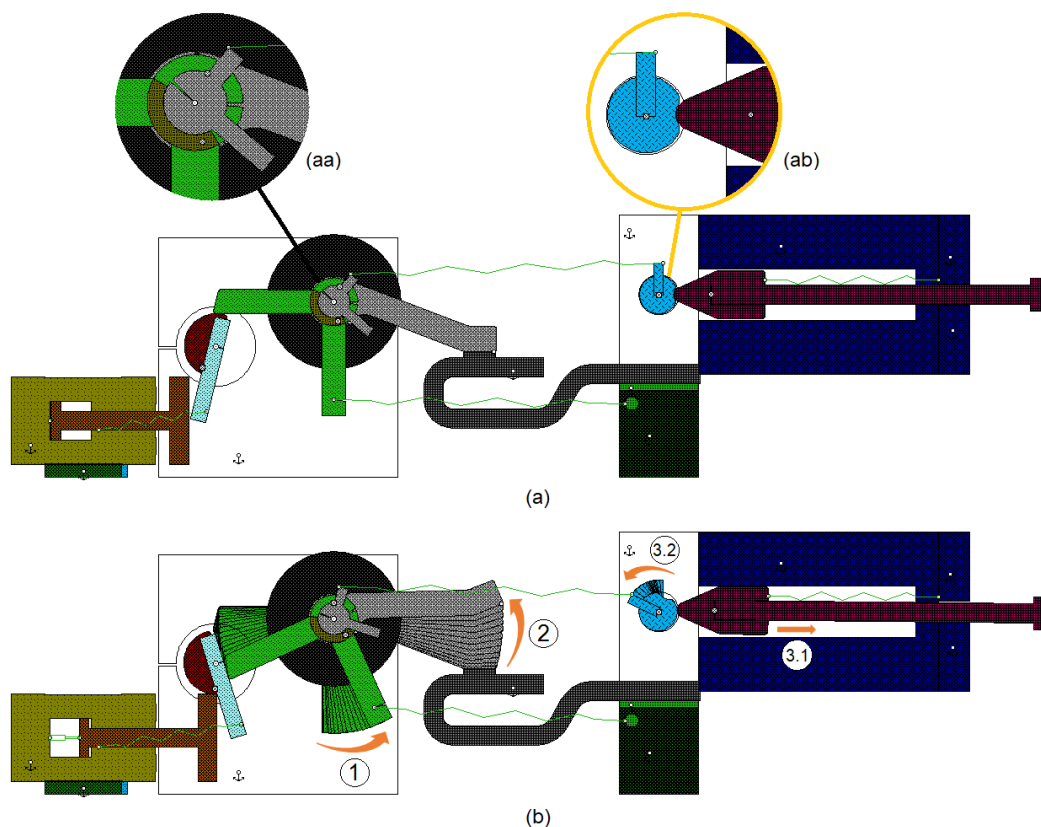
Fonte: Autoria própria (2022).

Verifica-se por meio da Figura 4-15 a existência de alguns elementos que ainda não haviam sido mencionados no transcorrer deste trabalho, caso do conjunto de ajuste de força (adotado a fim de tracionar a mola ao nível de tensionamento necessário), o sensor de posição angular / rotação e a válvula solenoide. As especificações técnicas atribuídas a estas peças, em conjunto aos itens dos demais subsistemas, serão apresentados na seção 4.2.3.

4.2.2.2 Subsistema de acionamento

O subsistema de acionamento possui como função a representação do mecanismo de operação do disjuntor em caixa moldada tomado como modelo. A si atribui-se a responsabilidade de assegurar a força de contato (aproximadamente 60 N para o referido modelo de disjuntor adotado), possibilitar a ocorrência de levitação do contato móvel e garantir a velocidade de abertura do mesmo. Assim sendo, o aludido subconjunto será aqui detalhado de modo análogo ao subsistema de disparo, partindo-se de sua reprodução em *Working Model 2D*, a qual se encontra ilustrada através da Figura 4-16.

Figura 4-16 – Modelo em *Working Model 2D* do subsistema de acionamento: (a) estado de prontidão e (b) processo de atuação do subsistema de acionamento.



Fonte: Autoria própria (2022).

A Figura 4-16.a apresenta o subsistema de acionamento em estado de prontidão, ou seja, o mesmo se encontra em seu estado ligado (apto a realizar a função de conduzir a corrente) e preparado para iniciar o movimento rotacional de abertura do contato elétrico acarretado pelo subsistema de disparo. Como indicado, este subconjunto deve assegurar a força de contato. Tal condição é obtida por meio dos eixos (componentes em cinza e azul turquesa) conectados via uma mola de tração. O eixo principal de abertura localizado a esquerda (Detalhe aa) está acoplado ao contato móvel, bem como a alavanca que recebe o impacto do martelo (grupamento em verde / verde musgo) e produz o movimento rotacional deste contato. Por outro lado, o eixo de retenção à direita (Detalhe ab) se encontra sujeitado a um elemento de restrição externa (agrupamento em vermelho vinho) que em conjunto a uma mola de compressão promovem um estado de energia estável com restrição externa (observar Figura 2-8).

Isto posto, visa-se neste momento, por meio dos detalhes ampliados de cada eixo, evidenciar os aspectos que tornam esta proposta de solução plausível. Nota-se que a deflexão da mola de tração produz um momento torsor sobre ambos os eixos, resultando-se em uma força de contato (eixo principal de abertura à esquerda – Detalhe aa) e em um centro instantâneo eminente de rotação (eixo de retenção à direita – Detalhe ab). É possível verificar-se também, por meio do Detalhe aa, a existência de uma pequena lacuna entre a alavanca acoplada ao eixo principal de abertura e o elemento integrante do martelo (em verde musgo) que será projetado sobre esta e desencadeará o processo de deslocamento angular do contato móvel. Essa lacuna possibilita que o tracionamento desse eixo seja, majoritariamente, convertido em força de contato. Ademais, essa disposição promove um pequeno vão para a livre aceleração do martelo primariamente a seu impacto contra a dita alavanca. Além disso, observa-se que a referida alavanca não possui um elemento limitador, próxima a si, de deslocamento angular no sentido anti-horário. Isto se deve a pretensão deste projeto de possibilitar a ocorrência da levitação do contato móvel em casos onde a força de repulsão magnética aumenta para um valor superior a força propiciada pela dita mola de tração.

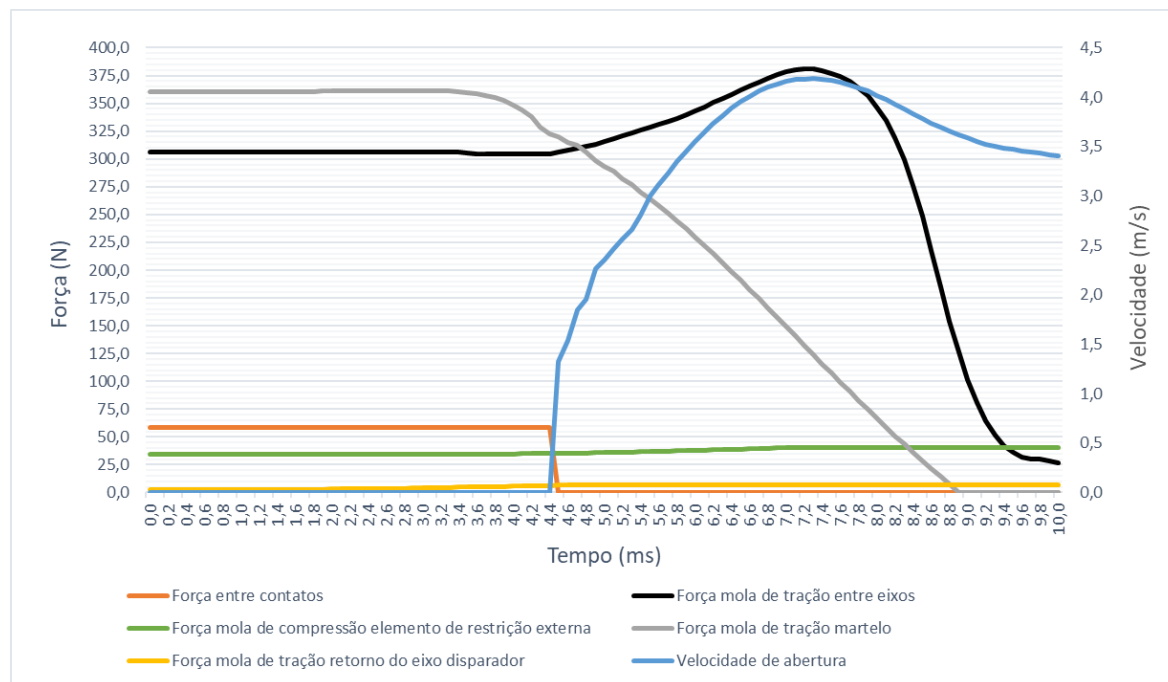
Por sua vez, o Detalhe ab destaca a conservação do equilíbrio estático sob o eixo de retenção (em azul turquesa) por meio do balanço de momentos e forças que atuam neste subconjunto. Essas forças e momentos, são provenientes, predominantemente: da mola de tração diretamente conectada ao referido eixo; da mola de compressão vinculada ao elemento de restrição; e dos atritos gerados nos pares de contatos entre as paredes do mancal e o eixo de retenção, bem como, entre o elemento de restrição e o dito eixo. Seu princípio de funcionamento é promovido – de um lado – pela deflexão da mola de compressão sobre o elemento de restrição externa (conjunto em vermelho vinho). Essa ação ocasiona um contato entre o elemento de

restrição externa e um sulco existente no eixo de retenção, resultando em uma força normal ao corpo cilíndrico do eixo e promovendo uma força de atrito no mencionado par. Conseqüentemente, essa força provoca um deslocamento, predominantemente, horizontal do eixo contra a parede do mancal que sustenta tal eixo, resultando num centro instantâneo eminente de rotação. Em contraposição, a força aplicada pela mola de tração sobre o eixo de retenção exerce um momento sobre tal. A combinação desse momento e dessas forças estabelecem um torque de atrito no dito eixo. No entanto, uma vez que este subsistema se encontra em equilíbrio estático, o mesmo apresenta um somatório das magnitudes atuantes sobre si igual a zero.

Equitativamente, a Figura 4-16.b ilustra o processo de deslocamento em sentido de afastamento entre contatos (móvel e fixo). Este processo se inicia em (1), propiciado pelo desengate da massa (item em verde) do eixo disparador (componente representado pelas peças em azul claro e vermelho escuro), promovendo assim a sua movimentação angular. A rotação do martelo é proporcionada pela energia potencial elástica armazenada na mola de tração conectada à sua extremidade inferior. Posteriormente a um breve deslocamento sem contenção (lacuna previamente descrita), o segmento integrante da massa (elemento em verde musgo) se choca contra a alavanca acoplada ao eixo principal de abertura – bem como ao contato móvel – e produz o movimento rotacional (2) de abertura do contato. Nota-se aqui que, a medida que a mola de tração que interliga o eixo principal de abertura ao eixo de retenção é defletida e, conseqüentemente, carregada (tal grandeza será retratada no decorrer desta seção) a propensão ao desequilíbrio do estado estático apresentado pelo eixo de retenção fica eminente. Quando tal deflexão atinge o valor necessário para desestabilizar este equilíbrio, o eixo de retenção desloca o elemento de restrição externa para à direita (3.1), devido a forma geométrica do eixo – isto é, ao sulco existente no mesmo – e, por consequência, deflete a mola de compressão que atua sobre o elemento de restrição externa. A continuidade dessa ação promove uma movimentação angular (3.2) anti-horária do referido eixo sob um novo centro instantâneo de rotação e, dessa maneira, libera o contato móvel para seguir com seu movimento de rotação (2).

Conforme demonstrado, este projeto foi elaborado considerando-se fundamentalmente o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho. Nesta perspectiva, a Figura 4-17 exprime em valores algumas dessas características previamente almejadas, tais como: força entre contatos de aproximadamente 60 N (item 4.2.2.2); ápice de velocidade de deslocamento (linear) do contato móvel próximo a 4 m/s (item 4.2.2); e fomento de uma condição controlada de desestabilização no estado estático aplicado ao eixo de retenção com o intuito de viabilizar a manutenção do deslocamento angular sofrido pelo contato móvel (item 4.2.2.2).

Figura 4-17 – Formas de onda de forças e velocidade de abertura versus tempo obtidas via simulação do subsistema de acionamento em *Working Model 2D*.

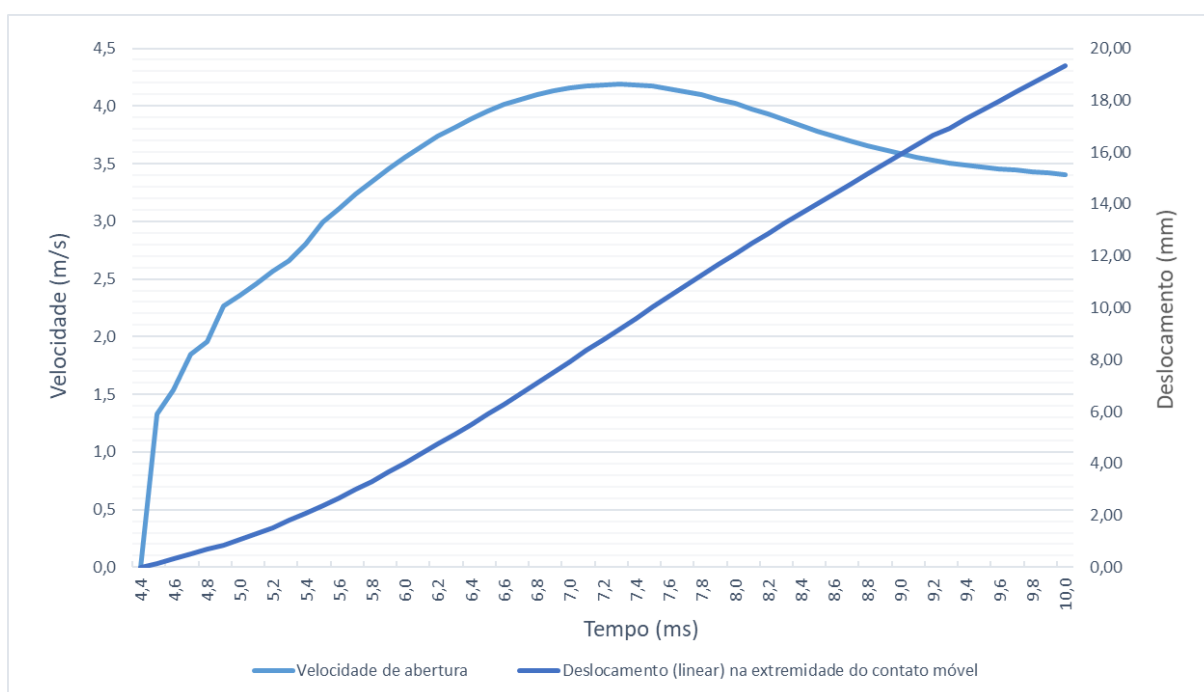


Fonte: Autoria própria (2022).

Verifica-se também, por meio da Figura 4-17, as forças resultantes das deflexões das molas envolvidas na operação do dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão. Nota-se que em torno de 3,5 ms o martelo inicia o seu deslocamento (instante onde principia-se o decréscimo da força da mola de tração acoplada à extremidade inferior do martelo), projetando-se sobre a alavanca acoplada ao eixo principal de abertura. Após cerca de 1 ms a separação entre contatos (móvel e fixo) é observada (força entre contatos é nula) e uma aceleração do contato móvel, em vista a promover um aumento na amplitude do afastamento entre esses componentes, é desencadeada. Ao mesmo tempo, constata-se um incremento nas forças da mola de tração entre o eixo principal de abertura e o eixo de retenção e da mola de compressão que atua sobre o elemento de restrição externa, forças as quais estão diretamente associadas à manutenção do equilíbrio estático sobre esse segundo eixo. No instante em que a derivada da força da mola de tração entre os eixos se iguala a zero, o eixo de retenção se encontra desimpedido a executar seu movimento rotacional, bem como, permite que o contato móvel prossiga com seu deslocamento até a posição almejada. Por sua vez, a mola de tração de retorno do eixo disparador, que possui a função de o posicionar / reter em sua posição inicial, apresenta um incremento em sua força à medida que o atuador pneumático desloca o dito eixo disparador para sua posição final (desengate da massa).

Por fim, a Figura 4-18 busca ilustrar a relação entre o deslocamento (linear) mensurado na extremidade do contato móvel e sua velocidade. Observa-se, por meio desta, que o citado contato apresenta (desprezando-se as forças magnéticas envolvidas na levitação do contato móvel durante um curto-circuito), uma aceleração positiva no percorrer dos primeiros 9 mm de deslocamento, enquanto que, os próximos 10 mm serão regidos por uma aceleração negativa. Além disso, nota-se que o almejado ápice de velocidade de deslocamento (linear) do contato móvel próximo a 4 m/s é obtido por meio desta proposta de formulação do subsistema em desenvolvimento.

Figura 4-18 – Formas de onda de velocidade de abertura e deslocamento versus tempo obtidas via simulação do subsistema de acionamento em *Working Model 2D*.



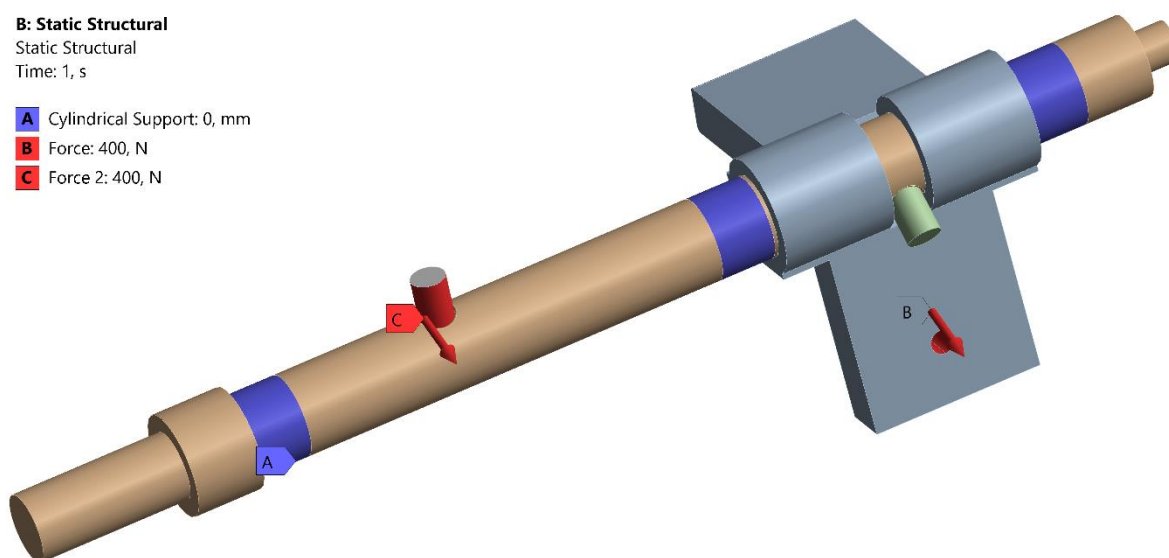
Fonte: Autoria própria (2022).

Assim sendo, de acordo com os dados acima relatados e conforme já indicado no item 4.2.2.1, a análise estrutural do subsistema de acionamento será executada sob uma condição de carregamento de 400 N sendo atribuída à extremidade inferior da massa, bem como, há um pino localizado na zona superior do eixo principal de abertura, porém, em oposição a essa primeira força. Essas cargas foram definidas e empregadas, nesta simulação, levando-se em consideração que tais grandezas podem ser consideradas os limites superiores para as condições aqui expostas, ou seja, o cenário mais crítico (observar Figura 4-17 – força mola de tração entre

eixos e força mola de tração martelo – 3,5 e 7,5 ms). Além disso, visa-se por meio desta ação, a redução do montante de análises computacionais a serem apresentadas ao longo desta seção.

Deste modo, a Figura 4-19 expõem as condições de contorno utilizadas no programa *ANSYS Mechanical* para simulação e análise estrutural estática dos componentes associados ao subsistema de acionamento com maior criticidade. A fixação adotada foi, mais uma vez, do tipo suporte cilíndrico (faces em azul), sendo o *Cylindrical Support* “A” atribuído ao eixo principal de abertura. *Force* “B” representa o carregamento (400 N) aplicado à extremidade inferior da massa e *Force* “C” expressa a carga (400 N), em oposição a anterior, conferida ao pino localizado na zona superior do eixo principal de abertura. O aço SAE 1045 foi empregado como matéria-prima nos componentes em estudo.

Figura 4-19 – Condições de contorno aplicadas nas geometrias dos componentes do subsistema de acionamento.

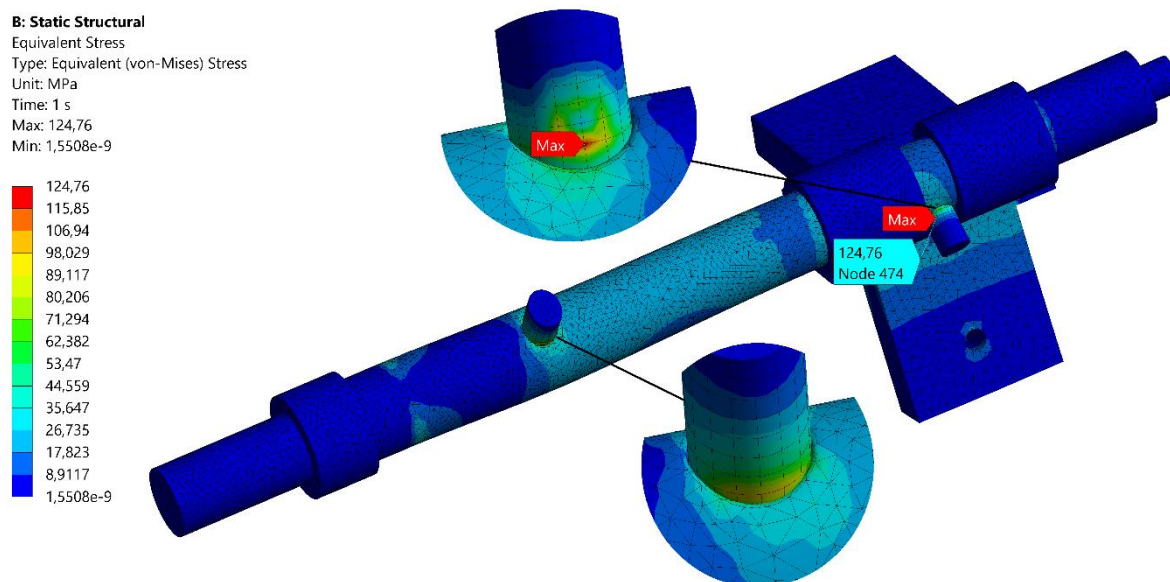


Fonte: Autoria própria (2022).

Neste contexto, a Figura 4-20 e a Figura 4-21 ilustram, respectivamente, a distribuição das tensões de *von Mises* e o fator de segurança para os componentes do subsistema de acionamento. Por meio destas figuras é possível se concluir que os componentes analisados não apresentam regiões com probabilidade de falhar estruturalmente durante a sua utilização, uma vez que a tensão de *von Mises* (124,76 MPa) é muito inferior ao limite de escoamento para o aço SAE 1045 (530 MPa) e o fator de segurança obtido (4,248) é superior a 1. Cabe-se aqui um destaque em relação as substanciais concepções geométricas que foram idealizadas, modeladas e simuladas em modo de prototipagem virtual até a obtenção de uma configuração de

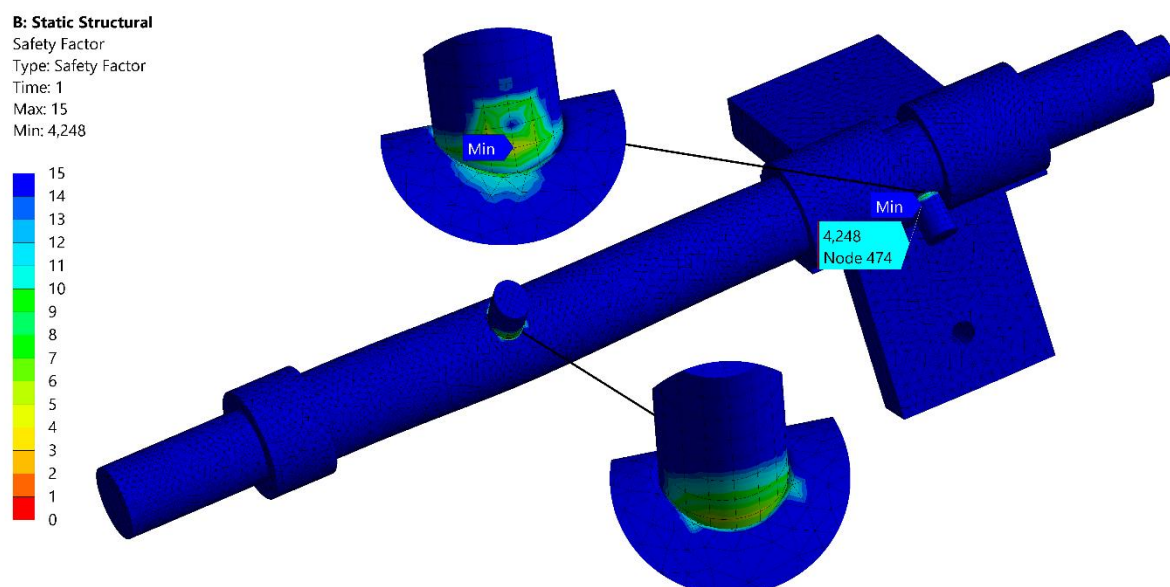
dispositivo estruturalmente robusta, segura ao operador e apta a desempenhar sua função com elevada eficiência.

Figura 4-20 – Tensão de *von Mises* atuante nos componentes do subsistema de acionamento.



Fonte: Autoria própria (2022).

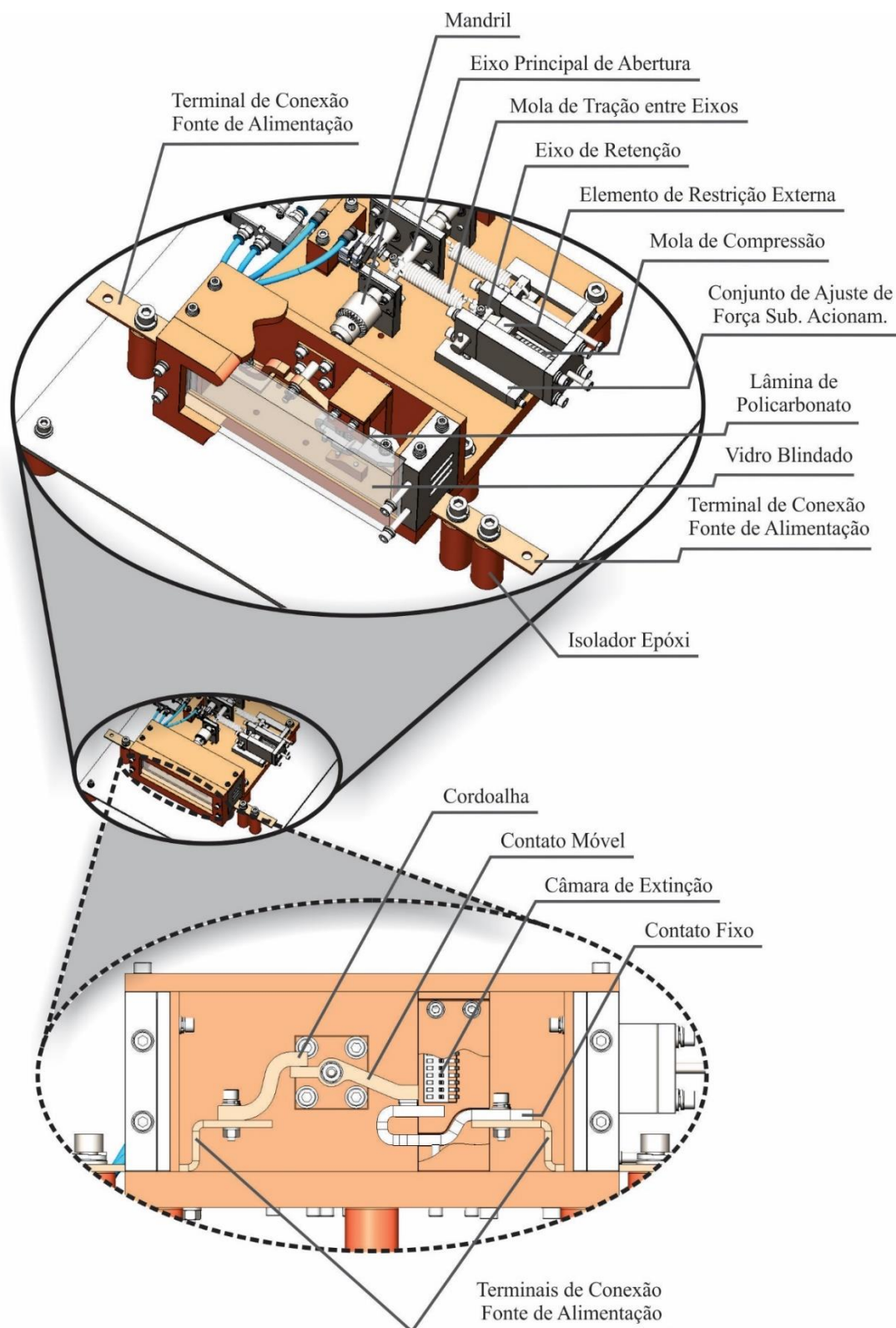
Figura 4-21 – Fator de segurança para os componentes do subsistema de acionamento.



Fonte: Autoria própria (2022).

Por sua vez, a Figura 4-22 busca ilustrar e identificar os principais componentes que compõem o subsistema de acionamento.

Figura 4-22 – Componentes básicos do subsistema de acionamento.



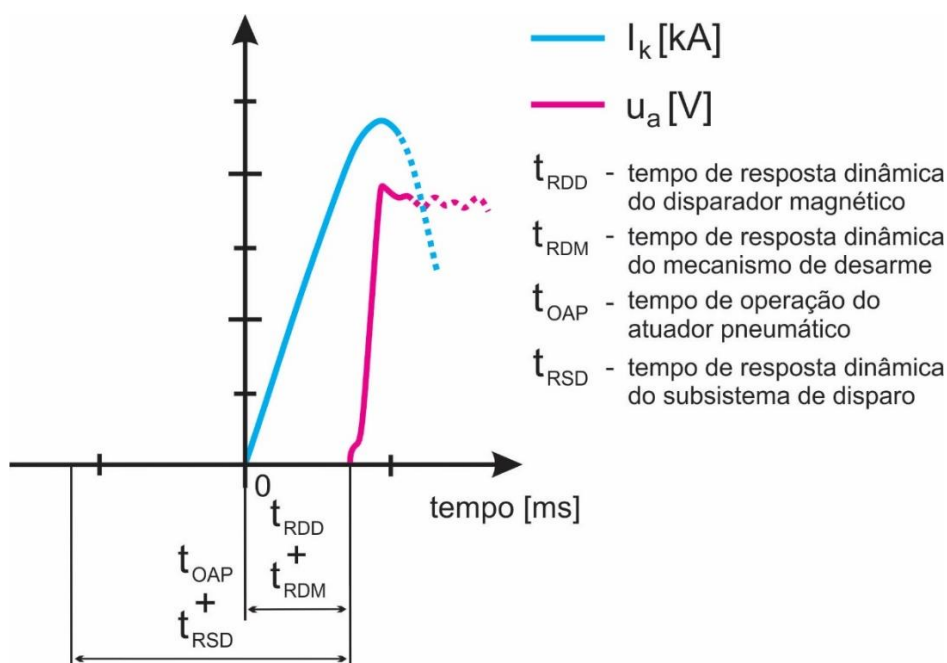
Fonte: A autoria própria (2022).

De modo similar a Figura 4-15 (componentes básicos do subsistema de disparo), a Figura 4-22 identifica a presença de alguns elementos que até este momento ainda não haviam

sido mencionados, como: terminais de conexão à fonte de alimentação, mandril, conjunto de ajuste de força do subconjunto de acionamento, lâmina de policarbonato, vidro blindado e isoladores epóxi. As especificações técnicas atribuídas a estas peças, em conjunto aos demais itens dos subsistemas desenvolvidos, serão apresentadas na próxima seção.

Por fim, buscar-se-á mediante os princípios introduzidos no item 4.2.2 (especificamente sintetizados através da Figura 4-6) e com base nos dados de tempo de ação dos componentes do sistema global (tempo de operação do atuador pneumático e de resposta dinâmica do subsistema de disparo [mensurados e informados no item 4.4]; tempo de resposta dinâmica do disparador magnético e de resposta dinâmica do mecanismo de desarme do disjuntor em caixa moldada utilizado como modelo), a simplificação do processo de execução dos ensaios de curto-circuito e a adequada representação do disjuntor em caixa moldada modelo por meio do dispositivo em ideação. Tais valores serão tomados como variáveis de entrada para sincronização entre o sistema de curto-circuito e o dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão.

Figura 4-23 – Comportamento dinâmico de um disjuntor e do dispositivo em estudo sob curto-circuito e tempos envolvidos para abertura (desconexão) dos contatos.



Fonte: Autoria própria (2022).

Assim sendo, nota-se por intermédio da Figura 4-23, que o principal propósito deste procedimento é a busca pela concomitância do instante de abertura dos contatos, para um certo nível de curto-circuito, entre o MCCB modelo e o dito dispositivo em desenvolvimento.

4.2.3 Especificações

Uma vez definidos os principais atributos e particularidades do projeto, esta seção tem como objetivo uma sucinta apresentação dos requisitos técnicos estabelecidos e aplicados aos componentes do equipamento em elaboração. Além disso, visa, simbolicamente, demarcar a passagem da fase de ideação para a fase de prototipação (física) no conceito *Design Thinking*.

Neste sentido, a Tabela 4-2 em conjunto aos Apêndices A e B buscam, tecnicamente, representar e minuciar tais características, identificar os itens que compõem este dispositivo e os ilustrar. Designadamente, a Tabela 4-2 exibe uma visão global dos componentes, materiais utilizados e detalhes técnicos a serem observados. Por sua vez, o desenho técnico apresentado via Apêndice A representa graficamente o dito produto. Por fim, o Apêndice B exibe os parâmetros da mola de compressão obtidos via processo de dimensionamento no *website* do fabricante de molas Gutekunst Federn.

Nota-se, a partir de tais fontes, a expressiva quantidade de elementos que integram o equipamento em foco. Os materiais empregados foram definidos levando-se em consideração a robustez, o desempenho e as solicitações (majoritariamente mecânicas, elétricas e térmicas) requeridas por cada componente. Tendo em vista a necessidade de isolamento dos condutores e partes da estrutura que se encontraram energizadas, bem como, de assegurar a rigidez dielétrica do dispositivo, delimitou-se o nível superior de tensão de 1000 Vca para sistemas de corrente alternada em baixa tensão (ver Anexo B) como requisito mínimo para materiais isolantes. Para os itens manufaturados elaborados, as principais opções de matéria-prima utilizadas foram o aço SAE 1010, o aço SAE 1045 e a fibra de vidro com resina poliéster. Em relação aos elementos de máquinas, optou-se primordialmente por itens padronizados e disponíveis no mercado. A exceção a esta regra são as molas helicoidais de compressão e tração, que devido a seus perfis mais personalizados foram dimensionadas e manufaturadas.

Para este último quesito, os parâmetros básicos de cada mola foram fornecidos pelo programa *Working Model 2D*, ou seja, as forças despendidas e suas extensões iniciais (comprimento da mola sem carga). Seus dimensionamentos foram obtidos via ferramenta de cálculo *online* de molas no *website* do fabricante de molas Gutekunst Federn, partindo-se das seguintes variáveis: matéria-prima, forma do olhal, diâmetro do arame (d), diâmetro externo do enrolamento (D_e), comprimento da mola sem carga (L_0), comprimento da mola pré-tensionada (L_1), comprimento da mola sob carga (L_2) e número de espiras da mola (n). Como resultado deste processo iterativo, os parâmetros necessários para a confecção das referidas molas foram obtidos. O Apêndice B exibe um exemplo decorrente de tal procedimento.

Tabela 4-2 – Especificação técnica dos componentes do dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos.

Nº do item	Descrição	Qtd.	Matéria-prima	Comprado ou manufaturado	Especificação / observações.
1	Porca sextavada M3	2	Aço carbono	Comprado	Rosca métrica, passo normal, classe 8, zincada.
2	Parede frontal disparador	1	Laminado em fibra de vidro com resina poliéster (LFVRP)	Manufaturado	-
3	Arruela de pressão M3	4	Aço inox AISI 304	Comprado	-
4	Válvula solenoide 5/2 vias VUVS-LK20-M52-AD-G18-1C1-S	1	-	Comprado	Válvula solenoide 5/2 vias, monoestável, acionamento elétrico 24 Vcc, retorno por mola.
5	Cilindro pneumático compacto ADNGF-12-10-P-A	1	-	Comprado	Cilindro pneumático compacto, 10 mm de curso, dupla ação, 68 N de força (teórica) no avanço a 6 bar.
6	Conexão pneumática cotovelo QSML-M5-6	2	-	Comprado	Conexão rápida em L roscada - M5 / tubo 6 mm.
7	Tubo pneumático PUN-H-6	2	TPE-U (Poliuretano)	Comprado	Tubo flexível para conexão pneumática Ø ext. 6 mm.
8	Parafuso sextavado interno M6x75	2	Aço carbono	Comprado	Rosca métrica, passo normal, classe 8.8, zincado.
9	Parafuso sextavado interno M5x16	12	Aço carbono	Comprado	Rosca métrica, passo normal, classe 8.8, zincado.
10	Placa retentor rolamento	2	Aço carbono SAE 1010	Manufaturado	Zincada.
11	Rolamento rígido de esferas 16100-2Z	1	-	Comprado	Proteção de aço em ambos os lados, Ø int. 10 mm, Ø ext. 28 mm, largura 8 mm, carga dinâmica básica de 5,07 kN e carga estática básica de 2,36 kN.
12	Mandril 3/8"	1	-	Comprado	Mandril leve, capacidade de fixação de 1 a 10 mm, rosca de acoplamento de 3/8" x 24 UFN.
13	Parafuso sextavado interno M5x30	2	Aço carbono	Comprado	Rosca métrica, passo normal, classe 8.8, zincado.
14	Eixo de retenção	1	Aço carbono SAE 1045	Manufaturado	Zincado, temperado e revenido (45 a 52 HRC).
15	Batente conjuntos ajuste de força	2	Aço carbono SAE 1010	Manufaturado	Zincada.
16	Arruela lisa M4	4	Aço carbono	Comprado	Zincada.
17	Mola de compressão	1	Aço mola EN 10270-1 DH	Manufaturado	Ø do arame 2,00 mm, Ø médio da mola 9,00 mm, constante k 24,844 N/mm, F1 37,27 N (1,5 mm de deflexão) e F2 248,44 N (10 mm de deflexão).

Nº do item	Descrição	Qtd.	Matéria-prima	Comprado ou manufaturado	Especificação / observações.
18	Elemento de restrição externa	1	Aço carbono SAE 1045	Manufaturado	Zincado, temperado e revenido (45 a 52 HRC).
19	Arruela de pressão M4	4	Aço inox AISI 304	Comprado	-
20	Parafuso sextavado interno M4x25	4	Aço carbono	Comprado	Rosca métrica, passo normal, classe 8.8, zincado.
21	Parafuso sextavado M6x100 + Porca sextavada M6 (conjunto soldado)	2	Aço carbono	Comprado	Rosca métrica, passo normal, classe 8.8 / 8, zincados.
22	Suporte elemento de restrição externa	2	Aço carbono SAE 1010	Manufaturado	Zincada.
23	Trilho conjuntos ajuste de força	4	Aço carbono SAE 1010	Manufaturado	Zincada.
24	Suporte eixo de retenção	2	Aço carbono SAE 1010	Manufaturado	Zincada.
25	Arruela lisa M3	6	Aço carbono	Comprado	Zincada.
26	Parafuso sextavado interno M3x20	2	Aço carbono	Comprado	Rosca métrica, passo normal, classe 8.8, zincado.
27	Vidro blindado	1	-	Comprado	21 mm de espessura.
28	Porca sextavada M6	13	Aço carbono	Comprado	Rosca métrica, passo normal, classe 8, zincada.
29	Parafuso sextavado interno M6x50	4	Aço carbono	Comprado	Rosca métrica, passo normal, classe 8.8, zincado.
30	Isolador epóxi Ø30x70xM10	4	Epóxi / inserto em latão	Comprado	Isolador baixa tensão em epóxi, diâmetro 30 mm, comprimento 70 mm, rosca M10.
31	Parafuso sextavado interno M8x20	5	Aço carbono	Comprado	Rosca métrica, passo normal, classe 8.8, zincado.
32	Arruela lisa M8	5	Aço carbono	Comprado	Zincada.
33	Parede lateral invólucro esquerda	1	LFVRP	Manufaturado	-
34	Parafuso sextavado interno M5x35	13	Aço carbono	Comprado	Rosca métrica, passo normal, classe 8.8, zincado.
35	Cordoalha	1	Cobre eletrolítico	Manufaturado	4 x 8 mm ² (seção da cordoalha).
36	Isolador epóxi Ø30x50xM10	5	Epóxi / inserto em latão	Comprado	Isolador baixa tensão em epóxi, diâmetro 30 mm, comprimento 50 mm, rosca M10.
37	Contato fixo	1	Cobre eletrolítico / Prata carbono	Manufaturado	Caracterizações não serão apresentadas tendo em vista se tratarem de especificações industriais.

Nº do item	Descrição	Qtd.	Matéria-prima	Comprado ou manufaturado	Especificação / observações.
38	Parafuso sextavado interno M6x30	8	Aço carbono	Comprado	Rosca métrica, passo normal, classe 8.8, zincado.
39	Parafuso sextavado interno M6x35	5	Aço carbono	Comprado	Rosca métrica, passo normal, classe 8.8, zincado.
40	Arruela de pressão M8	5	Aço inox AISI 304	Comprado	-
41	Arruela de pressão M6	44	Aço inox AISI 304	Comprado	-
42	Terminal de conexão fonte de alimentação	2	Cobre eletrolítico	Manufaturado	-
43	Parafuso sextavado interno M6x45	8	Aço carbono	Comprado	Rosca métrica, passo normal, classe 8.8, zincado.
44	Arruela lisa M6	55	Aço carbono	Comprado	Zincada.
45	Isolante lateral	2	LFVRP	Manufaturado	-
46	Parede superior invólucro isolante sistema aberto	1	LFVRP	Manufaturado	-
47	Parafuso sextavado interno M5x55	2	Aço carbono	Comprado	Rosca métrica, passo normal, classe 8.8, zincado.
48	Parede posterior invólucro isolante sistema aberto	1	LFVRP	Manufaturado	-
49	Câmara de extinção	1	SMC (polímero termofixo) / Aço carbono	Manufaturado	Caracterizações não serão apresentadas tendo em vista se tratarem de especificações industriais.
50	Contato móvel	1	Cobre eletrolítico / Prata tungstênio	Manufaturado	Caracterizações não serão apresentadas tendo em vista se tratarem de especificações industriais.
51	Trava rolamento	1	LFVRP	Manufaturado	-
52	Parafuso sextavado interno M6x25	16	Aço carbono	Comprado	Rosca métrica, passo normal, classe 8.8, zincado.
53	Parafuso sextavado interno M3x30	2	Aço carbono	Comprado	Rosca métrica, passo normal, classe 8.8, zincado.
54	Arruela de pressão M10	18	Aço inox AISI 304	Comprado	-
55	Arruela lisa M10	18	Aço carbono	Comprado	Zincada.
56	Parafuso sextavado interno M10x25	18	Aço carbono	Comprado	Rosca métrica, passo normal, classe 8.8, zincado.
57	Isolador epóxi Ø40x40xM8	5	Epóxi / inserto em latão	Comprado	Isolador baixa tensão em epóxi, diâmetro 40 mm, comprimento 40 mm, rosca M8.
58	Tampa suporte elemento de restrição externa	1	Aço carbono SAE 1010	Manufaturado	Zincada.

Nº do item	Descrição	Qtd.	Matéria-prima	Comprado ou manufaturado	Especificação / observações.
59	Eixo suporte contato móvel	1	Aço carbono SAE 1045	Manufaturado	Zincado, temperado e revenido (45 a 52 HRC).
60	Parede lateral invólucro direita	1	LFVRP	Manufaturado	-
61	Parede superior invólucro isolante	1	LFVRP	Manufaturado	-
62	Parede frontal invólucro isolante sistema aberto	1	LFVRP	Manufaturado	-
63	Lâmina de policarbonato descartável	1	Policarbonato transparente	Comprado	-
64	Parede frontal invólucro isolante	1	LFVRP	Manufaturado	-
65	Placa de ancoragem	1	Aço carbono SAE 1010	Manufaturado	Zincada.
66	Parede posterior invólucro isolante	1	LFVRP	Manufaturado	-
67	Base isolante	1	LFVRP	Manufaturado	-
68	Tubo pneumático PUN-H-8	1	TPE-U (Poliuretano)	Comprado	Tubo flexível para conexão pneumática Ø ext. 8 mm.
69	Conexão pneumática reta QS-8	1	-	Comprado	Conexão pneumática para engate rápido para tubos com Ø ext. de 8 mm em ambas as laterais.
70	Mola retorno eixo disparador	1	Aço mola EN 10270-1 DH	Manufaturado	Ø do arame 0,70 mm, Ø médio da mola 9,80 mm, constante k 0,325 N/mm, F1 2,60 N (8 mm de deflexão) e F2 7,47 N (23 mm de deflexão).
71	Trava mola retorno eixo disparador	1	Aço carbono SAE 1010	Manufaturado	Zincada.
72	Parede posterior disparador	1	Aço carbono SAE 1010	Manufaturado	Zincada.
73	Eixo disparador	1	Aço carbono SAE 1045	Manufaturado	Zincado, temperado e revenido (45 a 52 HRC).
74	Arruela de pressão M5	25	Aço inox AISI 304	Comprado	-
75	Retentor cilindro pneumático	1	LFVRP	Manufaturado	-
76	Disparador	1	Aço carbono SAE 1010	Manufaturado	Zincada.
77	Placa retentor rolamento frontal	2	Aço carbono SAE 1010	Manufaturado	Zincada.
78	Arruela lisa M5	27	Aço carbono	Comprado	Zincada.
79	Parede suporte eixo principal de abertura	1	Aço carbono SAE 1010	Manufaturado	Zincada.

Nº do item	Descrição	Qtd.	Matéria-prima	Comprado ou manufaturado	Especificação / observações.
80	Eixo principal de abertura	1	Aço carbono SAE 1045	Manufaturado	Zincado, temperado e revenido (45 a 52 HRC).
81	Mola de tração entre eixos	1	Aço mola EN 10270-1 DH	Manufaturado	Ø do arame 3,00 mm, Ø médio da mola 14,75 mm, constante k 12,544 N/mm, F1 250,87 N (20 mm de deflexão) e F2 357,49 N (28,5 mm de deflexão).
82	Rolamento rígido de esferas 6001-2Z	3	-	Comprado	Proteção de aço em ambos os lados, Ø int. 12 mm, Ø ext. 28 mm, largura 8 mm, carga dinâmica básica de 5,40 kN e carga estática básica de 2,36 kN.
83	Massa / martelo	1	Aço carbono SAE 1045	Manufaturado	Zincado, temperado e revenido (45 a 52 HRC).
84	Regulador mola tração martelo	1	Aço carbono SAE 1010	Manufaturado	Zincada.
85	Mola tração martelo	1	Aço mola EN 10270-1 DH	Manufaturado	Ø do arame 3,00 mm, Ø médio da mola 14,75 mm, constante k 12,544 N/mm, F1 250,87 N (20 mm de deflexão) e F2 357,49 N (28,5 mm de deflexão).
86	Alavanca eixo principal de abertura (Parafuso sextavado interno M5x16)	1	Aço carbono	Comprado	Rosca métrica, passo normal, classe 8.8, zincado.
87	Sensor de rotação (componente acoplado ao eixo)	1	-	Comprado	-
88	Parede suporte sensor de rotação	1	LFVRP	Manufaturado	-
89	Sensor de rotação RCS2200-360-PP-V-CCW-0,5M	1	-	Comprado	Encoder rotativo 24 Vcc, campo angular de 360°, sinal de saída de 0 a 10 Vcc, 12 bits de resolução.
90	Alavanca retorno eixo disparador	1	Aço carbono SAE 1010	Manufaturado	Zincada.
91	Rolamento rígido de esferas 61903-2Z	2	-	Comprado	Proteção de aço em ambos os lados, Ø int. 17 mm, Ø ext. 30 mm, largura 7 mm, carga dinâmica básica de 4,62 kN e carga estática básica de 2,55 kN.

Fonte: Autorial própria (2022).

4.3 Prototipação

A prototipação é uma etapa essencial no processo de *Design Thinking*, sendo usualmente empregada para testar um conceito – ou processo – e avaliar a precisão das suposições elaboradas no transcorrer das fases iniciais do projeto, ou seja, permite a iteração inicial do produto durante seu desenvolvimento de modo a validar suas funcionalidades. Em resumo, um protótipo é uma versão reduzida do produto; uma simulação ou uma versão de amostra que permite testar ideias e *designs* antes de efetivamente investir tempo e dinheiro no projeto.

Os protótipos de engenharia são – com uma frequência em amplo crescimento – idealizados, modelados e simulados em modo de representação virtual para, na sequência, serem concretizados via modelo físico. Esta disposição inicial de procedimentos virtuais pôde ser verificada, fundamentalmente, no decorrer da etapa de ideação deste trabalho. Como prosseguimento desta sistemática, esta seção tem como foco o modelo físico. Este formato de protótipo é utilizado para retratar uma ideia intangível em uma forma física e tridimensional. Circunstancialmente, os protótipos produzidos podem ser rápidos e rústicos – projetados para testes e entendimentos em estágio inicial – e, por vezes, complexos e detalhados – voltados para testes-piloto nos estágios finais do projeto. Um exemplo de prototipagem rápida para teste de conceito empregado no decorrer deste desenvolvimento é apresentado na Figura 4-24.

Figura 4-24 – Protótipo para teste de conceito do subconjunto eixo de retenção e elemento de restrição externa.



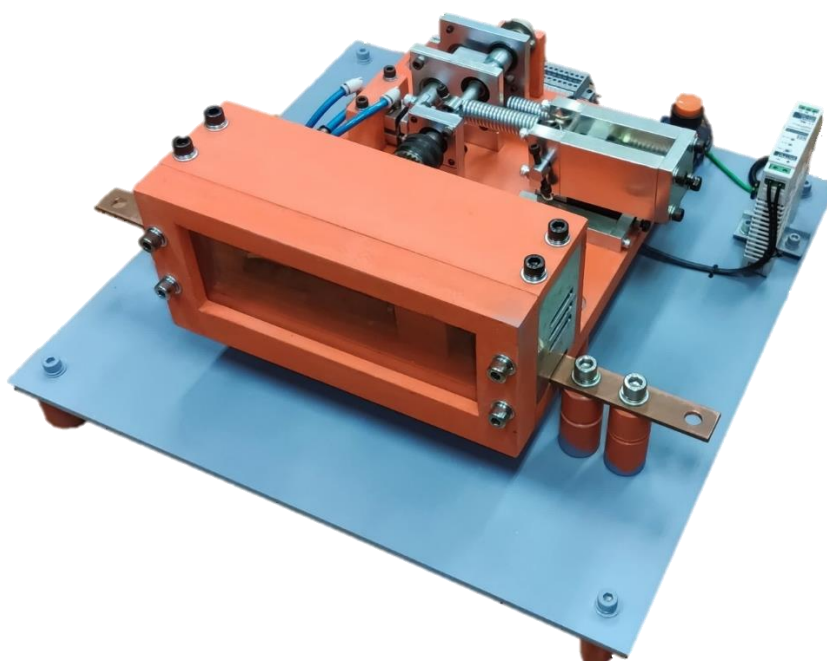
Fonte: A autoria própria (2022).

Tal estrutura, conforme já enfatizado, fora empregada com o intuito de se averiguar a viabilidade técnica da solução elaborada para o referido subconjunto em uma condição materializada. Desta forma, a Figura 4-24 busca ilustrar como tal princípio pode ser aplicado em uma situação prática, ou seja, na análise de sinergia entre os componentes atribuídos à função de originar uma força de contato entre os contatos móvel e fixo (por meio da deflexão da mola de tração entre eixos), bem como, promover o desacoplamento dessa mola no decorrer do processo de abertura do contato elétrico. Sendo tais funções providas, na solução, por meio de um estado de energia estável com restrição externa.

Assim sendo, para a produção deste protótipo, fora-se optado pela tecnologia de manufatura aditiva (impressão 3D) para a confecção dos componentes com aplicação exclusiva e emprego de itens padronizados para os elementos de máquina com função de fixação e armazenamento de energia potencial elástica. Deste modo, ao final de seu processo de montagem, foi possível se averiguar (em uma escala de força reduzida) o comportamento dinâmico deste subconjunto em avaliação, assim como, confirmar a sua eficácia.

Observa-se neste ponto que, sob outra perspectiva, o dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão pode ser, apropriadamente, qualificado como um protótipo de alta fidelidade, sendo o mesmo apresentado através da Figura 4-25.

Figura 4-25 – Dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão montado.

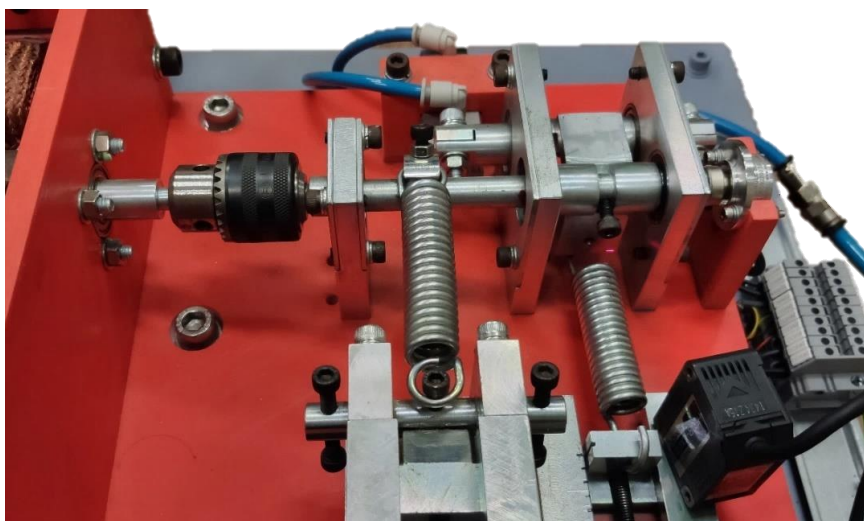


Esta designação é preconizada tendo em vista a essência construtiva atribuída aos protótipos de alta fidelidade, ou seja, modelos mais detalhados e realistas que se assemelham aos produtos finais em quesitos funcionais e aparência (VIANNA *et al.*, 2012). Assim sendo, tal caracterização pode ser significativamente atrelada ao conceito construtivo aplicado ao aparato em estudo, ou seja, apesar de ser “o produto em desenvolvimento”, o mesmo possui como propósito a precisa reprodução das estruturas / características funcionais de um disjuntor em caixa moldada. Além de, concomitantemente, visar permitir uma vultosa maleabilidade em relação a variáveis de projeto (objetivos específicos deste trabalho) que, por muitas vezes, possuem relevantes limitações para a promoção de uma abrangente alteração em um projeto padrão. Porém, para tal, a aparência final do dispositivo ficara significativamente distinta do produto disponibilizado ao mercado.

4.4 Ensaios e resultados

Uma vez concluídas estas primeiras rodadas de iteração do processo de *Design Thinking*, os procedimentos de ensaios e verificações dos subconjuntos de disparo e acionamento foram iniciados, partindo-se posteriormente para o dispositivo como um todo. Desta forma, como primeira análise, a determinação do tempo de operação do atuador pneumático (t_{OAP}) e do tempo de resposta dinâmica do subsistema de disparo (t_{RSD}) fora almejada. Assim sendo, a Figura 4-26 busca identificar o local de mensuração (ponto em vermelho refletido na massa / martelo) adotado para aferir os referidos tempos ($t_{OAP} + t_{RSD}$) via sensor de medição de deslocamento linear a laser.

Figura 4-26 – Arranjo para medição de tempo de resposta ($t_{OAP} + t_{RSD}$) do subsistema de disparo vs carga.

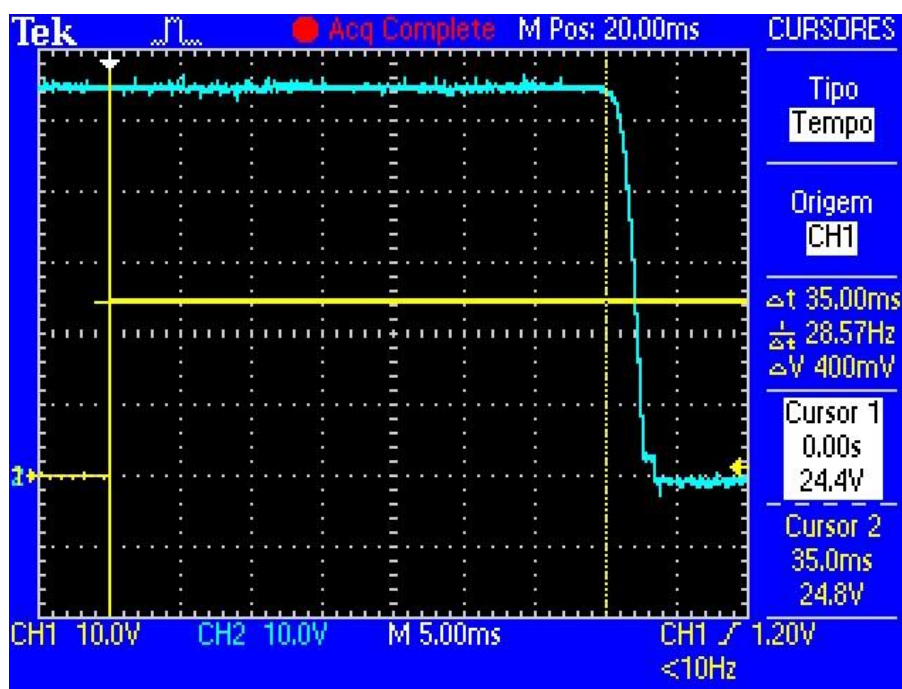


Fonte: A autoria própria (2022).

Para esta mensuração os seguintes equipamentos foram empregados: um osciloscópio digital Tektronix TDS 2014C, uma unidade de amplificação de sinal OMRON ZX2-LDA41, um sensor de medição de deslocamento linear a laser OMRON ZX2-LD50L, um botão pulsador e uma fonte de alimentação chaveada 24 Vcc. Sendo este último item o responsável pelo suprimento de energia ao amplificador de sinal, bem como ao sensor de deslocamento linear a laser e geração do sinal para o acionamento do atuador pneumático via botão pulsador.

Subsequentemente, ensaios para se mensurar o intervalo de tempo entre o instante de emissão de sinal à válvula solenoide do atuador pneumático e o instante de início de deslocamento da massa / martelo foram executados, sendo seus resultados obtidos conforme Figura 4-27.

Figura 4-27 – Mensuração do tempo de resposta ($t_{OAP} + t_{RSD}$) do subsistema de disparo vs carga.

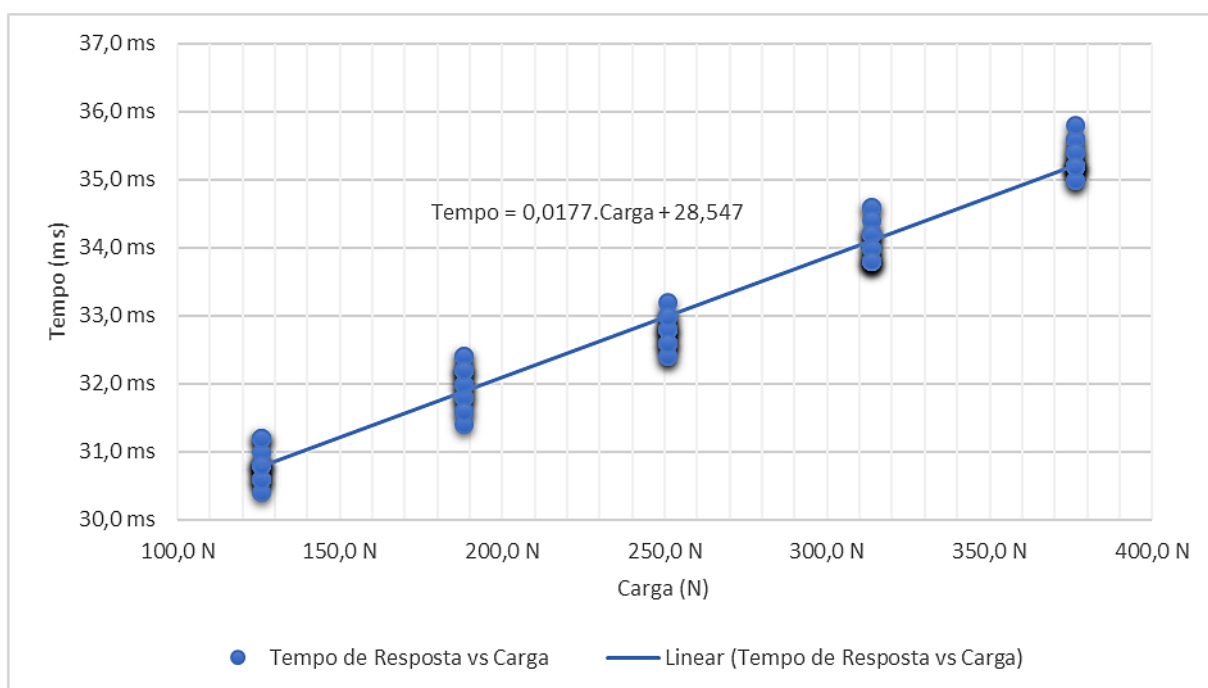


Fonte: Autoria própria (2022).

A forma de onda em amarelo, ilustrada na Figura 4-27, representa o sinal emitido via botão pulsador da fonte de alimentação à válvula solenoide do atuador pneumático, onde é possível se observar um degrau (de 0 para 24 Vcc) no sinal de tensão no instante $t = 0$ ms, ou seja, a válvula solenoide se encontra apta à operar o atuador pneumático. Ao passo que, a representação gráfica em azul claro retrata o sinal obtido via sensor de medição de deslocamento, a qual inicia o seu movimento de decremento no instante em que a massa / martelo principia a sua movimentação. Este deslocamento, conforme Figura 4-27, é iniciado no

instante $t = 35$ ms. Assim sendo, a somatória do tempo de operação do atuador pneumático (t_{OAP}) e do tempo de resposta dinâmico do subsistema de disparo (t_{RSD}) para esta amostragem é igual a 35 ms. Os ensaios foram realizados levando-se em consideração os seguintes carregamentos via deflexão da mola de tração conectada ao braço inferior da massa / martelo: 125,4 N; 188,2 N; 250,9 N; 313,6 N e 376,3 N. A qual se encontra defletida, respectivamente, em 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm e 30 mm. A fim de uma maior representatividade estatística, para cada deflexão, o ensaio foi repetido 15 vezes. Os resultados obtidos são apresentados e detalhados por meio da Figura 4-28 e da Tabela 4-3.

Figura 4-28 – Tempo de resposta ($t_{OAP} + t_{RSD}$) do subsistema de disparo vs carga.



Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 4-3 – Tempo de resposta ($t_{OAP} + t_{RSD}$) do subsistema de disparo vs carga.

Deflexão da mola de tração (mm)	Carga (N)	Tempo de resposta médio (ms)	Desvio padrão (ms)	Coefficiente de variação (%)
10	125,4	30,81	0,24	0,77
15	188,2	31,97	0,29	0,91
20	250,9	32,76	0,22	0,68
25	313,6	34,09	0,27	0,80
30	376,3	35,31	0,22	0,62

Fonte: Autoria própria (2022).

Verifica-se através da Figura 4-28 e da Tabela 4-3 que o incremento no tempo de resposta do subsistema de disparo ($t_{OAP} + t_{RSD}$) é diretamente proporcional ao acréscimo de carga sobre a massa / martelo. Além disso, nota-se que o coeficiente de variação – também conhecido como desvio padrão relativo – indica uma boa precisão e repetitividade do ensaio (abaixo de 1% em toda a faixa avaliada). Este coeficiente, em síntese, expressa a extensão da variabilidade em relação à média da população. Neste âmbito, considerando-se a relação entre grandezas (tempo de resposta e carga) como sendo linear, a mesma será regida por meio da Equação 4-1:

$$Tempo = 0,0177.Carga + 28,547 \text{ (ms)} \quad (4-1)$$

Desta forma, constata-se através da Equação 4-1 que, independentemente da carga aplicada, o tempo mínimo de resposta do subsistema de disparo será igual a 28,547 ms. Isto posto, para obter-se a concomitância do instante de abertura dos contatos almejada no item 4.2.2.2 (especificamente ilustrado através da Figura 4-23), as variáveis t_{RDD} e t_{RDM} necessitam ser introduzidas na Equação 4-1, originando-se a Equação 4-2:

$$Tempo = 0,0177.Carga + 28,547 - t_{RDD} - t_{RDM} \text{ (ms)} \quad (4-2)$$

Considerando os valores apresentados no item 4.2.2 para as variáveis t_{RDD} (3,09 ms para uma corrente de curto-circuito de 10 kA eficaz) e t_{RDM} (3,67 ms), resulta-se na Equação 4-3:

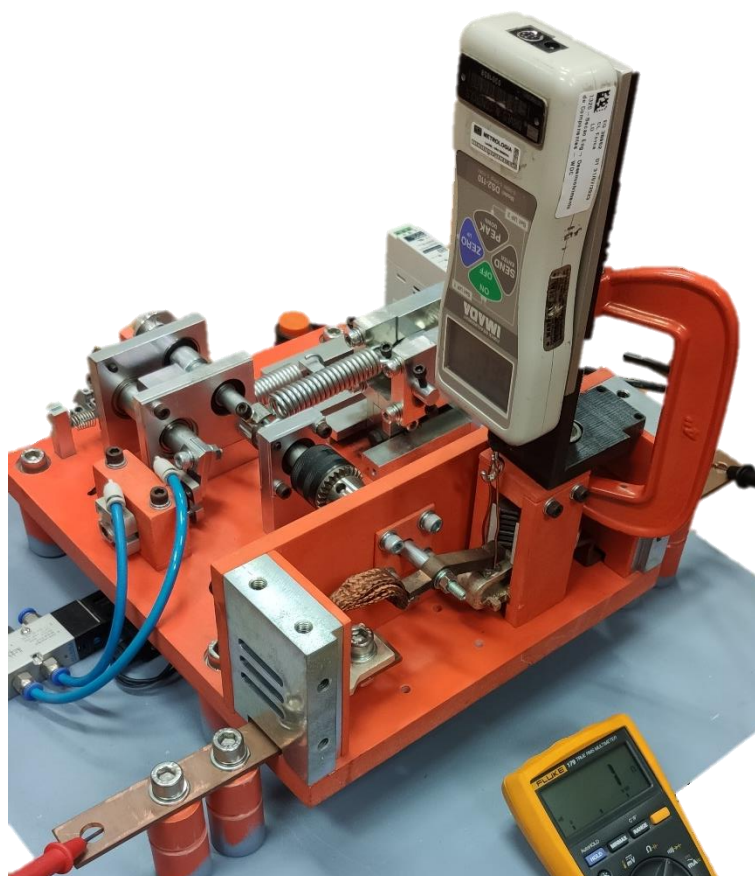
$$Tempo = 0,0177.Carga + 21,787 \text{ (ms)} \quad (4-3)$$

Portanto, para que a concomitância do instante de abertura dos contatos seja obtida (para um curto-circuito de 10 kA eficaz), o valor calculado através da Equação 4-3 – após o ajuste de carga – deverá ser o tempo aplicado no sistema de controle (Figura 4-1) no qual o sinal de acionamento do atuador pneumático será gerado e encaminhado em antecedência ao instante de início do curto-circuito. Ademais, ressalta-se que esta variável é também diretamente responsável pela velocidade de abertura do contato móvel acoplado ao eixo principal de abertura, sendo tal análise apresentada na sequência de ensaios que complementam este item.

Isto posto, foram-se realizados na sequência os testes para comprovação de um dos objetivos específicos deste estudo, ou seja, de “reproduzir a força de contato característica de um disjuntor de baixa tensão e possibilitar a sua variação”. Para este ensaio os seguintes equipamentos foram utilizados: um dinamômetro digital Imada DS2-110 (0 a 500 N), um multímetro digital True-RMS Fluke 177, uma base para acoplamento e deslocamento linear de

equipamentos diversos, um cabo para fins de transmissão mecânica e um grampo tipo C. Previamente, o dinamômetro digital foi acoplado a base via sua face posterior, sendo a viabilidade de seu deslocamento linear sobre a referida base averiguada e atestada. Posteriormente, a dita base foi fixada ao dispositivo em estudo via grampo tipo C, conforme Figura 4-29.

Figura 4-29 – Arranjo para medição da força de contato vs deflexão.

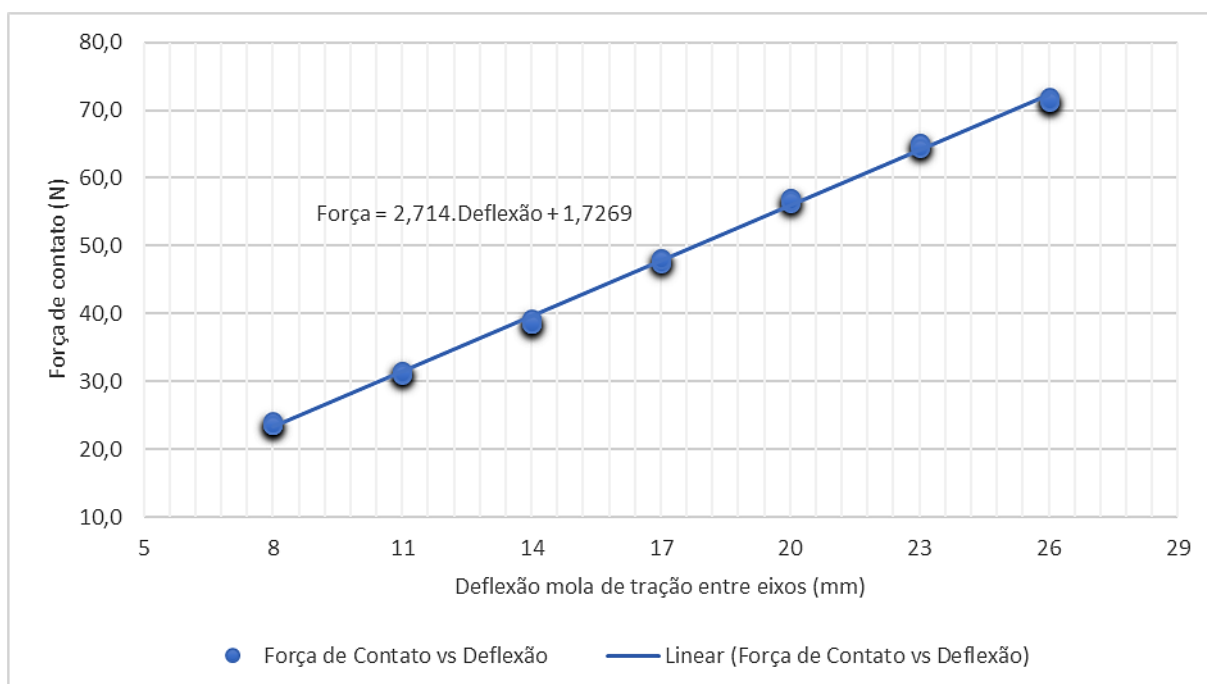


Fonte: Autoria própria (2022).

Para o tracionamento do contato móvel e averiguação da força de contato, um cabo com 1,5 mm de espessura de material condutivo (cobre eletrolítico sem revestimento isolante) foi adotado, a fim de produzir a manutenção de contatação (resistência inferior a 1 ohm) entre os componentes (contato móvel e fixo). Uma das extremidades do referido cabo foi inserida na região de interação entre os contatos, ao passo que a outra borda foi acoplada ao dinamômetro. Para a verificação de continuidade do circuito (presença de uma baixa resistência entre os dois terminais de conexão a fonte de alimentação), as ponteiros de sonda de cada um dos dois cabos de testes do multímetro foram fixadas em um dos extremos dos ditos terminais de conexão (cabo vermelho e cabo preto - Figura 4-29) e o multímetro foi disposto na função de verificação de continuidade. Desta forma, à medida que o cabo era tracionado com a força necessária para

gerar uma desconexão entre os contatos, o multímetro acusava a falta de continuidade no circuito e a referida medida apresentada no dinamômetro, para fins deste estudo, era registrada como sendo a força de contato para aquela configuração disposta. Os ensaios foram realizados levando-se em consideração as seguintes deflexões da mola de tração entre eixos: 8 mm, 11 mm, 14 mm, 17 mm, 20 mm, 23 mm e 26 mm. A fim de uma maior representatividade estatística, para cada deflexão, a medição de força de contato foi repetida 5 vezes. Os resultados obtidos são apresentados e detalhados por meio da Figura 4-30 e da Tabela 4-4.

Figura 4-30 – Força de contato vs deflexão.



Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 4-4 – Força de contato vs deflexão.

Deflexão da mola de tração entre eixos (mm)	Força de contato média (N)	Desvio padrão (N)	Coefficiente de variação (%)
8	23,80	0,21	0,88
11	31,40	0,23	0,73
14	38,82	0,32	0,82
17	47,94	0,30	0,63
20	56,74	0,29	0,51
23	64,82	0,30	0,46
26	71,54	0,21	0,29

Fonte: Autoria própria (2022).

Constata-se por meio da Figura 4-30 e da Tabela 4-4 que o incremento na dimensão de deflexão da mola de tração entre eixos é diretamente proporcional ao acréscimo de força de contato. Além disso, o referido ensaio também apresenta um coeficiente de variação abaixo de 1% em toda a faixa avaliada, sinalizando da mesma forma uma boa precisão e repetitividade do mesmo. Assim sendo, julgando-se a relação entre grandezas (deflexão da mola de tração entre eixos e força de contato) como sendo linear, esta será gerida através da Equação 4-4:

$$\text{Força} = 2,714 \cdot \text{Deflexão} + 1,7269 \text{ (N)} \quad (4-4)$$

Isto posto, nota-se através da Equação 4-4 que a mínima força de contato para este arranjo de componentes atribuídos ao dispositivo em estudo será igual a 1,7269 N. Tal característica é estabelecida em função de um tracionamento inicial gerado na alocação da mola. Este tracionamento provoca um pré-tensionamento (deflexão inicial) da referida mola e, portanto, promove tal particularidade.

Conforme salientado no item 4.2.2.2, o modelo de disjuntor escolhido como referência deste estudo adota aproximadamente 60 N como parâmetro de força de contato. Desta forma, rearranjando as variáveis apresentadas na Equação 4-4 para se definir a deflexão da mola de tração entre eixos como a variável a ser obtida, resulta-se a Equação 4-5:

$$\text{Deflexão} = \frac{\text{Força} - 1,7269}{2,714} \text{ (mm)} \quad (4-5)$$

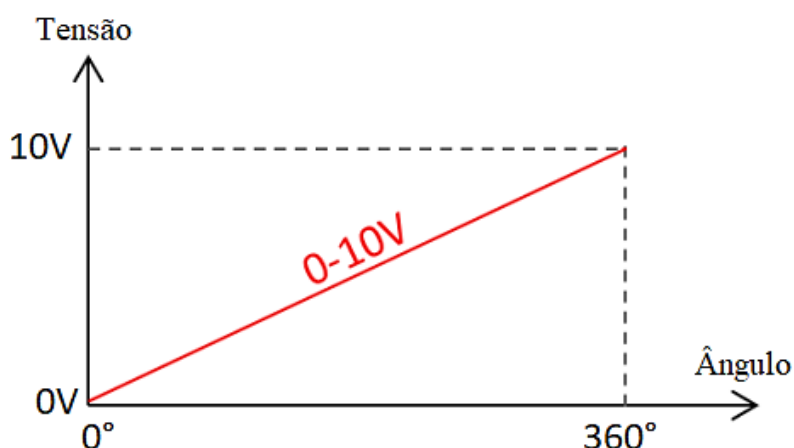
Conseqüentemente, para a obtenção de uma força de contato no dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão de aproximadamente 60 N – de acordo com a Equação 4-5 – uma deflexão de cerca de 21,5 mm deverá ser empregada. Portanto, o referido objetivo específico de “reproduzir a força de contato característica de um disjuntor de baixa tensão e possibilitar a sua variação”, fora considerado atingido.

À vista disso, norteando-se no fluxograma exposto no item 3.4 (Figura 3-2), foi-se dado prosseguimento a execução dos ensaios de validação do dito aparato eletromecânico. Novamente, buscou-se neste processo a corroboração de mais dois objetivos específicos deste trabalho, ou seja, de “reproduzir a velocidade de abertura de contatos característica de um disjuntor de baixa tensão e possibilitar a sua variação e sua abertura no instante desejado”, bem como, de “possibilitar a medição da posição angular do eixo de suporte do contato móvel, corrente conduzida pelo circuito e tensão sobre os contatos (móvel e fixo) do dispositivo

eletromecânico sob a condição de curto-circuito”. Observa-se a este respeito, que uma parcela do objetivo específico de “reproduzir a velocidade de abertura de contatos característica de um disjuntor de baixa tensão e possibilitar a sua variação e sua abertura no instante desejado”, se encontra parcialmente comprovada através do ensaio de tempo de resposta do subsistema de disparo, ou seja, de “possibilitar a abertura de contatos no instante desejado”. Tal particularidade será reconfirmada no ensaio de curto-circuito ao final desta seção.

Para se dar prosseguimento a estas validações, uma nova sequência de testes foi realizada, sendo o sensor de rotação Atek RCS2200-360-PP-V-CCW-0,5M e o osciloscópio digital Tektronix TDS 2014C utilizados para efetuar as mensurações e registros. A resposta de tensão em relação ao ângulo – resultante da rotação do elemento móvel do referido sensor – é expressa via Figura 4-31. Constata-se através desta, que para cada 36° de rotação do elemento móvel do sensor acoplado ao eixo principal de abertura, 1 V é acrescido em seu sinal de tensão.

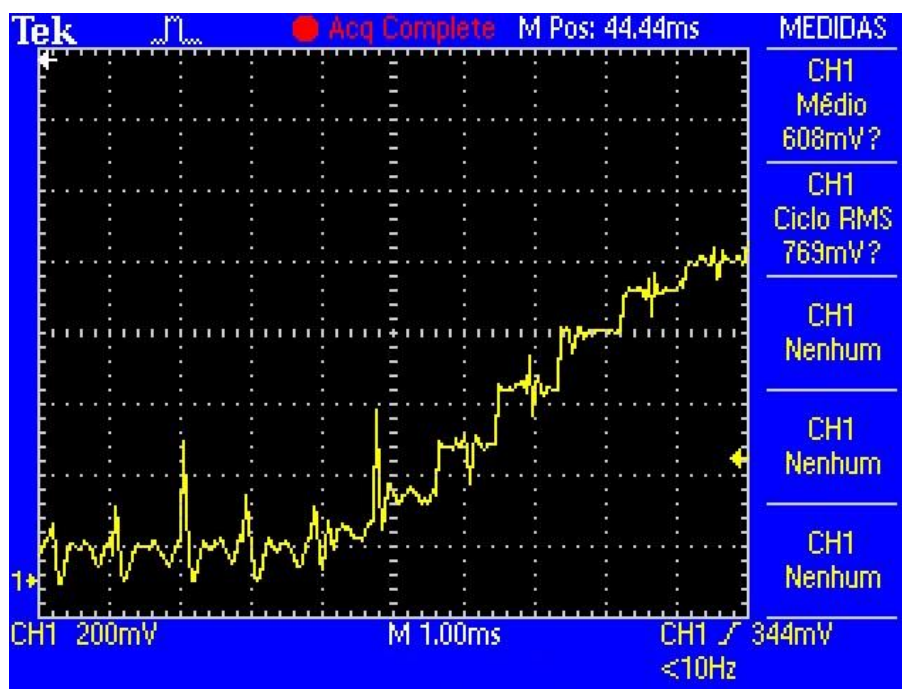
Figura 4-31 – Resposta de tensão vs ângulo resultante da rotação do elemento móvel do sensor Atek RCS 2220.



Fonte: Adaptado de Atek (2019).

De modo a restringir as variáveis de monitoramento, o ensaio de análise e aferição da velocidade de abertura do contato móvel foi realizado empregando-se no dispositivo a referida força de contato de aproximadamente 60 N aplicada no disjuntor escolhido como referência deste estudo. Os ensaios foram realizados levando-se em consideração os seguintes carregamentos via deflexão da mola de tração conectada ao braço inferior da massa / martelo: 313,6 N; 376,3 N e 439,0 N. A qual se encontra defletida, respectivamente, em 25 mm, 30 mm e 35 mm. A fim de uma maior representatividade estatística, para cada deflexão, o ensaio foi repetido 5 vezes. Um exemplo de resultado obtido é apresentado por meio da Figura 4-32.

Figura 4-32 – Mensuração da posição angular do contato móvel acoplado ao eixo principal de abertura.



Fonte: A autoria própria (2022).

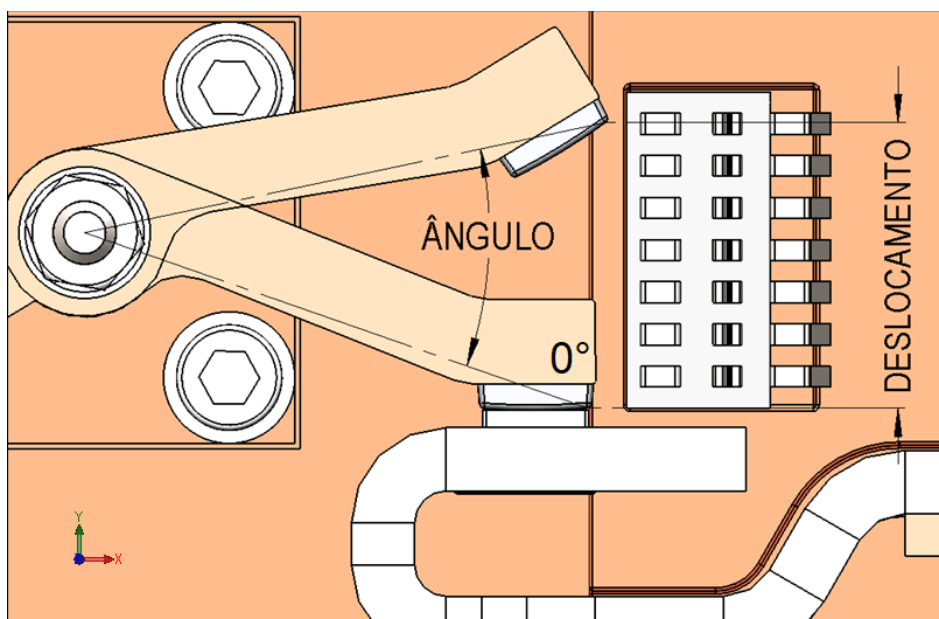
Isto posto, almeja-se como uma primeira etapa para a obtenção da velocidade de abertura do contato móvel, a sua posição angular. Para tal determinação, a posição onde os contatos (fixo e móvel) encontram-se fechados e em repouso foi definida como o posicionamento referencial de 0° e, conseqüentemente, 0 V. À vista disso, observa-se por meio da Figura 4-32 que o contato móvel rotaciona concomitantemente ao eixo principal de abertura durante um intervalo de 6 ms e apresenta um incremento de tensão de aproximadamente 0,8 V no decorrer deste período de tempo (carregamento de 376,3 N). Desta forma, aplicando-se a relação previamente indicada na Figura 4-31, revela-se uma rotação resultante de cerca de 29° .

Neste âmbito, para que a velocidade de abertura do contato móvel seja determinada, uma segunda relação entre variáveis necessitou ser estabelecida, ou seja, a resposta de deslocamento na extremidade do contato móvel em relação ao seu ângulo de rotação. Para que esse propósito fosse atingido, o *software* de desenho mecânico 3D *SolidWorks* foi empregado. Desse modo, partindo-se do ponto referencial de 0° , o aludido contato móvel foi rotacionado em 1° e o deslocamento produzido na sua extremidade foi registrado, sendo este procedimento repetido até o ângulo de 60° . Neste sentido, a Figura 4-33 visa ilustrar este processo.

Como conclusão deste recurso investigativo, constatou-se com referência ao eixo vertical (eixo y) – restringindo-se a este intervalo (0° a 60°) – um deslocamento preponderadamente linear e centrado no valor de 0,661 mm a cada grau rotacionado. Deste modo, tal valor foi assumido como sendo a medida de relação entre as variáveis tensão, ângulo

e deslocamento. Tal relação é apresentada através da Tabela 4-5. Em síntese, para cada um grau (1°) rotacionado pelo contato móvel, o sensor Atek RCS 2220 irá apresentar um incremento de 0,028 V e o contato móvel irá deslocar, com referência ao eixo vertical (eixo y – Figura 4-33), uma distância de 0,661 mm.

Figura 4-33 – Relação ângulo de abertura vs deslocamento do contato móvel.



Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 4-5 – Relação entre variáveis do sensor Atek RCS 2220 e do dispositivo em estudo.

Tensão Sensor (V)	Ângulo (°)	Deslocamento (mm)
0,028	1	0,661

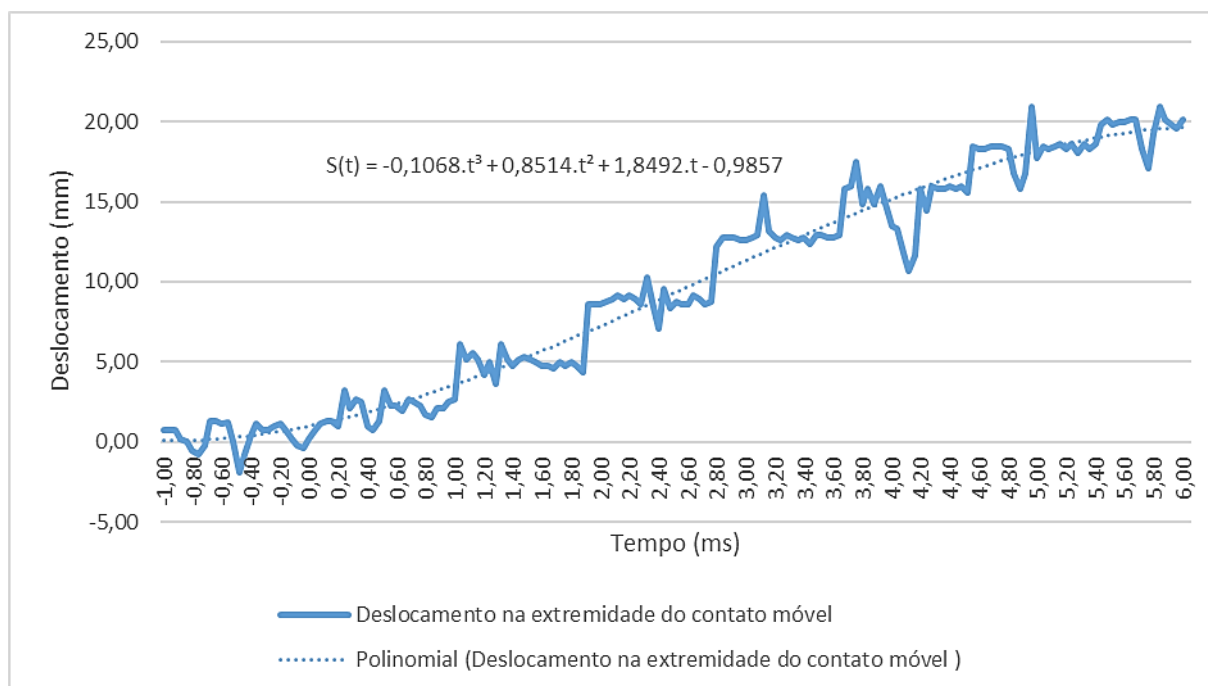
Fonte: Autoria própria (2022).

Assim sendo, uma vez que o resultado deste ensaio para a determinação da velocidade de abertura do contato móvel, auferido via sensor de rotação Atek RCS2200 e mensurado via osciloscópio digital, é apresentado sob a forma de diferença de potencial elétrico (Figura 4-32), torna-se essencial a determinação de sua equação correlacional. Desta forma, manipulando-se os dados apresentados na Tabela 4-5, a relação entre as grandezas tensão e deslocamento – considerando-se a mesma como sendo linear – será regida por meio da Equação 4-6:

$$\text{Deslocamento} = 23,78 \cdot \text{Tensão_Sensor} \text{ (mm)} \quad (4-6)$$

Desta maneira, empregando-se a Equação 4-6 de modo a adequar os dados exibidos na Figura 4-32, o deslocamento realizado na extremidade do contato móvel no período de 7 ms é retratado por meio da Figura 4-34:

Figura 4-34 – Deslocamento realizado na extremidade do contato móvel.



Fonte: Autoria própria (2022).

Constata-se através da Figura 4-34 que o deslocamento no eixo vertical, determinado na extremidade do contato móvel do aparato eletromecânico em estudo, ficou muito próximo ao seu componente análogo empregue no disjuntor em caixa moldada tomado como modelo, ou seja, de aproximadamente 19,5 mm (item 4.2.2). Além disso, a diferença no tempo de deslocamento do contato móvel para o anunciado intervalo foi inferior a 0,3 ms (6 ms contra 5,72 ms), ou seja, o dispositivo obteve desempenho equivalente ao seu disjuntor modelo e condizente com o projetado. Ademais, alterações no referido parâmetro de carregamento via deflexão da mola de tração conectada ao braço inferior da massa / martelo possibilitam a ampliação ou redução deste deslocamento em relação ao mesmo intervalo de tempo, como será verificado na sequência desta seção.

Desta forma, para que a velocidade de abertura do contato móvel se torne conhecida, uma linha de tendência polinomial de ordem 3 foi delineada, tendo como objetivo a representação de modo fidedigno – para o período de tempo aqui exposto – da forma de onda apresentada por meio da Figura 4-34, originando assim a Equação 4-7:

$$S(t) = -0,1068.t^3 + 0,8514.t^2 + 1,8492.t - 0,9857 \text{ (mm)} \quad (4-7)$$

Onde:

- S deslocamento, em (mm);
 t tempo, em (ms).

Uma vez que a função do deslocamento do contato móvel se encontra expressa, a física nos detalha que a taxa de variação de uma função é representada pela sua derivada. Deste modo, $S'(t)$ descreve a velocidade do referido contato em qualquer instante de tempo desejado para o período aqui exposto. Portanto, derivando-se a Equação 4-7 resulta-se na Equação 4-8:

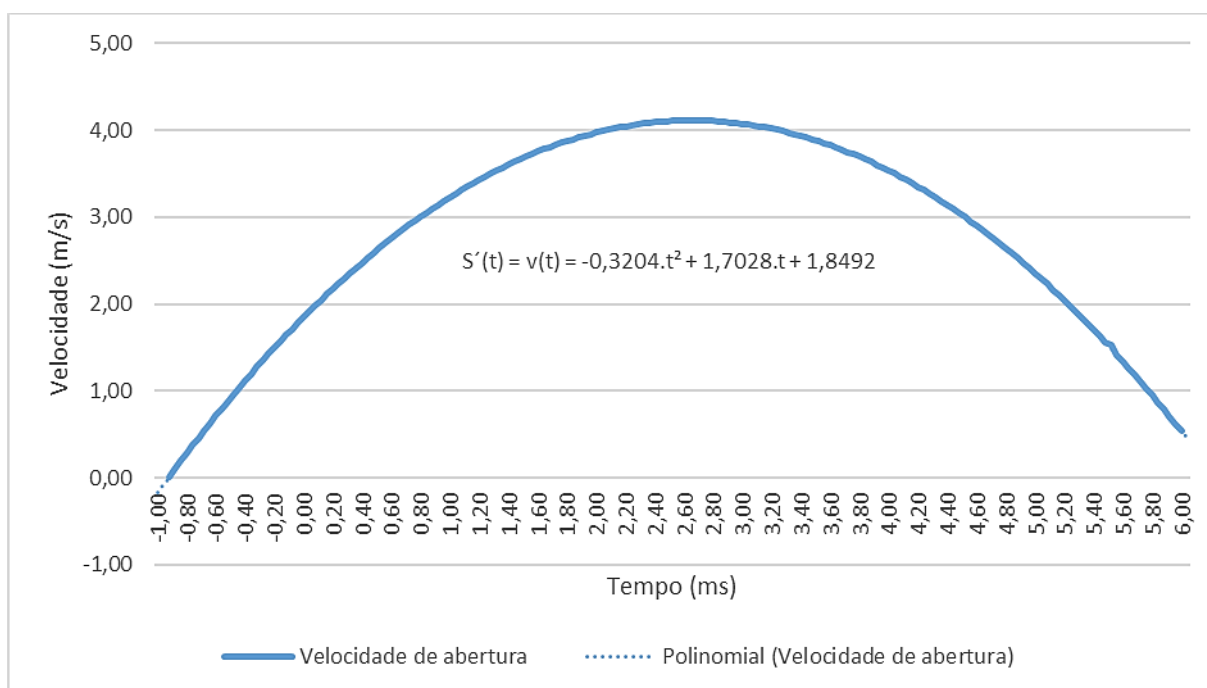
$$S'(t) = v(t) = -0,3204.t^2 + 1,7028.t + 1,8492 \text{ (mm)} \quad (4-8)$$

Onde:

- v velocidade, em (m/s);
 t tempo, em (ms).

Assim, representando-se a Equação 4-8 de forma gráfica origina-se a Figura 4-35:

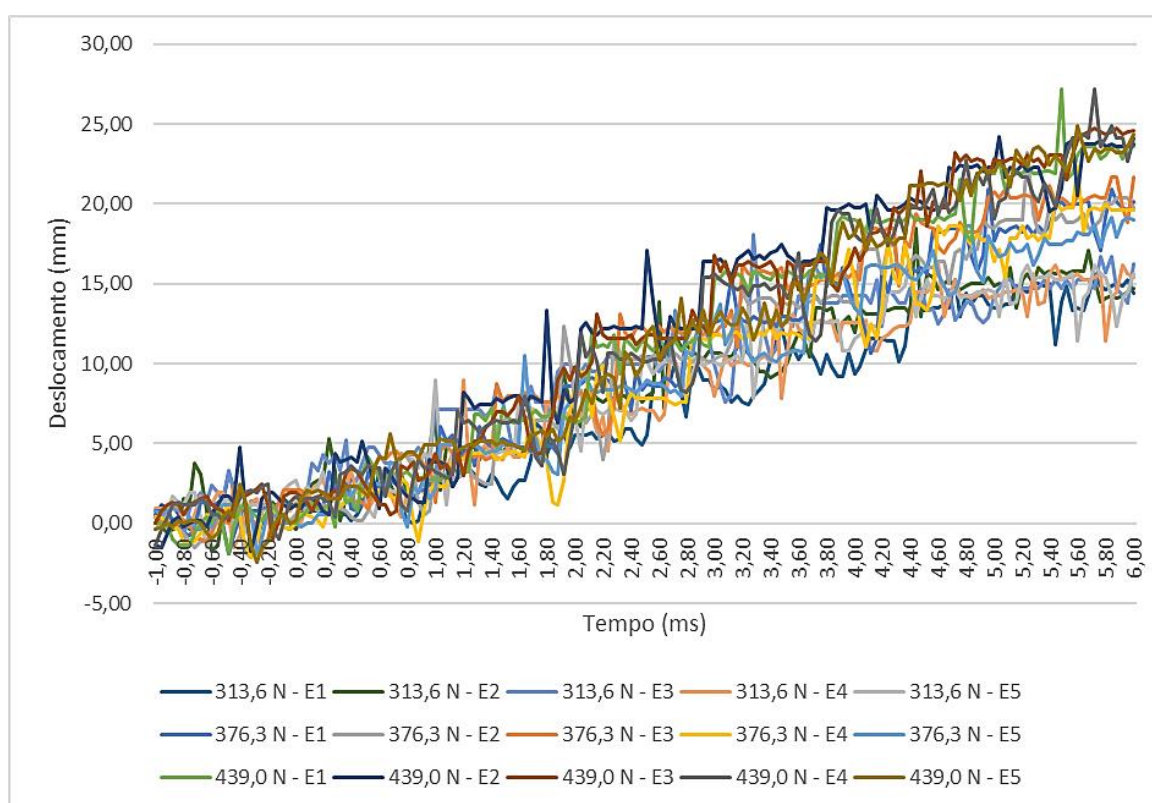
Figura 4-35 – Velocidade de abertura do contato móvel.



Fonte: Autoria própria (2022).

Confirma-se assim, através da Figura 4-35, que o ápice de velocidade de deslocamento do contato móvel em referência ao eixo vertical (eixo y) de aproximadamente 4 m/s, almejado para representar o disjuntor em caixa moldada utilizado como modelo, foi obtido (a cerca de 2,70 ms para a mensuração retratada). Por fim, a Figura 4-36 visa apresentar um comparativo entre as formas de onda de deslocamento para os carregamentos via deflexão da mola de tração conectada ao braço inferior da massa / martelo de 313,6 N; 376,3 N e 439,0 N (cinco repetições por deflexão), conforme inicialmente indicado.

Figura 4-36 – Comparação entre distintas configurações de ajuste de carregamento (313,6 N; 376,3 N e 439,0 N) para mensuração de deslocamento na extremidade do contato móvel.



Fonte: Autoria própria (2022).

Observa-se por meio da Figura 4-36 uma tangível distinção na extremidade direita das formas de onda ajustadas para representar o deslocamento na extremidade do contato móvel em referência ao eixo vertical (eixo y). Perceptivelmente, verifica-se a ocorrência de uma aglutinação de medidas na dita localização (6 ms), ou seja, próximas a 15 mm, 19 mm e 24 mm, respectivamente, para os carregamentos de 313,6 N; 376,3 N e 439,0 N. Indicando assim, distintos deslocamentos para um mesmo período de tempo. Portanto, comprovando-se deste modo a possibilidade de variação da velocidade de abertura de contatos característica de um disjuntor de baixa tensão do aparato eletromecânico em estudo.

Isto posto, à vista dos resultados apresentados, indica-se neste ponto que o objetivo específico deste trabalho de “reproduzir a velocidade de abertura de contatos característica de um disjuntor de baixa tensão e possibilitar a sua variação e sua abertura no instante desejado”, também fora considerado como atingido. Bem como, o objetivo específico de “possibilitar a medição da posição angular do eixo de suporte do contato móvel, corrente conduzida pelo circuito e tensão sobre os contatos (móvel e fixo) do dispositivo eletromecânico sob a condição de curto-circuito”, se encontra parcialmente comprovado através do ensaio de análise e aferição da velocidade de abertura do contato móvel (Figura 4-32), ou seja, de “possibilitar a medição da posição angular do eixo de suporte do contato móvel”.

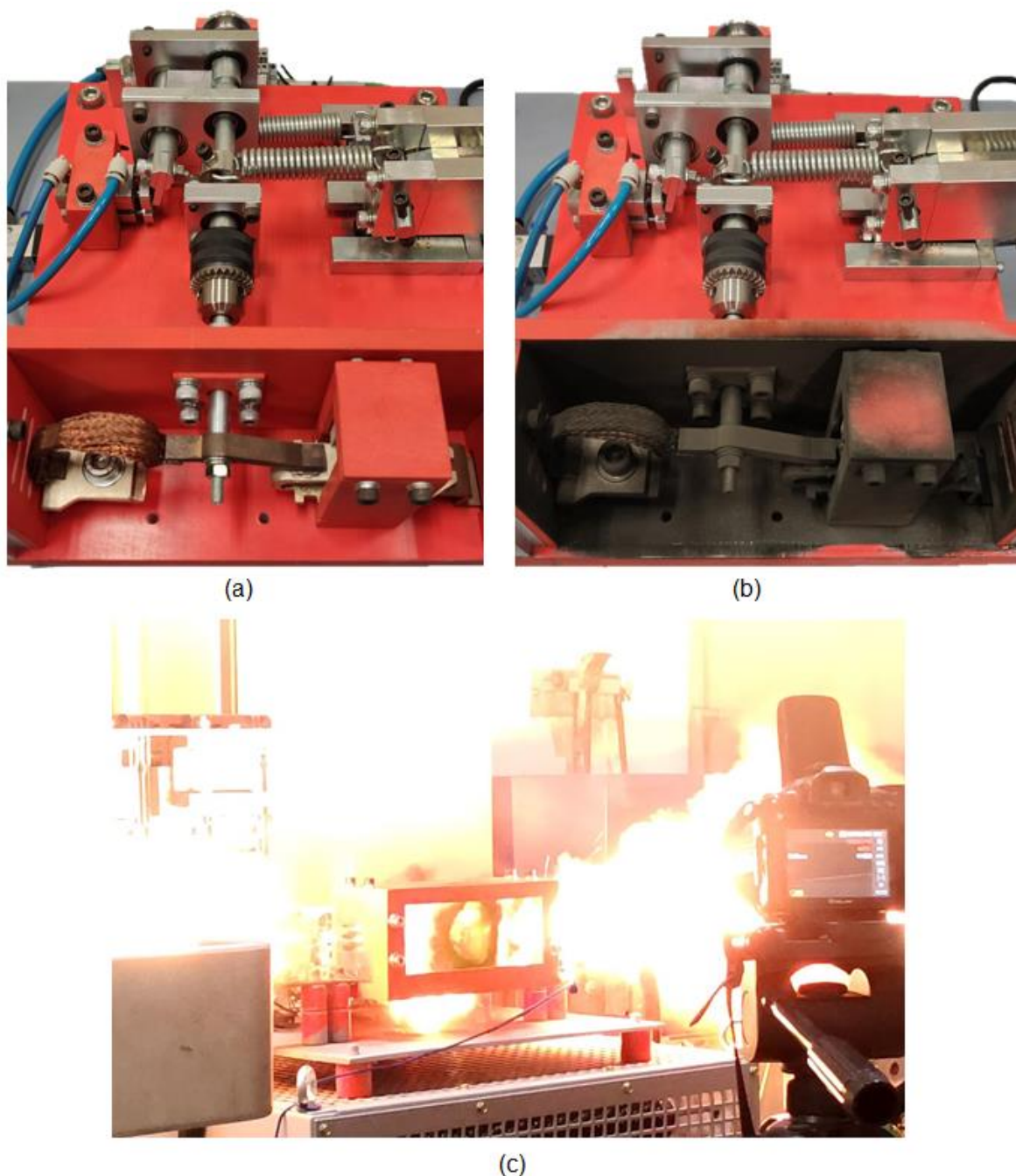
Por fim, uma vez que o dispositivo possibilitou uma fidedigna reprodução dos principais subsistemas de um disjuntor de baixa tensão, de acordo com o fluxograma exposto no item 3.4 (Figura 3-2), foi-se dado prosseguimento a execução do ensaio final de validação do dito aparato eletromecânico, ou seja, o ensaio de curto-circuito. Assim sendo, para a sua realização, o sistema de potência do laboratório foi ajustado e calibrado com os parâmetros previamente estabelecidos para o referido ensaio – corrente de curto-circuito presumida de 10 kA, tensão nominal de 220 V e fator de potência de 0,48 – com o propósito normativo de conferência e registro de seus oscilogramas (Apêndice C).

Para a execução do ensaio de curto-circuito, os seguintes parâmetros foram empregados no dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão: força de contato de aproximadamente 60 N e carregamento de 376,3 N no braço inferior da massa / martelo via deflexão da mola de tração a si conectada. Assim, uma vez que tais fatores se encontram definidos e ajustados, o sistema de medição do laboratório foi devidamente acoplado aos terminais de conexão do aparato em análise para a mensuração de tensão sobre os contatos e corrente conduzida, bem como, aos terminais do sensor de rotação Atek RCS2200 para mensuração de seu sinal de tensão. Na sequência, a rede de ar comprimido foi conectada a entrada da válvula solenoide do atuador pneumático e o sistema de controle do laboratório, responsável pela emissão do sinal de tensão 24 Vcc, foi vinculado aos terminais da bobina eletromagnética de comando da dita válvula solenoide.

Posteriormente a estes procedimentos, testes de disparo sem carga foram efetuados de modo a se assegurar uma precisa sincronia entre os sistemas envolvidos para a execução do ensaio de curto-circuito, bem como, se observar a ocorrência de uma propícia regularidade no tempo de disparo do dispositivo eletromecânico (dispondo-se como tempo de referência o resultado obtido via Equação 4-3 para os parâmetros de ajuste empregados – 28,45 ms). A

seguidos, os terminais de conexão do dispositivo foram acoplados ao mencionado sistema de potência do laboratório (aos moldes da Figura 2-10) e o ensaio de curto-circuito executado. Assim sendo, de modo a tornar os efeitos de um curto-circuito desta magnitude tangíveis, a Figura 4-37 busca expor o aparato em estudo em uma linha temporal de eventos (pré, durante e pós curto-circuito).

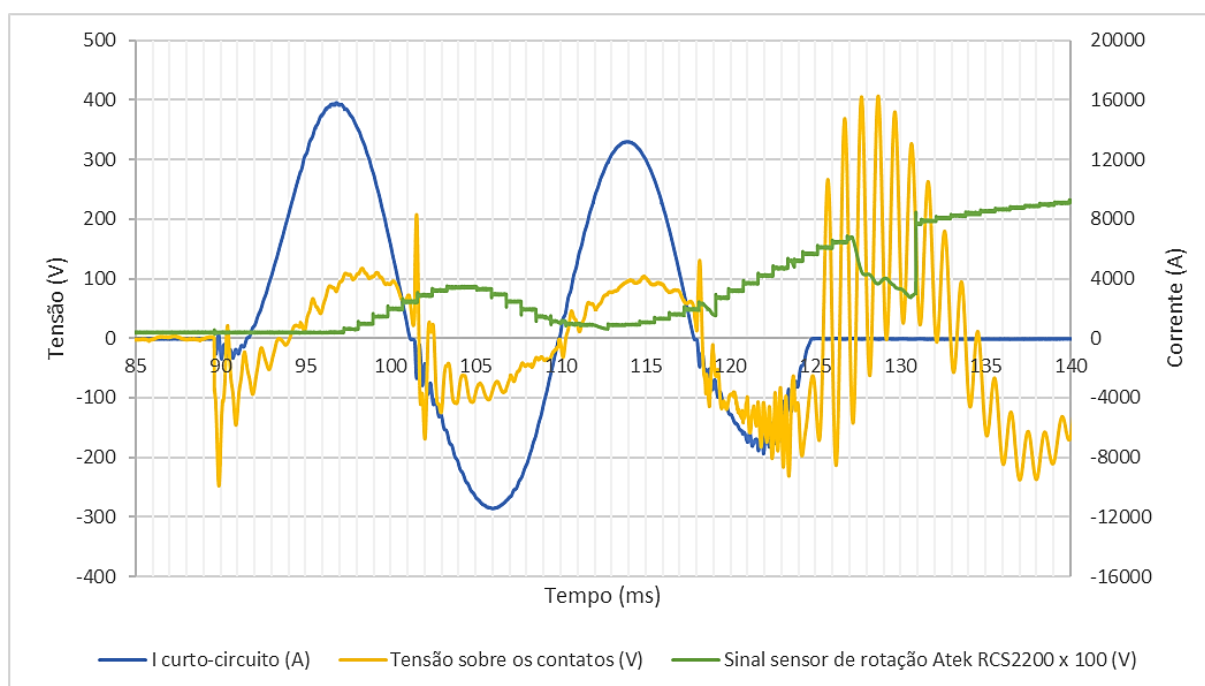
Figura 4-37 – Dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão: (a) pré curto-circuito; (b) pós curto-circuito e (c) no decorrer do curto-circuito.



Fonte: Autoria própria (2022).

Com o auxílio da Figura 4-37 é possível se visualizar os impactos nocivos de um curto-circuito para as estruturas em seu entorno. À vista disso, a Figura 4-37.c ilustra o processo de ignição do arco elétrico via abertura de contatos elétricos, bem como, a decorrente projeção de partículas em elevada temperatura ao exterior do dispositivo. Além disso, a Figura 4-37.a e a Figura 4-37.b visam, conjuntamente, oferecer um efeito comparativo entre o pré e o pós curto-circuito. Sob outra perspectiva, a Figura 4-38 (registros oficiais inclusos no Apêndice D) apresenta o aludido ensaio por intermédio de estruturas gráficas, onde a forma de onda em azul, expressa a corrente conduzida pelo dispositivo durante o curto-circuito; em amarelo, retrata a tensão de arco sobre os contatos (fixo e móvel); e em verde, denota a tensão oriunda do sensor de rotação Atek RCS2200 (a qual, visando-se a sua melhor observação, foi multiplicada por 100).

Figura 4-38 – Formas de onda obtidas via ensaio de curto-circuito no dispositivo em estudo.



Fonte: Autoria própria (2022).

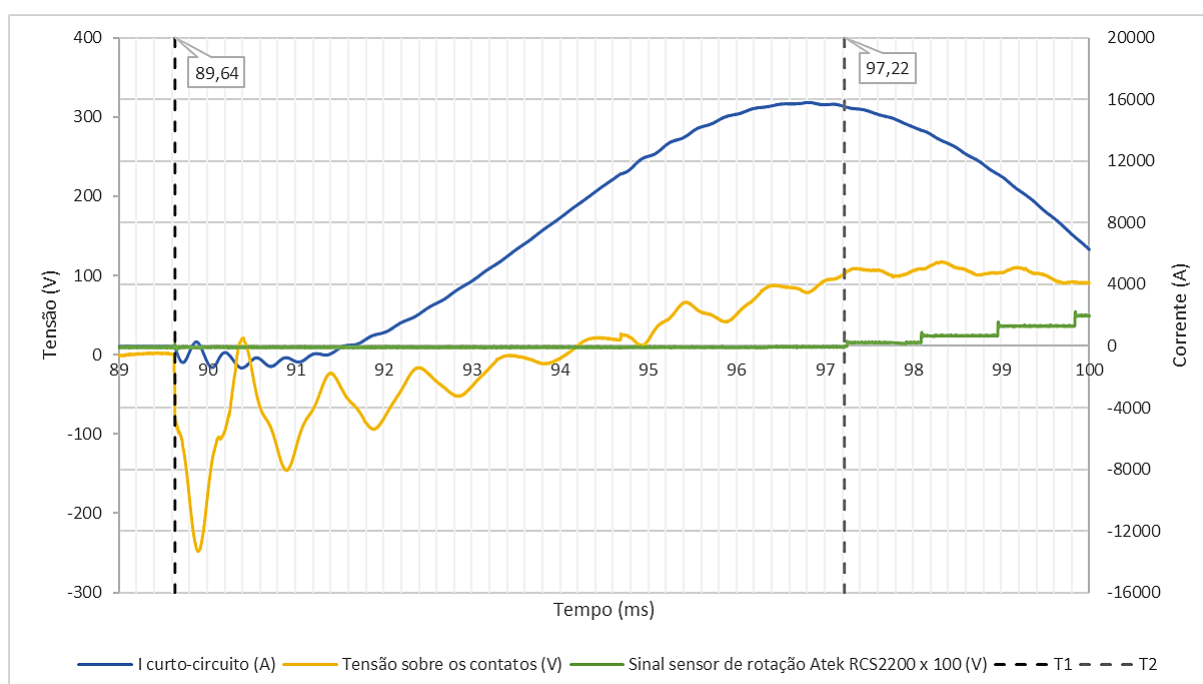
Tais formas de onda expressam informações contundentes e muito pertinentes aos desenvolvedores de equipamentos de proteção, como: número de ciclos até a interrupção de corrente do circuito elétrico e, conseqüente, extinção de arco; intervalo de tempo entre o início do curto-circuito e o instante de separação de contatos; se ocorreram processos de reignição de arco; nível de tensão de arco gerado sobre os contatos; dentre outras demandas investigativas. Desta forma, o objetivo específico de “possibilitar a medição da posição angular do eixo de

suporte do contato móvel, corrente conduzida pelo circuito e tensão sobre os contatos (móvel e fixo) do dispositivo eletromecânico sob a condição de curto-circuito”, fora considerado como integralmente concluído e devidamente legitimado.

Identifica-se também, através da Figura 4-38, períodos de ascendência (97 ms a 105 ms e posteriormente à 113 ms) e descendência (105 ms a 113 ms) no sinal de tensão procedente do sensor de rotação Atek RCS2200. Este fator é acarretado pelo decréscimo da força da mola de tração acoplada à extremidade inferior da massa / martelo e pelo incremento na força da mola de tração entre o eixo principal de abertura e o eixo de retenção (Figura 4-17). Essencialmente, este balanço de forças propicia tal peculiaridade, sendo o mesmo suspenso a partir do instante em que o equilíbrio estático sobre o eixo de retenção é violado e o referido eixo se encontra desimpedido a executar seu movimento rotacional, propiciando assim que o contato móvel prossiga com seu deslocamento (ascendente) até a posição almejada. Esta característica, inerente ao formato construtivo do dispositivo, se mostrou singularmente inconveniente para ensaios de curto-circuito onde a extinção do arco elétrico não ocorra ainda no primeiro semiciclo de condução de corrente.

Finalmente, a fração do objetivo específico de “reproduzir a velocidade de abertura de contatos característica de um disjuntor de baixa tensão e possibilitar a sua variação e sua abertura no instante desejado”, ou seja, de “possibilitar a abertura de contatos no instante desejado” se encontra evidenciada e revalidada através da Figura 4-39.

Figura 4-39 – Tempo de resposta global do dispositivo em ensaio de curto-circuito.



Fonte: Autoria própria (2022).

Para a sua corroboração, o intervalo entre 89 ms e 100 ms das formas de onda apresentadas via Figura 4-38 foi desassociado e ampliado para que alguns de seus pontos característicos fossem examinados, os quais são exibidos por meio da Figura 4-39. Assim sendo, constata-se através da linha tracejada T1 (89,64 ms) o princípio de condução de corrente via dispositivo e a manifestação de um incremento na tensão de arco sobre os contatos (móvel e fixo), estes fatores caracterizam o instante inicial do ensaio de curto-circuito. Por outro lado, para se definir o ponto de tempo de resposta global do dispositivo, o instante inicial de incremento na tensão do sensor de rotação Atek RCS2200 fora utilizado, sendo definido através da linha tracejada T2 (97,22 ms). Nota-se que, de acordo os valores apresentados no item 4.2.2 para as variáveis t_{RDD} (3,09 ms para uma corrente de curto-circuito de 10 kA eficaz) e t_{RDM} (3,67 ms), um tempo de resposta total de 6,76 ms era almejado. No entanto, considerando todas as variáveis envolvidas e sincronizadas para a realização deste ensaio, o tempo de 7,58 ms (97,22 ms - 89,64 ms) obtido foi considerado satisfatório.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma consistente fundamentação e análise dos subsistemas responsáveis pelo desempenho de um disjuntor de baixa tensão no estabelecimento, condução e, primordialmente, na interrupção da corrente elétrica conduzida através de seus terminais.

Projetar e testar distintas configurações de tais equipamentos torna-se excessivamente oneroso e paulatino. Alicerçado nesta descrição, o desenvolvimento de um dispositivo que possibilitasse replicar e, de modo fácil e célere, variar mecanicamente as principais características operacionais de um disjuntor em caixa moldada se mostrava fundamental. Ademais, o presente trabalho se apresentou muito valoroso, tendo em vista a pequena gama de estudos referentes ao assunto no meio acadêmico em função da elevada dificuldade técnica de se reproduzir um equipamento na condição de elevados níveis de curto-circuito, bem como, expressar o comportamento físico de um arco elétrico em características tangíveis.

A partir disso, baseado no conceito *Design Thinking*, este estudo buscou reproduzir tais estruturas a partir de um dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão. Sistematizado em suas etapas estruturais – Imersão; Análise e Síntese; Ideação e Prototipação – o aparato foi idealizado, projetado, manufaturado e testado mediante um processo consideravelmente iterativo e ágil.

Assim sendo, para se desenvolver o dispositivo eletromecânico em questão e representar o desempenho característico de um disjuntor de baixa tensão sob a condição de curto-circuito, cinco objetivos específicos foram definidos. À vista disso, a apresentação das definições e conceitos elementares deste equipamento se mostraram primordiais, sendo a mesma estabelecida como o primeiro objetivo específico. Deste modo, foi possível se verificar através do capítulo de desenvolvimento um vasto apanhado histórico dos dispositivos já empregues para tal propósito e um consistente embasamento teórico referente aos principais subsistemas de um disjuntor de baixa tensão. Posteriormente, aplicando-se o conceito *Design Thinking* (vide capítulos Metodologia e Desenvolvimento), o projeto do equipamento proposto foi elaborado, esmiuçado e prototipado (tanto na ótica virtual como material). Na sequência, a análise dos ensaios de validação do aparato permitiu se concluir que os demais objetivos específicos apresentados, ou seja, de reproduzir a força de contato característica de um disjuntor de baixa tensão e possibilitar a sua variação; reproduzir a velocidade de abertura de contatos característica de um disjuntor de baixa tensão e possibilitar a sua variação e sua abertura no

instante desejado; e possibilitar a medição da posição angular do eixo de suporte do contato móvel, corrente conduzida pelo circuito e tensão sobre os contatos (móvel e fixo) do dispositivo eletromecânico sob a condição de curto-circuito foram categoricamente realizados e atingidos.

Sendo assim, a proposta do trabalho de se produzir um dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão se mostrou plausível, executável e com substancial potencial de empregabilidade para a geração de um vultuoso banco de dados elétricos e mecânicos vinculados a distintas configurações de ajuste de performance e materiais.

Em pesquisas futuras, destaca-se como demanda de aperfeiçoamento a elaboração e acoplamento de um sistema que restrinja ou coíba o movimento descendente do contato móvel após o mesmo iniciar o seu deslocamento ascendente no atual aparato. Além disso, o desenvolvimento e inserção de uma estrutura para limitar o deslocamento do contato móvel a um nível almejado também se manifesta necessário.

REFERÊNCIAS

- ANDRÉ, P. *et al.* Effects of dielectric material on arc plasma pressure and ablation measurement in high-power apparatus. **IEEE Transactions on Magnetics**, New York, v. 39, n. 1, p. 197-201, jan. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60947-1**: Dispositivo de manobra e comando de baixa tensão. Parte 1: Regras gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60947-2**: Dispositivo de manobra e comando de baixa tensão. Parte 2: Disjuntores. Rio de Janeiro, 2013.
- ATEK. **Angle sensor user manual RCS 2200**. Technical notes. Tuzla/Istanbul, Turkey, 2019. 5p. Disponível em: https://www.metrolog.net/files/rcs2200_en_metrolog.pdf. Acesso em 18 jan. 2022.
- BACK, N. *et al.* **Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem**. Barueri: Editora Malone, 2008.
- BALASTRERO JR., J. O. **Modelagem e otimização de componentes mecânicos em sistemas CAD 3D com o emprego de geometrias paramétricas**. 2010. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2010.
- BATISTA, V. **Análise estrutural estática de uma estrutura em C de ponteadeira estacionária de clinching**. 2018. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Aeroespacial) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.
- BAYLISS, C. R. HARDY, B. J. **Transmission and distribution electrical engineering**. 3. ed. Burlington: Elsevier, 2007.
- BEEMAN, D. **Industrial power systems handbook**. New York: McGraw-Hill, 1955.
- BELBEL, E. M. LAURAIRE, M. Behavior of switching arc in low-voltage limiter circuit breakers. **IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology**, New York, v. 8, n. 1, p. 3-12, mar. 1985.
- BROWNE JR, T. E. **Circuit interruption: Theory and techniques**. New York: Marcel Dekker, 1984.
- BUCKLEY, L. Double-diamond design thinking. **Acumen**, 2018. Disponível em: <http://acumen.sg/double-diamond-design-thinking>. Acesso em 25 fev. 2022.

- BUDYNAS, R. G. NISBETT, J. K. **Shigley's mechanical engineering design**. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.
- COTRIM, A. A. M. B. **Instalações elétricas**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.
- CHRISTIE, E. J. *et al.* Prototyping strategies: Literature review and identification of critical variables. **ASEE Annual Conference & Exposition**. San Antonio, United States of America, 2012.
- DAN, R. F. SIANG, T. Y. Stage 2 in the design thinking process: define the problem and interpret the results. **Interaction Design Foundation**, 2020. Disponível em: <https://www.interaction-design.org/literature/article/stage-2-in-the-design-thinking-process-define-the-problem-and-interpret-the-results>. Acesso em 02 nov. 2021.
- DAN, R. F. SIANG, T. Y. What is ideation – and how to prepare for ideation sessions. **Interaction Design Foundation**, 2021. Disponível em: <https://www.interaction-design.org/literature/article/what-is-ideation-and-how-to-prepare-for-ideation-sessions>. Acesso em 02 jun. 2021.
- DEGUI, C. YONG, C. WEN, Y. H. Investigation of back commutation phenomena for narrow slot arc quenching chamber in current limiting circuit breaker. **Proceedings of the Forty-Second IEEE Holm Conference on Electrical Contacts joint with the 18th International Conference on Electrical Contacts**. Chicago, United States of America, 1996.
- DONG, J. *et al.* Low-voltage electric arc reconstruction from magnetic field measurements. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v. 69, n. 6, p. 3750-3760, jun. 2020.
- EATON. **Single and double break MCCB performance revisited**. Technical notes. Shanghai, China, 2018. 6p.
- ERICSSON, O. Modeling of breaking arcs when they are extinguished by current zero-crossings. **UPTEC Q14**. Uppsala, Sweden, 2014.
- FREITAS JUNIOR, V. *et al.* A pesquisa científica e tecnológica. **Revista Espacios**, Caracas, v. 35, n. 9, p. 12 - 22, set. 2014.
- GERHARDT, T. E. SILVEIRA, D. T. (Org.). **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GHEZZI, L. BALESTRERO, A. **Modeling and simulation of low voltage arcs**. 2010. 328 p. Thesis (Doctor of Science) - Technische Universiteit Delft, Delft, Holland, 2010.

GIL, F. S. L. **Análise da qualidade de malha de elementos finitos e validação de situação de caso real de viga bi apoiada**. 2015. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015.

GONZALEZ, D. *et al.* Modellschalter-versuchsstand des kompetenzzentrums für elektrische kontakte ilmenau - KEKI. **23. Albert-Keil-Kontaktseminar**, Karlsruhe, Deutschland, 2015.

GÜNTHER, I. D. **Modelagem de um minidisjuntor sob curto-circuito**. 2005. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 551**: IEEE recommended practice for calculating short-circuit currents in industrial and commercial power systems. New York, United States of America, 2006.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60038**: IEC standard voltages. Geneva, 2009.

KARMANKAR, R. G. Analysis of von Mises stress for interference fit and pull-out states by using finite element method. **International Research Journal of Engineering and Technology**, Trichy, v. 04, n. 11, p. 1367-1374, nov. 2017.

KWON, J. *et al.* An influence of new arc quenching methods for improving the interrupting capacity of low voltage circuit breaker. **1st International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology**. Xi'an, China, 2011.

LEE, H. **Finite element simulations with ANSYS Workbench 17**: theory, applications, case studies. Kansas City: SDS Publications, 2017.

LI, X. *et al.* Analysis of the interruption process of molded case circuit breakers. **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, New York, v. 30, n. 3, p. 375-382, sep. 2007.

LIMA, A. M. *et al.* Metodologia design thinking no projeto de *software* para mobilidade urbana: relato de aplicação. **AtoZ**, Curitiba, v. 3, n. 2, p. 128-138, jul./dez. 2014.

MAECKER, H. **The electric arc**: the physics of stationary gas discharges near thermal equilibrium. Berg: Popp, 2009.

MCBRIDE, J. W. JEFFERY, P. A. Anode and cathode arc root movement during contact opening at high current. **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, New York, v. 22, n. 1, p. 38-46, mar. 1999.

MITSUBISHI ELECTRIC. **Molded case circuit breakers and earth leakage circuit breakers**. Technical notes. Tokyo, Japan, 2013. 183p.

MÜLLER-ROTERBERG, C. **Handbook of design thinking: tips & tools for how to design**. Seattle: Amazon Digital Services LLC - Kdp Print Us, 2018.

NHP ELECTRICAL ENGINEERING PRODUCTS. **Technical news: controlling high short circuit currents with current limiting circuit breakers**. Catalogue. Melbourne, Australia, 2000. 4p.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Ed. Bookman, 2013.

ONCHI, T. ISOZAKI, M. WADA, M. Current limiting simulation for low voltage circuit breaker. **29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. Roanoke, United States of America, 2003.

PAHL, G. *et al.* **Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações**. 6. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2005.

PECHRACH, K. MCBRIDE, J. W. WEAVER, P. M. Gas flow and composition effects on arc motion in current limiting circuit breakers. **Proceedings of the Forth-Seventh IEEE Holm Conference on Electrical Contacts**. Montreal, Canada, 2001.

PECHRACH, K. MCBRIDE, J. W. WEAVER, P. M. The correlation of magnetic, gas dynamic and thermal effects on arc mobility in low contact velocity circuit breakers. **Proceedings of the Forth-Eighth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts**. Orlando, United States of America, 2002.

PECHRACH, K. MCBRIDE, J. W. WEAVER, P. M. The energetics of gas flow and contact erosion during short circuit arcing. **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, New York, v. 27, n. 1, p. 51-56, mar. 2004.

PEREIRA, J. A. R. **Conceção e construção de um simulador de controlo de vibrações**. 2013. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013.

PIVOTTO, E. S. **Modelagem e simulação computacional de disjuntores em caixa moldada sob curto-circuito**. 2016. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, *no prelo* 2016.

PUCHETA, M. A. *et al.* Topological synthesis of planar metamorphic mechanisms for low-voltage circuit breakers. **Mechanics Based Design of Structures and Machines**, An International Journal, v. 40, n. 4, p. 453-468, apr. 2012.

QUEMENEUR, J. **Etude des forces à l'origine du déplacement d'un arc électrique dans un disjoncteur basse-tension**. 2017. 168 f. Thèse (Doctorat en Ingénierie des Plasmas) – Université Paul Sabatier, Toulouse, Français, 2017.

RATTAN, S. S. **Theory of machines**. 3. ed. New Delhi: tata McGraw Hill Education Private Limited, 2009.

RAZZOUK, R. SHUTE, V. What is design thinking and why is it important? **Review of Educational Research**, United States of America, v. 82, n. 3, p. 330-348, sep. 2012.

RODRIGUEZ, J. J. Experimental method to obtain a volumetric representation of the arc splitting process in MCCB. **IEEE 62nd Holm Conference on Electrical Contacts**. Clearwater Beach, United States of America, 2016.

ROSCHKE, T. **Modelling of motor circuit breaker and contactor under short circuit conditions with dymola**. Report. Dresden University of Technology, Dresden, *no prelo* 2002.

ROZENFELD, H. *et al.* **Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006.

SCHLABBACH, J. **Short-circuit current**. Bodmin: MPG Books Ltd, 2005.

SCHMELCHER, T. **Manual de baixa tensão: informações técnicas para aplicação de dispositivos de manobra, comando e proteção**. 2. ed. São Paulo: Siemens/Nobel, 1988. v. 1.

SCOTTI, A. *et al.* Modelo descritivo do fluxo de calor em soldagem a arco visando o conceito de calor imposto efetivo. **Soldag. Insp**, São Paulo, v. 17, p. 166-172, 2012.

SHEA, J. J. DEVAULT, B. CHIEN, Y. Blow-open forces on double-break contacts. **Proceedings of IEEE Holm Conference on Electrical Contacts**. Pittsburgh, United States of America, 1993.

SHEA, J. J. Polymeric arc chamber walls influence on AgW/AgC contact resistance. **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, New York, v. 23, n. 2, p. 205-210, jun. 2000.

SHEA, J. J. Gassing arc chamber wall material effect on post current-zero recovery voltage breakdown. **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, New York, v. 27, n. 1, p. 42-50, mar. 2004.

SLADE, P. G. **Electrical contacts: principles and applications**. Boca Raton: CRC Press, 1999.

THORING, K. MÜLLER, R. M. Understanding design thinking: a process model based on method engineering. **International Conference on Engineering and Product Design Education**. London, United Kingdom, 2011.

ULRICH, K. T.; EPPINGER, S. D. **Product design and development**. 3. ed. McGraw Hill, New York, 2004.

VALDES, M. *et al.* Selectivity analysis in low voltage power distribution systems with fuses and circuit breakers. **IEEE Industrial & Commercial Power Systems 2009 Technical Conference**. Calgary, Canada, 2009.

VED, N. **Circuit breaker monitoring application using wireless communication**. 2005. 89 p. Dissertation (Master of Science in Electrical Engineering) - Texas A&M University, Bryan, United States of America, 2005.

VIANNA, M. *et al.* **Design thinking: business innovation**. Rio de Janeiro: MJV Press, 2012.

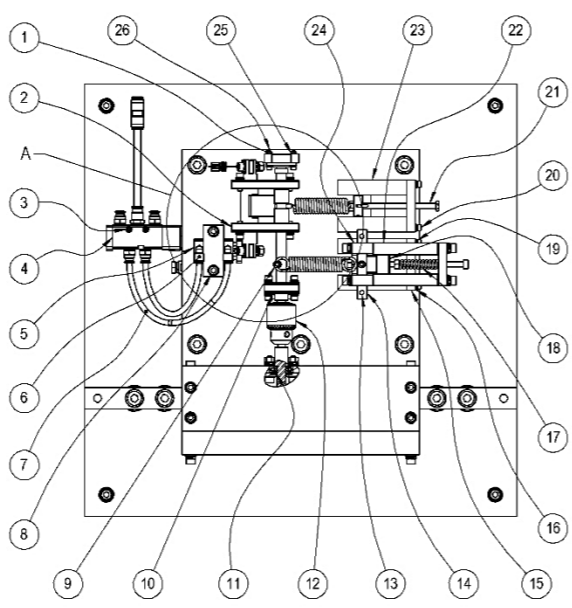
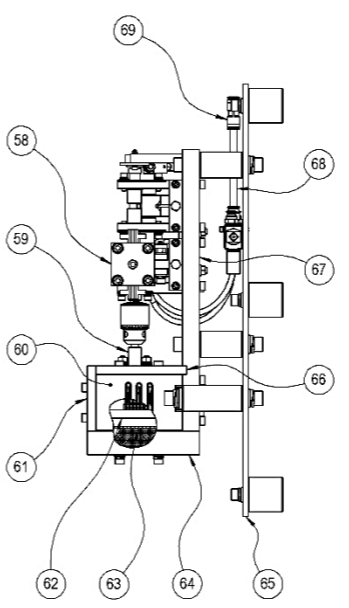
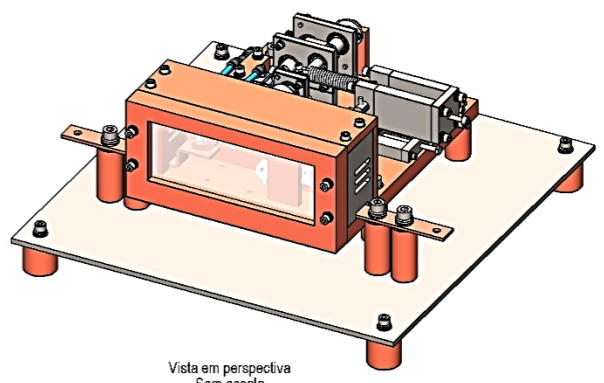
WANG, Q. *et al.* Simulation of the Venting Configuration Effects on Arc Plasma Motion in Low-Voltage Circuit Breaker. **IEEE Transactions on Plasma Science**, New York, v. 38, n. 9, p. 2300-2305, sep. 2010.

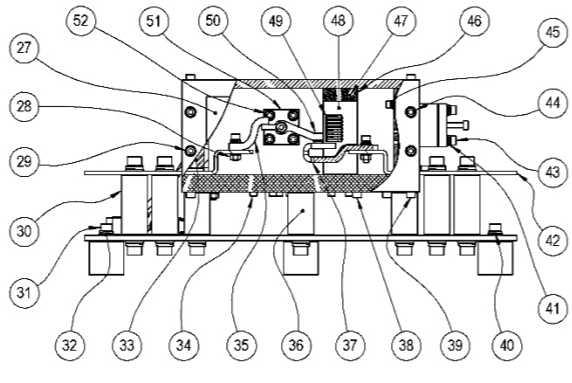
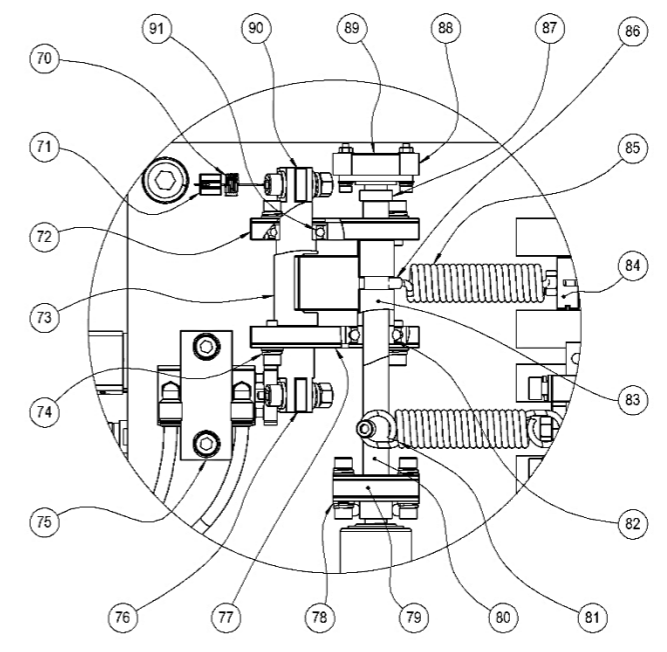
WEICHERT, H. Shock waves in arc chambers of miniature circuit breakers. **Thirty-Sixth IEEE Conference on Electrical Contacts and the Fifteenth International Conference on Electrical Contacts**. Montreal, Canada, 1990.

ZHANG, X. **Investigation of circuit breaker dielectric performance**. Dissertation (Master of Science in Material Science and Engineering) - Iowa State University, Ames, United States of America, 2005.

APÊNDICE A – Projeto do dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão.

Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.
1	Porta sextavada M3	2
2	Parede frontal disparador	1
3	Arnelo de pressão M3	4
4	Válvula solenóide 5/2 vias VUVS-LK20-M52-AD-G18-1C1-S	1
5	Cilindro pneumático compacto ADNCF-12-10-P-A	1
6	Conexão pneumática cotovelo GSM-LM-6	2
7	Tubo pneumático PUH-H-6	2
8	Parafuso sextavado interno M5x7,5	2
9	Parafuso sextavado interno M5x18	12
10	Placa retentor rolamento	2
11	Rolamento rígido de esferas 16100-2Z	1
12	Mrandri 3/8"	1
13	Parafuso sextavado interno M5x30	2
14	Eixo de retenção	1
15	Botente conjuntos ajuste de força	2
16	Arnelo lisa M4	4
17	Mola de compressão	1
18	Elemento de restrição externa	1
19	Arnelo de pressão M4	4
20	Parafuso sextavado interno M4x25	4
21	Parafuso sextavado M6x100 + Porta sextavada M6 (conjunto soldada)	2
22	Suporte elemento de restrição externa	2
23	Trilho conjuntos ajuste de força	4
24	Suporte eixo de retenção	2
25	Arnelo lisa M3	6
26	Parafuso sextavado interno M3x20	2
27	Vidro blindado	1
28	Porta sextavada M5	13
29	Parafuso sextavado interno M5x50	4
30	Isolador epóxi Ø30x70xM10	4
31	Parafuso sextavado interno M5x20	5
32	Arnelo lisa M8	5
33	Parede lateral invólucro esquerda	1
34	Parafuso sextavado interno M5x35	13
35	Cordalha	1
36	Isolador epóxi Ø30x50xM10	5
37	Contato fixo	1
38	Parafuso sextavado interno M5x30	8
39	Parafuso sextavado interno M5x35	5
40	Arnelo de pressão M8	5
41	Arnelo de pressão M5	44
42	Terminal de conexão fonte de alimentação	2
43	Parafuso sextavado interno M6x45	8
44	Arnelo lisa M6	56
45	Isolante lateral	2
46	Parede superior invólucro isolante sistema aberto	1
47	Parafuso sextavado interno M5x55	2
48	Parede posterior invólucro isolante sistema aberto	1
49	Câmara de extinção	1
50	Contato móvel	1
51	Trava rolamento	1
52	Parafuso sextavado interno M6x25	16
53	Parafuso sextavado interno M3x30	2
54	Arnelo de pressão M10	18
55	Arnelo lisa M10	18
56	Parafuso sextavado interno M10x25	18
57	Isolador epóxi Ø40x40xM8	5
58	Tampa suporte elemento de restrição externa	1
59	Eixo suporte contato móvel	1
60	Parede lateral invólucro direita	1
61	Parede superior invólucro isolante	1
62	Parede frontal invólucro isolante sistema aberto	1
63	Lâmina de polycarbonato descartável	1
64	Parede frontal invólucro isolante	1
65	Placa de ancoragem	1
66	Parede posterior invólucro isolante	1
67	Base isolante	1
68	Tubo pneumático PUH-H-8	1
69	Conexão pneumática reta QS-8	1
70	Mola retorno eixo disparador	1
71	Trava mola retorno eixo disparador	1
72	Parede posterior disparador	1
73	Eixo disparador	1
74	Arnelo de pressão M5	25
75	Retentor cilindro pneumático	1
76	Disparador	1
77	Placa retentor rolamento frontal	2
78	Arnelo lisa M5	27
79	Parede suporte eixo principal de abertura	1
80	Eixo principal de abertura	1
81	Mola de tração entre eixos	1
82	Rolamento rígido de esferas 6001-2Z	3
83	Massa / martelo	1
84	Regulador mola tração martelo	1
85	Mola tração martelo	1
86	Alavanca eixo principal de abertura	1
87	Sensor de rotação (componente acoplado ao eixo)	1
88	Parede suporte sensor de rotação	1
89	Sensor de rotação RC32200-360-PP-V-CCW-0,5M	1
90	Alavanca retorno eixo disparador	1
91	Rolamento rígido de esferas 61903-2Z	2

MASSA BRUTA	28,875	kg	MASSA LÍQUIDA	28,875	kg	ESCALA	1:5		
EXECUTADO	EVERTON		DISPOSITIVO ELETROMECÂNICO PARA ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE ARCOS ELÉTRICOS EM CURTO-CIRCUITOS		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">00</td> </tr> <tr> <td>FOLHA 1 / 1</td> </tr> </table>			00	FOLHA 1 / 1
00									
FOLHA 1 / 1									
DATA	09/05/2022		JARAGUÁ DO SUL						

APÊNDICE B – Mola parametrizada via Gutekunst Federn website.

<p>Firm/Name <input type="text"/></p> <p>Convers. partner <input type="text"/></p> <p>Street <input type="text"/></p> <p>ZIP/City <input type="text"/></p> <p>Phone <input type="text"/> Fax <input type="text"/></p> <p>E-mail <input type="text"/></p>	<p>Cust.no. <input type="text"/></p> <p>Date <input type="text"/></p> <p><input type="checkbox"/> Inquiry <input type="checkbox"/> Order</p> <p>Ref.no. <input type="text"/></p> <p>Piece <input type="text"/></p> <p>Del.date <input type="text"/></p>	<p>GUTEKUNST FEDERN </p> <p>Carl-Zeiss-Strasse 15 D-72555 Metzingen Phone 0049 7123 960-0 Fax 0049 7123 960-195 technik@gutekunst-co.com www.gutekunst-federn.de</p> <p>Compression spring</p>																																										
<table style="width:100%; font-size: small;"> <tr> <td>d mm Wire diameter</td> <td>F1 N Prestressed spring force</td> <td>S1 mm Spring deflection at F1</td> </tr> <tr> <td>D mm Mean coil diameter</td> <td>F2 N Loaded spring force</td> <td>S2 mm Spring deflection at F2</td> </tr> <tr> <td>Dd mm Diameter of mandrel</td> <td>Fn N Maximum force in static use</td> <td>Sh mm Excursion</td> </tr> <tr> <td>De mm Outer coil diameter</td> <td>Fc N Theoretic maximum force at Lc</td> <td>Sn mm Spring deflection at Fn</td> </tr> <tr> <td>Dh mm Diameter of bush</td> <td>k --- Stress coefficient</td> <td>tauzul N/mm² Permitted shearing strength</td> </tr> <tr> <td>e1 mm Perm.dev. perpendicular line</td> <td>L0 mm Length of unstressed spring</td> <td>tau1 N/mm² Shearing stress at F1</td> </tr> <tr> <td>e2 mm Perm.dev. parallel line</td> <td>L1 mm Spring length at F1</td> <td>tau2 N/mm² Shearing stress at F2</td> </tr> <tr> <td></td> <td>L2 mm Spring length at F2</td> <td>taun N/mm² Shearing stress at Fn</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Ln mm Spring length at Fn</td> <td>tauc N/mm² Shearing stress at Fc</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Lc mm Block length</td> <td>taukozul N/mm² Perm. high-end stress, corrected</td> </tr> <tr> <td></td> <td>n pc. Aktive coils</td> <td>taukhzul N/mm² Perm. lifting tension, corrected</td> </tr> <tr> <td></td> <td>nt pc. Total coils</td> <td>tau2 N/mm² Corrected shearing stress at F2</td> </tr> <tr> <td></td> <td>R N/mm Spring rate</td> <td>tau kh N/mm² Corrected lifting tension</td> </tr> <tr> <td></td> <td>s mm Pitch (distance between coils)</td> <td></td> </tr> </table>			d mm Wire diameter	F1 N Prestressed spring force	S1 mm Spring deflection at F1	D mm Mean coil diameter	F2 N Loaded spring force	S2 mm Spring deflection at F2	Dd mm Diameter of mandrel	Fn N Maximum force in static use	Sh mm Excursion	De mm Outer coil diameter	Fc N Theoretic maximum force at Lc	Sn mm Spring deflection at Fn	Dh mm Diameter of bush	k --- Stress coefficient	tauzul N/mm² Permitted shearing strength	e1 mm Perm.dev. perpendicular line	L0 mm Length of unstressed spring	tau1 N/mm² Shearing stress at F1	e2 mm Perm.dev. parallel line	L1 mm Spring length at F1	tau2 N/mm² Shearing stress at F2		L2 mm Spring length at F2	taun N/mm² Shearing stress at Fn		Ln mm Spring length at Fn	tauc N/mm² Shearing stress at Fc		Lc mm Block length	taukozul N/mm² Perm. high-end stress, corrected		n pc. Aktive coils	taukhzul N/mm² Perm. lifting tension, corrected		nt pc. Total coils	tau2 N/mm² Corrected shearing stress at F2		R N/mm Spring rate	tau kh N/mm² Corrected lifting tension		s mm Pitch (distance between coils)	
d mm Wire diameter	F1 N Prestressed spring force	S1 mm Spring deflection at F1																																										
D mm Mean coil diameter	F2 N Loaded spring force	S2 mm Spring deflection at F2																																										
Dd mm Diameter of mandrel	Fn N Maximum force in static use	Sh mm Excursion																																										
De mm Outer coil diameter	Fc N Theoretic maximum force at Lc	Sn mm Spring deflection at Fn																																										
Dh mm Diameter of bush	k --- Stress coefficient	tauzul N/mm² Permitted shearing strength																																										
e1 mm Perm.dev. perpendicular line	L0 mm Length of unstressed spring	tau1 N/mm² Shearing stress at F1																																										
e2 mm Perm.dev. parallel line	L1 mm Spring length at F1	tau2 N/mm² Shearing stress at F2																																										
	L2 mm Spring length at F2	taun N/mm² Shearing stress at Fn																																										
	Ln mm Spring length at Fn	tauc N/mm² Shearing stress at Fc																																										
	Lc mm Block length	taukozul N/mm² Perm. high-end stress, corrected																																										
	n pc. Aktive coils	taukhzul N/mm² Perm. lifting tension, corrected																																										
	nt pc. Total coils	tau2 N/mm² Corrected shearing stress at F2																																										
	R N/mm Spring rate	tau kh N/mm² Corrected lifting tension																																										
	s mm Pitch (distance between coils)																																											
<p><input checked="" type="checkbox"/> Form 1: Spring ends closed and ground</p> <p><input type="checkbox"/> Form 2: Spring ends closed</p> <table style="width:100%; font-size: x-small;"> <tr> <td>tau zul</td><td>991,1</td> <td>tau ko zul</td><td></td> <td>tau 2 / tau zul</td><td>0,718</td> </tr> <tr> <td>k</td><td>1,333</td> <td>tau kh zul</td><td></td> <td>tau n / tau zul</td><td>1,483</td> </tr> </table>			tau zul	991,1	tau ko zul		tau 2 / tau zul	0,718	k	1,333	tau kh zul		tau n / tau zul	1,483																														
tau zul	991,1	tau ko zul		tau 2 / tau zul	0,718																																							
k	1,333	tau kh zul		tau n / tau zul	1,483																																							
<p>1 Coiling direction</p> <p><input type="checkbox"/> left <input checked="" type="checkbox"/> right</p>	<p>7 Guidance and seat to DIN EN 13906-1</p> <p><input type="checkbox"/> mandrel <input type="checkbox"/> bush</p> <p>Buckling length in mm at</p> <table style="width:100%; font-size: x-small;"> <tr> <td>pic. 1</td><td>pic. 2</td><td>pic. 3</td><td>pic. 4</td><td>pic. 5</td> </tr> <tr> <td>v=2,0</td><td>v=1,0</td><td>v=1,0</td><td>v=0,7</td><td>v=0,5</td> </tr> <tr> <td>43,74</td><td>39,66</td><td>39,66</td><td>32,92</td><td></td> </tr> </table>	pic. 1	pic. 2	pic. 3	pic. 4	pic. 5	v=2,0	v=1,0	v=1,0	v=0,7	v=0,5	43,74	39,66	39,66	32,92		<p>11 Surface treatment <input type="checkbox"/> shot peened</p>																											
pic. 1	pic. 2	pic. 3	pic. 4	pic. 5																																								
v=2,0	v=1,0	v=1,0	v=0,7	v=0,5																																								
43,74	39,66	39,66	32,92																																									
<p>2 Dynamic load <input type="checkbox"/></p> <p>tau k2 <input type="text"/></p> <p>tau kh <input type="text"/></p> <p>tau k2 / tau ko zul <input type="text"/></p> <p>tau kh / tau kh zul <input type="text"/></p>	<p>3 Material</p> <p>EN 10270-1 DH (D) (Spring steel wire)</p> <p>Shearing modulus G <input type="text"/> 81500,0</p> <p>Elasticity modulus E <input type="text"/> 206000,0</p>	<p>12 Tolerances to DIN EN 15800</p> <table style="width:100%; font-size: x-small;"> <tr> <th>Grade</th> <th>De,Di,D</th> <th>L0</th> <th>F1,F2</th> <th>e1,e2</th> <th>Wire diameter d to EN 10270</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> </table>	Grade	De,Di,D	L0	F1,F2	e1,e2	Wire diameter d to EN 10270	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																		
Grade	De,Di,D	L0	F1,F2	e1,e2	Wire diameter d to EN 10270																																							
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																							
2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																							
3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																							
<p>3 Excursion Sh <input type="text"/> 8,50 mm</p>	<p>9 Wire or rod surface</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> drawn <input type="checkbox"/> rolled <input type="checkbox"/> metal-cut</p>	<p>13 Prouction compensation through</p> <p>A spring resistance and associated length of tensed spring L0 <input type="checkbox"/></p> <p>A spring resistance, associated length of tensed spring and L0 n, d <input type="checkbox"/></p> <p>Two spring resistances and associated lengths of tensed spring L0,n,De,Di <input type="checkbox"/></p>																																										
<p>4 Stress cyc. end. N <input type="text"/></p>	<p>10 Springs deburred <input type="checkbox"/> inside <input type="checkbox"/> outside</p>	<p>14 Wind test springs ! LS <input type="text"/> mm</p> <p>Rest springs <input type="checkbox"/> wound <input type="checkbox"/> not wound</p> <p>Not wound springs may be longer than L0 !</p>																																										
<p>5 Stress cycle frequ. n <input type="text"/> /</p>																																												
<p>6 Application temp. <input type="text"/> °C</p>																																												
<p>Additional details / spring test / test/factory cert. / drawing number ...</p> <div style="border: 1px solid black; height: 40px;"></div>																																												
<p style="font-size: x-small;">Vers. 8.1 GEKO / 1.3 HB Technologies AG, Tübingen Please do not fill out ! Gutekunst + Co.KG</p>																																												
<table style="width:100%; font-size: x-small;"> <tr> <td style="width:20%;">W.(g)</td> <td style="width:20%;">7,670</td> <td style="width:20%; text-align: center;">/ 1</td> <td style="width:20%; text-align: center;">/ 10</td> <td style="width:20%; text-align: center;">/ 100</td> <td style="width:20%; text-align: center;">/ 1000</td> <td style="width:20%; text-align: center;">Lz</td> </tr> </table>			W.(g)	7,670	/ 1	/ 10	/ 100	/ 1000	Lz																																			
W.(g)	7,670	/ 1	/ 10	/ 100	/ 1000	Lz																																						

APÊNDICE C – Registro do oscilograma de calibração em laboratório dos parâmetros de curto-circuito – 10kA@220V – FP 0,48.

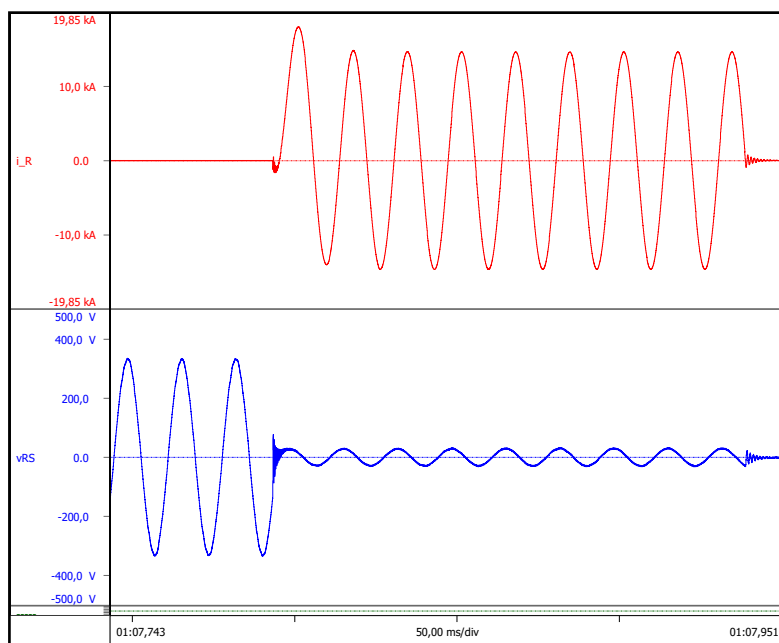
Current: 10,366 k

Voltage: 234,5

Power Factor: 0,48

n: 1,74

Test: 1888_13/09/2022



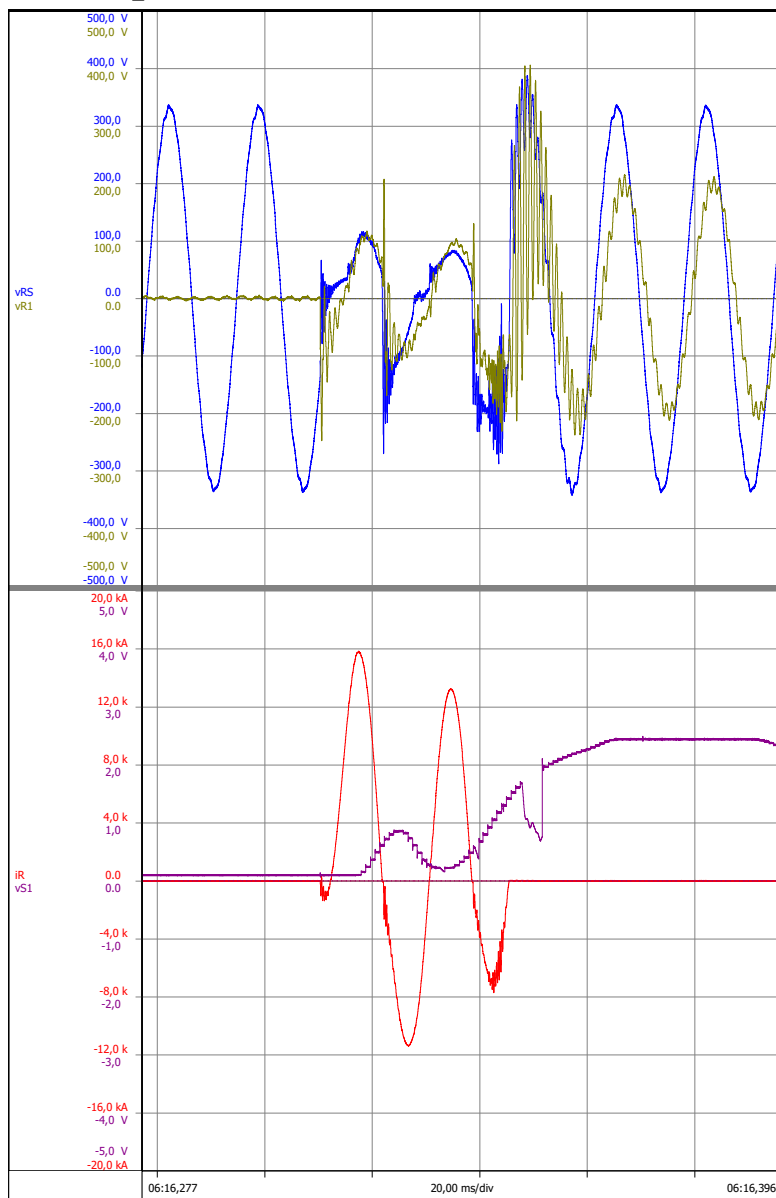
Current RMS [A]	10,366 k
Current Peak [A]	18,047 k
I ² t [A ² s]	15,84 M
Time [s]	145,6 m

Voltage RMS Ph-N [V]	---
Voltage RMS Ph-Ph RS [V]	234,5
Power Factor	0,48

APÊNDICE D – Registro do oscilograma de performance apresentado pelo dispositivo eletromecânico para estudo experimental da interrupção de circuitos elétricos na atuação de disjuntores de baixa tensão em seu primeiro ensaio de curto-circuito.

Sample: Dispositivo eletromecânico - Curto-circuito **Operation:** Open

Test: 1888_13/09/2022



Voltage RMS Ph-G [V]	137,01
Voltage RMS Ph-Ph RS [V]	234,8
Arc Voltage Peak Across Contact [V]	-247,9

Current RMS [A]	7,3934 k
Current Peak [A]	15,864 k
I ² t [A ² s]	2,493 M
Time [s]	35,14 m

vRS: Voltage source waveform
vR1: Voltage drop waveform between sample contacts
iR: Current waveform
vS1: Encoder signal

APÊNDICE E – Solicitação de autorização para pesquisa



Solicitação de Autorização para Pesquisa

Jaraguá do Sul, 22 de agosto de 2022

Eu, **Everton Soares Pivotto**, responsável principal pelo projeto de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) denominado preliminarmente de “**Projeto de um Dispositivo Eletromecânico para Estudo Experimental do Comportamento de Arcos Elétricos em Curto-circuitos**”, do Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica do IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU, venho pelo presente, solicitar autorização da [REDACTED] para a realização da coleta de dados em sua empresa no período de fevereiro/2022 a dezembro/2022, com o objetivo de “montar e ensaiar um dispositivo eletromecânico para estudo experimental do comportamento de arcos elétricos em curto-circuito”. Esta pesquisa está sendo orientada pelo Prof. Cassiano Rodrigues Moura, pesquisador do IFSC.

Para o desenvolvimento desta pesquisa, solicito autorização para a realizar a coleta de dados que consistirá de análise do ambiente, debates com grupo de colaboradores de áreas técnicas, montagem do dispositivo eletromecânico supracitado, ensaios eletromecânicos e imagens através de fotos e vídeos. Saliento que as coletas serão tratadas de forma anônima e confidencial, isto é, em nenhum momento será divulgado o nome de um funcionário e da empresa, em qualquer fase do estudo. As imagens serão divulgadas somente nesta pesquisa e os resultados divulgados em eventos e/ou revistas científicas, tomando o cuidado de não identificar marca ou produto da empresa, bem como, dados referentes a possíveis segredos industriais.

Contando com a autorização desta instituição, agradecemos e coloco-me à disposição para qualquer esclarecimento.

Everton Soares Pivotto - Pesquisador Principal
evertonpivotto@msn.com

Autorizo:

Nome: [REDACTED]

ANEXO A – Relações padronizadas entre capacidade de estabelecimento e de interrupção em curto-circuito e respectivos fatores de potência, para disjuntores de corrente alternada

A Tabela A especifica as relações padronizadas entre a capacidade de estabelecimento em curto-circuito e a capacidade de interrupção em curto-circuito, conforme Tabela 2 da norma NBR IEC 60947-2.

Tabela A – Fator n entre a capacidade de estabelecimento em curto-circuito e a capacidade de interrupção em curto-circuito e respectivo fator de potência (para disjuntores de corrente alternada).

Capacidade de interrupção em curto-circuito I kA eficaz	Fator de potência	Valor mínimo para n <u>capacidade de estabelecimento em curto-circuito</u> capacidade de interrupção em curto-circuito
$4,5 \leq I \leq 6$	0,7	1,5
$6 < I \leq 10$	0,5	1,7
$10 < I \leq 20$	0,3	2,0
$20 < I \leq 50$	0,25	2,1
$50 < I$	0,2	2,2

NOTA Para valores de capacidade de interrupção inferiores a 4,5 kA, para certas aplicações, ver Tabela 11 para o fator de potência.

ANEXO B – Sistemas de corrente alternada com uma tensão nominal entre 100 V e 1000 V e equipamento relacionados

A Tabela B especifica os níveis de tensões nominais recomendados para sistemas trifásicos a quatro ou três fios e sistemas de três fios de fase única, incluindo os circuitos monofásicos (extensões, serviços, etc.) ligados a estes sistemas, conforme Tabela 1 da norma IEC 60038 (2009).

Tabela B – Níveis de tensões nominais recomendados entre 100 V e 1000 V em sistemas de corrente alternada.

Three-phase four-wire or three-wire systems		Single-phase three-wire systems
Nominal voltage		Nominal voltage
V		V
50 Hz	60 Hz	60 Hz
–	120/208	120/240
–	240	–
230/400 ¹⁾	277/480	–
400/690 ¹⁾	480	–
–	347/600	–
1 000	600	–

¹⁾ The nominal voltage of existing 220/380 V and 240/415 V systems shall evolve toward the recommended value of 230/400 V. The transition period should be as short as possible and should not exceed the year 2003. During this period, as a first step, the electricity supply authorities of countries having 220/380 V systems should bring the voltage within the range 230/400 V +6 %, –10 % and those of countries having 240/415 V systems should bring the voltage within the range 230/400 V +10 %, –6 %. At the end of this transition period, the tolerance of 230/400 V ± 10 % should have been achieved; after this the reduction of this range will be considered. All the above considerations apply also to the present 380/660 V value with respect to the recommended value 400/690 V.