

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA – FEMEC  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

MURILO ANTÔNIO DA SILVA ROCIOLI

Melhorias em Módulos Robóticos para Manutenções de Componentes do Sistema  
de Transmissão de Energia Elétrica

Uberlândia – MG

2023

MURILO ANTÔNIO DA SILVA ROCIOLI

Melhorias em Módulos Robóticos para Manutenções de Componentes do Sistema  
de Transmissão de Energia Elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal de Uberlândia como  
requisito parcial para obtenção do título de  
Engenheiro Mecatrônico.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Sales Gonçalves

Uberlândia – MG

2023

MURILO ANTÔNIO DA SILVA ROCIOLI

Melhorias em Módulos Robóticos para Manutenções de Componentes do Sistema  
de Transmissão de Energia Elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Engenharia Mecatrônica da  
Universidade Federal de Uberlândia como  
requisito parcial para obtenção do título de  
Engenheiro Mecatrônico.

Uberlândia, 04 de Julho de 2023

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Rogério Sales Gonçalves – UFU (Orientador)

---

Prof. Éder Alves de Moura – UFU

---

Prof. Dr. Pedro Augusto Queiroz de Assis – UFU

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão, primeiramente a Deus e a todos que contribuíram para a conclusão deste trabalho de conclusão de curso.

Desejo agradecer ao meu orientador, Rogério Sales Gonçalves, pela orientação, apoio e inestimável expertise ao longo de todo o processo de pesquisa. Seus insights e constante encorajamento foram fundamentais para moldar este trabalho.

Também sou grato aos membros do corpo docente da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) e da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), pela dedicação e conhecimentos compartilhados ao longo da minha jornada acadêmica.

Agradeço aos meus colegas de curso, que estiveram ao meu lado durante esses anos de estudo, pelos momentos de colaboração, amizade e apoio mútuo. Suas contribuições enriqueceram minha experiência acadêmica.

Não posso deixar de agradecer aos meus familiares e amigos por seu amor, incentivo e compreensão ao longo dessa jornada. Suas palavras de encorajamento foram uma fonte constante de motivação. Deixo um agradecimento especial a minha namorada, Victoria Freitas, pelo apoio imensurável em toda essa caminhada.

Por fim, gostaria de expressar minha gratidão a todas as fontes de conhecimento, autores e pesquisadores cujas obras foram consultadas e citadas nesta pesquisa. Seus estudos e contribuições foram essenciais para o desenvolvimento do meu trabalho.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para este projeto, o meu sincero agradecimento. Vocês foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Agradecimentos a Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC Programa de P&D 05697-0518/2018) e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) pela cooperação e financiamento deste projeto.

“Não podemos prever o futuro, mas podemos criá-lo.”

Peter Drucker

## RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso (TCC) envolve a temática relacionada às melhorias em módulos robóticos utilizados para a realização de manutenções em componentes do sistema de transmissão de energia elétrica. O objetivo primordial deste estudo consiste na melhoria de módulos robóticos especializados para a instalação de amortecedores de vibração em cabos de transmissão, bem como para a lavagem de cadeias de isoladores.

Na primeira fase do projeto, optou-se por utilizar um drone hexacóptero modelo EFT E610, originalmente empregado na área agrícola, que possui um reservatório com capacidade de 10 litros, destinado à condução de líquidos. Em seguida, concentra-se os esforços no desenvolvimento de um módulo robótico para lavagem das cadeias de isoladores e de outros elementos. Esse módulo consiste em uma estrutura fixada ao drone, composta por uma lavadora de alta pressão portátil e um tanque de água com capacidade para 10 litros.

Na segunda fase do projeto, concentrou-se na concepção de um módulo robótico específico para a instalação de amortecedores do tipo Stockbridge, cuja finalidade é reduzir as vibrações nos cabos de alta tensão. Este módulo será transportado por um drone e deixado no cabo para após a instalação do amortecedor ser buscado pelo drone. A introdução de robôs nessa tarefa busca mitigar os riscos associados às atividades realizadas em alturas elevadas, aprimorar a eficiência e a segurança do processo de instalação, bem como otimizar o tempo necessário para a substituição dos amortecedores.

Na terceira fase do projeto, focou-se no desenvolvimento de um módulo robótico para a instalação de amortecedores de vibração pré-formados. Para isso, investigou-se um sistema similar empregado na instalação de sinalizadores avifauna em cabos para-raios. O módulo robótico é transportado pelo drone até o local de instalação do amortecedor, onde é fixado por meio de um sistema composto por motores e eixos. Após a fixação, o módulo é recolhido pelo drone e transportado de volta ao solo.

Os resultados obtidos evidenciam a viabilidade do emprego de módulos robóticos para a execução dessas tarefas no sistema de transmissão de energia elétrica. Adicionalmente, o desenvolvimento desses módulos contribui para a automação e o aprimoramento da eficiência nas manutenções dos componentes do sistema visando-se diminuir os riscos aos técnicos de linha viva.

**Palavras-chave:** módulos robóticos, manutenção, sistema de transmissão de energia elétrica, instalação de amortecedores, lavagem de cadeias de isoladores, automação.

## ABSTRACT

This course completion work addresses the issue related to improvements in robotic modules used to perform maintenance on components of the electric power transmission system. The main objective of this study consists in the development of specialized robotic modules for the installation of vibration dampers in transmission cables, as well as for the washing of insulator chains.

In the first phase of the project, it was decided to use an EFT E610 hexacopter drone, originally used in the agricultural area, with a capacity of 10 liters, intended for conducting liquids. Then, it concentrated on efforts aimed at developing the robotic module responsible for washing the chains of insulators and other elements. This module consists of a structure attached to the drone, consisting of a cordless portable high-pressure wash machine and a water tank with a capacity of 10 liters.

In the second phase of the project, the focus was on designing a specific robotic module for installing Stockbridge-type dampers, whose purpose is to reduce vibrations in high-voltage cables. The introduction of robots in this task seeks to mitigate the risks associated with activities carried out at high heights, improve the efficiency and safety of the installation process, as well as optimize the time required to replace the shock absorbers.

In the third phase of the project, the focus was on the development of a robotic module for the installation of preformed vibration dampers. For this, a similar system used in the installation of bird signaling cables was investigated. The robotic module is transported by the drone to the place where the preformed vibration damper is installed, where it is fixed using a system composed of motors and axles. After attachment, the module is picked up by the drone and transported back to the ground.

The results show the viability of using robotic modules to perform these tasks in the electric power transmission system. Additionally, the development of these modules contributes to the automation and improvement of efficiency in the maintenance of system components.

**Keywords:** robotic modules, maintenance, electric power transmission system, installation of dampers, washing of insulator chains, automation.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – O sistema elétrico brasileiro	15
Figura 2 – Elementos contidos nos cabos de transmissão	21
Figura 3 – Isoladores em Linhas de Transmissão	22
Figura 4 – Amortecedor Stockbridge	24
Figura 5 – Amortecedor de Vibração Pré-formado	26
Figura 6 – Instalação manual de um amortecedor pré-formado	27
Figura 7 – Hexacóptero EFT E610	28
Figura 8 – Dimensões do Hexacóptero EFT E610	29
Figura 9 – Módulo Robótico para Lavagem da Cadeia de Isoladores	30
Figura 10 – Montagem anterior do módulo	31
Figura 11 – Ideias para acoplamento da lavadora no drone	32
Figura 12 – Mecanismo de fixação do Módulo de Lavagem	32
Figura 13 – Modelo simplificado para cálculo	34
Figura 14 – Geometria do Módulo Robótico	35
Figura 15 – Motor de parafusadeira DC com caixa de redução utilizado	36
Figura 16 – Polia ABS	37
Figura 17 – Mecanismo de pinça	38
Figura 18 – Perfil de rosca	38
Figura 19 – Gráfico de performance	40
Figura 20 – Gráfico de performance do MB03012	41
Figura 21 – Motorreductor utilizado	42
Figura 22 – Fechadura Magnética	43
Figura 23 – Placa de alumínio do módulo	43
Figura 24 – Acoplamento entre fechadura e módulo	44
Figura 25 – Bateria de LiPo	45
Figura 26 – Caixa de alumínio	46
Figura 27 – Centro de massa antes da instalação do amortecedor	47
Figura 28 – Centro de massa após a instalação do amortecedor	47

Figura 29 – Módulo robótico para instalação/remoção de amortecedores de vibração pré-formado	49
Figura 30 – Geometria do Módulo Robótico	50
Figura 31 – Polia ABS	50
Figura 32 – Sistema de acoplamento	51
Figura 33 – Centro de massa	53
Figura 34 – Sistema de acoplamento do módulo	55
Figura 35 – Simulação Estática da peça de fixação da lavadora	55
Figura 36 – Massa da peça de fixação da Lavadora no software SolidWorks	56
Figura 37 – Posições que a lavadora deverá exercer na operação de limpeza	57
Figura 38 – Protótipo do módulo nas três posições	57
Figura 39 – Vista isométrica do módulo	58
Figura 40 – Outra vista isométrica do módulo	58
Figura 41 – Posição inicial do módulo	59
Figura 42 – Vistas do módulo	60
Figura 43 – Vista isométrica do módulo	60
Figura 44 – Protótipo do módulo nas duas vistas	61

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Componentes Sistema Controle	45
Tabela 2 – Componentes Sistema Controle	52

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Cálculo do fuso auto travante	39
Equação 2 – Cálculo da força normal à superfície do amortecedor	39
Equação 3 – Cálculo do torque do motor	42

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
CAD	<i>Computer Aided Design</i>

## SUMÁRIO

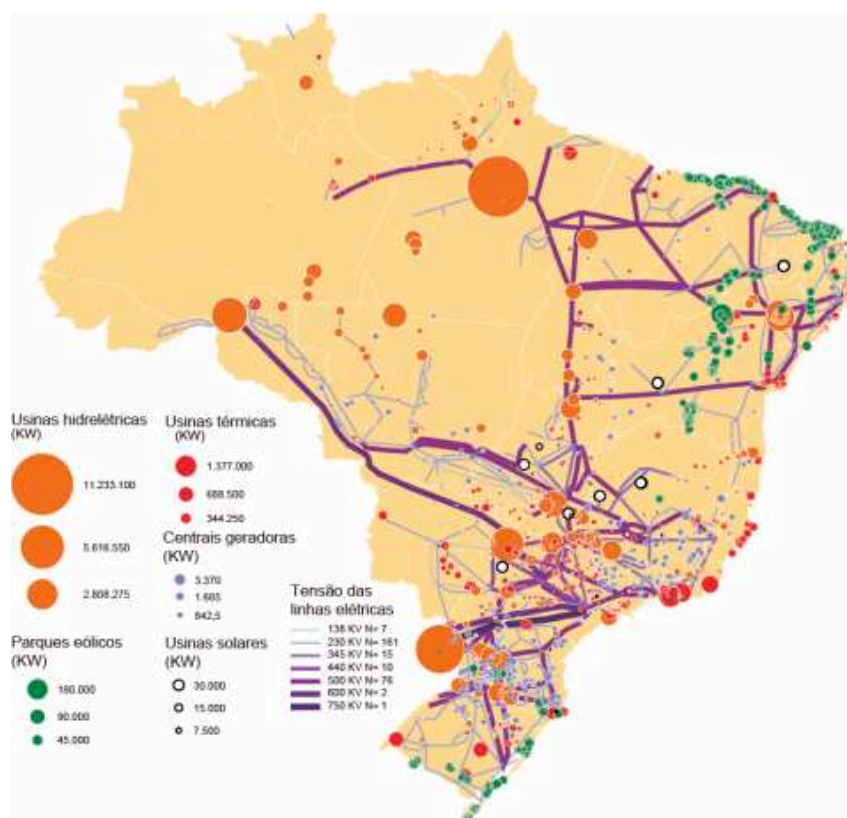
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1. Considerações Iniciais	15
1.2. Justificativa	17
<b>2 OBJETIVOS</b>	<b>19</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>20</b>
3.1 Robôs para manutenção de linhas de alta tensão	20
3.2 Limpeza de cabos de alta tensão	21
3.3 Instalação de amortecedores de vibração do tipo stockbridge	24
3.4 Instalação de amortecedores de vibração pré-formados	25
<b>4 METODOLOGIA</b>	<b>28</b>
4.1 O veículo aéreo não tripulado	28
4.2 Módulo robótico para lavagem de cadeias de isoladores	29
4.2.1 Fixação do Módulo Robótico no Drone	29
4.2.2 Geometria do Módulo Robótico de lavagem	30
4.2.3 Mecanismo de Fixação no VANT	30
4.2.4 Análises Estáticas	33
4.2.5 Melhorias a serem feitas no módulo	33
4.3 Módulo robótico para instalação/desinstalação dos amortecedores de vibração do tipo stockbridge	33
4.3.1 Locomoção do módulo no cabo	34
4.3.2 Mecanismo de pinça	37
4.3.3 Mecanismo de instalação do módulo	40
4.3.4 Mecanismo de fixação no VANT	42
4.3.5 Sistema de alimentação	44
4.3.6 Análises Estáticas	46
4.3.7 Análises Dinâmicas	46
4.3.8 Melhorias a serem feitas no módulo	48
4.4 Locomoção do módulo no cabo	49
4.4.1 Locomoção do módulo no cabo	49
4.4.2 Mecanismo de fixação no VANT	51
4.4.3 Análises Estáticas	52
4.4.4 Análises Dinâmicas	52
4.4.5 Melhorias a serem feitas no módulo	53
<b>5 RESULTADOS</b>	<b>55</b>
5.1 Melhorias no módulo robótico para limpeza de cadeias de isoladores	55
5.2 Melhorias no módulo robótico para instalação/desinstalação dos amortecedores de vibração do tipo stockbridge	57
5.3 Melhorias no módulo robótico para instalação dos amortecedores de vibração pré-formados	60
<b>6 DISCUSSÃO</b>	<b>62</b>
<b>7 CONCLUSÃO</b>	<b>64</b>
<b>8 REFERÊNCIAS</b>	<b>65</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1. Considerações Iniciais

A crescente importância e presença da energia elétrica na vida cotidiana tem impulsionado uma demanda contínua por seu fornecimento. Conseqüentemente, tem havido um considerável aumento na construção de linhas de transmissão de energia elétrica, com o intuito de suprir essa demanda em constante crescimento. A Figura 1 ilustra a distribuição dessas linhas de transmissão em todo o território brasileiro.

Figura 1: O sistema elétrico brasileiro.



Fonte: Atlas do Brasil, Hervé Théry e Neli Aparecida de Mello-Théry (2016).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o sistema brasileiro de linhas de transmissão elétrica está em constante expansão. Só em 2020 foram concluídos 6.159,34 km do total de novas linhas a nível nacional, aumentando o alcance das mesmas em 15 estados (ANEEL, 2022). De acordo com o Ministério de Minas e Energia, o Sistema Interligado Nacional (SIN) é composto por cerca de 150 mil km de linhas de transmissão.

Com a extensão das linhas de transmissão, que se estende por milhares de quilômetros, tem gerado a necessidade de realizar manutenções e inspeções dessas linhas, bem como dos acessórios indispensáveis ao seu funcionamento.

São múltiplas as atividades de manutenção e inspeção dos cabos de alta voltagem. Por exemplo, pode-se citar a execução de uma minuciosa avaliação dos cabos visando a aferição da integridade física e mecânica, detecção de possíveis falhas e descargas atmosféricas, e avaliação da necessidade de manutenção emergencial ou programada. Além disso, é de suma importância conduzir uma inspeção visual dos cabos condutores, espaçadores, isoladores de porcelana ou de vidro, torres, bem como efetuar a instalação ou remoção de esferas de sinalização aérea no cabo, enquanto a linha permanece energizada. Além disso, outras tarefas são desempenhadas, tais como os serviços de emenda do cabo, limpeza, reparos e implementação de novas linhas.

Neste sentido, é imprescindível compreender as necessidades e desafios enfrentados pelos profissionais envolvidos nesse cenário, bem como explorar tecnologias e metodologias que possam otimizar os processos de manutenção e inspeção. Com isso, espera-se contribuir para o desenvolvimento de soluções eficientes e seguras, que garantam a confiabilidade e o bom funcionamento do sistema de transmissão de energia elétrica.

Em particular, o presente trabalho busca melhorias em módulos robóticos voltados para manutenção de componentes do sistema de transmissão de energia elétrica. Ao analisar as demandas do setor e explorar tecnologias promissoras, pretende-se oferecer contribuições significativas para o avanço desse campo, proporcionando maior eficiência e qualidade nas operações de manutenção, com ênfase na segurança dos profissionais envolvidos e no aumento da confiabilidade do sistema como um todo.

## **1.2. Justificativa**

Assim, torna-se imprescindível a realização de inspeções periódicas e eficientes para identificar e mitigar potenciais falhas nos componentes do sistema de transmissão de energia elétrica. A detecção precoce dessas falhas é fundamental para evitar interrupções no fornecimento de energia, garantir a segurança do sistema e preservar a qualidade do serviço prestado aos consumidores.



Uma das áreas críticas de atenção é a preservação da integridade dos cabos de alta tensão, que estão expostos a uma série de desafios ambientais e operacionais. Problemas como mau contato nas proximidades dos pontos de apoio em torres elétricas e o envelhecimento dos condutores representam ameaças significativas à eficiência e confiabilidade do sistema de transmissão. Além disso, fatores como a presença de objetos indesejáveis, danos causados por fenômenos naturais e a deterioração de isoladores e estruturas metálicas podem comprometer o desempenho e a segurança da rede.

Nesse sentido, investir em aprimoramentos tecnológicos e soluções inovadoras é crucial para a efetiva manutenção e inspeção dos componentes do sistema de transmissão de energia elétrica. A utilização de módulos robóticos representa uma promissora abordagem para superar as limitações e desafios inerentes às inspeções realizadas por operadores humanos. Os avanços na área de robótica permitem a realização de inspeções mais precisas, abrangentes e seguras, reduzindo a exposição dos trabalhadores a ambientes hostis e minimizando os riscos de acidentes.

Além disso, a introdução de módulos robóticos na manutenção e inspeção dos componentes do sistema de transmissão de energia elétrica contribui para a otimização dos processos e a redução de custos operacionais. Ao garantir a detecção precoce de falhas e a identificação de pontos críticos, tais tecnologias possibilitam intervenções mais assertivas e

planejadas, evitando a necessidade de manutenções emergenciais e reduzindo o tempo de inatividade da rede.

Considerando os desafios enfrentados pela indústria de energia elétrica, justifica-se a relevância deste trabalho de pesquisa, que visa propor melhorias nos módulos robóticos utilizados na manutenção e inspeção dos componentes do sistema de transmissão de energia elétrica. Por meio da investigação e análise de novas abordagens tecnológicas, busca-se contribuir para a eficiência, segurança e confiabilidade do sistema, fortalecendo a infraestrutura energética do país e proporcionando benefícios significativos para as concessionárias, consumidores e sociedade como um todo.

## 2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo explorar e apresentar novas abordagens e projetos de módulos robóticos aplicáveis à manutenção de elementos presentes no sistema de transmissão de energia elétrica. Diante dos desafios enfrentados na manutenção das linhas de alta tensão, busca-se contribuir para o avanço tecnológico nessa área por meio da investigação e desenvolvimento de soluções inovadoras.

Assim, serão analisadas as necessidades e requisitos específicos relacionados à manutenção das linhas de transmissão de energia elétrica, considerando aspectos como segurança, eficiência e custos operacionais.

Em seguida, pretende-se realizar uma revisão detalhada das soluções existentes, identificando suas vantagens, limitações e áreas de oportunidade. Será feita uma análise crítica dessas soluções, visando compreender suas contribuições e lacunas, com o intuito de embasar o desenvolvimento de propostas inovadoras.

Além disso, busca-se realizar melhorias nos módulos robóticos adaptados às demandas específicas da manutenção de linhas de alta tensão. Serão considerados diversos aspectos, como capacidade de inspeção visual, manipulação de equipamentos, detecção de falhas e interações seguras com o ambiente operacional. Será dada ênfase à segurança dos operadores e à redução dos riscos associados às atividades de manutenção.

Pretende-se também realizar testes e simulações das ideias propostas, avaliando a eficácia, confiabilidade e desempenho. Serão considerados cenários reais de operação, simulando condições adversas e analisando a resposta dos drone-robôs diante de situações desafiadoras.

Por fim, deseja-se contribuir para o avanço científico e tecnológico no campo da manutenção de linhas de alta tensão, por meio da proposição de soluções inovadoras baseadas em drone-robôs. Espera-se que os resultados deste trabalho possam subsidiar futuros desenvolvimentos e aprimoramentos nessa área, promovendo maior eficiência, segurança e redução de custos nas operações de manutenção em sistemas de transmissão de energia elétrica.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Robôs para manutenção de linhas de alta tensão**

Uma abordagem promissora para otimizar as operações de manutenção e inspeção é o emprego de robôs na manutenção. Essa utilização apresenta potencial para reduzir os custos associados à mão de obra humana, aumentar a eficiência das tarefas e mitigar os riscos à integridade humana, uma vez que diminuiria a necessidade de trabalho direto dos operadores nas linhas.

Diante desse contexto, torna-se imperativo desenvolver e aprimorar robôs para a manutenção dos componentes presentes nas linhas de transmissão. Esses robôs podem se apresentar em diferentes formatos e modelos, como os robôs móveis e os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs). Diversos estudos têm se concentrado na busca por soluções inovadoras nessa área, visando superar os desafios e limitações existentes, como Disyadej et al. (2019), Miller, Abbasi e Mohammadpour (2017) e Yan (2020).

Nos cabos de transmissão encontram-se diversos elementos que representam obstáculos para os robôs móveis, tais como esferas de sinalização aérea, cadeias de suspensão, isoladores, luvas, espaçadores, grampos, amortecedores de vibração do tipo pré-formado ou stockbridge, espantadores de pássaros, emendas e diferentes tipos de torres. É possível observar alguns destes elementos na Figura 2.

Figura 2: Elementos contidos nos cabos de transmissão.



Fonte: Linhas de Transmissão - Instalação Amortecedor Helicoidal em LT 138kV

Dessa forma, as soluções propostas na literatura, que utilizam robôs móveis suspensos por cabos, enfrentam dificuldades para superar todos os tipos de obstáculos existentes. Além disso, essas soluções são complexas e apresentam desafios para serem implementadas nos cabos.

### 3.2 Robôs para limpeza de cabos de alta tensão

Para assegurar o isolamento adequado das linhas de alta tensão nas torres, são empregados dispositivos conhecidos como isoladores. É possível ver esse tipo de equipamento na Figura 3. Esses componentes devem apresentar características dielétricas satisfatórias, bem como propriedades mecânicas, considerando a natureza exigente do ambiente em que serão utilizados. Os isoladores devem ser capazes de suportar altas tensões de compressão e possuir superfícies altamente polidas. No entanto, esses isoladores podem se sujar devido à presença de aves, poeira, sal e substâncias químicas provenientes de diferentes fontes de poluição atmosférica (HADIPOUR, SHIRAN, 2017). A manutenção adequada dos isoladores desempenha um papel crucial na prevenção de falhas no sistema de transmissão de energia elétrica. A acumulação de sujeira forma uma camada condutora na superfície dos isoladores, aumentando o risco de ocorrência do fenômeno de *flashover*.

*Flashover* é um fenômeno que ocorre em sistemas elétricos de potência quando há uma descarga elétrica que ioniza o ar e cria um canal condutor de eletricidade. Esse canal pode causar um curto-circuito e danificar os equipamentos elétricos.

“*Flashover* é um fenômeno que ocorre quando uma superfície isolante é submetida a uma tensão suficientemente alta para ionizar o ar adjacente. O ar ionizado torna-se condutor e permite a passagem de corrente elétrica através da superfície isolante”. (KUFFEL, E.; ZHANG, J.; KUFFEL, J. High Voltage Engineering Fundamentals. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.)

A maioria dos casos de *flashover* é imprevisível, o que requer a realização de operações de manutenção que frequentemente demandam várias horas para serem concluídas.

Figura 3: Isoladores em Linhas de Transmissão.



Fonte:

<https://conteudo.hvex.com.br/tecnologia/avaliacao-de-isoladores-em-linhas-de-transmissao/>

A limpeza tradicional das cadeias de isoladores geralmente é realizada por operadores em condições de linha energizada ou durante desligamentos programados. Essa limpeza pode ser realizada por técnicos utilizando panos, lavadoras de alta pressão instaladas nas torres ou transportadas pelos próprios técnicos. Além disso, a limpeza pode ser feita por meio de

caminhões equipados com plataformas ou dispositivos robóticos, especialmente em aplicações de baixa tensão dentro de áreas urbanas. No caso de linhas de alta tensão no sistema de transmissão, também são utilizados helicópteros como meio de acesso e execução da limpeza.

A execução da limpeza de isoladores envolve uma série de riscos significativos para os eletricitas, incluindo quedas, lesões corporais, choque elétrico, cortes causados por isoladores danificados, lesões por esmagamento de membros, colisões do equipamento com a estrutura ou acessórios e lesões corporais causadas pela queda de ferramentas. O tempo médio estimado para concluir essa tarefa é de aproximadamente 1,5 horas por estrutura (COPEL, 2015).

Estudos realizados por Parker *et al.* (2010) e Jiang *et al.* (2015) apresentam robôs destinados à limpeza e inspeção de isoladores, abrangendo os discos da cadeia de isoladores e realizando a limpeza por meio de escovas. Esses robôs têm a capacidade de locomover-se ao longo da cadeia de isoladores.

No entanto, a utilização desses robôs enfrenta desafios significativos relacionados à manutenção dos protótipos complexos e à necessidade de posicioná-los nos isoladores, o que ainda envolve riscos semelhantes, uma vez que os técnicos precisam escalar os postes/torres e instalar os robôs nos isoladores, além de questões ergonômicas decorrentes do peso considerável dos mesmos.

Uma abordagem inicialmente descrita por Kurtgis (1984) para a limpeza de isoladores envolve o uso de helicópteros equipados com lavadoras de alta pressão acopladas. Jans (1991) apresenta um dispositivo composto por escovas rotativas para a limpeza de isoladores, sendo o posicionamento desse dispositivo realizado por meio de helicópteros.

Além disso, existem aplicações de drones para a limpeza de isoladores. Em um estudo realizado por Tengfei *et al.* (2015), é apresentado um drone com três bicos para realizar a limpeza de isoladores. Um bico é responsável pela aplicação do produto de limpeza, outro pela água limpa e o terceiro utiliza um spray de alta pressão. O processo de limpeza é monitorado por uma câmera, cujas imagens são transmitidas para uma estação terrestre, permitindo que o operador avalie se a limpeza foi realizada de forma completa.

Outra abordagem mencionada na literatura é o uso de helicópteros do tipo aeromodelo ou drones para realizar a limpeza de isoladores, utilizando uma fonte de água externa, como um caminhão-tanque, para fornecer o suprimento de água necessário (HADIPOUR, ABEROMAND, JAMEII, 2016). Essa técnica permite a pulverização de água nos isoladores,

removendo os depósitos de sujeira e melhorando a eficácia da limpeza. O uso de drones nesse contexto oferece uma abordagem mais segura, evitando a necessidade de acesso direto aos isoladores e reduzindo os riscos associados ao trabalho em altura.

### 3.3 Instalação de amortecedores de vibração do tipo Stockbridge

A transmissão de energia elétrica por meio de linhas aéreas enfrenta desafios significativos decorrentes das diversas condições ambientais encontradas ao longo das grandes distâncias percorridas pelos cabos condutores. Especificamente, as vibrações eólicas induzidas pelos ventos podem ocasionar danos e fadiga nos cabos, tornando-se necessário o uso de dispositivos de amortecimento de vibração para mitigar tais oscilações e reduzir os danos decorrentes.

A seleção adequada do modelo de amortecedor de vibração do tipo Stockbridge deve considerar uma variedade de fatores, incluindo diâmetro, massa, forças de tração, condições climáticas e topográficas, bem como o espaçamento entre as torres. Geralmente, esses amortecedores são aplicados em linhas de transmissão que utilizam apenas um cabo por fase, com comprimentos aproximados de 600mm e massa variando entre 1kg e 7kg (MARCHI, MERINO, 2014). Podemos observar um exemplo de amortecedor Stockbridge na Figura 4.

Figura 4: Amortecedor Stockbridge.



Fonte:

<http://www.nordserv.com.br/produtos/94/amortecedor-de-vibracao-stockbridge-forjasul.html>

A substituição manual dos amortecedores de vibração Stockbridge em cabos condutores requer a atuação de uma equipe composta por no mínimo três pessoas e apresenta riscos associados à queda dos eletricitistas, lesões decorrentes de objetos ou ferramentas caindo

das torres, além da presença de insetos e animais nas estruturas. O tempo médio para execução dessa tarefa é de cerca de 20 minutos por amortecedor, sem considerar o tempo necessário para o acesso às torres, montagem dos equipamentos e descida dos eletricitistas (COPEL, 2015).

Uma alternativa à abordagem manual é a utilização de robôs para a instalação dos amortecedores de vibração stockbridge. Na literatura, encontram-se estudos sobre o desenvolvimento de robôs capazes de transpor obstáculos e estruturas de torres, bem como de instalar esses amortecedores por meio de ferramentas adaptadas. No entanto, esses robôs apresentam uma considerável massa e exigem a participação de vários operadores para posicionar adequadamente o robô no cabo de alta tensão (POULIOT, RICHARD, MONTAMBAULT, 2015; JIANG, 2019).

### **3.4 Instalação de amortecedores de vibração pré-formados**

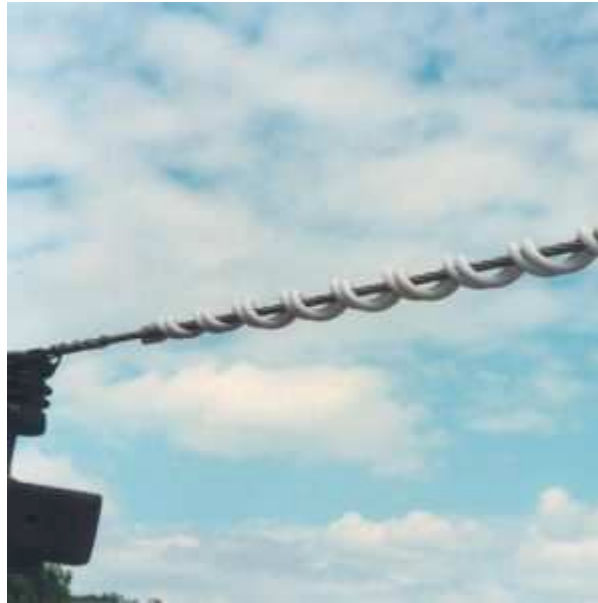
A utilização de dispositivos de amortecimento de vibração pré-formados é amplamente empregada como uma prática convencional para mitigar os efeitos das oscilações induzidas pelo vento em linhas de transmissão de energia elétrica. Esses amortecedores desempenham um papel fundamental na salvaguarda dos cabos condutores, atenuando danos e a fadiga ocasionada pelas vibrações.

A seleção apropriada do tipo de amortecedor de vibração assume uma importância extrema no que tange à eficácia e longevidade do sistema. A literatura acadêmica investiga diversos aspectos relacionados à instalação e à escolha desses dispositivos.

Diversos estudos têm sido conduzidos no sentido de explorar os principais fatores que afetam a seleção dos amortecedores de vibração pré-formados, compreendendo diâmetro, massa, forças de tração, condições climáticas e topográficas, assim como o espaçamento entre as torres (MARCHI, MERINO, 2014). Esses elementos são cruciais para determinar o desempenho e a eficiência desses amortecedores na supressão das vibrações. É possível ver uma imagem de um amortecedor de vibração pré-formado na Figura 5.



Figura 5: Amortecedor de Vibração Pré-formado.



Fonte:

<https://plp.com.br/energia/transmissao/control-de-vibracao/amortecedor-de-vibracao-preformado-svd/>

Ademais, pesquisadores têm se dedicado ao desenvolvimento de métodos automatizados e soluções inovadoras para a instalação dos amortecedores de vibração pré-formados. Estudos recentes têm explorado o emprego de robôs e drones como alternativas promissoras para a execução dessa tarefa de manutenção (RUBIN, 2000; GONÇALVES, CARVALHO, 2013). Tais abordagens visam reduzir os riscos associados à presença de operadores em alturas elevadas, bem como aprimorar a eficiência e a segurança do processo de instalação. Pode-se ver um exemplo de instalação manual do amortecedor pré-formado na Figura 6.

Figura 6: Instalação manual de um amortecedor pré-formado.



Fonte: <https://www.adeel.com.br/amortecedor-de-vibracao-preformado/>

Contudo, é crucial ressaltar que a substituição desses dispositivos requer uma equipe devidamente qualificada e treinada, em virtude dos potenciais riscos envolvidos, incluindo quedas de eletricitistas, lesões resultantes de ferramentas ou materiais, bem como a presença de insetos e animais nas torres (COPEL, 2015). Portanto, torna-se fundamental adotar medidas de segurança adequadas e seguir os protocolos estabelecidos para assegurar a execução segura da referida tarefa.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho consiste em uma abordagem sistemática que envolve diferentes etapas. O objetivo principal é analisar e propor melhorias nos módulos robóticos utilizados na instalação de amortecedores de vibração e na limpeza de cadeias de isoladores do sistema de transmissão de energia elétrica.

### 4.1 O veículo aéreo não tripulado

A fase inicial deste projeto envolveu a utilização do hexacóptero modelo EFT E610, uma aeronave não tripulada (drone) com seis rotores. O drone estava disponível para uso e testes no Laboratório de Automação e Robótica (LAR) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). A Figura 7 apresenta uma imagem ilustrativa do drone mencionado.

Figura 7: Hexacóptero EFT E610.

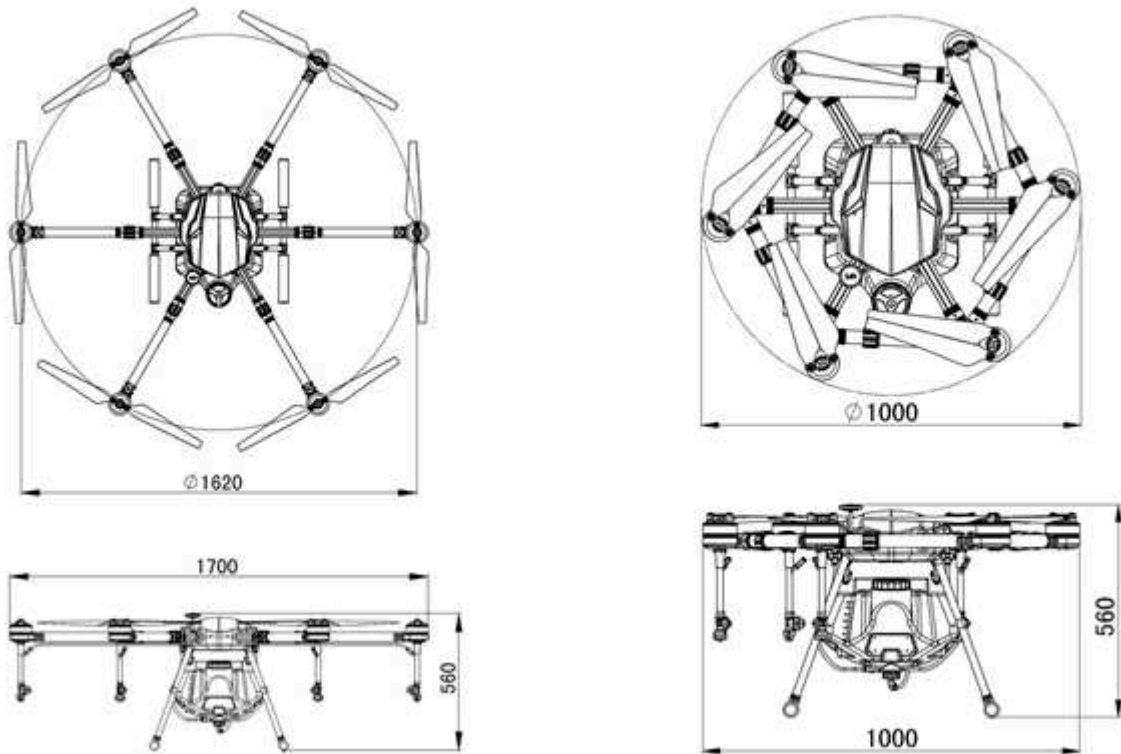


Fonte: E Series Hexacopter 10-16KG Agriculture Drone Airframe. Disponível em: <https://www.motionew.com/shop/multirotor-drone/e-series-hexacopter-e610-e616-10-16kg-agriculture-drone-frame/>

O hexacóptero EFT E610 foi concebido com o propósito de ser empregado no contexto agrícola, oferecendo recursos específicos para esse fim. Uma de suas características

é a presença de um reservatório com capacidade para armazenar até 10 litros de líquidos, Fig. 7. A Figura 8 apresenta as dimensões do hexacóptero.

Figura 8: Dimensões do Hexacóptero EFT E610.



Fonte:

<https://www.motionew.com/shop/multirotor-drone/e-series-hexacopter-e610-e616-10-16kg-agriculture-drone-frame/>

## 4.2 Módulo robótico para lavagem de cadeias de isoladores

O conceito do drone-robô para limpeza de cadeias de isoladores e outros elementos baseia-se na integração de um drone com um módulo de limpeza removível. Esse módulo permite a realização da limpeza em componentes específicos, tais como isoladores, cabos e esferas de sinalização. O módulo robótico inclui uma pistola de alta pressão e um tanque de água de fácil abastecimento.

### 4.2.1 Fixação do Módulo Robótico no Drone

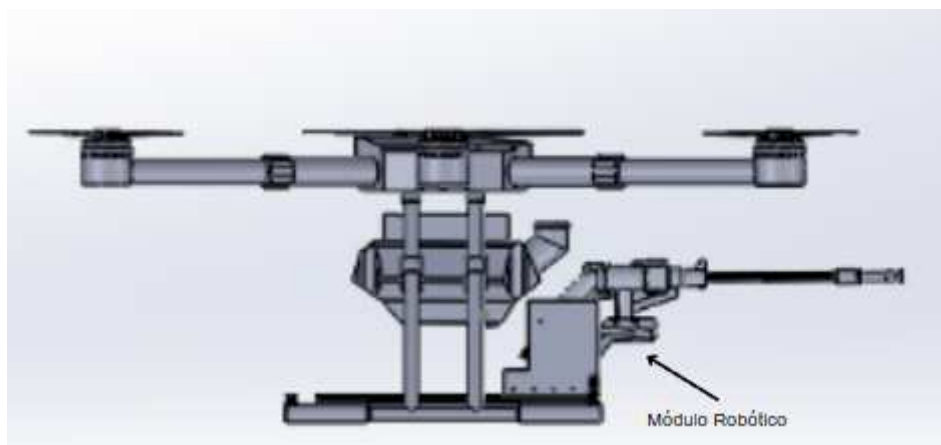
Nesse caso o módulo robótico para lavagem de cadeias de isoladores não deve ser deixado suspenso nas linhas durante a sua operação, permanecendo sempre fixo ao drone utilizado para o transporte.

Durante o transporte do módulo robótico até a aproximação da cadeia de isoladores, o drone desempenha um papel fundamental. Ele é responsável por conduzir o robô até a posição desejada ao longo da linha de transmissão identificando as cadeias de isoladores. É essencial que o sistema de fixação entre o módulo robótico e o VANT seja seguro e confiável, evitando qualquer possibilidade de desconexão acidental durante o transporte.

#### 4.2.2 Geometria do Módulo Robótico de lavagem

Foi pensada em uma geometria simples para esse módulo, uma vez que, como ele não vai ser apoiado no cabo. Sendo assim, o módulo foi desenvolvido para ser implementado junto a base do drone, como pode ser visto na Figura 9.

Figura 9: Módulo Robótico para Lavagem da Cadeia de Isoladores.



Fonte: Autor

#### 4.2.3 Mecanismo de Fixação no VANT

No protótipo anterior, o módulo era fixado no VANT através de presilhas e fitas de metal, conforme Figura 10.

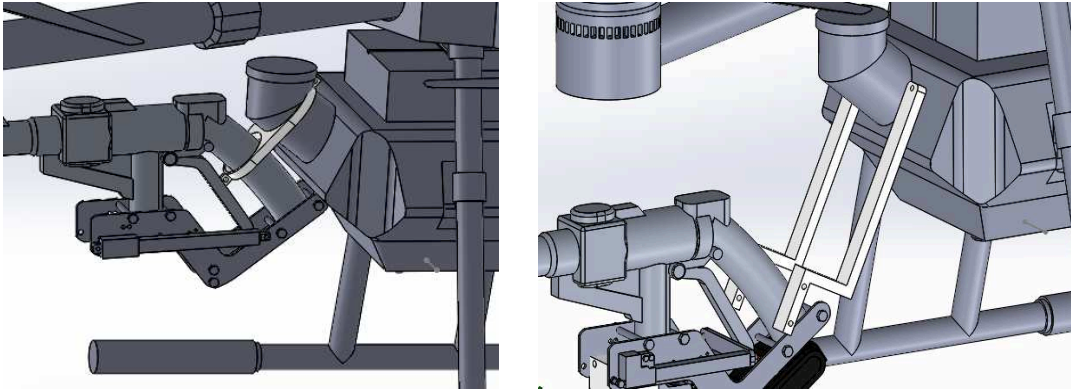
Figura 10: Montagem anterior do módulo.



Fonte: Autor

Durante o desenvolvimento, foram sugeridas algumas outras alterações, através de peças que poderiam prender a lavadora diretamente no tanque de água. É possível ver dois exemplos na Figura 11.

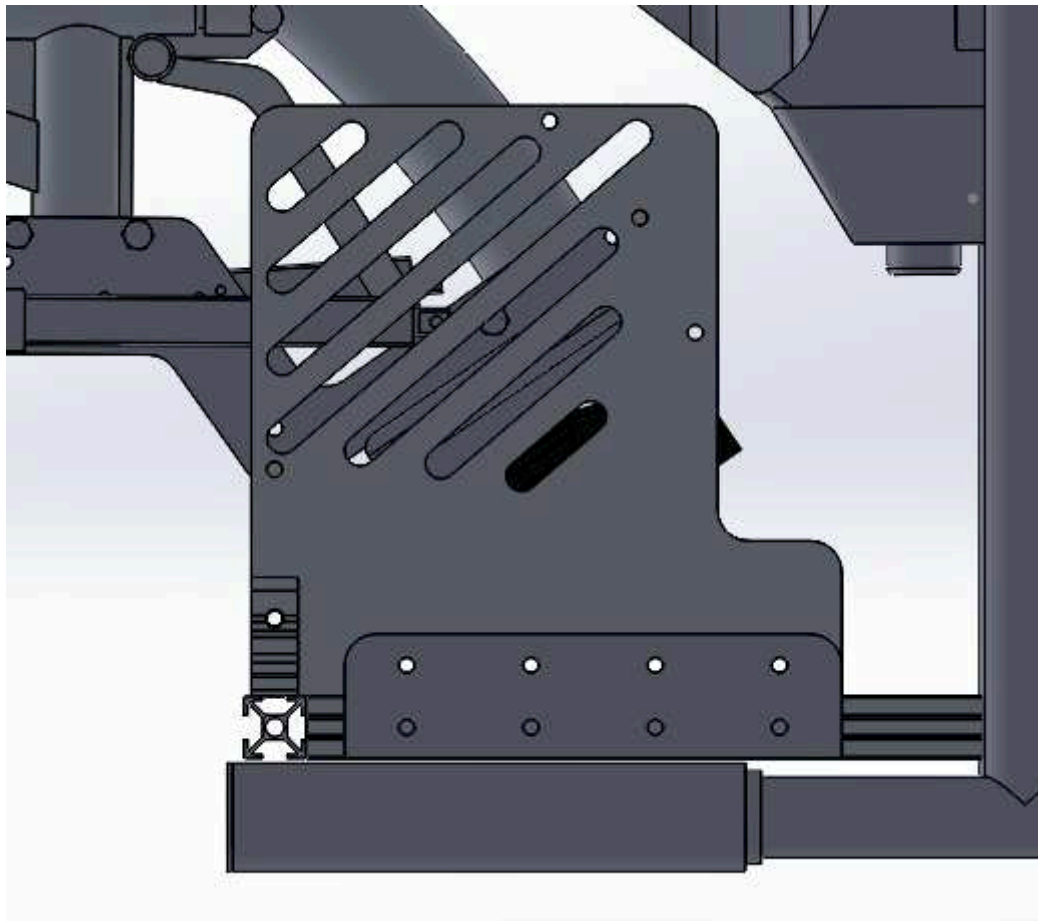
Figura 11: Ideias para acoplamento da lavadora no drone.



Fonte: Autor

Assim, após testes e simulações, para a fixação do módulo no drone, foi desenvolvido uma placa que poderia ser acoplada diretamente nas furações já existentes nas peças do módulo.

Figura 12: Mecanismo de fixação do Módulo de Lavagem.



Fonte: Autor.

#### 4.2.4 Análises Estáticas

Considerando que o módulo robótico desenvolvido será transportado por meio de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), há uma restrição quanto à massa que pode ser suportada. Portanto, é necessário realizar uma análise para garantir que o limite de massa seja respeitado e evitar possíveis falhas estruturais.

Para realizar essa análise foi utilizado o software de modelagem e simulação de CAD SolidWorks. Foram realizadas simulações estáticas para avaliar o comportamento da estrutura do módulo robótico sob diferentes condições de carga. O objetivo era determinar se a estrutura suportaria aos esforços, sem ultrapassar o limite de massa e sem apresentar rupturas.

Após as análises, foi concluído que a Liga de Alumínio 1060 é um material adequado para a estrutura do módulo robótico. Nas simulações realizadas no SolidWorks, esse material demonstrou não sofrer rupturas mesmo quando submetido às cargas e às condições de transporte previstas.

#### 4.2.5 Melhorias a serem feitas no módulo

Foram observados alguns problemas que foram corrigidos durante a execução do projeto, como o desafio da fixação da lavadora no drone para ser de fácil montagem/desmontagem. Além disso, o módulo deveria ser capaz de realizar a operação de lavagem em 3 posições diferentes. Estas melhorias serão demonstradas na seção de Resultados.

### **4.3 Módulo robótico para instalação/desinstalação dos amortecedores de vibração do tipo Stockbridge**

Nesta etapa do projeto, foi concebido um módulo robótico que é transportado por um drone a partir de uma base instalada no solo para ser colocada no cabo. Então, o módulo se desloca ao longo do cabo até o local designado para a instalação do amortecedor do tipo Stockbridge. Esse deslocamento é realizado por meio de um sistema de motores e eixos que permitem a movimentação controlada do módulo.



Após a fixação do amortecedor, o módulo se desloca até o ponto de acoplamento ao drone, que o transporta de volta ao solo.

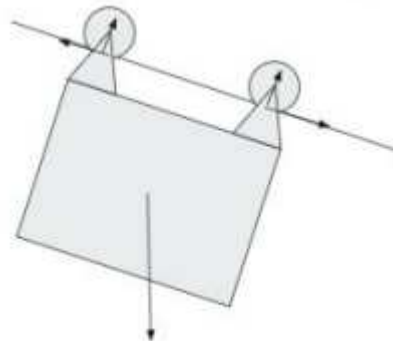
Para viabilizar o acoplamento e desacoplamento do módulo robótico, foi projetada uma placa metálica equipada com um eletroímã. Esse sistema possibilita a realização do acoplamento ao módulo robótico, permitindo seu transporte a partir do solo e a subsequente soltura no cabo para execução das tarefas previstas. Esse sistema de fixação será descrito na Seção 4.3.4.

#### 4.3.1 Locomoção do módulo no cabo

Para a locomoção do módulo no cabo, foi pensado em um modelo para a geometria do mesmo e quais motores poderiam ser usados para a movimentação.

Inicialmente, pensou-se em utilizar uma geometria que permite deixar o centro de massa abaixo do cabo. Em um primeiro protótipo, pensou-se em utilizar um modelo próximo ao da imagem da Figura 13:

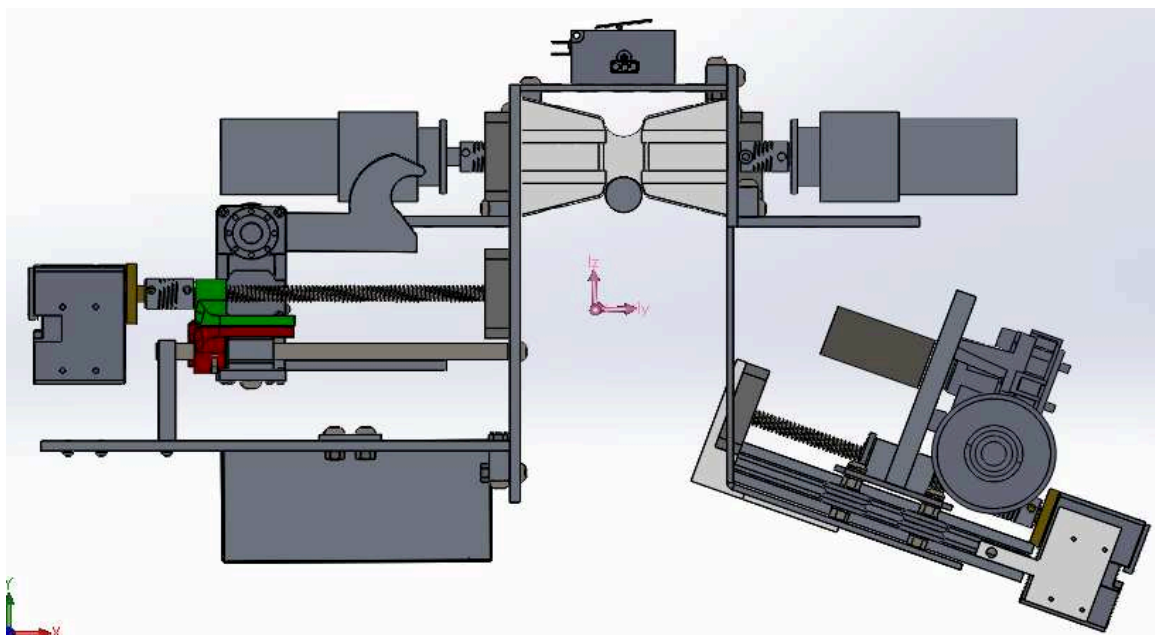
Figura 13 - Modelo simplificado para cálculo.



Fonte: Autor

Porém, com o desenvolvimento da pesquisa, verificou-se que esse modelo não atendia a todos os requisitos do projeto. Assim, após uma adaptação desse modelo a seguinte geometria para o módulo robótico foi desenvolvida, Figura 14.

Figura 14 - Geometria do Módulo Robótico



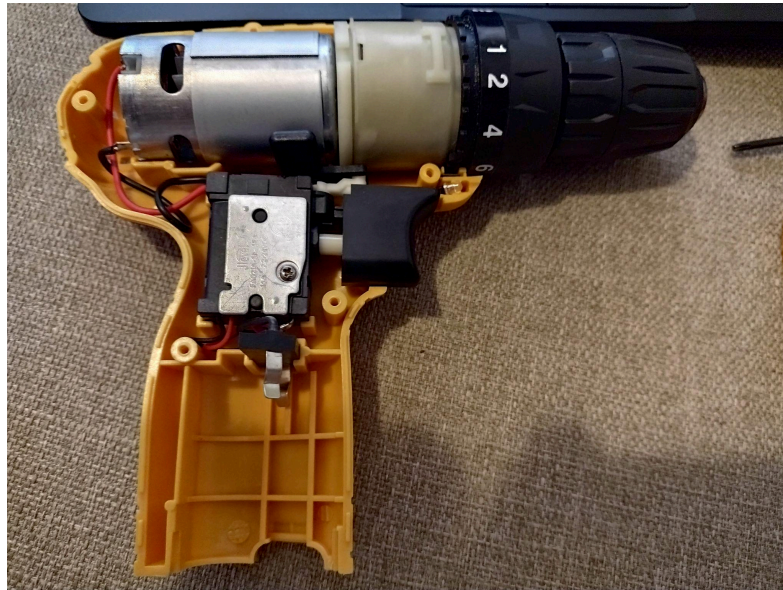
Fonte: Autor

Com esse formato, é possível atender a todos os requisitos do projeto e, ainda, utilizar a própria geometria como uma guia no momento de deixar o módulo no cabo. Ainda sobre esse formato, é possível, no momento da instalação, suportar o amortecedor dentro da estrutura, o que facilita todo o processo.

Inicialmente, foi pensando na utilização do motor XM540-W270-T/R, da Robotis/Dynamixel, porém com o desenvolvimento do projeto, percebeu-se que esse motor não possuía o torque suficiente para fazer a locomoção da estrutura, devido à elevada massa.

Assim, foi utilizado um motor de parafusadeira modelo CHEVROLET-GM3401 com capacidade de torque até 23 Nm, velocidade em vazio de 1350 RPM e alimentação de 12V.

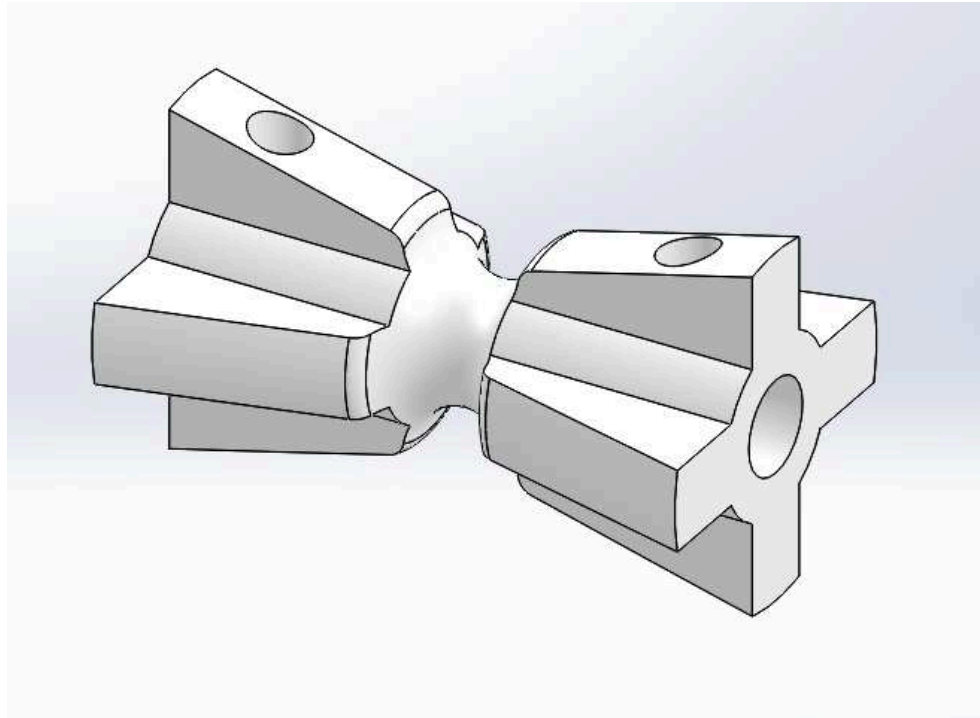
Figura 15 - Motor de parafusadeira DC com caixa de redução utilizado.



Fonte: Autor

Ainda para a locomoção do módulo no cabo, será utilizado uma polia de ABS, com um eixo de metal por dentro, o que permite a fixação aos acoplamentos elásticos e ao motor. A escolha do material de ABS foi devido à alta massa que a polia inicialmente se encontrava, visto que ela possui 100mm de largura servindo de guia para o acoplamento no cabo e possuindo cravos especialmente projetados para permitir a transposição do amortecedor instalado, Fig. 16.

Figura 16 - Polia ABS



Fonte: Autor

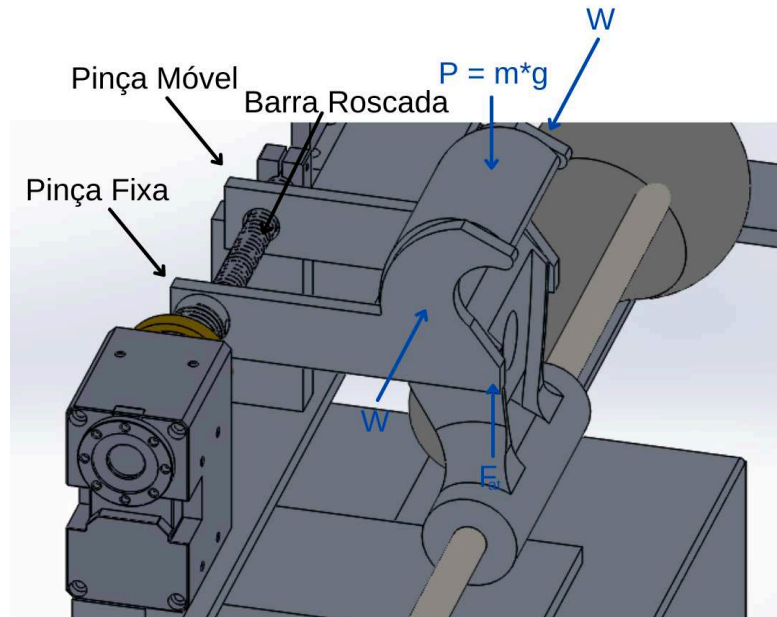
É possível perceber que essa polia possui uma geometria que faz com o que o cabo fique no centro, permitindo mais estabilidade ao projeto.

#### 4.3.2 Mecanismo de pinça

Para o processo de movimentação e instalação do amortecedor Stockbridge, foi preciso pensar em um sistema que atendesse as necessidades do projeto em termos de geometria e eletrônica.

Assim, projetou-se um sistema com fuso de transmissão de potência, comumente usados em macacos mecânicos por ser classificado como um mecanismo auto travante, Figura 17.

Figura 17 - Mecanismo de pinça

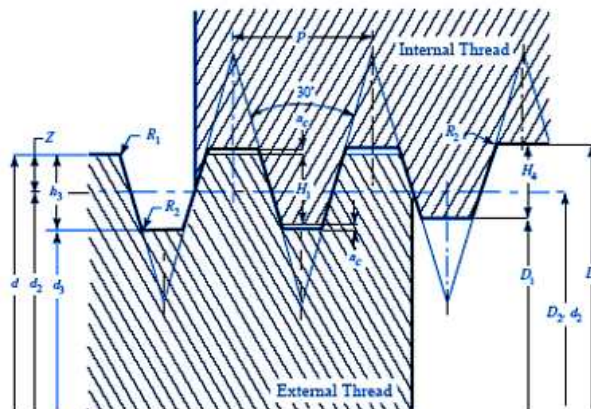


Fonte: Autor

O mecanismo da Figura 17 é composto por duas pinças, um fuso e um motor que a move. Assim, para o movimento de soltar o amortecedor, a barra deve girar e o próprio giro faz com que a pinça rotacione em torno do eixo da barra.

Após definir o mecanismo, é necessário escolher as propriedades do fuso e do motor. Para esse tipo de tarefa, é bem comum o uso do perfil trapezoidal de rosca, Figura 18, pois este oferece grande resistência à esforços aplicados na direção do eixo.

Figura 18 - Perfil de rosca



Fonte: ISO 2901

É importante que o fuso adotado seja auto-travante, e para isso, segundo Juvinal, R. C., & Marshek, K. M. (2011), deve respeitar a Equação (1):

$$f \geq L \frac{\cos(\alpha_n)}{(\pi \cdot d_m)} \quad (1)$$

onde,

$f$  - coeficiente de atrito entre o material da rosca interna e o material da rosca externa (0.5);

$L$  - Passo da rosca;

$\alpha_n$  - ângulo do perfil da rosca ( $30/2=15^\circ$ );

$d_m$  - diâmetro nominal da rosca;

Portanto, a partir dessa equação, foi escolhida uma rosca com diâmetro nominal de 8 mm e passo de 2 mm, que são suficientes para que seja auto-travante. Com esses parâmetros definidos, é necessário, agora, escolher o motor responsável para desempenhar um torque mínimo capaz de segurar o amortecedor.

Para isso, é preciso calcular a força normal à superfície do amortecedor para que ele não caia. Foi feita então uma análise estática do sistema, utilizando a Equação (2), conforme Figura 17:

$$T = \frac{W d_m f \pi d_m - L \cos(\alpha_n)}{2 \pi d_m \cos(\alpha_n) + f L} + \frac{W f_c d_c}{2} \quad (2)$$

onde,

$f$  - coeficiente de atrito entre o material da rosca interna e o material da rosca externa, ambos alumínio (0.5);

$f_c$  - coeficiente de atrito entre o material do colar da rosca e de seu apoio, ambos alumínio (0,5);

$L$  - Passo da rosca (0,002 m);

$\alpha_n$  - ângulo do perfil da rosca ( $15^\circ$ );

$d_m$  - diâmetro nominal da rosca (0,008 m);

$T$  - torque do motor

$W$  - carga que o mecanismo precisa desempenhar

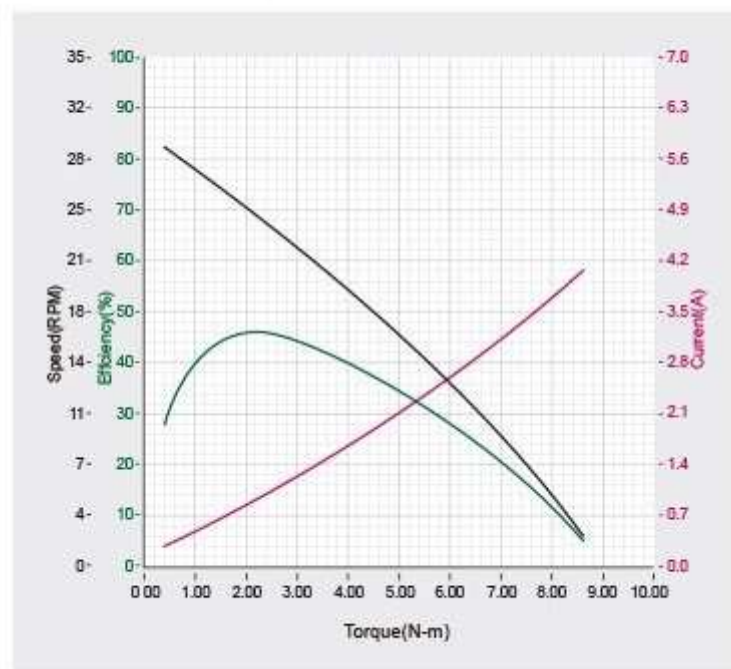
$g$  - gravidade ( $9,81 \text{ m/s}^2$ );

$m$  - massa do amortecedor;

$\mu$  - o coeficiente de atrito entre a pinça e o amortecedor (0,8);

Tem-se, então, que o valor do torque mínimo do motor deve ser de  $0,47 \text{ Nm}$ . Para isso, foi selecionado o motor XM540-W270-T/R, da Robotis/Dynamixel, Fig. 19:

Figura 19 - Gráfico de performance.



Fonte: Robotis

#### 4.3.3 Mecanismo de instalação do módulo

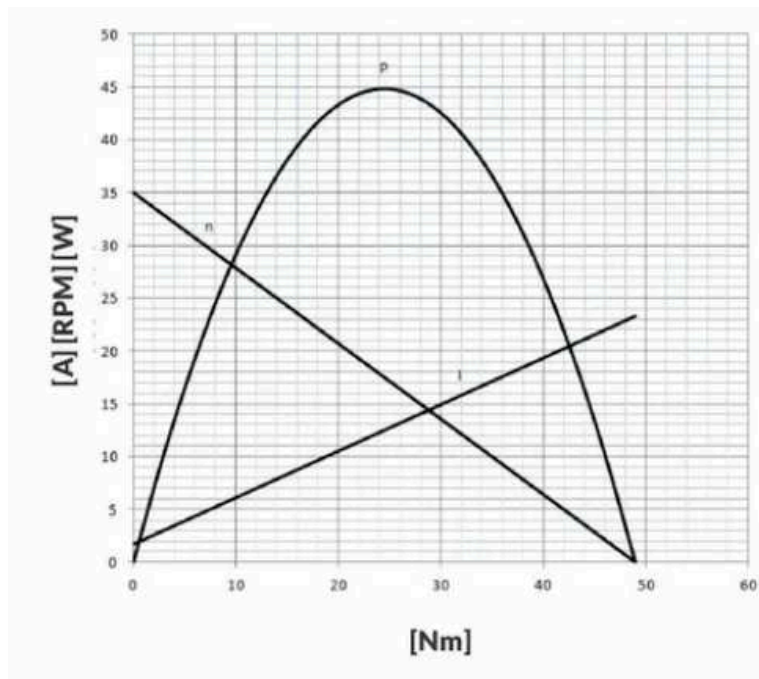
O próximo aspecto a ser definido é o motor responsável por fazer a instalação do amortecedor Stockbridge. Para isso, é importante saber o torque necessário determinado pela fabricante do equipamento.

A CELESC disponibilizou para o Laboratório de Automação e Robótica da UFU (LAR) dois exemplares do modelo utilizado, juntamente com as dimensões e especificações técnicas. A partir dos dados adquiridos, tem-se que o amortecedor em questão requer um torque de aperto do parafuso de  $40 \text{ Nm}$ , isso implica que o motor responsável por essa tarefa deverá desempenhar esse torque mínimo.

Após várias pesquisas no mercado de motores que atendessem os requisitos de torque e não extrapolam os limites de peso do projeto foi encontrado o modelo MB03012, da TEK8.

Esse modelo possui uma massa de 1,7 kg, o que o torna viável dentro da limitação de peso, e requer uma voltagem de 12 V. Analisando seu gráfico, pode-se observar que para atingir o torque de 40 N.m, consome aproximadamente 19 A, Figura 20.

Figura 20 - Gráfico de performance do MB03012

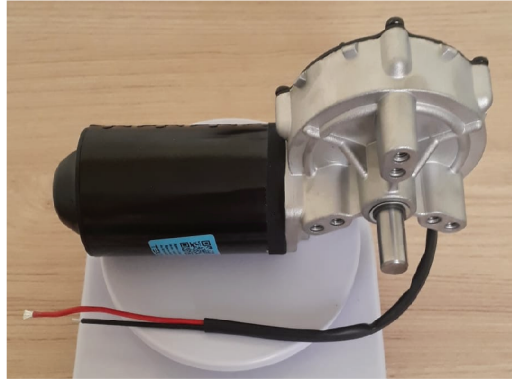


Fonte: TEK8

Visto que o amortecedor requer cerca de 40 Nm para a instalação, os 50 Nm são para uma margem de segurança e, dessa forma, essa solução se mostrou viável.

Figura 21 - Motorreductor utilizado





Fonte: Autor

Para fazer a translação ao longo do eixo do parafuso de fixação, optou-se por utilizar um sistema de eixos e motor, utilizando outro motor XM540-W270-T/R.

Para fazer a translação desses componentes, o motor deve transportar uma carga de 1575 g por aproximadamente 50 mm. Através da Equação 3, pode-se calcular o torque que esse motor deve desempenhar:

$$T = \frac{Wd_m}{2} \left( \mu \sec \left( \frac{15\pi}{180} \right) + \frac{\tan \left( \frac{\alpha\pi}{180} \right)}{1 - \left( \mu \sec \left( \frac{15\pi}{180} \right) \tan \left( \frac{\alpha\pi}{180} \right) \right)} \right) \quad (3)$$

onde,

$T$  - torque do motor

$W$  - carga que o mecanismo precisa carregar (1575 g);

$\alpha_n$  - ângulo do perfil da rosca (15°);

$d_m$  - diâmetro nominal da rosca (0,008 m);

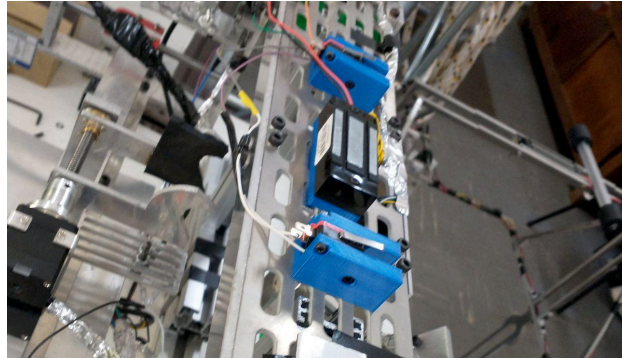
$\mu$  - coeficiente de atrito do material (0,5).

Tem-se, então, que o valor do torque mínimo do motor deve ser de 0,082 Nm. Sendo assim, como já demonstrado na Figura 8, o motor XM540-W270-T/R, da Robotis/Dynamixel, possui o torque necessário para fazer a translação do sistema.

#### 4.3.4 Mecanismo de fixação no VANT

Sabendo que o módulo é levado ao cabo por meio de um VANT, é importante que seja pensado algum mecanismo de acoplamento rápido e simples. A solução encontrada foi a utilização de um eletroímã alimentado pela bateria do módulo. O modelo escolhido foi o de uma fechadura magnética como na Figura 22.

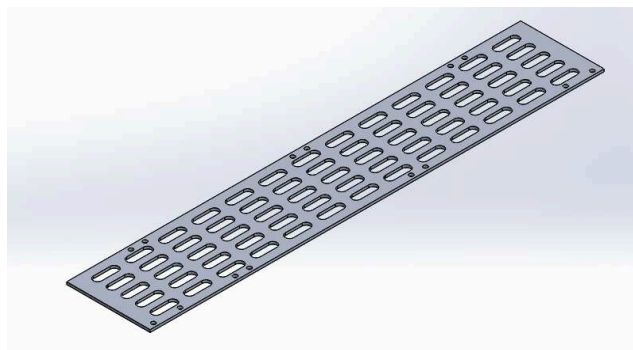
Figura 22 - Fechadura Magnética.



Fonte: Autor

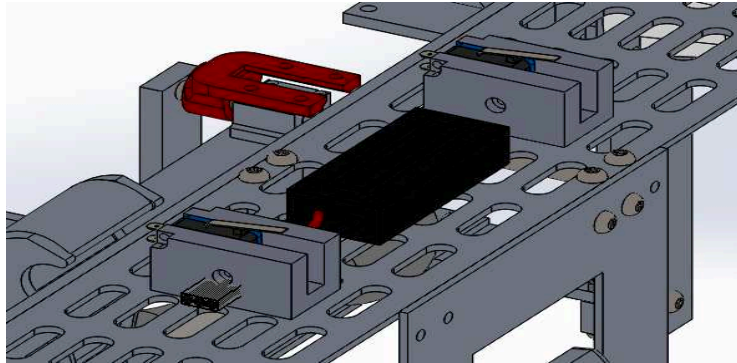
Essa escolha foi tomada devido às grandes cargas que esse mecanismo é capaz de sustentar (90 kg). A peça será acoplada no drone, enquanto o módulo possui uma placa de alumínio para fazer a fixação dos componentes, Figura 23.

Figura 23 - Placa de alumínio do módulo



Fonte: Autor

Figura 24 - Acoplamento entre fechadura e módulo



Fonte: Autor

#### 4.3.5 Sistema de alimentação

Para alimentar todos os componentes é necessário fazer o uso de baterias. É importante que esse componente tenha duas características: ser capaz de fornecer corrente elétrica para todos os componentes e não exceder as restrições de massa do sistema.

Para definir as especificações técnicas das baterias a serem usadas, foram considerados os componentes que o sistema possui. É preciso levar em consideração que, além dos motores de locomoção e dos mecanismos de translação do amortecedor e do motorreductor, temos também o sistema de controle, composto por um Raspberry Pi e um ESP32, bem como reguladores de tensão e um monster shield. A descrição completa do sistema de controle e funcionamento deste não é escopo deste trabalho.

No mercado, existem diversos tipos de bateria, entretanto, os modelos comerciais que possuem maior quantidade de energia por unidade de massa são as caracterizadas como LiPo, que possuem polímeros de lítio em sua composição. O LAR dispõe de baterias de LiPo, com as seguintes especificações técnicas: 5200mAh, 11.1 V, 15-30 C, portanto esse foi o modelo escolhido.

Para suprir as necessidades do sistema, foram utilizadas duas baterias desse modelo, uma para o sistema de controle e movimentação e outra para o sistema de instalação do amortecedor. Para a primeira bateria, têm-se os seguintes componentes:

Tabela 1 - Componentes Sistema Controle

Componente	Consumo [mA]
Raspberry Pi 3B+	2000
Motores Dynamixel	12,6
Lora ESP32	120
Motores CHEVROLET-GM3401	2600

Dessa forma, tem-se um consumo total de 4733 mA, o que está dentro da capacidade fornecida pela bateria de LiPo. Calculando o tempo estimado de funcionamento desse sistema, temos que a bateria pode fornecer até 54 minutos de operação.

Para a instalação, foi utilizado o motorreductor, o qual requer uma alimentação maior de 20 A para desempenhar o torque necessário para a instalação do amortecedor. Assim, utilizando uma bateria apenas para esse sistema, temos um tempo estimado de funcionamento de 16 minutos.

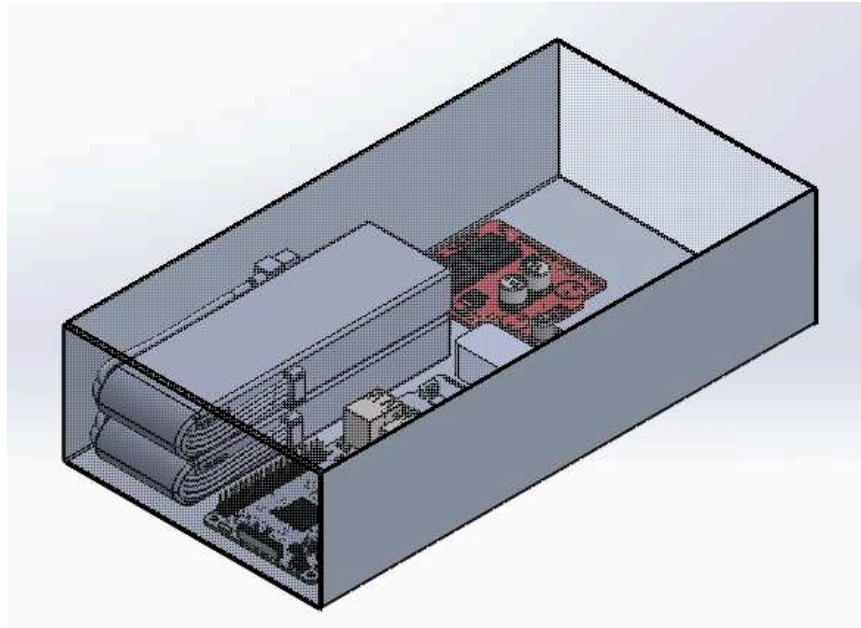
Figura 25 - Bateria de LiPo



Fonte: Loja Floripa Hobby

Para alocar todas as baterias e componentes eletrônicos do sistema de controle, foi utilizada uma caixa de alumínio, que também permite a blindagem do sistema. A blindagem contra as interferências eletromagnéticas não é objetivo deste trabalho.

Figura 26 - Caixa de alumínio



Fonte: Autor

#### 4.3.6 Análises Estáticas

Como o modelo robótico desenvolvido será transportado por um VANT, a limitação de massa é imposta. Por esse motivo é importante retirar material, fazendo as devidas análises estáticas atendendo ao limite de massa e evitando o rompimento.

As análises foram feitas utilizando o software de CAD SolidWorks e chegou-se à conclusão que a Liga de Alumínio 1060 pode ser usada na estrutura do módulo, pois se trata de um material que não sofreu ruptura nas simulações.

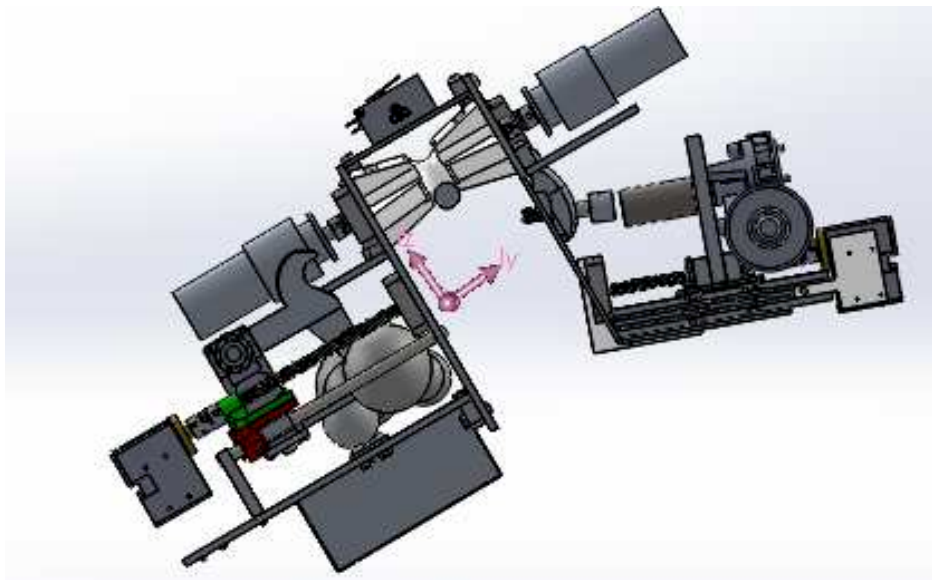
#### 4.3.7 Análises Dinâmicas

Além das análises estáticas, foram feitas, também, simulações dinâmicas com o modelo no cabo. Com esses estudos foi possível fazer vários testes para melhorar a estabilidade do módulo no cabo, além de corrigir eventuais problemas com o centro de massa do projeto, o qual deve estar mais ao meio possível e abaixo do cabo, para o módulo não cair do cabo.

A partir disso, mostrou-se importante a adição de um sistema de balanceamento, que é composto por um contrapeso feito de aço. Tal material foi escolhido em função de ter uma

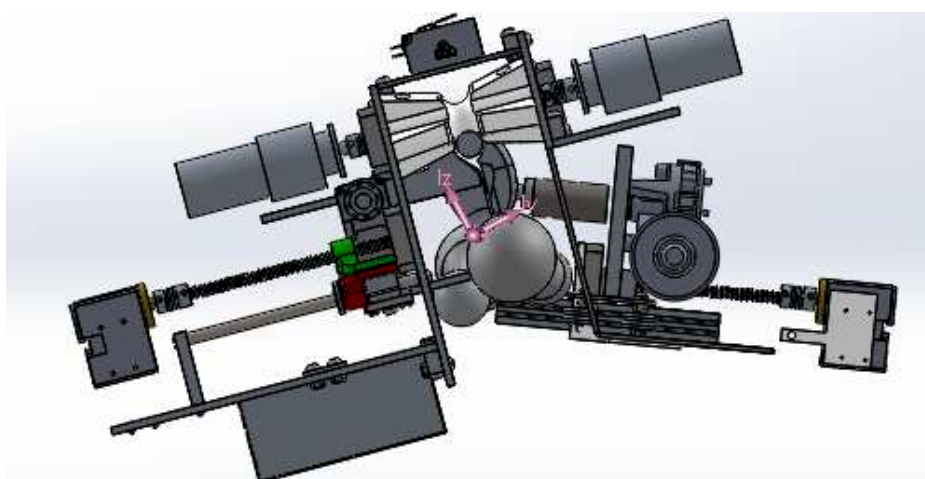
densidade maior que o alumínio e, assim, nos permite fazer um bloco que ocupe um espaço menor e tenha massa suficiente para o balanceamento necessário. Para ilustrar tal questão, podemos visualizar os centros de massa antes e após a instalação do amortecedor nas Figuras 27 e 28:

Figura 27 - Centro de massa antes da instalação do amortecedor



Fonte: Autor

Figura 28 - Centro de massa após a instalação do amortecedor



Fonte: Autor

#### 4.3.8 Melhorias a serem feitas no módulo

Sendo assim, foram observadas algumas melhorias a serem corrigidas neste projeto, como a troca do sistema de acoplamento do amortecedor, bem como otimizações para fixação do módulo no drone e diminuição da massa total do projeto. Tais melhorias serão melhor visualizadas na seção de Resultados.

### **4.4 Módulo robótico para instalação dos amortecedores de vibração pré-formados**

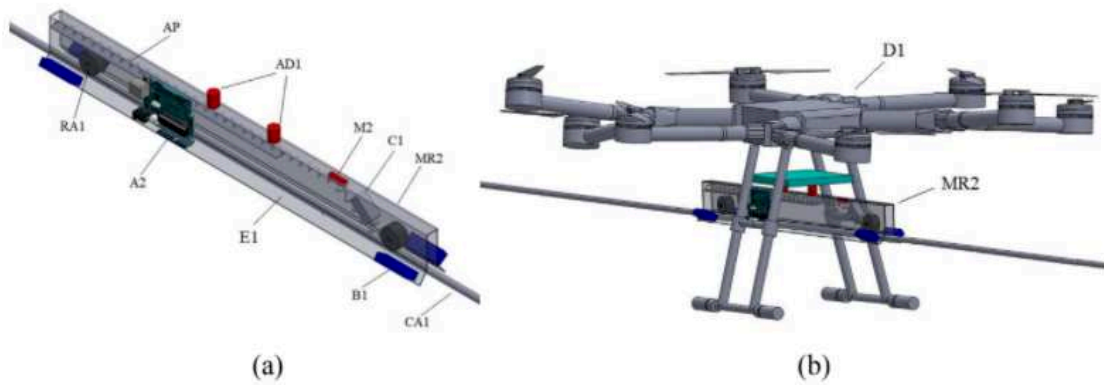
Inicialmente, foi realizado um estudo com o objetivo de buscar referências de módulos robóticos semelhantes e compreender o funcionamento desses sistemas. Durante a pesquisa, foi identificado um módulo robótico utilizado para a instalação de sinalizadores avifauna em cabos. Essa referência foi considerada relevante para compreender a dinâmica de locomoção e instalação necessária para o amortecedor de vibração pré-formado, uma vez que os processos são semelhantes.

Foi concebida uma estrutura de módulo robótico que é transportada a partir de uma base instalada no solo por meio do drone, sendo posteriormente fixada no cabo. Após esse processo, o módulo se desloca ao longo do cabo até o local designado para a instalação do amortecedor de vibração pré-formado. Esse deslocamento é possível devido à utilização de um sistema composto por motores e eixos, que permite a movimentação controlada do módulo ao longo do cabo.

Após a conclusão do processo de fixação do amortecedor, o módulo robótico se desloca novamente no cabo até o ponto de acoplamento ao drone, que o transporta de volta ao solo. Para viabilizar o acoplamento e desacoplamento do módulo robótico, foi projetada uma placa metálica equipada com um eletroímã, que permite a sua fixação ao drone. Esse mecanismo possibilita o transporte do módulo robótico a partir do solo e sua subsequente soltura no cabo para execução das tarefas previstas.

A Figura 29 ilustra o conceito do drone-robô para instalação/remoção de amortecedores de vibração do tipo pré-formado, sendo apresentada a ideia do projeto na Figura 29(a), enquanto a Figura 29(b) mostra o módulo robótico acoplado ao drone.

Figura 29 - (a) Módulo robótico para instalação/remoção de amortecedores de vibração pré-formado; (b) Acoplamento com o drone.



Fonte: Autor

#### 4.4.1 Locomoção do módulo no cabo

Para a locomoção do módulo no cabo, foi pensado em um modelo para a geometria do mesmo e quais motores poderiam ser usados para a movimentação.

Inicialmente, pensou-se em utilizar uma geometria que permite deixar o centro de massa bem abaixo do cabo. Em um primeiro protótipo, pensou-se em utilizar um modelo próximo ao da imagem da Fig. 8.

Porém, com o desenvolvimento da pesquisa e após vários testes, verificou-se que esse modelo não atendia a todos os requisitos do projeto. Assim, após uma adaptação desse modelo, chega-se à seguinte geometria para o módulo robótico, Fig. 30.

Figura 30 - Geometria do Módulo Robótico





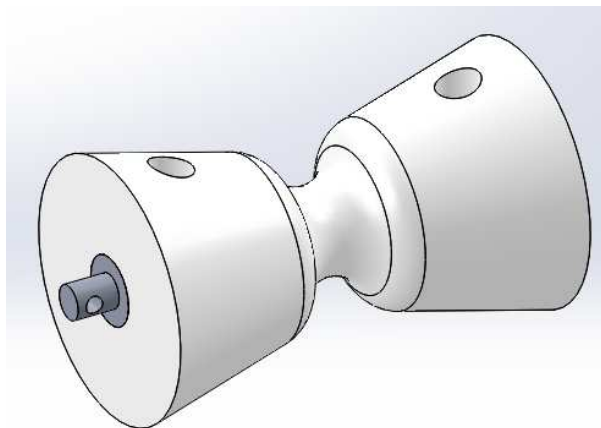
Fonte: Autor

Com esse formato, é possível atender a todos os requisitos do projeto e, ainda, utilizar a própria geometria como uma guia no momento de deixar o projeto no cabo.

Para a locomoção, foi utilizado um motor de parafusadeira modelo CHEVROLET-GM3401.

Ainda para a locomoção do módulo no cabo, será utilizado uma polia de ABS, com um eixo de metal por dentro, o que permite a sua fixação aos acoplamentos elásticos e ao motor, Figura 31.

Figura 31 - Polia ABS

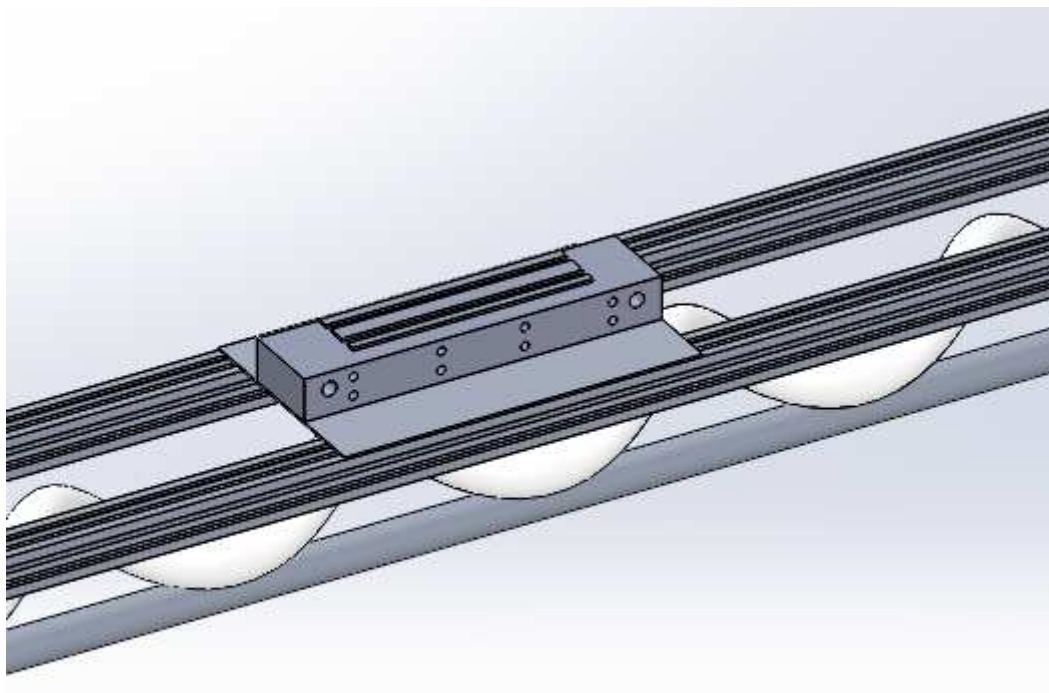


Fonte: Autor

#### 4.4.2 Mecanismo de fixação no VANT

Sabendo que o módulo é levado ao cabo por meio de um VANT, é importante que seja pensado algum mecanismo de acoplamento rápido e simples. A solução encontrada foi a utilização de uma fechadura magnética com capacidade de carga de 90 kg alimentada pela bateria do módulo, conforme detalhado nos modelos anteriores, Figura 32.

Figura 32 - Sistema de acoplamento



Fonte: Autor

#### 4.4.3 Sistema de alimentação

Para alimentar os componentes é necessário fazer o uso de baterias. É importante que esse componente tenha duas características: ser capaz de fornecer corrente elétrica para todos os componentes e não exceder as restrições de massa do sistema.

Para definir as especificações técnicas das baterias a serem usadas, deve-se considerar os componentes que o sistema possui. É preciso levar em consideração que, além dos motores de locomoção e dos mecanismos de instalação do amortecedor, temos também o sistema de

controle. A descrição completa do sistema de controle e funcionamento não é escopo deste trabalho.

No mercado, existem diversos tipos de bateria e novamente foram utilizadas baterias de LiPo [8], com as seguintes especificações técnicas: 5200mAh, 11.1 V, 15-30 C. Para suprir as necessidades do sistema foram utilizadas 2 baterias desse modelo.

Os seguintes componentes utilizarão a bateria:

Tabela 2 - Componentes do Sistema Controle

<b>Componente</b>	<b>Consumo [mA]</b>
Motores Dynamixel	12,6
Motores CHEVROLET-GM3401	2600

Dessa forma, temos um consumo total de 2612,6 mA, o que está dentro da capacidade fornecida pela bateria de LiPo. Calculando o tempo estimado de funcionamento desse sistema, temos que a bateria pode fornecer até 2 horas de operação.

#### 4.4.4 Análises Estáticas

Como o modelo robótico desenvolvido será carregado por um VANT, a limitação de massa deve ser considerada. Por esse motivo é importante retirar material, fazendo as devidas análises estáticas atendendo ao limite de massa e evitando o rompimento.

As análises foram feitas utilizando o software de CAD SolidWorks e chegou-se à conclusão que uma estrutura de perfis de alumínio de 20 mm pode ser usada na estrutura do módulo, além de chapas de Liga de Alumínio 1060, pois se trata de um material que não sofreu ruptura nas simulações otimizadas.

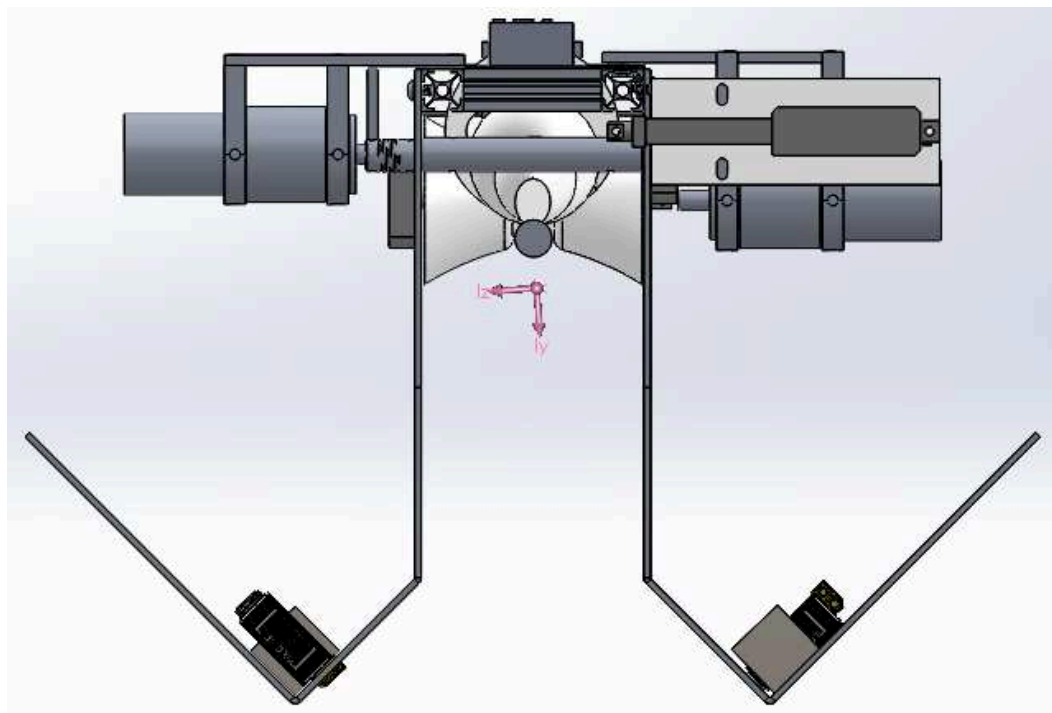
#### 4.4.5 Análises Dinâmicas

Além das análises estáticas, foram feitas, também, simulações dinâmicas com o modelo no cabo. Com esses estudos foi possível fazer vários testes para melhorar a estabilidade do módulo no cabo, além de corrigir eventuais problemas com o centro de massa

do projeto, o qual deve estar mais ao meio possível e abaixo do cabo, para o módulo não cair do cabo.

A partir disso, mostrou-se importante a adição de um sistema de balanceamento, que é composto pelas baterias e por um contrapeso feito de aço. Tal material foi escolhido em função de ter uma densidade maior que o alumínio e, assim, nos permite fazer um bloco que ocupe um espaço menor e tenha massa suficiente para o balanceamento necessário. Para ilustrar tal questão, pode-se visualizar o centro de massa na Figura 33:

Figura 33 - Centro de massa



Fonte: Autor

#### 4.4.6 Melhorias a serem feitas no módulo

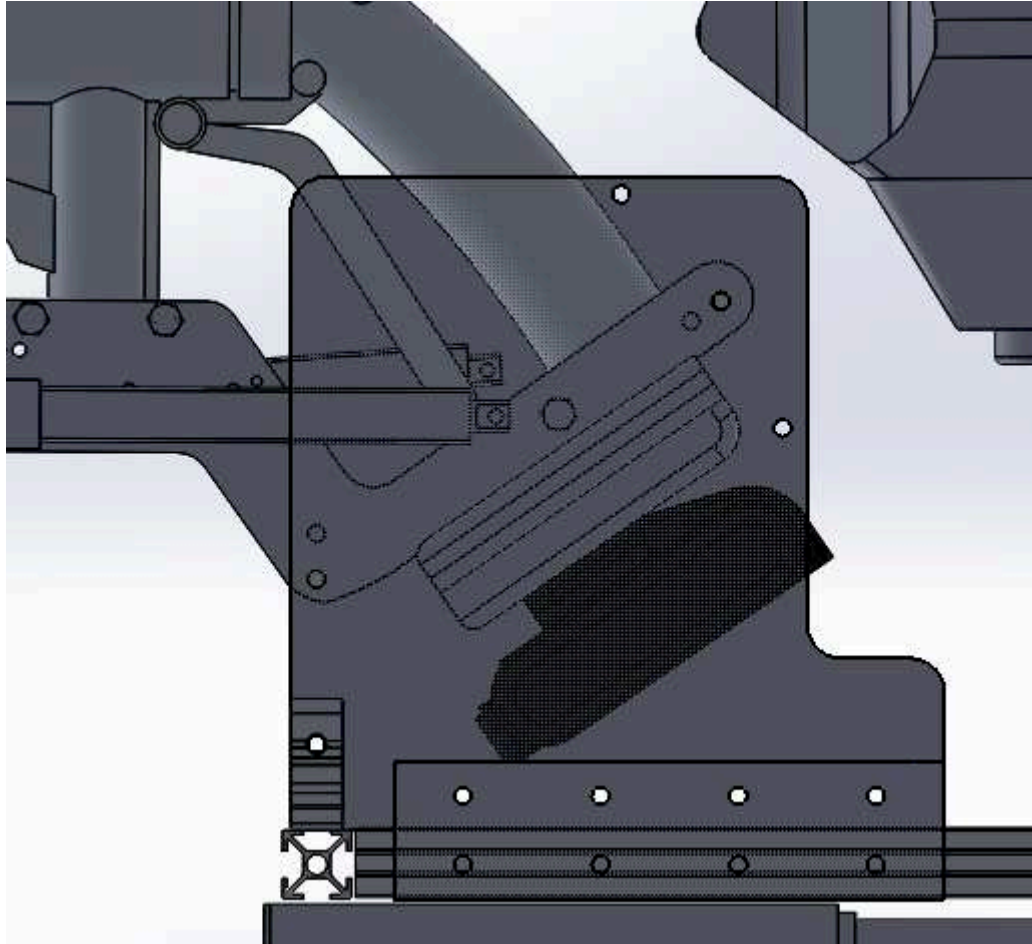
Portanto, foram observadas algumas melhorias a serem realizadas neste projeto, como um novo sistema para a instalação do amortecedor, junto com o desenvolvimento de um novo bocal para exercer essa função. Tais melhorias poderão ser observadas com mais detalhes na seção de Resultados.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Melhorias no módulo robótico para limpeza de cadeias de isoladores

Foi possível realizar algumas melhorias no módulo como a troca do sistema de acoplamento no drone. Pode-se observar o novo sistema de acoplamento na Figura 34.

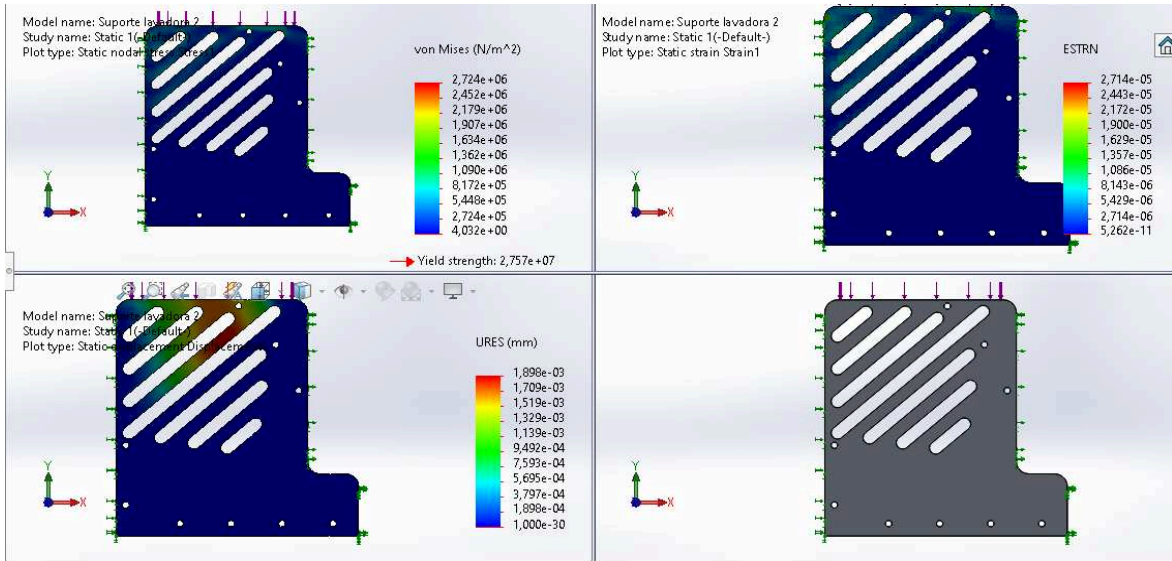
Figura 34: Sistema de acoplamento do módulo.



Fonte: Autor

A placa de acoplamento foi produzida em Alumínio 1060, pois resistiu aos esforços impostos na simulação, através do software de CAD SolidWorks. Para a simulação, foi utilizada uma força de 34 N, levando em consideração o peso da Lavadora, aproximadamente 1,7kg, e utilizando um fator de segurança de 2. Na Figura 35, é possível observar o resultado da simulação estática da peça.

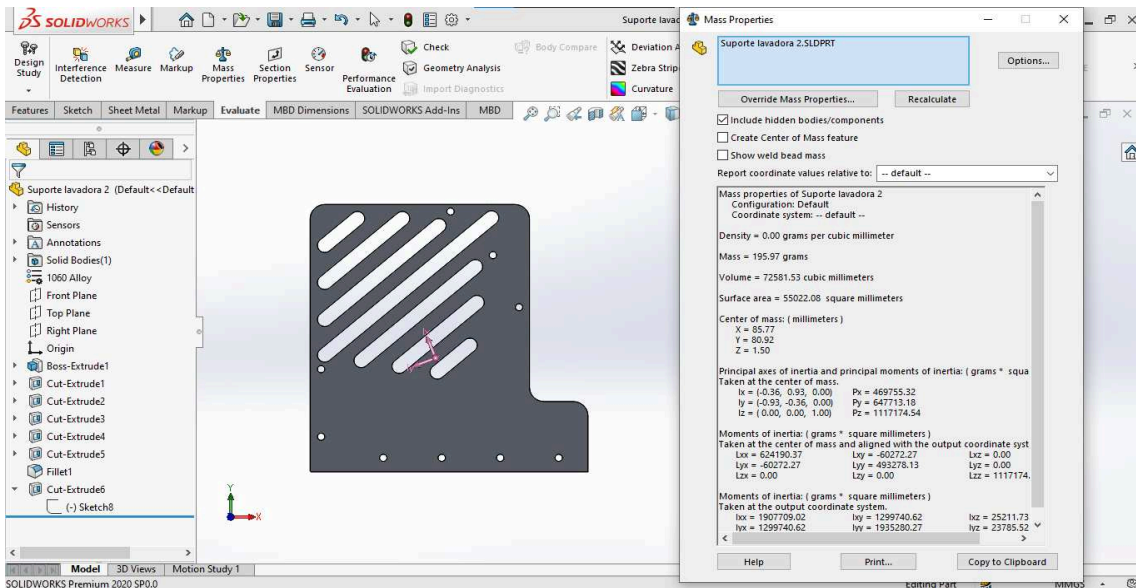
Figura 35: Simulação Estática da peça de fixação da lavadora.



Fonte: Autor

Além disso, é importante salientar a preocupação com o peso total do projeto. Para isso, foram feitos rasgos na peça com o objetivo de diminuir a massa. Assim, foi possível atingir uma massa de 195,97 g para cada uma das peças. É possível ver tais dados na Figura 36:

Figura 36: Massa da peça de fixação da Lavadora no software SolidWorks.

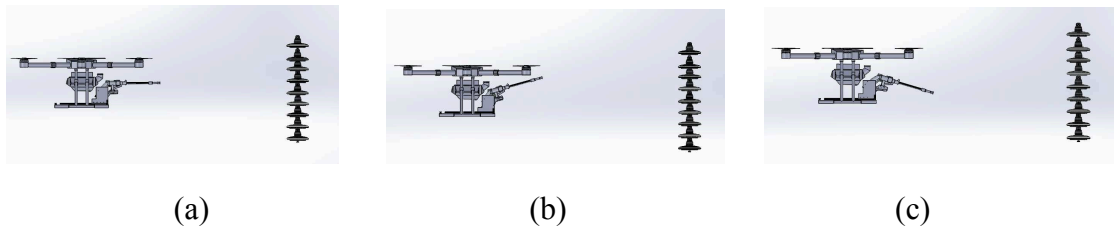


Fonte: Autor.

Para evitar maiores riscos durante o manuseio do módulo, foram feitos filetes nas peças, com o objetivo de arredondar os cantos das peças, para maior segurança.

Além disso, na Figura 37, é possível observar as 3 posições que a lavadora deverá exercer durante a operação de limpeza.

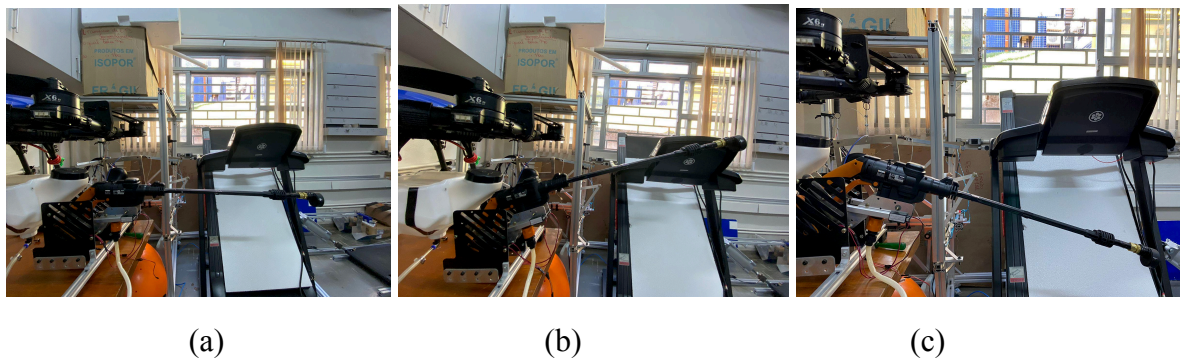
Figura 37: Posições que a lavadora deverá exercer na operação de limpeza. (a) posição de limpeza horizontal; (b) limpeza com a lavadora para cima e (c) para baixo.



Fonte: Autor

É possível visualizar o protótipo do módulo para limpeza de cadeias de isoladores nas três configurações na Figura 38:

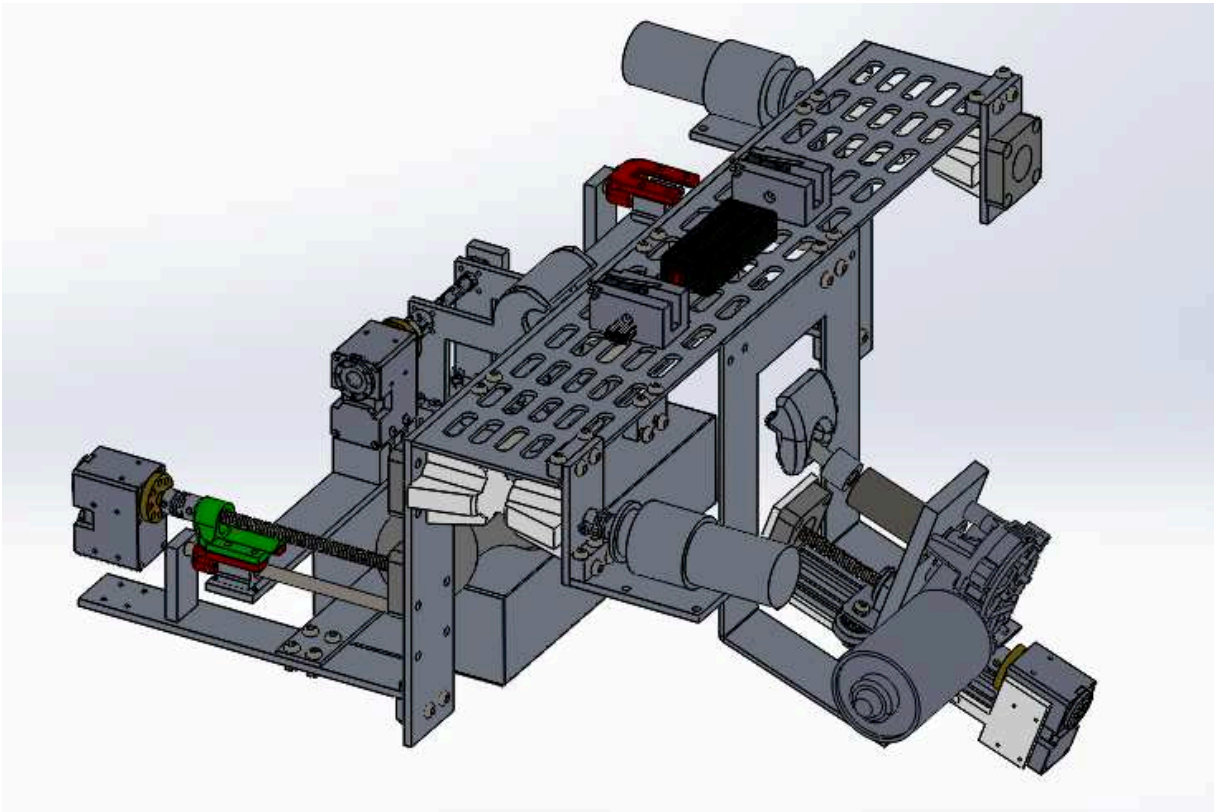
Figura 38: Protótipo do módulo nas três posições. (a) posição de limpeza horizontal; (b) limpeza com a lavadora para cima e (c) para baixo.



## 5.2 Melhorias no módulo robótico para instalação/desinstalação dos amortecedores de vibração do tipo stockbridge

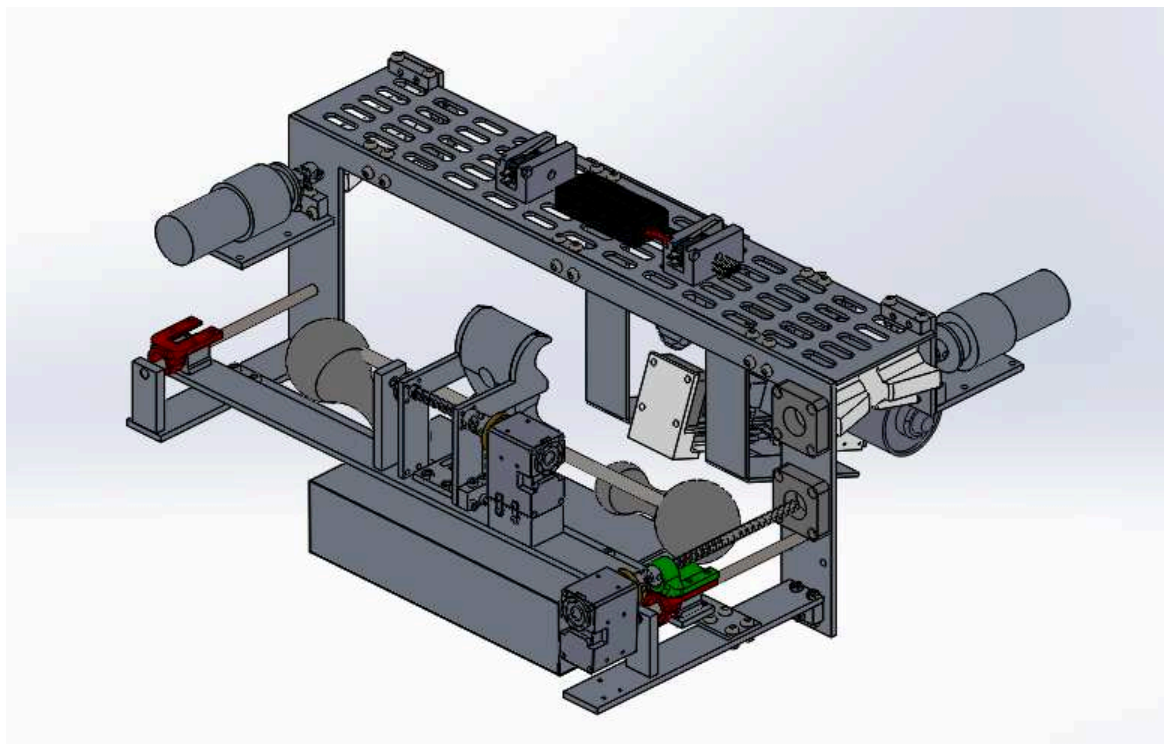
Como resultado da modelagem no software de CAD SolidWorks, das análises estáticas e dinâmicas, bem como a junção dos sistemas e mecanismos abordados neste relatório, foi construído o módulo robótico conforme Figs. 39 e 40.

Figura 39 - Vista isométrica do módulo



Fonte: Autor

Figura 40 - Outra vista isométrica do módulo





Fonte: Autor

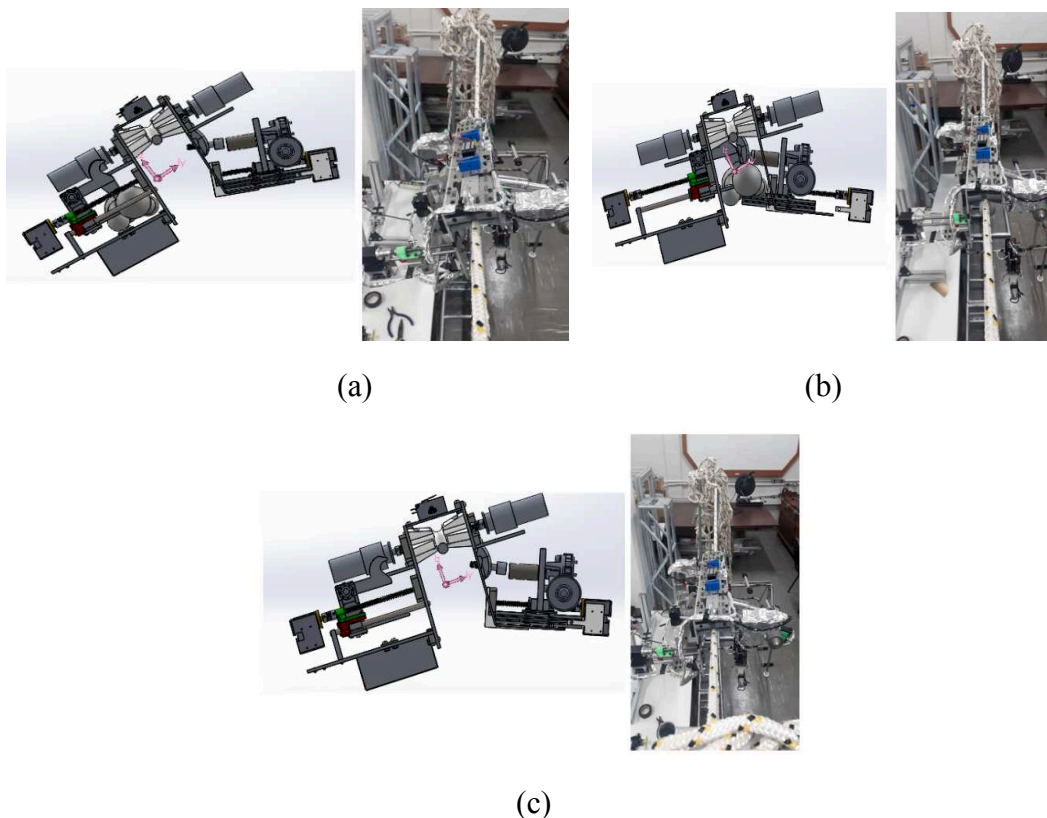
Conforme Figuras 39 e 40, o resultado final é um módulo robótico com duas polias de ABS, com um eixo de alumínio para fixação por dentro, responsáveis pelo apoio do módulo no cabo e pela locomoção, feita através de dois motores de parafusadeira.

O amortecedor é mantido fixo por duas pinças, cujo movimento é feito por um sistema de uma barra roscada auto-travante e um motor.

O sistema de instalação do amortecedor é feito através do motorreductor, o qual é movimentado através de um sistema de eixos e motor. O acoplamento do módulo ao drone é desempenhado por um eletroímã.

A Figura 41 apresenta a sequência completa de instalação do amortecedor, já comparando com a situação real e o centro de massa em cada uma das posições.

Figura 41 - (a) Posição inicial do módulo, (b) Amortecedor no centro e (c) Motorreductor volta para a posição inicial.

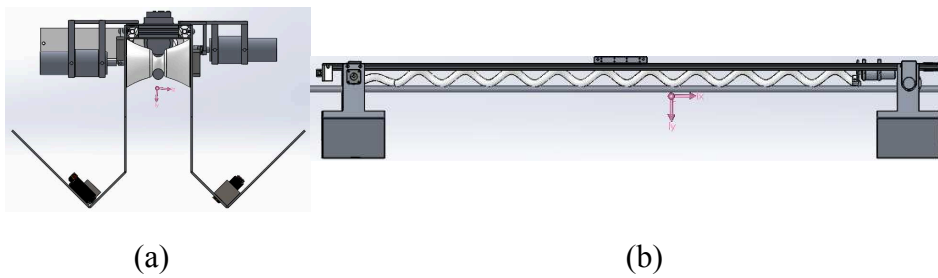


Fonte: Autor

### 5.3 Melhorias no módulo robótico para instalação dos amortecedores de vibração pré-formados

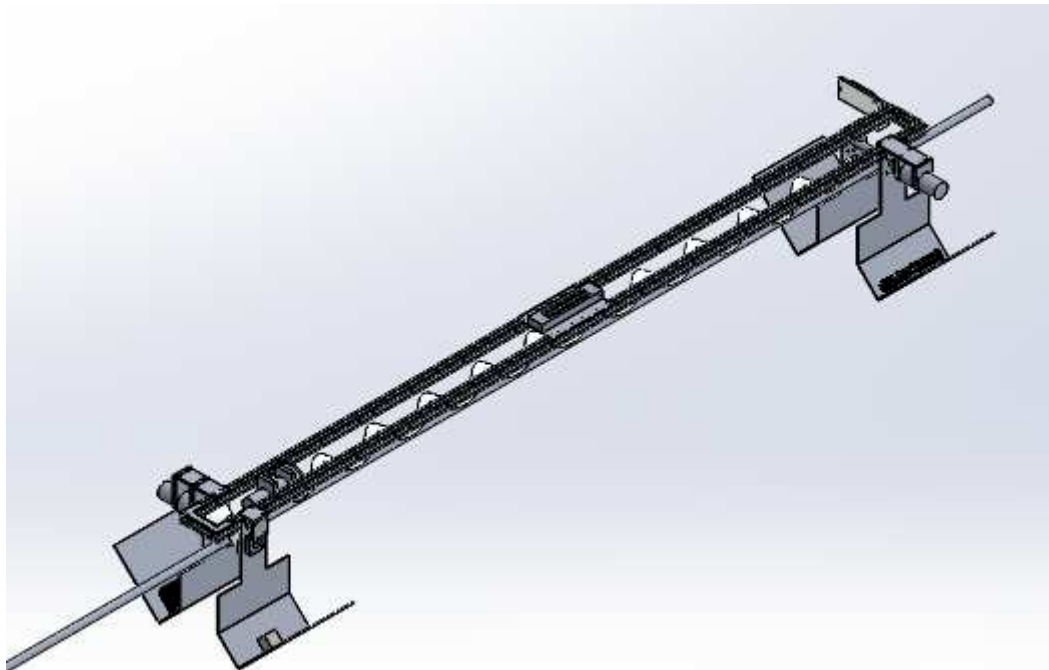
Portanto, como resultado da modelagem no software de CAD SolidWorks, das análises estáticas e dinâmicas, bem como a junção dos sistemas e mecanismos abordados neste relatório, foi construído o módulo robótico conforme Figs. 42 e 43.

Figura 42 - Vistas do módulo. (a) frontal; (b) lateral.



Fonte: Autor

Figura 43 - Vista isométrica do módulo



Fonte: Autor

Como podemos observar nas figuras, o resultado final é um módulo robótico com duas polias de ABS, com uma estrutura feita de Alumínio 1060 e a locomoção feita através de dois motores de parafusadeira. O amortecedor é mantido fixo por dentro da estrutura metálica e o acoplamento do módulo ao drone é desempenhado por um eletroímã.

É possível visualizar o protótipo do módulo para instalação dos amortecedores de vibração pré-formados na Figura 44:

Figura 44 - Protótipo do módulo nas duas vistas. (a) frontal; (b) lateral.



(a)

(b)

Fonte: Autor

## 6 DISCUSSÃO

O módulo de limpeza de isoladores se mostrou funcional e importante no processo de manutenção do sistema de transmissão de energia elétrica. Com sua implementação e funcionamento, será possível reduzir riscos e custos atrelados à essa atividade, bem como a eficiência em tempo e custos na limpeza proposta por esses módulos.

Os resultados também revelaram que os módulos robóticos desenvolvidos foram capazes de se deslocar no cabo de forma controlada e realizar a instalação dos amortecedores. Isso demonstra a eficiência do sistema de motores e eixos implementado, bem como a adequada integração com o drone.

As limitações encontradas durante o estudo incluem a necessidade de aprimoramentos no sistema de acoplamento entre o drone e o módulo robótico, visando facilitar a retirada do chão e a soltura no cabo. Além disso, a análise do desempenho do drone em diferentes condições ambientais e a sua adaptação para outras aplicações além da instalação de amortecedores podem ser objetos de futuras pesquisas.

É importante ressaltar que este estudo contribui para o avanço do conhecimento na área de manutenção de componentes do sistema de transmissão de energia elétrica por meio da aplicação de módulos robóticos. Os projetos aqui apresentados podem servir de base para o desenvolvimento de soluções inovadoras e eficientes no campo da engenharia mecatrônica.

Por fim, acredita-se que este trabalho possa incentivar pesquisas futuras e estimular a implementação prática dessas tecnologias em larga escala, visando melhorias na infraestrutura energética e proporcionando maior confiabilidade e segurança no fornecimento de energia elétrica.

## 7 CONCLUSÕES

Com base nos resultados e discussões apresentados, é possível concluir que a utilização de módulos robóticos para a instalação de amortecedores no sistema de transmissão de energia elétrica é uma abordagem promissora.

O drone-robô desenvolvidos neste estudo mostraram-se adequados para o transporte e acoplamento do módulo robótico ao cabo de transmissão. A integração entre o drone e o módulo garantiu a instalação correta dos amortecedores.

As limitações identificadas no estudo, como o aprimoramento do sistema de acoplamento e a necessidade de análises mais abrangentes em diferentes condições ambientais, podem ser consideradas oportunidades para pesquisas futuras. Além disso, a adaptação do drone-robô para outras aplicações além da instalação de amortecedores e limpeza de cadeias de isoladores pode ampliar ainda mais a sua utilidade e impacto na área da engenharia.

No contexto da manutenção de componentes do sistema de transmissão de energia elétrica, a aplicação de módulos robóticos representa um avanço significativo. Essa tecnologia permite a realização de tarefas de forma mais eficiente, segura e precisa, contribuindo para a melhoria da infraestrutura energética e garantindo um fornecimento confiável de energia elétrica.

Por fim, este trabalho reforça a importância da pesquisa e do desenvolvimento de soluções inovadoras na área da engenharia mecatrônica. A utilização de módulos robóticos para limpeza de cadeias de isoladores, e a instalação de amortecedores de vibração pré-formados são exemplos de como a aplicação de novas tecnologias pode trazer benefícios significativos para o setor energético. Espera-se que este estudo inspire outros pesquisadores a explorarem e aprimorarem ainda mais essas tecnologias, impulsionando o progresso e a inovação na área.

## 8 REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 7276: Sinalização de advertência em linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- Disyadej, Thongchai & Kwanmuang, Surat & Muneesawang, Paisarn & Promjan, Jatuporn & Poochinapan, Kanyuta. (2020). **Smart Transmission Line Maintenance and Inspection using Mobile Robots**. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 5. 493-500. 10.25046/aj050361.
- Miller R., Abbasi F., Mohammadpour F., **Power line robotic device for overhead line inspection and maintenance**, *Industrial Robot: An International Journal*, 775-84, 2017.
- Parker, L.E.; Draper, J.V.; 1999. **Robotics Applications in Maintenance and Repair**. *Handbook of Industrial Robotics*, 2nd Edition, Wiley Publishers.
- Gonçalves, R. S.; Carvalho, J. C. M., **Review and Latest Trends in Mobile Robots Applied in Power Transmission Lines**, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013.
- Gonçalves, R. S., Carvalho, J. C. M. **Robô Móvel Suspenso por Fio**. III Encontro Interno e VII Seminário de IC, Uberlândia, p. 36, 2003a.
- Gonçalves, R. S., Carvalho, J. C. M. **Robô Móvel Suspenso Por Fio Utilizando Mecanismo Biela-Manivela Deslizante**, VI SEMEC Semana de Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2003.
- Gonçalves, R. S., Carvalho, J. C. M. **Mobile Robot for Inspection of Power Transmission Lines**. XI CREEM - Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, Nova Friburgo, 2004.
- Gonçalves, R.S.; Carvalho, J.C.M.; 2005. **Kinematic Analysis of a Four Legged Robot Suspended on Wire**. In CD Proc. Of the 18th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2005, Ouro Preto.
- Gonçalves, R. S. **Robô Móvel Suspenso por Fio com Pernas de Comprimentos Variáveis**. 116f. Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.
- Gonçalves, R. S., Carvalho, J. C. M. **Methodology for obstacles transposition for a mobile robot suspended by wire**. IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Recife, 2006a.
- Gonçalves, R. S., Carvalho, J. C. M. **Robô Móvel Suspenso por Fio**, 16 Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - POSMEC, Uberlândia, 2006b.
- Gonçalves, R. S., Carvalho, J. C. M. **Kinematics Analysis of a Four Legged Robot Suspended on Wire**, Capítulo de Livro: ABCM Symposium Series in Mechatronics ed.Rio

de Janeiro : Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v.2, p. 273-280, 2006c.

Gonçalves, R. S., Carvalho, J. C. M. **A Legged Robot Suspended on Wire for Transposition of Insulators and Signalizing Spheres**, 3rd International Symposium on Multibody Systems and Mechatronics - MuSMe2008, 2008.

ForjaSul. **Amortecedores Stockbridge**. Disponível em: <http://www.forjasul.com.br/pt-br/destaques> . Acesso em 12/05/2021.

F. Tian, Y. Wang and L. Zhu, **Power line recognition and tracking method for UAVs inspection**. 2015 IEEE International Conference on Information and Automation.

DJI. **AGRAS MG-1P SERIES**. Disponível em: <https://www.dji.com/br/mg-1p/info>. Acesso em 12/05/2021.

Robotis. **XM540-W270-T/R**. Disponível em: <http://manual.robotis.com/docs/en/dxl/x/xm540-w270/> . Acesso em 13/05/2021.

AFL Global. **Dissipator High-Efficiency Stockbridge Damper**. Disponível em: <https://www.aflglobal.com/Products/Conductor-Accessories/Motion-Control-Accessories/Vibration-Dampers/Dissipator-High-Efficiency-Stockbridge-Damper.aspx> . Acesso em 14 mai. 2021.

Juvinall, Robert C, and Kurt M. Marshek. **Fundamentals of Machine Component Design**. New York: John Wiley, 2006.

CHEVROLET. **Parafusadeira a Bateria 12V 1,3Ah Lítio com Carregador Bivolt e Maleta - CHEVROLET-GM3401**. Disponível em: <https://www.lojadomecanico.com.br/produto/153617/21/223/parafusadeira-a-bateria-12v--13ah--litio-com-carregador-bivolt-e-maleta-chevrolet-gm3401->. Acessado em 12 jun. 2021.

FloripaHobby. **Bateria de Li-Po 5200mah 11.1v 15-30C Gens Tattu**. Disponível em: <https://www.floripahobby.com/bateria-de-li-po-5200mah-111v-15-30c-gens-tattu> Acessado em: 12 jun. 2021.

PIXFORCE. Linhas de transmissão: **A expansão no Brasil e seus desafios**. Disponível em: <https://www.pixforce.com.br/post/linhas-de-transmissao-a-expansao-no-brasil-e-seus-desafios> . Acesso em: 15 jun. 2023.

ONS. **O Sistema em Números**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 15 jun. 2023.

ANEEL. **Transmissão** — Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/transmissao>.

Acesso em: 15 jun. 2023.

KUFFEL, E.; ZHANG, J.; KUFFEL, J. **High Voltage Engineering Fundamentals**. 2nd ed.

Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. Acesso em: 15 jun 2023.