

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA - UFU
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA - FEMEC
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

PEDRO MACHADO SALES

DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO ROBÓTICO ACOPLADO À UM DRONE
PARA INSTALAÇÃO DE ESPAÇADORES EM CABOS DE ALTA TENSÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2024

PEDRO MACHADO SALES

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO ROBÓTICO ACOPLADO À UM DRONE
PARA INSTALAÇÃO DE ESPAÇADORES EM CABOS DE ALTA TENSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia, como
requisito parcial para a obtenção do título de
Graduado em Engenharia Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Sales Gonçalves.

Uberlândia - MG

2024

PEDRO MACHADO SALES

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO ROBÓTICO ACOPLADO À UM DRONE
PARA INSTALAÇÃO DE ESPAÇADORES EM CABOS DE ALTA TENSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia, como
requisito parcial para a obtenção do título de
Graduado em Engenharia Mecatrônica.

BANCA EXAMINADORA

Uberlândia, 07 de Novembro de 2024

Dedico este trabalho aos que me apoiaram para chegar até aqui: à minha família, pelo amor e carinho, aos professores pelos ensinamentos e dedicação, e aos meus amigos, pelo companheirismo e bons momentos juntos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Rogério Sales Gonçalves, orientador deste projeto, por confiar na minha capacidade, pelos ensinamentos, compreensão, companheirismo e motivação. Sem o senhor, não teria chegado até aqui.

O trabalho foi apoiado e financiado pelas Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC programa de P&D, processo n. 05697-1023/2023), e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Agradeço aos meus amigos da Universidade Federal de Uberlândia pelo auxílio e bons momentos passados juntos ao longo de nossa graduação, sem vocês eu não chegaria até aqui.

Finalmente, agradeço também aos meus familiares pelo amor e apoio oferecidos nos momentos mais difíceis.

“It’s important to draw wisdom from many different places. If we take it from only one place it becomes rigid and stale.”

(Iroh)

SALES, Pedro Machado. **DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO ROBÓTICO ACOPLADO A UM DRONE PARA INSTALAÇÃO DE ESPAÇADORES EM CABOS DE ALTA TENSÃO**. 2024. 44f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

RESUMO

O presente projeto refere-se ao desenvolvimento de um módulo robótico acoplado a um drone para instalar espaçadores. Os espaçadores são elementos utilizados entre vários cabos do sistema de distribuição de energia para manter estes espaçados. O drone levará o módulo robótico até o cabo, deixará este módulo robótico para a partir da utilização de um rádio controle deslocar-se, se necessário, e instalar/desinstalar o espaçador. Após a finalização do procedimento o drone busca o módulo robótico retornando-o para a estação em solo para repetir a operação se necessário. Este drone-robô visa a diminuição de riscos para os técnicos que realizam estas operações escalando as torres e locomovendo-se nos cabos ou mesmos suspensos em uma plataforma fixa a um helicóptero.

Palavras-chave: Módulo Robótico, Drone, Cabos de Alta Tensão, Espaçador.

SALES, Pedro Machado. **DEVELOPMENT OF A ROBOTIC MODULE COUPLED TO A DRONE FOR INSTALLATION OF SPACERS IN HIGH VOLTAGE CABLES**. 2024. 44p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

ABSTRACT

This project refers to the development of a robotic module coupled to a drone to install spacers. Spacers are elements used between various cables of the power distribution system to keep these spaced apart. The drone will take the robotic module to the cable, let this robotic module to move, using a radio control, if necessary, and install/uninstall the spacer. After completing the procedure, the drone searches for the robotic module, returning it to the ground station to repeat the operation if necessary. This drone-robot aims to reduce risks for technicians who carry out these operations by climbing the towers and moving on cables or even suspended from a platform fixed to a helicopter.

Keywords: Robotic Module, Drone, High Voltage Cable, Spacer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Torres de transmissão de alta tensão.	13
Figura 2 - Modelo de espaçador de dois cabos comercial.	14
Figura 3 - Substituição manual de um espaçador de dois cabos através de um carrinho (<i>Buggy</i>).	14
Figura 4 - Manutenção de cabos com auxílio de helicóptero.	15
Figura 5 – Modelo 3D do espaçador utilizado no projeto.	17
Figura 6 - Esquema cinemático do módulo robótico.	18
Figura 7 - Perfil V-slot 20 x 20 mm em alumínio.	19
Figura 8 - Roda motorizada (esquerda) e roda livre (direita).	20
Figura 9 - Vista frontal das rodas usinadas.	20
Figura 10 - Garra de manuseio dos espaçadores.	21
Figura 11 - Vista frontal da garra contendo o corpo principal do espaçador.	22
Figura 12 - Vista frontal da garra após liberação do espaçador.	22
Figura 13 - Garra contendo o corpo principal do espaçador.	23
Figura 14 - Disposição da parte parafusada do espaçador entre as aletas.	24
Figura 15 - Atuador linear VT 12 V 100 mm.	25
Figura 16 - Passo a passo do posicionamento dos motores.	26
Figura 17 - Rolamento linear LM 8 mm.	26
Figura 18 - Montagem dos fusos.	27
Figura 19 - Parafusadeira modelo CHEVROLET-GM3401.	28
Figura 20 - Soquete universal.	28
Figura 21 - Fechadura eletromagnética.	29
Figura 22 - Garra fechada contendo o espaçador durante simulação com cordas.	30
Figura 23 - Posicionamento da peça parafusada.	31
Figura 24 - Vista frontal da configuração do módulo após posicionamento das peças do espaçador.	31
Figura 25 - Vista frontal da configuração do módulo para transporte.	32
Figura 26 - Vista frontal do módulo acima dos cabos.	32
Figura 27 - Guias em chapa dobrada.	33
Figura 28 - Vista frontal do módulo posicionado nos cabos e com os atuadores horizontais retraídos.	34
Figura 29 - Vista frontal do módulo durante a parafusação.	34
Figura 30 - Garra após liberação do espaçador durante simulação com corda.	35

Figura 31 - Vista frontal do módulo preparado para a remoção.	35
Figura 32 - Espaçador instalado nos cabos de teste.	36
Figura 33 - Diagrama de corpo livre da pinça da garra.	37
Figura 34 - Drone EFT 610 utilizado no projeto.	38
Figura 35 - Print da propriedade de massa da montagem no SolidWorks.	38
Figura 36 - Centro de gravidade do módulo.	39
Figura 37 - Módulo robótico finalizado.	40
Figura 38 - Flambagem no conjunto de parafusação.	41

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CG	Centro de Gravidade
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1. Introdução.....	13
2. Objetivo.....	16
3. Desenvolvimento	16
3.1. Espaçadores	16
3.2. Arquitetura do módulo robótico	18
3.3. Estrutura.....	18
3.4. Movimentação do módulo robótico.....	19
3.5. Mecanismo de manuseio dos espaçadores	21
3.6. Mecanismo de manuseio dos motores.....	24
3.7. Conjunto de parafusação	27
3.8. Mecanismo de acoplamento	29
4. Operação.....	30
4.1. Preparação.....	30
4.2. Instalação.....	34
4.3. Remoção.....	36
5. Cálculos	37
5.1. Cálculo do Torque do Servomotor.....	37
5.2. Cálculo da massa.....	37
5.3. Cálculo do centro de gravidade.....	39
6. Resultados e discussões	40
7. Considerações finais.....	42
Referências	43

1. Introdução

Com as crescentes demandas elétricas industriais e residenciais, a eletrificação desempenha um papel fundamental para fornecer a infraestrutura necessária para esta constante evolução, que alimenta diversos setores importantes para a sociedade. Para distribuir a eletricidade em larga escala e entre grandes distâncias, é comumente usado pelo mundo inteiro sistemas de transmissão de alta tensão, que operam em tensões muito elevadas, buscando minimizar as perdas de energia durante o transporte [1].

Existem várias tecnologias de transmissão de alta tensão, entre as principais estão as linhas aéreas, que empregam cabos suspensos, Fig. 1, e os cabos subterrâneos. As linhas aéreas são mais comuns e geralmente são usadas para transmitir eletricidade em áreas abertas, onde a instalação de torres para suportes dos cabos é mais viável. Os cabos subterrâneos são usados em áreas urbanas ou em locais onde as linhas aéreas seriam impraticáveis, como sob corpos d'água.

Figura 1 - Torres de transmissão de alta tensão.



Fonte: gsepi, 2024.

Os cabos suspensos exigem da instalação e manutenção regular de componentes e acessórios para assegurar o seu desempenho adequado e segurança. Esse processo pode ser desafiador devido à instalação de muitos desses acessórios ao longo dos cabos. O módulo desenvolvido neste projeto terá seu foco nos espaçadores. Os espaçadores, Fig. 2, atualmente utilizados para linhas de

transmissão de dois cabos são formados por um corpo principal, contendo braços e extremidades que podem ser fixas nos cabos a partir de uniões parafusadas ou rebitadas [2].

Figura 2 - Modelo de espaçador de dois cabos comercial.



Fonte: aflglobal, 2024.

Estes espaçadores são essenciais para manter a distância adequada entre os condutores e evitar descargas elétricas acidentais, sendo instalados em diferentes quantidades entre os postes/torres de transmissão, conforme normas específicas. Tradicionalmente, a instalação de espaçadores em cabos de alta tensão é realizada manualmente por técnicos treinados, que primeiramente escalam a torre de transmissão desativada, e normalmente com o auxílio de carrinhos se locomovem ao longo dos cabos até o local desejado para a instalação ou remoção, visto na Fig 3.

Figura 3 - Substituição manual de um espaçador de dois cabos através de um carrinho (*Buggy*).



Fonte: YouTube, 2016.

Em alguns casos, helicópteros são utilizados para instalar ou remover espaçadores, com técnicos presos em plataformas fixas ao lado da aeronave, como visto na Figura 4. Isso, porém, apresenta diversos riscos, como quedas, colisão com os cabos e possíveis panes no helicóptero. No entanto, avanços na robótica e na tecnologia de drones abriram portas para a automação e, portanto, aprimoramento na eficiência dessas operações de manutenção.

Figura 4 - Manutenção de cabos com auxílio de helicóptero.



Fonte: Samson, 2014.

Este projeto de fim de curso se concentra no desenvolvimento de um módulo robótico inovador, projetado para ser acoplado a um drone, a fim de facilitar a instalação de espaçadores em cabos de alta tensão. A integração de robótica e drones oferece uma solução promissora para aprimorar a segurança e eficiência das operações de manutenção em sistemas de transmissão de energia elétrica. Este documento explora os aspectos de projeto, desenvolvimento e operação deste módulo robótico, bem como suas implicações na otimização das operações de manutenção.

O desafio de projetar e implementar com sucesso um sistema robótico para a instalação de espaçadores em cabos de alta tensão acoplado a um drone é complexo e requer uma abordagem interdisciplinar que abrange engenharia mecânica, eletrônica, automação e controle, além de considerações práticas de segurança e regulamentações. Este trabalho busca contribuir para o avanço da tecnologia na área de manutenção de sistemas de transmissão de energia, fornecendo uma visão sobre a aplicação dessa abordagem.

A partir deste ponto, esta pesquisa explora em detalhes o desenvolvimento e funcionamento do módulo robótico e sua aplicação no contexto da manutenção de cabos de alta tensão.

2. Objetivo

O objetivo principal é conceber, projetar, desenvolver e testar um módulo robótico inovador que será acoplado a um drone para a instalação de espaçadores em cabos de alta tensão. Este projeto de pesquisa tem como finalidade projetar um módulo robótico capaz de manipular e instalar espaçadores com precisão em cabos de alta tensão, considerando fatores como peso, tamanho, resistência e funcionalidades.

O módulo robótico também contará com um sistema de controle eletrônico necessário para realizar a sua operação.

Este projeto visa contribuir para a crescente literatura científica e técnica relacionada à aplicação de tecnologias robóticas e drones no setor de energia elétrica, oferecendo informações valiosas para profissionais, pesquisadores e empresas do setor.

Ao atingir esses objetivos, este trabalho busca demonstrar o potencial do módulo robótico acoplado a um drone como uma solução inovadora para os desafios enfrentados na manutenção de sistemas de transmissão de energia elétrica, promovendo um ambiente mais seguro e eficiente para profissionais da área.

3. Desenvolvimento

3.1. Espaçadores

É de suma importância a escolha de um modelo de espaçador já presente no mercado e de fácil aquisição para ser utilizado pelo módulo robótico acoplado a um drone. Os modelos comerciais de espaçadores já foram amplamente testados e seu bom funcionamento foi certamente comprovado, garantindo sua qualidade e eficácia na manutenção de sistemas de transmissão de energia elétrica, eliminando um fator que poderia eventualmente acarretar em problemas ao longo do desenvolvimento do módulo.

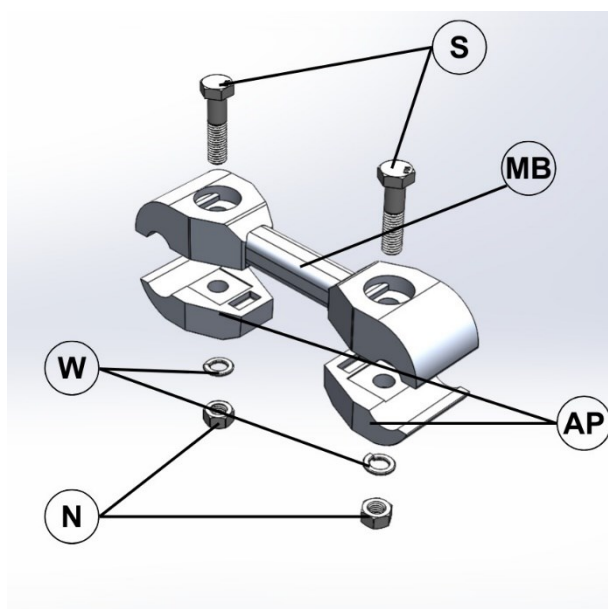
Desenvolver um espaçador personalizado exigiria um esforço significativo de engenharia, testes e certificação. A utilização de um modelo comercial reduz o tempo

de desenvolvimento e diminui os custos associados à fabricação de componentes personalizados.

Isso permite também que o foco principal seja direcionado para o desenvolvimento da tecnologia robótica e da integração com os drones, maximizando os benefícios da automação na manutenção de sistemas de energia elétrica.

Com esses fatores em mente, escolheu-se para este projeto o espaçador rígido presente na Figura 5 de código MYCEC-32A-20 [3], da Maxxweld, com aplicação em redes de distribuição de energia com tensão máxima de 230 kV. Diferentemente do espaçador presente na Figura 2, este possui três peças separadas, unidas e fixadas nos cabos através de parafusos, porcas e arruelas. Este espaçador, Fig. 5, é formado por um corpo principal (MB), que irá em cima dos cabos, e duas peças secundárias (AP) que irão por baixo dos cabos e então serão parafusadas ao corpo principal através de parafusos sextavados M12 (S), porcas (N) e arruelas (W), proporcionando uma fixação firme e segura aos cabos.

Figura 5 – Modelo 3D do espaçador utilizado no projeto.



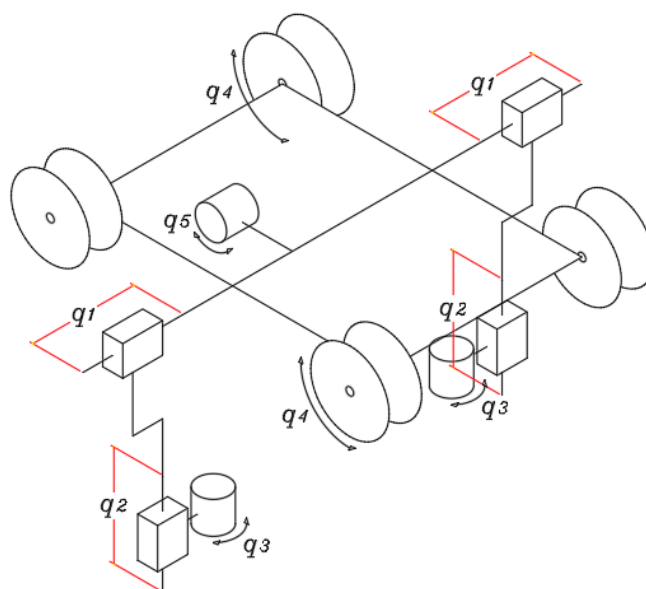
Fonte: De autoria própria.

Este espaçador vem com uma série de dificuldades que serão abordadas, como a sua variedade de peças separadas a serem manipuladas, assim como a necessidade de dois pontos de parafusação, e o acesso da instalação deverá ser feito tanto da parte superior dos cabos como a inferior.

3.2. Arquitetura do módulo robótico

Desenvolveu-se uma arquitetura base do módulo robótico capaz de realizar as etapas necessárias para a instalação do espaçador nos cabos. A parte principal da instalação se encontra na parafusação das peças do espaçador (q_3). Para posicionar os motores que realizarão essa etapa, deve estar presente mecanismos que os movimentarão (q_1 é responsável pela movimentação na horizontal e q_2 na vertical). Para transportar a peça principal do espaçador, uma pinça metálica será utilizada acionada por um servomotor (q_5). A movimentação do módulo ao longo do cabo será realizada por duas rodas motorizadas, q_4 . A Figura 6 apresenta o esquema cinemático do módulo robótico.

Figura 6 - Esquema cinemático do módulo robótico.



Fonte: De autoria própria.

3.3. Estrutura

A estrutura do módulo robótico foi construída em perfil V-slot 20 x 20 mm, mostrada na Figura 7, um perfil feito em alumínio, leve e com uma alta resistência. Além disso, por ser um perfil bastante usado para máquinas de pequeno e médio porte, este é vastamente disponível no mercado, assim como peças complementares para auxiliar a montagem, como cantoneiras e porcas martelo canal 6, amplamente utilizadas no desenvolvimento deste projeto.

Figura 7 - Perfil V-slot 20 x 20 mm em alumínio.



Fonte: Forseti, 2024

A estrutura principal em V-slot foi projetada visando fixar todos os componentes necessários para o projeto nesta, com o objetivo de ser a mais leve possível devido ao peso limite que o drone é capaz de transportar.

Além disso, o posicionamento de todos os componentes deve ser rigorosamente avaliado, uma vez que o Centro de Gravidade (CG) do módulo robótico como um todo deve estar localizado abaixo dos cabos por onde o módulo transitará. Isso se vê necessário devido ao fato de que quando o CG de um objeto está localizado abaixo do ponto de apoio, nesse caso os cabos, ele tende a ser mais estável. Isso ocorre porque, quando há um deslocamento lateral, possivelmente devido ao vento, o momento resultante do peso do módulo, situado no CG, age para retornar o módulo à sua posição de equilíbrio, evitando que este tombe.

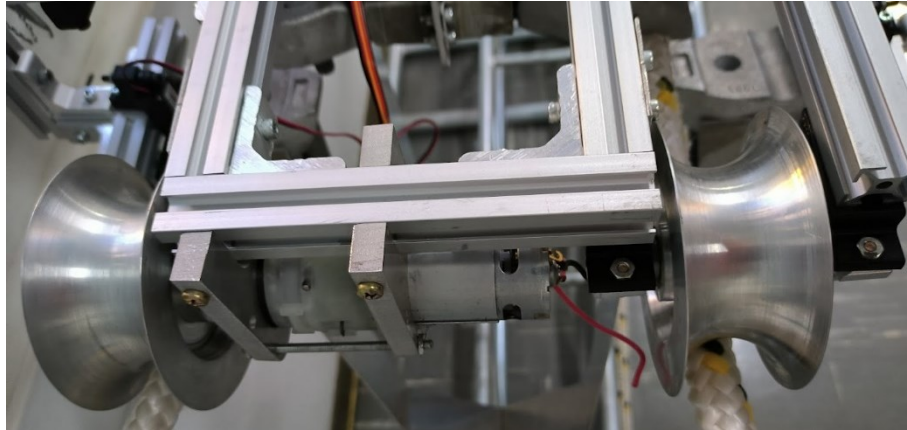
O modo de fixação dos atuadores e fusos na estrutura metálica em V-Slot também será através de peças personalizadas projetadas e impressas em 3D.

3.4. Movimentação do módulo robótico

A movimentação do módulo por sobre os cabos será através de 4 rodas/roldanas, aonde duas serão controladas por motores de parafusadeira, do modelo CHEVROLET-GM3401 e as outras duas se movimentarão livremente ao redor de um eixo preso à estrutura, através de rolamentos adaptados e integrados ao corpo da roda. Para melhor tração do módulo, os motores controlarão uma roda de cada

extremidade, evitando que o sistema fique desbalanceado. A disposição final das rodas e motores ficou como visto na Figura 8.

Figura 8 - Roda motorizada (esquerda) e roda livre (direita).



Fonte: De autoria própria.

As rodas utilizadas foram fabricadas em alumínio, dado a sua leveza quando comparado a outros metais, propriedade relevante neste projeto devido ao limite de peso que o drone nos propõe. As roldanas foram usinadas com o canal do tipo U, Figura 9, para que encaixem nos cabos seguindo sua curvatura, consequentemente proporcionando maior estabilidade, facilidade no posicionamento e garantindo que as rodas sempre estarão alinhadas com os cabos durante todo o procedimento. Isso se vê necessário para assegurar a precisão essencial para a instalação dos espaçadores, além de prover maior tração para o módulo.

Figura 9 - Vista frontal das rodas usinadas.



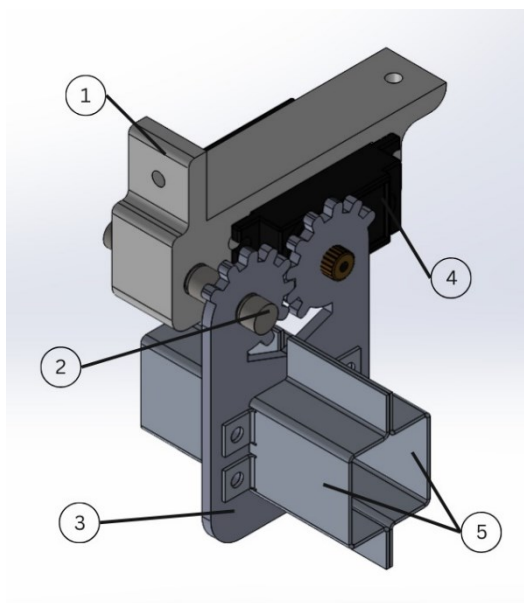
Fonte: De autoria própria.

Serão necessários testes para validar o bom funcionamento das rodas, para assegurar que o atrito será o suficiente. Caso negativo, formas de aumentar o atrito como recartilhamento deverão ser analisadas.

3.5. Mecanismo de manuseio dos espaçadores

O espaçador será manuseado pelo módulo através de uma garra metálica, presente na Figura 10, projetada para ser capaz de abraçar o corpo do espaçador, mantendo-o estável e no lugar adequado para que todo o processo de transporte e de instalação ocorra suavemente.

Figura 10 - Garra de manuseio dos espaçadores.



Fonte: De autoria própria.

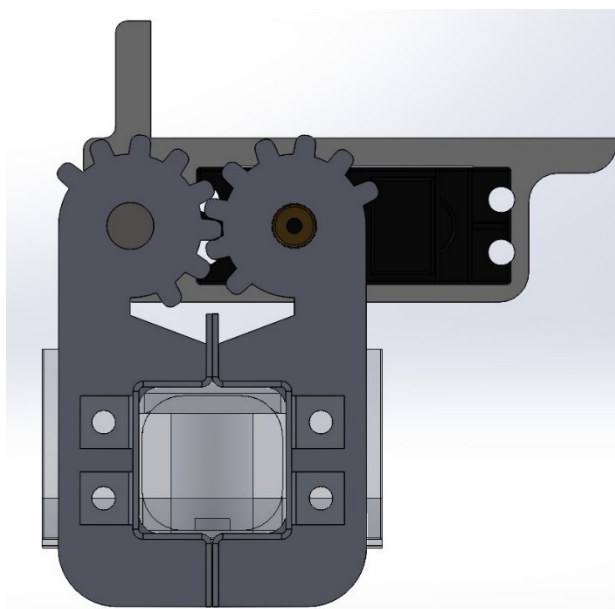
Estas garras são compostas por duas pinças metálicas simétricas (3), acopladas à chapas metálicas dobradas (5) cujo propósito é de proporcionar uma maior área de contato para manter o corpo principal do espaçador ortogonal aos cabos, evitando erros no processo de parafusação.

Para coordenar o movimento de ambas as pinças, elas foram conectadas através de um sistema de engrenagens, sincronizando o processo de abertura e fechamento da garra. A pinça que não será controlada diretamente pelo servo motor girará livremente em torno de um eixo (2), preso através de anéis elásticos, acoplado

à uma peça impressa de ABS (1) que será fixada à estrutura principal do módulo mantendo todo o sistema em seu devido lugar.

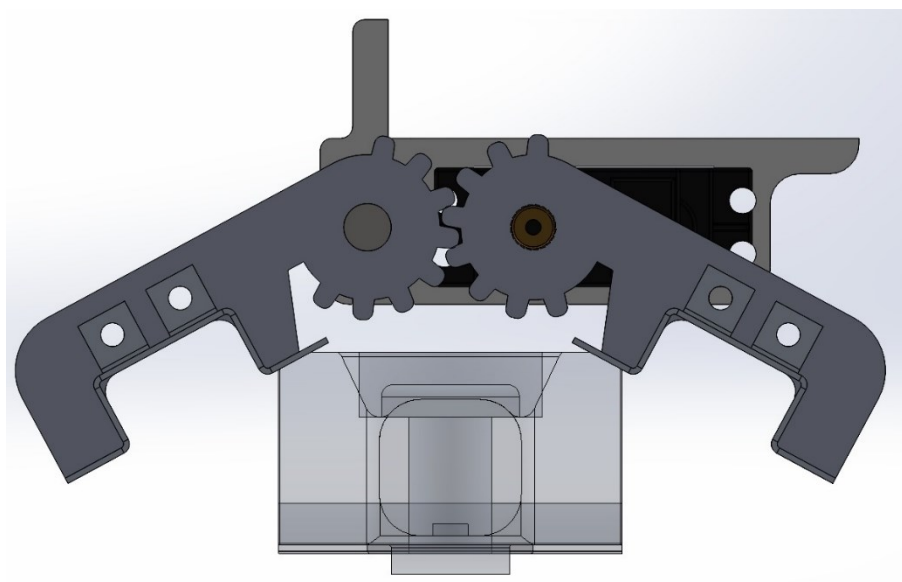
O sistema é acionado por um servo motor (4), que fechará a garra, abraçando o espaçador (Figura 11), e abrirá a garra o suficiente para liberá-lo quando o processo de parafusação já estiver finalizado e o módulo estiver pronto para ser retirado (Figura 12).

Figura 11 - Vista frontal da garra contendo o corpo principal do espaçador.



Fonte: De autoria própria.

Figura 12 - Vista frontal da garra após liberação do espaçador.

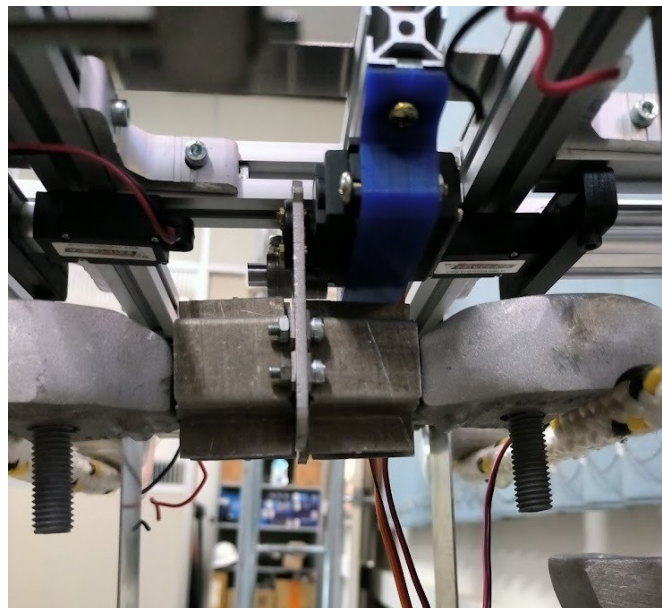


Fonte: De autoria própria.

Para a escolha do modelo do servo motor levou-se em consideração o torque mínimo necessário capaz de suportar o torque que o peso do espaçador aplica às garras, e que será transferido ao servo. O servo escolhido então foi o de modelo MG996R [4], comumente utilizado em projetos similares. Este servo motor é capaz de suportar até 11 kgf.cm de torque, quando alimentado com uma tensão de 6 V, sendo o suficiente para suprir a carga solicitada.

Entretanto, esta garra nos permite apenas segurar o corpo principal do espaçador, como mostrado na Figura 13, não sendo suficiente para manusear todas suas três principais partes, como as peças separadas (AP) apontadas na Figura 5.

Figura 13 - Garra contendo o corpo principal do espaçador.



Fonte: De autoria própria.

Com o objetivo de segurar as duas partes restantes, percebeu-se que não seria necessário algo complexo como a garra que fixa o corpo principal, bastando apenas uma superfície que acomodasse as peças, contanto que não permitisse o deslizamento destas, possivelmente causadas pelo vento, vibração ou pela movimentação do módulo como um todo.

Por conveniência, o conjunto do motor e soquetes ao ser devidamente inserido na peça prévio ao transporte, junto de uma aleta para limitar o movimento horizontal da peça parafusada, são capazes de acomodá-la suficientemente, como visto na Figura 14.

Figura 14 - Disposição da parte parafusada do espaçador entre as aletas.



Fonte: De autoria própria.

Com essa disposição, garante-se que a porca seja corretamente conectada ao soquete antes do transporte do módulo, permitindo que seja fixada ao parafuso com sucesso.

3.6. Mecanismo de manuseio dos motores

Ao utilizar o modelo de espaçador escolhido, um problema deve ser solucionado: como a instalação do espaçador se dá pela instalação de duas peças separadas, fixadas através de parafuso e porca, o manuseio da instalação deve ser feito tanto por cima quanto por baixo das peças e, conseqüentemente, do cabo. Portanto, o módulo deve ser capaz de acessar ambas extremidades, evitando que seu posicionamento nos cabos pelo drone seja afetado.

Ademais, com a necessidade de manter o centro de gravidade abaixo dos cabos, levando em consideração que um dos componentes previstos com maior massa do módulo serão os motores de parafusadeira, é recomendável que estes sejam posicionados de forma que possam parafusar o espaçador por baixo dos cabos.

O mecanismo deverá então movimentar um dos acessos (neste caso, o mais viável será o acesso inferior) de forma que não comprometa o posicionamento ou a movimentação do módulo nos cabos. A solução desenvolvida envolve alocar o

mecanismo de manuseio dos espaçadores fora do conflito dos cabos, e posicioná-los em seus devidos lugares após a aterrissagem do módulo nos cabos de alta tensão.

Para resolver esse problema, encontrou-se a necessidade de um sistema de posicionamento adequado e preciso, onde os atuadores lineares se provaram uma escolha possível, sendo de fácil controle, baixo preço e fácil aquisição. O modelo escolhido tanto para o movimento horizontal como o vertical foi o VT de 12 V e comprimento do curso de 100 mm [5].

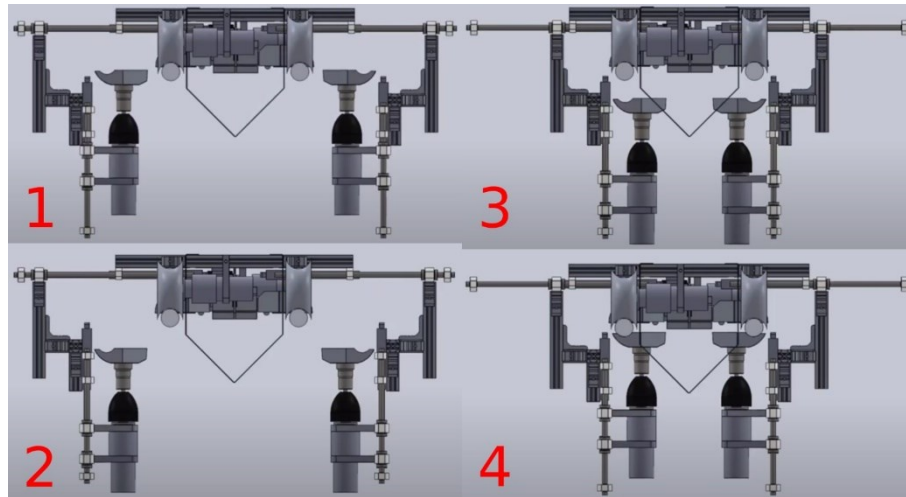
Figura 15 - Atuador linear VT 12 V 100 mm.



Fonte: Vinitronica, 2024.

Esse mecanismo irá movimentar o conjunto de motores para baixo do cabo (passos 1, 2 e 3 na Figura 16), e em sequência para cima em direção ao corpo principal do espaçador (passo 4), aproximando as duas partes do espaçador na posição adequada para prosseguir com o processo de instalação.

Figura 16 - Passo a passo do posicionamento dos motores.



Fonte: De autoria própria.

Porém, há uma grande desvantagem nos atuadores escolhidos, uma vez que o braço móvel do atuador não suporta o peso previsto neste, que no caso do atuador responsável pela movimentação horizontal deverá ser capaz de suportar o peso de uma estrutura e principalmente, todo o peso do motor. O fato da carga estar localizada fora de alinhamento em relação ao ponto de fixação da estrutura, também haverá um momento que o atuador deverá resistir.

Uma opção encontrada para contornar este problema foi a utilização de eixos retificados como guias e rolamentos lineares, que absorverão grande parte da carga solicitada e assim adicionarão uma maior estabilidade e confiança na movimentação do atuador. Foram utilizados eixos retificados de 8 mm fabricados em aço. A conexão entre o braço do atuador e os eixos guia são feitas em peças de ABS impressas em 3D.

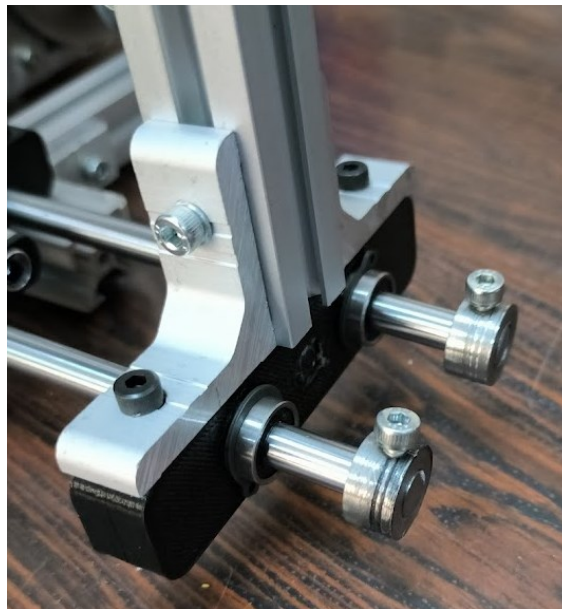
Figura 17 - Rolamento linear LM 8 mm.



Fonte: Forsetti, 2024.

Para a movimentação do atuador ser de forma suave e evitar o atrito da peça impressa com os fusos, serão utilizados rolamentos lineares que auxiliarão o deslocamento do braço do atuador através do fuso, fixados à peça impressa através de anéis elásticos. Essa montagem foi utilizada em ambos os atuadores que movimentam os motores de parafusação horizontalmente e os que os movimentam verticalmente. Ao final do fuso foram parafusados batentes para limitar o movimento dos atuadores. A montagem final pode ser vista na Figura 18.

Figura 18 - Montagem dos fusos.



Fonte: De autoria própria.

3.7. Conjunto de parafusação

Para realizar a etapa mais crucial do processo de instalação, o conjunto de parafusação consiste em um motor de parafusadeira modelo CHEVROLET-GM3401, modelo visto na Figura 19.

Figura 19 - Parafusadeira modelo CHEVROLET-GM3401.



Fonte: Mercado Livre, 2024

O parafuso utilizado que é parte do conjunto do espaçador vendido comercialmente é um parafuso sextavado M12x60, normalmente parafusado através de um bocal acoplado à parafusadeira. Porém, com relação a este projeto, a utilização deste bocal se provou ineficiente devido à falta de precisão para o acoplamento deste ao parafuso, causado pela soma de diversos fatores como o vento, flexão dos perfis, flexão do braço dos atuadores e guias, falta de acomodação do espaçador na garra, entre outros. Provou-se necessário então a escolha de uma alternativa mais flexível, como o soquete universal, por exemplo, capaz de acoplar-se a diferentes tipos e tamanhos de parafusos diferentes.

Figura 20 - Soquete universal.



Fonte: Loja do mecanico, 2024.

Para a escolha do soquete universal a ser utilizado, deve-se levar em consideração que este, além de ser capaz de ser acoplado ao parafuso utilizado pelo espaçador, deve possuir dimensões que o permitirão entrar no furo da peça parafusada, como visto anteriormente.

3.8. Mecanismo de acoplamento

A alternativa escolhida para transportar com segurança o módulo robótico acoplado ao drone foi a utilização de travas/fechaduras eletromagnéticas. Estas são divididas em duas partes, Figura 21, onde uma ficará localizada na superfície superior da estrutura do módulo robótico e a outra será fixada ao drone a ser utilizado.

Figura 21 - Fechadura eletromagnética.



Fonte: Mercado livre, 2024.

Normalmente utilizadas em portões, estas fechaduras são capazes de fornecer uma fixação bem resistente entre o módulo e o drone, evitando que acidentes possam acontecer durante o processo de transporte. Os modelos disponíveis no mercado oferecem cerca de 60 à 250 kgf de tração. Outro fator positivo que influenciou na escolha se deve ao fato de que essas fechaduras podem ser controladas remotamente, facilitando o acoplamento e desacoplamento quando o módulo estiver nos cabos, fora de alcance do técnico.

4. Operação

A operação será dividida em quatro partes principais para o processo de instalação do espaçador: preparação, aproximação, instalação e remoção. Esta deverá ser feita com a linha desativada, evitando danos ao módulo.

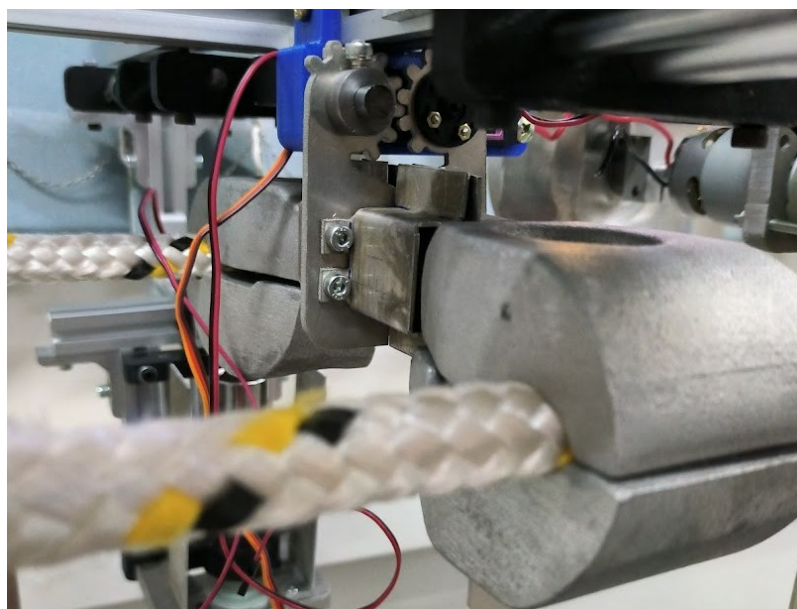
4.1. Preparação

Esta etapa consiste em abastecer o módulo robótico com o espaçador que será utilizado, configurando cada uma de suas peças nos lugares adequados para evitar imprecisões durante o processo ou principalmente evitar que peças caiam do módulo enquanto este estiver em altitudes elevadas, podendo danificar seriamente as peças e pôr as pessoas que transitam no local em perigo.

O primeiro passo dessa etapa é conferir se os atuadores lineares verticais estão estendidos, facilitando o acesso para a instalação das peças.

A peça principal do espaçador deve ser encaixada nas garras mecânicas com o servo na posição de aberto. Após o posicionamento, o servo deverá ser configurado para posição de fechado, mantendo a peça estável dentro dos limitadores da garra, Figura 22.

Figura 22 - Garra fechada contendo o espaçador durante simulação com cordas.



Fonte: De autoria própria.

Como as peças parafusadas são espelhadas, seu posicionamento é feito de maneira idêntica. Antes de posicioná-las, deve-se encaixar a porca e a arruela no soquete universal, e então posicionar a peça entre os limitadores, e com o conjunto de soquete, porca e arruela contido em seu furo, como visto na Figura 23.

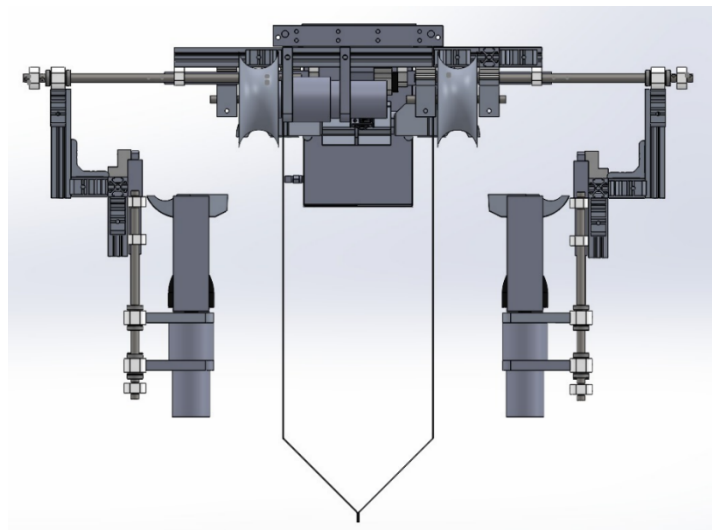
Figura 23 - Posicionamento da peça parafusada.



Fonte: De autoria própria.

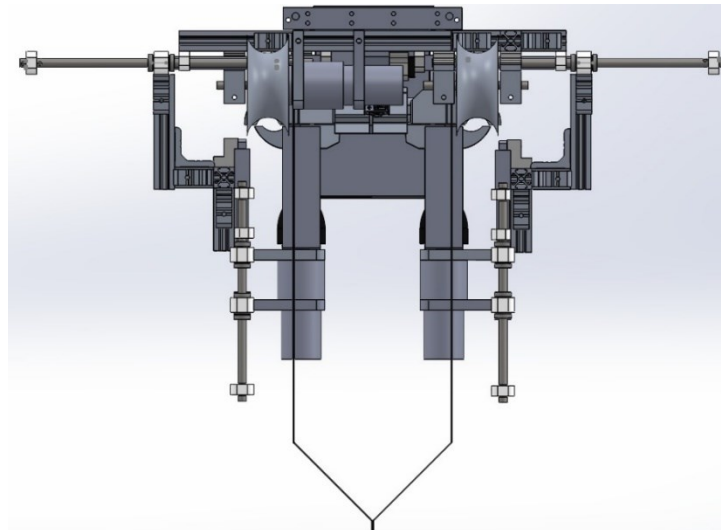
Finalizado a instalação das peças no módulo robótico, Figura 24, deve-se então retrainr todos os atuadores lineares, para que haja menos arrasto no conjunto módulo e drone durante a etapa de aproximação, Figura 25.

Figura 24 - Vista frontal da configuração do módulo após posicionamento das peças do espaçador.



Fonte: De autoria própria.

Figura 25 - Vista frontal da configuração do módulo para transporte.



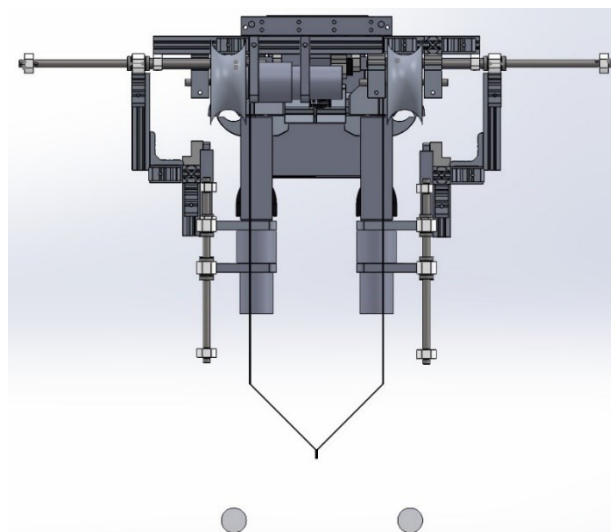
Fonte: De autoria própria.

Após a configuração das peças no módulo robótico, este deve ser acoplado ao drone através da fechadura eletromagnética.

Aproximação

O drone deverá ser controlado por um técnico habilitado. Este levará o módulo robótico até acima dos cabos, à uma distância segura que possibilite os atuadores horizontais se estenderem, Figura 26. Este processo é necessário para evitar a colisão dos braços com o cabo durante o posicionamento do módulo nos cabos.

Figura 26 - Vista frontal do módulo acima dos cabos.



Fonte: De autoria própria.

Após a extensão dos atuadores, o técnico deverá abaixar o drone, mantendo um nível aceitável de alinhamento com os cabos para posicionar corretamente o módulo, tendo em vista que o módulo tem um guia metálico embutido em seu corpo, que auxiliará o técnico a encaixar as polias sobre o cabo (Figura 27).

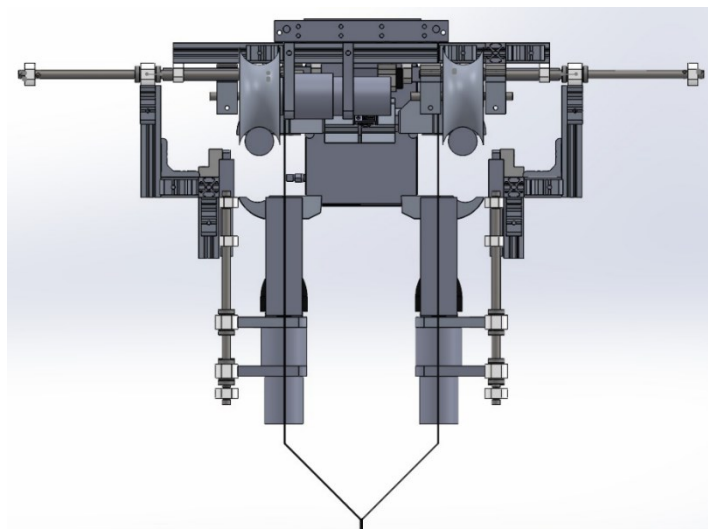
Figura 27 - Guias em chapa dobrada.



Fonte: De autoria própria.

Com o módulo corretamente posicionado, pode-se desativar a trava eletromagnética e retirar o drone do local. Antes que o módulo fique livre para se movimentar pelo cabo e começar a etapa de instalação no local adequado, deve-se retrain os atuadores lineares horizontais, Figura 28, para diminuir o arrasto e o estresse nas hastes destes atuadores durante seu percurso.

Figura 28 - Vista frontal do módulo posicionado nos cabos e com os atuadores horizontais retraídos.

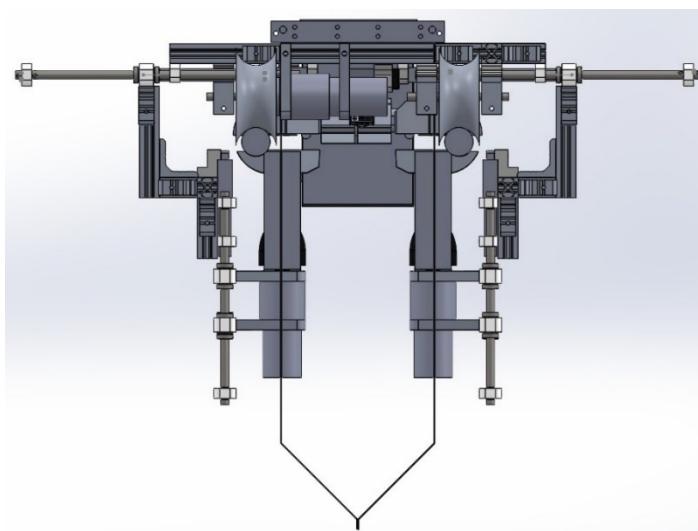


Fonte: De autoria própria.

4.2. Instalação

Ao chegar no local desejado, o módulo começará o processo de instalação. O processo é totalmente automático, e começa ao retrain os atuadores lineares verticais até o contato da peça parafusada, Figura 29, com a peça principal do espaçador, sendo então possível começar a parafusação. O posicionamento do motor de parafusadeira deverá ser ajustado à medida que o parafuso e porca são apertados, devido à diferença de altura da porca no início do processo comparado com o final.

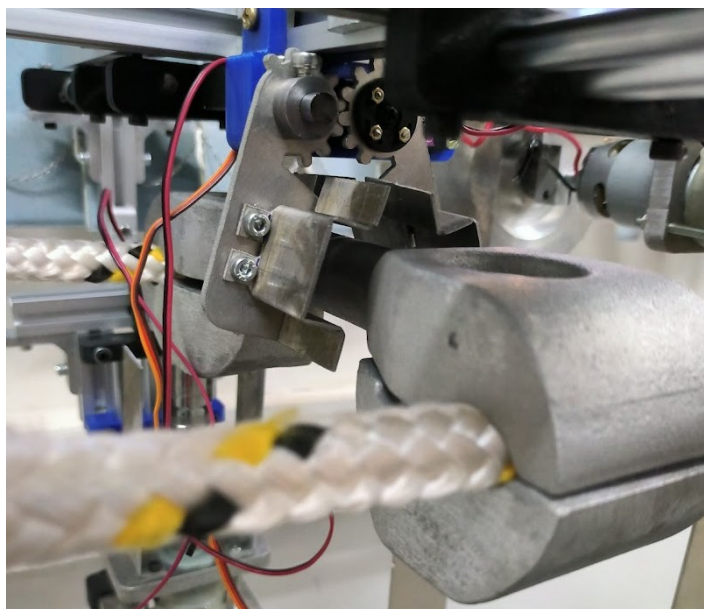
Figura 29 - Vista frontal do módulo durante a parafusação.



Fonte: De autoria própria.

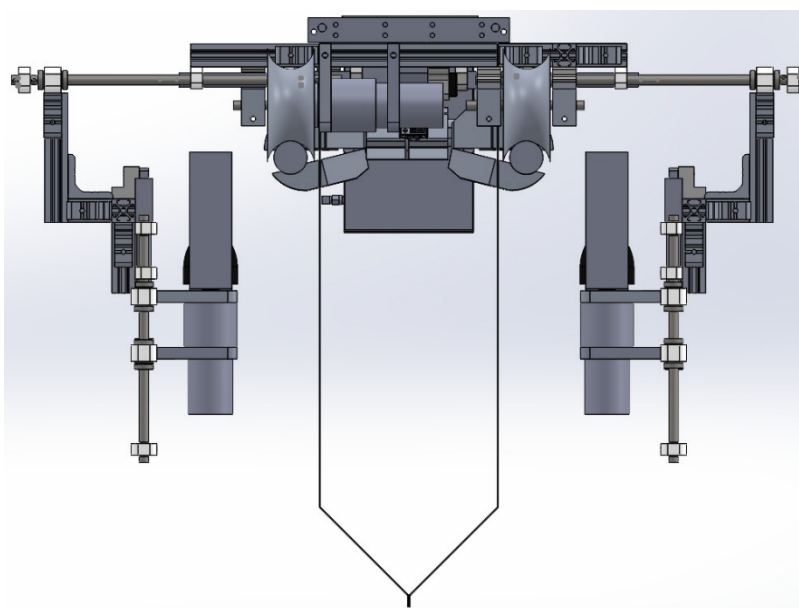
Ao terminar, a garra irá liberar a peça principal do espaçador , Figura 30, e os atuadores lineares irão posicionar o motor de fora da rota de colisão com os cabos, Figura 31, podendo então ser efetuada a próxima etapa de retirada do módulo robótico pelo drone. O espaçador instalado pode ser visto na Figura 32.

Figura 30 - Garra após liberação do espaçador durante simulação com corda.



Fonte: De autoria própria.

Figura 31 - Vista frontal do módulo preparado para a remoção.



Fonte: De autoria própria.

Figura 32 - Espaçador instalado nos cabos de teste.



Fonte: De autoria própria.

4.3. Remoção

O acoplamento do drone ao módulo robótico, como visto anteriormente, é feito através de uma trava eletromagnética localizada na parte superior do módulo. O controle preciso do drone para efetuar o acoplamento entre as travas torna a remoção em uma tarefa complexa e possivelmente perigosa de ser efetuada pelo técnico, podendo ocasionar em danos nos equipamentos.

Detalhes sobre esta etapa deverá ser estudado em trabalhos futuros. Uma opção atualmente utilizada em outros projetos para automatizar o processo de recuperação do módulo robótico consiste na utilização da visão computacional.

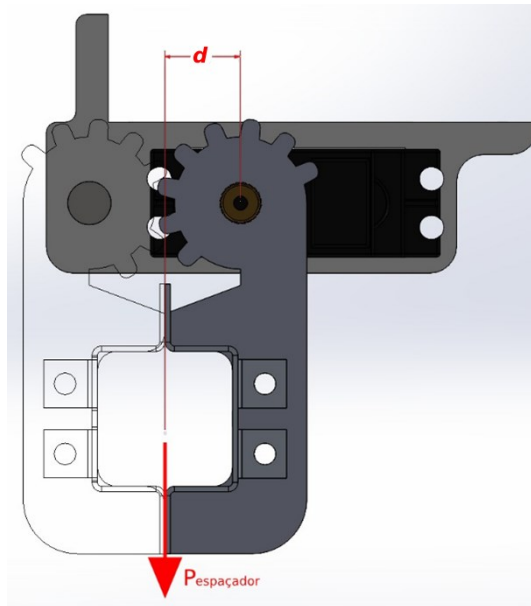
Ao implementar essa tecnologia no processo, o técnico deverá apenas posicionar o drone acima do módulo, onde através de câmeras instaladas neste, será capaz de utilizar a visão computacional para identificar e localizar o acoplador magnético presente em sua parte superior, e com base em um algoritmo poderá então autonomamente se aproximar ao módulo e efetuar o acoplamento com sucesso para prosseguir com a remoção do módulo.

5. Cálculos

5.1. Cálculo do Torque do Servomotor

Para determinar o torque que atuará no braço do servomotor que controla as garras de fixação do corpo principal do espaçador, pode-se considerar o torque necessário para manter as garras fechadas durante o transporte.

Figura 33 - Diagrama de corpo livre da pinça da garra.



Fonte: De autoria própria.

Esse torque T é resultado do peso do espaçador possuir uma excentricidade d em relação ao eixo do servo-motor, gerando um momento resultante que o servo deverá ser capaz de suportar. A Equação 1 apresenta a equação para o cálculo deste torque, aonde m é a massa do espaçador.

$$T_{\text{espaçador}} = m_{\text{espaçador}} * d = 1,4 \text{ kg} * 1,4 \text{ cm} \quad (1)$$

$$T_{\text{espaçador}} = 1,96 \text{ kg.cm} \quad (2)$$

O torque que o servo escolhido consegue suportar é de 11 kg.cm, superando significativamente o valor solicitante obtido.

5.2. Cálculo da massa

O drone responsável pelo transporte do módulo é o de modelo EFT E610, presente na Figura 34, normalmente utilizado na pulverização no setor agrícola. Sua

capacidade total de carga ou Maximum Take-Off Weight (MTOW) é de 25 kg, embora o volume máximo do compartimento de líquidos seja de 10 L [6].

Figura 34 - Drone EFT 610 utilizado no projeto.

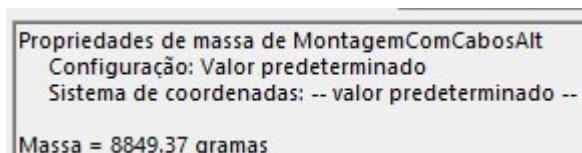


Fonte: Effort tech, 2024.

Como o drone foi projetado para o transporte de 10 kg, pode-se adotar este valor como o limite do peso do módulo robótico a ser desenvolvido.

Segundo o SolidWorks, software utilizado para o projeto e simulação do módulo, a massa do módulo total contendo todas as peças e com o espaçador já acoplado é de aproximadamente 8,85 kg (Figura 35).

Figura 35 - Print da propriedade de massa da montagem no SolidWorks.



Fonte: De autoria própria.

Já que o protótipo no software não contém parafusos, porcas ou cabos do sistema de controle, além de também ser possível encontrar variações na massa real das peças, foi adotado um erro de 10% no projeto e então considerado o peso real do módulo como 9,74 kg, que embora seja um valor satisfatório para a aplicação, está muito próximo da capacidade máxima a qual o drone foi projetado para transportar.

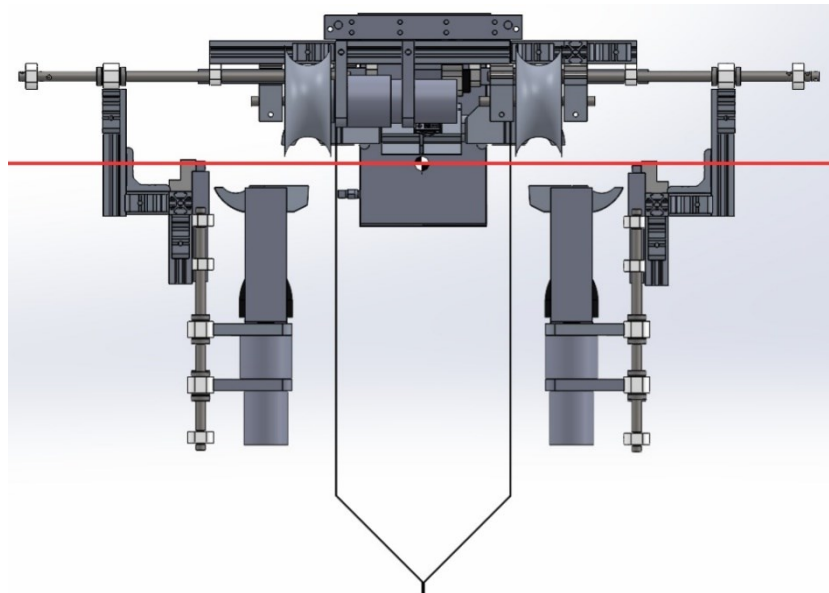
5.3. Cálculo do centro de gravidade

Como comentado anteriormente, se vê necessário que o centro de gravidade do módulo robótico ao se locomover-se pelos cabos fique localizado abaixo dos cabos, proporcionando um maior equilíbrio.

Através do mesmo software de CAD utilizado para calcular a massa total do módulo, também foi possível localizar o centro de gravidade e seguir com o projeto se assegurando que este se mantenha abaixo dos cabos como esperado.

Embora o centro de gravidade seja variável devido ao movimento dos atuadores lineares verticais, será analisado o centro de gravidade no pior caso, que acontece ao retrain os atuadores, elevando-os e consequentemente o centro de gravidade (Figura 36).

Figura 36 - Centro de gravidade do módulo.

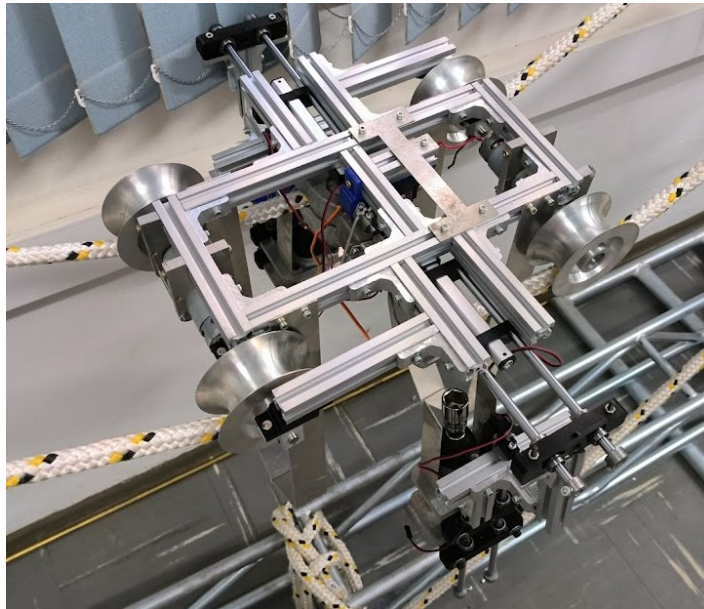


Fonte: De autoria própria.

6. Resultados e discussões

Após a finalização da montagem de todas as peças, todas as etapas de operação foram testadas manualmente, uma vez que o sistema de controle ainda não foi desenvolvido. O módulo robótico montado, mostrado na Figura 37, obteve grandes semelhanças com o protótipo 3D desenvolvido.

Figura 37 - Módulo robótico finalizado.



Fonte: De autoria própria.

No sistema de movimentação horizontal, pôde-se perceber que os fusos na configuração utilizada não foram capazes de fornecer a resistência necessária para evitar que o conjunto todo sofresse flambagem, visto na Figura 38. Isso irá diminuir a vida útil das peças do módulo, assim como diminuir a precisão tão importante para o processo. Em trabalhos futuros estas falhas serão sanadas.

Por outro lado, nenhum dano ao braço do atuador linear devido ao peso foi identificado.

Figura 38 - Flambagem no conjunto de parafusação.



Fonte: De autoria própria.

A configuração que poderá ser estudada no futuro se resume em rotacionar os fusos em 90° , aumentando assim o momento de inércia da peça impressa que fixa o conjunto de parafusação ao atuador horizontal e assim sua resistência ao momento causado pela excentricidade do posicionamento do motor.

O centro de gravidade obtido não foi localizado tão baixo como desejado, devido à grande quantidade de peças acima dos cabos. É valioso estudar alternativas que diminuirá esta quantidade, rearranjando as peças e estrutura para obter o resultado desejado.

7. Considerações finais

Com a maior parte da transmissão elétrica mundial sendo através de linhas aéreas, a utilização de espaçadores seguirá como uma parte indispensável neste sistema. A busca por formas de otimizar a instalação dos espaçadores, melhorando a segurança e confiabilidade na manutenção destes provou ser um tópico valioso a ser estudado. Como alternativa, a implementação de um módulo robótico para a instalação de espaçadores demonstra um avanço significativo neste setor. Ao automatizar essa tarefa, reduz-se o risco de acidentes, muitas vezes envolvendo humanos, otimiza-se o tempo de execução, reduz-se o custo e também minimiza-se os impactos ambientais quando comparado com outras alternativas, como a utilização de helicópteros.

O módulo robótico desenvolvido neste projeto, embora desenvolvido para apenas um tipo de espaçador, é significativamente escalável e poderá ser adaptado para diferentes tipos de espaçadores que utilizem do mesmo método de instalação.

Após futuro desenvolvimento na parte de controle do módulo e no sistema de reconhecimento e acoplamento com o drone, ele ainda deverá ser propriamente modificado conforme previamente discutido e testado para certificar-se do seu bom funcionamento.

Referências

- [1] KAGAN, N., CÉSAR, C., ROBBA, E. J. Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. 2° ed. São Paulo: Editora Blucher, 2021.
- [2] Speed grip spacers for two bundle conductors 3300 series. Disponível em: <<https://www.aflglobal.com/en/Products/Conductor-Accessories/Motion-Control-Accessories/Spacers/Speed-Grip-Spacers-for-Two-Bundle-Conductors---3300-Series>>. Acesso em: 16 de Julho de 2024.
- [3] Maxxweld. Catálogo de Produtos: Linhas de Transmissão E Redes De Distribuição, 2014. Disponível em: <https://www.maxxweld.com.br/wp-content/uploads/2014/10/catalogo_misto_redes_distribuicao.pdf> Acesso em: 10 de Julho de 2023.
- [4] Alldatasheet. MG996R Datasheet. Disponível em: <<https://www.alldatasheet.com/html-pdf/1131873/ETC2/MG996R/110/1/MG996R.html>>. Acesso em: 5 de Outubro de 2023.
- [5] Micro Atuador Linear VT - 12V. Disponível em: <<https://www.vinitronica.com.br/0j89tybfm-micro-atuador-linear-vt-6v>>. Acesso em: 20 de Maio de 2024
- [6] Effort-tech. E series hexacopter. Disponível em: <<http://www.effort-tech.com/en/e6>>. Acesso em: 10 de Julho de 2024.

