FREDERICO COSTA SOUZA

DRONE-ROBÔS PARA MANUTENÇÃO DE COMPONENTES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2023

FREDERICO COSTA SOUZA

DRONE-ROBÔS PARA MANUTENÇÃO DE COMPONENTES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações

Orientador: Prof. Dr. Rogério Sales Gonçalves

UBERLÂNDIA – MG

2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S729 Souza, Frederico Costa, 1991-
2023 Drone-Robôs Para Manutenção De Componentes Em Linhas De Transmissão [recurso eletrônico] / Frederico Costa Souza. - 2023.

Orientador: Rogério Sales Gonçalves.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.te.2023.580
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Gonçalves, Rogério Sales, 1981-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado Acadêmico, nº 370, PPGEM				
Data:	13/12/2023	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	10:20
Matrícula do Discente:	11913EMC006				
Nome do Discente:	Frederico Costa Souza				
Título do Trabalho:	DRONE-ROBÔS PARA MANUTENÇÃO DE COMPONENTES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO				
Área de concentração:	Mecânica dos Sólidos e Vibrações				
Linha de pesquisa:	Projeto de Sistemas Mecânicos				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	DRONE-ROBÔS UTILIZANDO-SE DEEP LEARNING PARA MANUTENÇÃO DE CABOS DE ALTA TENSÃO				

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Marcus Antonio Viana Duarte - FEMEC/UFU; Thiago Augusto Machado Guimarães - FEMEC/UFU; Marcelo Becker - EESC/USP; José Maurício Santos Torres da Motta - UnB; e Rogério Sales Gonçalves, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Dr. Rogério Sales Gonçalves, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.

Documento assinado eletronicamente por **Rogerio Sales Gonçalves**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 13/12/2023, às 10:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Thiago Augusto Machado Guimarães**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 13/12/2023, às 10:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Becker**, **Usuário Externo**, em 13/12/2023, às 10:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Marcus Antonio Viana Duarte**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 13/12/2023, às 10:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **José Maurício Santos Torres da Motta**, **Usuário Externo**, em 13/12/2023, às 10:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4948625** e o código CRC **362A7DC5**.

Referência: Processo nº 23117.078675/2023-57 SEI nº 4948625

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder a dádiva de viver e a oportunidade de desenvolver minhas capacidades.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade preciosa, ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro.

Ao meu orientador prof. Rogério Sales Gonçalves pelos valiosos auxílios prestados durante a realização do projeto e principalmente pela confiança em meu potencial.

À minha mãe Maria do Rosário Costa, por lutar sempre pela minha felicidade e de meu irmão. Dedico a ela esta conquista tão importante, que só pôde ser alcançada devido aos seus constantes sacrifícios realizados em prol de meu desenvolvimento como profissional e ser humano.

Ao meu irmão Cláudio Costa, pela amizade e companheirismo constantes.

À minha namorada Marcela Fonseca Reis, que me mostra a cada dia que o amor verdadeiro é possível de ser sentido e compartilhado nesta vida.

Aos grandes amigos Rafael Novais, Rafael Monteiro e Evandro Monteiro, cuja amizade de sempre constituiu reforço positivo e agradável para o bem fluir da vida durante o período de realização desta tese.

Ao meu pai Cláudio Vanderly, pelo apoio de sempre, torcendo e contribuindo para o meu sucesso.

À minha querida avó Iracy Ramos Costa, pois onde quer que ela esteja neste universo infinito, com certeza estará comemorando este triunfo de minha parte.

Aos engenheiros Pablo Barbosa e Murilo Rocioli, pelas importantes contribuições às tarefas do projeto.

À técnica de laboratório Guênia Ladeira e ao professor Carlos Gallo, pela assistência recebida durante as tarefas práticas realizadas em laboratório, na construção dos protótipos e testes.

A todo o pessoal da CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina) e aos técnicos de linha viva pela boa vontade na realização dos testes experimentais envolvidos nesta tese e pelo apoio financeiro a partir do processo P&D 05697-0518/2018.

A todos que contribuíram para que eu cumprisse com mais esta etapa da minha vida.

SOUZA, F. C. **Drone-robôs para manutenção de componentes em linhas de transmissão.** 2023. 354 p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

A aplicação de robôs em operações de manutenção de linhas de alta tensão tem avançado paulatinamente ao longo das últimas décadas, com destaque para o segmento dos robôs móveis e drones. Entretanto, mesmo com os avanços alcançados, muitos problemas relativos ao desenvolvimento desses robôs ainda persistem. Dentre as características desejáveis para esses robôs estão: confiabilidade; autonomia de funcionamento; baixo peso; alta capacidade de transposição de obstáculos e blindagem contra interferências eletromagnéticas, muitas dessas até então pouco contempladas nos robôs existentes. Isso posto, propôs-se nesta tese o desenvolvimento de drone-robôs para manutenção de linhas de transmissão de energia elétrica. Estes drone-robôs consistem em conjuntos formados por um drone que funciona acoplado a diferentes módulos robóticos, cada um destes desenvolvido para desempenhar uma tarefa de manutenção específica. Esta tese descreve a concepção, o desenvolvimento, a construção e testes experimentais de três drone-robôs: um para limpeza de cadeias de isoladores, um para remoção de detritos das linhas e outro para instalação de amortecedores de vibração do tipo *stockbridge*. Esta tese contempla também a implementação do controle de atitude de um drone apropriado para transporte dos módulos citados e um procedimento de blindagem dos drone-robôs contra interferências eletromagnéticas e descargas eletrostáticas provenientes de linhas de transmissão de até 138 kV. O emprego dos drone-robôs em testes de campo que ocorreram em instalações de uma companhia energética mostraram a eficiência destes robôs na superação de grande parcela das limitações existentes, fazendo com que os robôs desenvolvidos se destaquem como soluções promissoras no segmento de robôs para manutenção de linhas de alta tensão.

Palavras-chave: Robótica. VANTs. Manutenção de linhas de transmissão de energia. Blindagem eletrostática. Blindagem eletromagnética.

SOUZA, F. C. **Drone-robots for transmission lines components maintenance**. 2023. 353 p. Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

The application of robots in high voltage power line maintenance operations has gradually advanced over the last few decades, with emphasis on the segment of mobile robots and drones. However, even with the advances achieved, many problems related to the development of these robots still persist. Among the desirable characteristics for these robots are: reliability; operating autonomy; low weight; high capacity for overcoming obstacles and shielding against electromagnetic interference, many of which until then were little contemplated in existing robots. That said, it was proposed in this thesis the development of drone-robots for maintenance of high voltage power lines. These drone-robots consist of sets formed by a drone that works coupled to different robotic modules, each one of these developed to perform a specific maintenance task. This thesis describes the design, development, construction, and experimental testing of three drone-robots: one for cleaning insulator chains, one for removing debris from the lines, and another for installing *stockbridge* vibration dampers. This thesis also includes the implementation of attitude control for a drone suitable for transporting the mentioned modules and a procedure for the drone-robots shielding against electromagnetic interference and electrostatic discharges from transmission lines of up to 138 kV. The use of drone-robots in field tests conducted at a power company's facilities demonstrated the efficiency of these robots in overcoming a significant portion of existing limitations, making the developed robots stand out as promising solutions in the high-voltage power line maintenance robot segment.

Keywords: Robotics. UAVs. Power transmission lines maintenance. Electrostatic shielding. Electromagnetic shielding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Mapa do sistema de transmissão previsto até 2027 no Brasil.....	2
Figura 1.2	Componentes presentes ao longo das linhas de transmissão.....	4
Figura 1.3	Métodos usados na inspeção e manutenção de linhas de alta tensão: (a) Instalação de esferas de sinalização com o auxílio de helicóptero; (b) operadores realizando manutenção de cadeias de isoladores; (c) drone para inspeção de cabos de alta tensão.....	6
Figura 1.4	Robô suspenso por fio.....	8
Figura 2.1	Torres de transmissão com disposição dos condutores (a) triangular de circuito simples, (b) vertical de circuito duplo (c) horizontal de circuito simples.....	16
Figura 2.2	Linhas de transmissão entre torres com destaque para catenária.....	17
Figura 2.3	VANT pousado sobre uma linha de transmissão simulada.....	20
Figura 2.4	Robô híbrido construído por Chang et al. (2017).....	21
Figura 2.5	Drone projetado para locomoção sobre cabo de alta tensão da empresa Skive Airborne Robotics.....	22
Figura 2.6	Exemplos de trabalhos que desenvolvem robôs para manutenção: (a) robô para limpeza de linhas; (b) VANT para instalação de esferas de sinalização.....	24
Figura 2.7	Processo de equalização de potencial realizado por um operador de linha viva.....	27
Figura 2.8	Robô de inspeção sendo testado em contato com linhas a 500 kV.....	28
Figura 2.9	Gráfico temporal da forma de onda de tensão obtida na ocorrência da aplicação de um arco elétrico sobre a blindagem do robô, no estudo realizado por Barnett et al. (2020).....	30
Figura 2.10	Drone para instalação de espantadores de pássaros em contato com linha viva de 35 kV.....	31
Figura 2.11	Pouso de um drone sobre uma bancada de teste a 315 kV.....	32
Figura 2.12	Teste de descarga de alta tensão sobre estrutura blindada de um VANT: (a) Instalação experimental para medir o campo elétrico gerado; (b) Descarga na fuselagem do VANT a 1 cm de distância; (c)	

	Descarga no nariz do VANT a 1 cm de distância; (d) Descarga na asa do VANT a 1 cm de distância	33
Figura 2.13	Hexacóptero EFT E610	39
Figura 2.14	Tanque com capacidade de 10 litros	40
Figura 2.15	Dimensões do Hexacóptero EFT E610, em milímetros	40
Figura 2.16	Controlador de voo Pixhawk 2.1 Cube Black	41
Figura 2.17	Interface do *software* Mission Planner	42
Figura 2.18	Velocidade média do vento na região de Florianópolis, estado de Santa Catarina	44
Figura 2.19	Fluxograma de registro de VANTs junto ao órgão competente (ANAC).	45
Figura 2.20	Computador portátil Raspberry Pi modelo 3 B+	46
Figura 2.21	Placa WiFi LoRa ESP32	47
Figura 3.1	(a) Limpeza de cadeia de isoladores com panos em linhas desligadas; (b) Limpeza de cadeia de isoladores com lavadoras de alta pressão	49
Figura 3.2	(a) Limpeza de isoladores por caminhões. (b) Caminhão tanque para Limpeza de isoladores; (b) braço robótico	50
Figura 3.3	(a) Adaptação de uma lavadora de alta pressão em um helicóptero; (b) Lavagem de isoladores por helicóptero	51
Figura 3.4	(a) Robô desenvolvido para limpeza de isoladores; (b) Modelo semelhante desenvolvido por Wang et al. (2016)	51
Figura 3.5	(a) Drone para limpeza de isoladores; (b) Drone para combate a incêndios	52
Figura 3.6	Drone desenvolvido pela *Aerones* aplicado a degelo de turbinas de vento	53
Figura 3.7	Drone para limpeza de cadeias de isoladores	54
Figura 3.8	Procedimento para limpeza dos isoladores com helicóptero, segundo a norma IEEE 957-2005	58
Figura 3.9	Lavadora Portátil de Alta Pressão Worx WG629E	58
Figura 3.10	Conceito da operação proposta para o drone-robô	60
Figura 3.11	Hexacóptero EFT E610 utilizado e suas características	61
Figura 3.12	Desenho em CAD do Drone-robô para limpeza de cadeias de isoladores	62
Figura 3.13	Desenho em CAD do módulo robótico para lavagem de cadeias de isoladores	62
Figura 3.14	Vista superior do drone-robô para limpeza, com medidas em milímetros	63

Figura 3.15 (a) Bobina de papel alumínio 8011ho de 0,10 mm de espessura e (b) fita adesiva de alumínio, de espessura 0,18 mm..... 64
Figura 3.16 Câmera de profundidade modelo Intel RealSense D455..... 66
Figura 3.17 Imagem obtida com a câmera de profundidade, exibindo diagrama de pontos, nas situações: (a) detecção fora do alvo; (b) distância ótima para lavagem; (c) muito próxima da cadeia (menor que 1 metro)..... 67
Figura 3.18 Esquema de detecção da distância até a cadeia de isoladores pela câmera de profundidade..... 67
Figura 3.19 Esquema do sistema eletrônico do módulo de limpeza das cadeias de isoladores..... 69
Figura 3.20 Esquema da comunicação dos programas para controle e automação do módulo de remoção de detritos..... 70
Figura 3.21 Esquema do sistema de comunicação presente no módulo..... 71
Figura 3.22 Interface de controle do aplicativo "*Bluetooth Serial Controller*", com botões configurados para uso em destaque..... 71
Figura 3.23 Cadeia de isoladores construída para testes, com isoladores cobertos com uma solução salina a 35% (a) Perspectiva frontal; (b) Perspectiva lateral esquerda; (c) Perspectiva lateral direita..... 72
Figura 3.24 Protótipo de drone-robô. (a) vista geral; (b) vista lateral..... 74
Figura 3.25 Lavadora do módulo de limpeza com os componentes correspondentes..... 75
Figura 3.26 Limpeza da cadeia de isoladores vertical com drone equipado com câmera de profundidade..... 79
Figura 3.27 Limpeza de isoladores vista pela câmera RGB do drone..... 79
Figura 3.28 Cadeia de isoladores após limpeza: (a) Perspectiva frontal; (b) Perspectiva lateral esquerda; (c) Perspectiva lateral direita..... 80
Figura 3.29 Drone-robô para lavagem de uma cadeia de isoladores em linha de transmissão de 138 kV energizada..... 81
Figura 3.30 Visão da câmera RGB durante o teste experimental..... 81
Figura 3.31 Sistema de visão em profundidade desenvolvido para manter uma distância segura da cadeia de isoladores..... 82
Figura 4.1 Exemplo de detritos em linhas do sistema de transmissão..... 85
Figura 4.2 (a) Robô móvel; (b) ferramenta para limpeza..... 86
Figura 4.3 Drone com lança chamas realizando a limpeza de detritos..... 86
Figura 4.4 Adaptação de lança-chamas em drones:. (a) drone com lança-chamas; (b) solução comercial..... 87

Figura 4.5 Esquema representativo da vista frontal do módulo de remoção de detritos..... 89
Figura 4.6 Esquema representativo da vista lateral do módulo de detritos..... 90
Figura 4.7 (a) Desenho das estruturas inferiores e das estruturas dianteira e traseira com as cantoneiras do módulo de remoção de detritos; (b) Desenho da estrutura superior do módulo de remoção de detritos..... 94
Figura 4.8 Componentes fabricados em impressora 3D: (a) Suporte do atuador e do maçarico do módulo de remoção de detritos; (b) Suporte da câmera do módulo de remoção de detritos; (c) Suporte do motor do módulo de remoção de detritos..... 94
Figura 4.9 Simulação em elementos finitos da resistência da estrutura do módulo: (a) solicitação sobre estrutura lateral; (b) solicitação sobre estrutura inferior..... 95
Figura 4.10 Imagens da simulação em CAE do módulo de remoção de detritos: (a) movimentação sobre um cabo de aço; (b) destaque para o centro de massa..... 95
Figura 4.11 Desenho do módulo robótico com componentes do sistema eletrônico em destaque..... 97
Figura 4.12 Esquema do sistema eletrônico do módulo de remoção de detritos..... 98
Figura 4.13 Parte do sistema eletrônico responsável pelo acionamento do eletroímã..... 98
Figura 4.14 Comunicação do sistema eletrônico..... 99
Figura 4.15 Esquema da comunicação dos programas para controle e automação do módulo de remoção de detritos..... 100
Figura 4.16 Fluxograma do programa de automação do módulo destinado à execução pelo Raspberry Pi..... 100
Figura 4.17 Interface de controle do aplicativo *Arduino Bluetooth Controller*, com botões configurados para uso em destaque..... 101
Figura 4.18 Medição de campo magnético emitido por aparelho micro-ondas: (a) Medidor de campo magnético (gaussímetro) utilizado; (b) visão geral do teste; (c) destaque da região de medição..... 103
Figura 4.19 (a) Fechadura magnética A180 e (b) placa metálica utilizadas..... 105
Figura 4.20 Módulo para simulação construído para testes iniciais do pouso/retirada no cabo com o drone EFT E610..... 106
Figura 4.21 (a) estrutura metálica para fixação da linha simulada, (b) drone EFT

	E610 com o protótipo do módulo acoplado.....	106
Figura 4.22	Gráfico das atenuações do campo elétrico para faixa de frequências de 30 a 3000 Hz.....	108
Figura 4.23	Teste de emissão de campo magnético sobre o módulo.....	110
Figura 4.24	Fotos da estrutura fabricada para o módulo de remoção de detritos. (a) Estrutura com tampa superior; (b) Estrutura sem tampa.....	113
Figura 4.25	Módulo com o sistema eletrônico e outros componentes acoplados.....	114
Figura 4.26	Módulo com componentes externos em destaque.....	115
Figura 4.27	Teste de equilíbrio do módulo de remoção de detritos sobre o cabo de aço, mostrado em etapas sequenciais de (a) até (d).....	116
Figura 4.28	Teste de movimentação do módulo sobre um cabo de aço, em dois momentos (a) e (b).....	117
Figura 4.29	Teste de remoção de um tênis sobre o cabo com o acionamento do maçarico. (a) aproximação do módulo; (b) acionamento da chama; (c) visão da queima do barbante, (d) queda do tênis (objeto estranho).....	118
Figura 4.30	Teste de remoção de um tênis sobre o cabo com o acionamento do maçarico, visto da perspectiva da câmera presente no módulo: (a) aproximação do módulo; (b) acionamento da chama; (c) visão da queima do barbante, (d) queda do tênis (objeto estranho).....	119
Figura 4.31	Ângulo máximo da catenária atingido pelo módulo.....	120
Figura 4.32	Teste de pouso com módulo robótico: (a) posicionamento manual do drone em relação â linha, (b) contato do drone com a linha, (c) liberação do módulo na linha.....	120
Figura 4.33	Teste de recolhimento do módulo robótico: (a) posicionamento manual do drone em relação à linha, (b) contato do drone com o módulo, (c) recolhimento do módulo sobre a linha.....	121
Figura 4.34	(a) Drone e módulo robótico para remoção de detritos; (b) Destaque da unidade de controle do sistema de visão acoplado ao drone.....	122
Figura 4.35	Procedimento para deixar o módulo no cabo: (a) início do voo; (b) posicionamento do drone acima do cabo; (c) aproximação do cabo; (d) entrega do módulo; (e) afastamento do drone do cabo; (f) finalização da tarefa com o pouso do drone.....	123
Figura 4.36	Imagens do sistema de visão para entrega do módulo (a) seta indicando localização da linha, (b) linha detectada (c) aviso de que o pouso pode ser realizado.....	123
Figura 4.37	Procedimento para retirada do módulo do cabo: (a) Posicionamento	

	manual do drone sobre o cabo; (b) posicionamento fino no cabo a partir do sistema de visão; (c) acoplamento do drone no módulo; (d) retirada do módulo do cabo; (e) voo do drone para pouso; (f) pouso do conjunto drone-módulo robótico.....	124
Figura 4.38	Imagens do sistema de visão para busca do módulo (a) descrição da tela, (b) mensagem avisando que o pouso pode ser realizado.....	125
Figura 4.39	Módulo de remoção de detritos sobre estrutura de uma subestação a 138 kV: (a) imagem da câmera externa; (b) imagem da câmera acoplada ao módulo.....	126
Figura 4.40	Procedimento para colocação do módulo manualmente no cabo: (a) içamento do robô por corda; (b) posicionamento do robô no cabo energizado; (c) retirada da corda do módulo.....	126
Figura 4.41	Remoção do par de tênis da linha de alta tensão, pela visão da câmera em solo: (a) movimentação do módulo, (b) aproximação do maçarico ao ponto de queima do tênis, (c) queima e queda do tênis.....	127
Figura 4.42	Remoção do tênis da linha de alta tensão, pela visão da câmera na altura do poste: (a) aproximação do maçarico ao ponto de queima do tênis; (b) queima e queda do par de tênis.....	128
Figura 4.43	Remoção do par de tênis da linha de alta tensão, pela visão da câmera do módulo: (a) movimentação do módulo; (b) maçarico atuando no ponto de queima do cadarço do par de tênis; (c) queda do par de tênis.....	128
Figura 5.1	Modelo de amortecedor de vibração *stockbridge*.....	131
Figura 5.2	Robô Linescout para instalação de amortecedores de vibração.....	132
Figura 5.3	Robô para instalação e remoção de amortecedores de vibração.....	133
Figura 5.4	Esquema cinemático do módulo de instalação de amortecedores.....	136
Figura 5.5	Esquema representativo da vista lateral do módulo de instalação de amortecedores *stockbridge*.....	137
Figura 5.6	Mecanismo de pinça projetado.....	141
Figura 5.7	(a) Desenho da polia fabricada em ABS; (b) Placa superior de alumínio.....	144
Figura 5.8	Vista isométrica do módulo robótico com destaque para os motores Dynamixel.....	145
Figura 5.9	Componentes utilizados na construção do módulo robótico: (a) Mancal; (b) Suporte de eixo; (c) Rolamento linear; (d) Eixo Retificado; (e) Fuso trapezoidal; (f) Acoplamento elástico; (g) Castanha; (h) Pinça	

para transporte do amortecedor..... 145
Figura 5.10 Vista isométrica em CAD do módulo de instalação de amortecedores *stockbridge*..... 146
Figura 5.11 Vista isométrica em CAD do módulo de instalação de amortecedores *stockbridge* (lado oposto)..... 147
Figura 5.12 Simulações de avaliação da resistência da estrutura do módulo: avaliação da placa superior de alumínio..... 148
Figura 5.13 Simulações de avaliação da resistência da estrutura do módulo: chapa suporte do amortecedor e das pinças..... 148
Figura 5.14 Simulação de instalação de amortecedor, com detalhe para posição do centro de massa: (a) módulo sem amortecedor; (b) amortecedor recuado; (c) amortecedor e motoredutor avançados em direção ao cabo..... 149
Figura 5.15 Sistema elétrico/eletrônico do módulo de instalação de amortecedores de vibração..... 151
Figura 5.16 Parte do sistema eletrônico responsável pelo acionamento da fechadura magnética..... 151
Figura 5.17 Algoritmo do programa de movimentação executado pelo Raspberry Pi..... 152
Figura 5.18 Sistema de comunicação do módulo..... 153
Figura 5.19 Interface do aplicativo *Arduino Bluetooth Controller*, com legenda dos botões configurados para comando do módulo..... 154
Figura 5.20 Sistema de acionamento da fechadura magnética com chaves fim de curso: (a) Desenho em CAD ilustrando fins de curso superiores e fechadura magnética; (b) foto do módulo ilustrando o fim de curso inferior instalado..... 154
Figura 5.21 Desenho em CAD da caixa de alumínio usada para acomodar o sistema eletrônico: (a) caixa fechada; (b) visualização de componentes inseridos no interior..... 155
Figura 5.22 Estrutura final do módulo de instalação de amortecedores..... 160
Figura 5.23 Avaliação do equilíbrio do módulo de instalação de amortecedores, com posições obtidas na prática: (a) amortecedor recuado; (b) amortecedor e motoredutor avançados em direção ao cabo; (c) módulo sem amortecedor..... 160
Figura 5.24 Componentes do sistema de controle ainda sem cabeamento acomodados na caixa de alumínio..... 161

Figura 5.25 Instalação do amortecedor em laboratório: etapa de deslocamento do amortecedor até a linha..... 165
Figura 5.26 Instalação do amortecedor em laboratório: etapa de translação do bocal para parafusamento..... 165
Figura 5.27 Instalação do amortecedor em laboratório: etapa de parafusamento do amortecedor..... 166
Figura 5.28 Instalação do amortecedor em laboratório: etapa de desprendimento das pinças do amortecedor..... 166
Figura 5.29 Instalação do amortecedor em laboratório: fim da instalação e recuo das estruturas do módulo para a posição original..... 167
Figura 5.30 Movimentação do módulo transpondo o amortecedor: (a) módulo antes da transposição. (b) movimento durante a transposição. (c) transposição concluída..... 167
Figura 5.31 Imagem da câmera interna ao módulo, usada para auxiliar no posicionamento do bocal para o processo de desinstalação..... 168
Figura 5.32 Desinstalação do amortecedor: etapa de translação da estrutura de pinças em direção ao amortecedor..... 169
Figura 5.33 Desinstalação do amortecedor: etapa de translação do bocal para desaparafusamento..... 169
Figura 5.34 Desinstalação do amortecedor: etapa de desaparafusamento do amortecedor..... 170
Figura 5.35 Desinstalação do amortecedor: etapa de fixação do amortecedor pelas pinças..... 170
Figura 5.36 Desinstalação do amortecedor: etapa de transporte do amortecedor para o interior do módulo..... 171
Figura 5.37 Inserção do módulo de instalação de amortecedores sobre uma linha de alta tensão energizada a 138 kV..... 171
Figura 5.38 Imagem da câmera interna do módulo de amortecedores com este sobre uma linha viva..... 172
Figura A.1 Conexão serial entre Pixhawk 1 e Raspberry Pi 3B+..... 195
Figura A.2 Níveis de projeto da aplicação proposta, do mais alto ao mais baixo.... 196
Figura A.3 (a) Drone modelo F450 construído e (b) rádio controle Flysky Fsi6..... 198
Figura A.4 Sistema de visão: (a) receptor com cabo USB, (b) câmera Foxeer Arrow Mini, (c) transmissor 5,8 GHz..... 198
Figura A.5 Imagens da câmera Foxeer captadas pelo aplicativo “USB Camera”, durante um voo livre realizado com o drone F450..... 199

Figura A.6	Esquema do sistema eletrônico do drone.....	199
Figura A.7	Fluxograma do algoritmo de automatização da limpeza da cadeia de isoladores.....	201
Figura A.8	(a) Cilindros de isopor utilizados. (b) Cadeia simulada formada com três cilindros empilhados.....	202
Figura A.9	Execução da rotina de simulação da limpeza das cadeias pelo drone F450 - (a) etapa de limpeza vertical 1, (b) etapa 1 de giro em torno da cadeia em 60°, (c) etapa de limpeza vertical 2, (d) etapa 2 de giro em torno da cadeia em 60°, (e) etapa de limpeza vertical 3, (f) etapa de pouso.....	203
Figura B.1	Câmera Pi Camera (em destaque), posicionada em paralelo à direção frontal do drone.....	206
Figura B.2	Fluxograma do algoritmo de detecção de linha e pouso proposto.....	207
Figura B.3	Limites de tolerância para detecção da linha pelo algoritmo proposto, delimitados pela linha preta central e pelo retângulo sombreado.....	208
Figura B.4	Teste de pouso automático sobre uma linha: (a) decolagem manual, (b) posicionamento manual, (c) detecção da linha, e (d) pouso automático.....	209
Figura B.5	Imagens da Pi Camera durante um teste de pouso automático: (a) imagem durante um momento de correção da posição do drone, (b) imagem captada no momento em que o drone realiza o pouso.....	210
Figura B.6	Componentes do sistema de visão embarcados no drone F450.....	211
Figura B.7	Teste de transmissão sem fio das imagens da Pi Camera, durante um voo do drone.....	211
Figura B.8	Fluxograma do algoritmo para detecção de cores.....	212
Figura B.9	Teste do sistema de reconhecimento de linha.....	214
Figura B.10	Simulação da função de detecção de cores com uma folha de papel vermelha.....	214
Figura B.11	Esquema eletrônico do sistema de visão final.....	215
Figura B.12	Utilização de um monitor de 7 polegadas para recepção da imagem proveniente do sistema de visão, com alimentação a bateria.....	216

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Pressão recomendada para remoção de contaminantes de isoladores conforme norma IEEE 957-2005.....	57
Tabela 3.2	Especificações relativas ao sistema de limpeza do drone-robô de limpeza.....	59
Tabela 4.1	Resultados dos cálculos das variáveis de projeto do módulo.....	107
Tabela 4.2	Resultados dos cálculos de atenuação do campo magnético para a blindagem de t = 1 mm, em diferentes frequências.....	110
Tabela 4.3	Resultados das medições de campo magnético para cada posição do módulo testada, em μT.....	111
Tabela 4.4	Principais características do módulo de remoção de objetos estranhos.....	113
Tabela 5.1	Valores das grandezas físicas relativas ao modelo matemático proposto.....	157
Tabela 5.2	Variáveis utilizadas no cálculo do torque do motor para movimentação do fuso.....	158
Tabela 5.3	Variáveis utilizadas no cálculo do torque do motor para movimentação do fuso.....	159

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

3D	Três Dimensões
ABS	Acrinolitrila Butadieno Estireno
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
API	*Application Programming Interface*
CAD	*Computer Aided Design*
CAE	*Computer Aided Engineering*
CC	Corrente Contínua
CELESC	Centrais Elétricas de Santa Catarina
GPS	*Global Positioning System*
HDMI	*High-Definition Multimedia Interface*
HSV	*Hue, Saturation, Value*
IEC	*International Electrotechnical Commission*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
ISO	*International Organization for Standardization*
LAN	*Local Access Network*
LAR	Laboratório de Automação e Robótica
LiPo	Polímero de Lítio
LoRa	*Long Range*
LT	Linha de Transmissão
PD	*Partial Discharge*
PLA	Ácido Polilático
RF	Rádio Frequência
RGB	*Red Green Blue*
RTK	*Real Time Kinematic*
SD	*Secure Disk*
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
USB	*Universal Serial Bus*
VANT	Veículos Aéreos Não Tripulados

LISTA DE SÍMBOLOS

A	efeito de absorção
a	sinal de comando enviado a partir do aplicativo de celular
A_E	efeito de absorção do campo elétrico
A_M	efeito de absorção do campo magnético
a_z	aceleração desenvolvida na direção z do módulo de remoção de detritos
a_{z2}	aceleração desenvolvida na direção z do módulo de instalação de amortecedores de vibração *stockbridge*
B	fator de correção que corresponde ao efeito de paredes de blindagem finas
d	distância entre o centro das duas rodas e o centro de massa da estrutura do módulo de remoção de detritos no eixo vertical em y
d_i	distância entre a ponta da lavadora e a cadeia de isoladores
d_1	distância que separa as duas chapas laterais da estrutura do módulo de remoção de detritos
d_2	distância entre o centro das duas rodas e o centro de massa da estrutura do módulo de instalação de amortecedores de vibração *stockbridge* no eixo vertical em y
d_c	diâmetro do colar
d_m	diâmetro nominal da rosca
E_0	campo elétrico incidente
E_f	campo elétrico atenuado
f_r	coeficiente de atrito entre o material da rosca interna e o material da rosca externa
f	frequência da emissão do campo
F_{at1}	força de atrito na roda sobre o ponto A do módulo de remoção de detritos
F_{at2}	força de atrito na roda sobre o ponto B do módulo de remoção de detritos
F_{at3}	força de atrito na roda A do módulo de instalação de amortecedores

de vibração *stockbridge*

F_{at4} força de atrito na roda B do módulo de instalação de amortecedores de vibração *stockbridge*

f_c coeficiente de atrito entre o material do colar da rosca e de seu apoio

F_v força aplicada pelo vento sobre a estrutura do módulo de remoção de detritos

F_y força na direção do eixo y do módulo de remoção de detritos

F_{y1} força normal aplicada pelo cabo na roda 1 do módulo de remoção de detritos

F_{y2} força na direção do eixo y do módulo de instalação de amortecedores de vibração *stockbridge*

F_{y2} força normal aplicada pelo cabo na roda 2 do módulo de remoção de detritos

F_{y3} força normal aplicada pelo cabo na roda 1 do módulo de instalação de amortecedores de vibração *stockbridge*

F_{y4} força normal aplicada pelo cabo na roda 2 do módulo de instalação de amortecedores de vibração *stockbridge*

F_z força de tração na roda igual a F_{z1} e F_{z2}

F_z força na direção do eixo y do módulo de remoção de detritos

F_{z1} força de tração na roda sobre o ponto A do módulo de remoção de detritos

F_{z2} força de tração na roda sobre o ponto B do módulo de remoção de detritos

F_{z3} força de tração na roda A do módulo de instalação de amortecedores de vibração *stockbridge*

F_{z4} força de tração na roda B do módulo de instalação de amortecedores de vibração *stockbridge*

F_{zz} força de tração na roda igual a F_{z3} e F_{z4}

g aceleração da gravidade

H_0 campo magnético incidente

h_1 cota do centro do cabo até o início da chapa dobrada da estrutura lateral do módulo de remoção de detritos

h_2 comprimento da estrutura inferior esquerda do módulo de remoção de detritos

h_3 cota do centro do cabo até o topo da estrutura do módulo de

	remoção de detritos
H_f	campo magnético atenuado
L	distância entre os centros das duas rodas da estrutura do módulo de remoção de detritos em z
L_2	distância entre os centros das duas rodas da estrutura do módulo de instalação de amortecedores de vibração *stockbridge* em z
L_r	passo da rosca
m	massa do módulo de remoção de detritos
m_2	massa do módulo de instalação de amortecedores de vibração *stockbridge*
m_a	massa do amortecedor
M_A	momento em torno do ponto A do módulo de remoção de detritos
M_{A2}	momento em torno do ponto A do módulo de instalação de amortecedores de vibração *stockbridge*
M_B	momento em torno do ponto B do módulo de remoção de detritos
M_{B2}	momento em torno do ponto B do módulo de instalação de amortecedores de vibração *stockbridge*
M_z	momento em torno do eixo z do módulo de remoção de detritos
M_{z2}	momento em torno do eixo z do módulo de instalação de amortecedores de vibração *stockbridge*
P_g	força peso sobre a estrutura do módulo de remoção de detritos
P_{g2}	força peso sobre a estrutura do módulo de instalação de amortecedores de vibração *stockbridge*
P_{gy}	componente da força peso na direção y do módulo de remoção de detritos
P_{gy2}	componente da força peso na direção y do módulo de instalação de amortecedores de vibração *stockbridge*
P_{gz}	componente da força peso na direção z do módulo de remoção de detritos
P_{gz2}	componente da força peso na direção z do módulo de instalação de amortecedores de vibração *stockbridge*
P_t	força peso atuante sobre a estrutura do módulo de remoção de detritos
r	distância da fonte emissora
R	efeito de reflexão
r_1	raio da roda do módulo de remoção de detritos

r_2	raio da roda do módulo de instalação de amortecedores de vibração *stockbridge*
R_E	efeito de reflexão do campo elétrico
R_M	efeito de reflexão do campo magnético
S	efetividade da blindagem
S_E	efetividade
t	espessura das blindagens
T	torque do motor
W	esforço a ser suportado pelas pinças
W_m	carga do motoredutor que o mecanismo precisa carregar
α_n	ângulo do perfil da rosca
β	ângulo da catenária do cabo do módulo de remoção de detritos
β_2	ângulo da catenária do cabo do módulo de instalação de amortecedores de vibração *stockbridge*
δ	espessura da blindagem na qual a intensidade da onda emitida ao interior da blindagem é atenuada em aproximadamente 37 % do valor da onda incidente
θ	ângulo entre a estrutura inclinada e a horizontal do módulo de remoção de detritos
λ	comprimento de onda da onda incidente
μ_1	coeficiente de atrito dinâmico do módulo de remoção de detritos
μ_2	coeficiente de atrito dinâmico do módulo de instalação de amortecedores de vibração *stockbridge*
μ_m	coeficiente de atrito do material no cálculo do torque para suportar o motoredutor
μ_p	coeficiente de atrito entre a pinça e o amortecedor
μ_r	permeabilidade magnética relativa
σ_r	condutividade relativa
v	velocidade da ondas eletromagnética
τ	torque do módulo de remoção de detritos
τ_2	torque do módulo de instalação de amortecedores de vibração *stockbridge*

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – Introdução 1
1.1. Objetivo geral 10
1.2. Objetivos específicos..... 10
1.3. Justificativa..... 11
1.4. Inovações propostas/almejadas com esta tese..... 13
1.5. Organização do trabalho..... 13

CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica 15
2.1. Sistema de transmissão de energia elétrica..... 15
2.2. Robôs para inspeção de linhas de alta tensão..... 18
2.3. Robôs para manutenção de linhas de alta tensão..... 22
2.4. Fenômenos eletromagnéticos provenientes das linhas de alta tensão..... 24
2.5. Blindagem de robôs de inspeção e manutenção contra interferências eletromagnéticas e descargas eletrostáticas..... 26
2.6. Projeto de blindagem de robôs de inspeção ou manutenção contra interferências eletromagnéticas..... 34
2.7. Equipamentos básicos para construção dos drones robôs..... 38
2.7.1 Drone hexacóptero EFT E610..... 38
2.7.2 Influência dos ventos..... 43
2.7.3 Certificação da aeronave junto ao órgão competente (ANAC)..... 45
2.7.4 Placa Raspberry Pi..... 45
2.7.5 Placa WiFi LoRa ESP32..... 46

CAPÍTULO III – Drone-Robô para Limpeza de Cadeias de Isoladores..... 48
3.1. Revisão Bibliográfica..... 48
3.2. Justificativa..... 54
3.3. Metodologia..... 56
3.3.1 Concepção do drone robô para limpeza de isoladores..... 56
3.3.2 Projeto e construção do drone-robô para limpeza de isoladores..... 59
3.3.3 Desenvolvimento de blindagem eletromagnética e eletrostática para o

drone-robô de limpeza de isoladores..... 62
3.3.4 Sistema de detecção de distância do módulo de limpeza..... 65
3.3.5 Sistema eletrônico do módulo de limpeza..... 68
3.3.6 Testes em laboratório da lavagem de cadeias de isoladores com câmera de profundidade..... 72
3.3.7 Testes de validação em uma companhia energética..... 73
3.4 Resultados e Discussões..... 73
3.4.1 Protótipo de drone-robô para limpeza de cadeias de isoladores..... 73
3.4.2 Resultados dos cálculos do projeto da blindagem do drone-robô de limpeza..... 75
3.4.3 Resultados dos testes em laboratório da lavagem de cadeias de isoladores..... 78
3.4.4 Resultados dos testes em campo de validação da lavagem de cadeias de isoladores..... 80

CAPÍTULO IV – Drone-Robô para Remoção de Detritos de Linhas de Alta Tensão..... 84
4.1. Revisão Bibliográfica..... 84
4.2. Justificativa..... 87
4.3. Metodologia..... 88
4.3.1 Modelagem matemática..... 88
4.3.2 Projeto mecânico em CAD..... 93
4.3.3 Simulações CAE..... 94
4.3.4 Projeto do sistema de controle e automação do módulo..... 95
4.3.5 Programas de controle do módulo de remoção de detritos..... 99
3.3.6 Blindagem eletromagnética e eletrostática do drone-robô para remoção de detritos..... 101
4.3.7 Testes iniciais do módulo de remoção de detritos em laboratório..... 104
4.3.8 Testes iniciais de pouso sobre a linha com o drone EFT E610..... 104
4.3.9 Teste de liberação e retirada do módulo com sistema de controle já instalado com o drone EFT transportando o módulo de remoção de detritos..... 106
4.3.10 Testes em campo de liberação e atuação do módulo de detritos em linha viva..... 107
4.4 Resultados e Discussões..... 107
4.4.1 Resultados dos cálculos do projeto do módulo de remoção de detritos –

Cálculo do torque do motor..... 106
4.4.2 Resultados dos cálculos da blindagem eletromagnética..... 108
4.4.3 Fabricação e confecção do módulo de remoção de detritos..... 113
4.4.4 Resultados dos testes preliminares do módulo de remoção de detritos... 115
4.4.5 Testes de pouso e recolhimento do módulo simulado com o drone EFT E610..... 120
4.4.6 Resultados dos testes do módulo acoplado ao drone..... 121
4.4.7 Teste da interferência eletromagnética com o módulo de remoção de detritos colocado manualmente no cabo..... 125
4.4.8 Testes de remoção de detritos sobre linha de 138kV energizada..... 126

CAPÍTULO V – Drone-Robô para Instalação de Amortecedores de Vibração Stockbridge..... 130
5.1. Revisão Bibliográfica..... 131
5.2. Justificativa..... 133
5.3. Metodologia..... 135
5.3.1 Modelagem matemática do drone-robô..... 135
5.3.2 Projeto em CAD do módulo de instalação de amortecedores..... 143
5.3.3 Simulações em CAE do módulo de instalação de amortecedores..... 147
5.3.4 Sistema eletrônico do módulo de instalação de amortecedores..... 150
5.3.5 Blindagem eletromagnética e eletrostática do drone-robô para instalação de amortecedores de vibração..... 155
5.3.6 Teste do módulo em laboratório em linha simulada envolvendo instalação e desinstalação do amortecedor..... 156
5.3.7 Testes de validação em campo com inserção do módulo de amortecedores em linha viva por vara de manobra..... 156
5.4. Resultados e Discussões..... 157
5.4.1 Cálculos da modelagem matemática..... 157
5.4.2 Construção do módulo de instalação de amortecedores..... 159
5.4.3 Resultados dos cálculos da blindagem eletromagnética..... 162
5.4.4 Resultados dos testes de instalação e desinstalação do amortecedor em laboratório..... 164
5.4.5 Testes de validação em campo com inserção e atuação do módulo de amortecedores em linha viva por vara de manobra..... 171

CAPÍTULO VI – Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros..... 173

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 178

APÊNDICES

Apêndice A..... 194

A.1. Estabelecimento do controle de atitude automático..... 194

A.2. Construção e operação de um drone de pequeno porte auxiliar para teste..... 196

A.3. Automatização dos movimentos do drone..... 199

A.4. Testes de automatização com o drone F450..... 202

A.5. Construção de drone F550 para testes das funções de automatização testadas..... 204

A.6. Conclusões..... 204

Apêndice B – Desenvolvimento de sistema de visão para pouso do drone e transporte dos módulos às linhas de alta tensão..... 205

B.1. Implementação de função de detecção da linha de alta tensão e pouso automatizado..... 205

B.2. Testes do programa de detecção de linhas e pouso automático com drone F450..... 208

B.3. Testes do programa de detecção de linhas e pouso automático com drone F450 simulando acoplamento do módulo robótico..... 210

B.4. Implementação de função de detecção de cores para recolhimento do módulo..... 212

B.5. Programa contemplando união das funções de detecção de linha e de cores..... 213

B.6. Sistema eletrônico do sistema de visão acoplado ao drone EFT E610..... 214

B.7. Testes de liberação e busca do módulo sobre linha simulada com auxílio de imagens do sistema de visão..... 216

B.8. Conclusões..... 217

Apêndice C – Esquemas elétricos dos módulos robóticos..... 218

Apêndice D – Programas desenvolvidos para automatização dos módulos robóticos..... 223

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A humanidade depende da eletricidade para seu conforto e sobrevivência, permitindo a realização de diversas tarefas cotidianas e salvando vidas em diversos casos. Consequentemente, a importância da energia elétrica na vida humana tem crescido consideravelmente, o que tem resultado em um aumento constante da demanda por essa forma de energia. Devido a isso, inúmeras linhas de transmissão de energia elétrica são construídas continuamente.

No mês de abril de 2023, o Sistema Elétrico Brasileiro alcançou a marca de 181,765 quilômetros de linhas de transmissão em funcionamento (MME, 2023). A Figura 1.1 mostra o mapa do sistema de transmissão com as linhas instaladas no Brasil estimado para concretização até o ano de 2027. Com toda essa extensão de linhas em funcionamento, torna-se então indispensável a realização de inspeções e manutenções periódicas nos equipamentos e acessórios associados a essas linhas, a fim de garantir o seu adequado funcionamento sem interrupções.

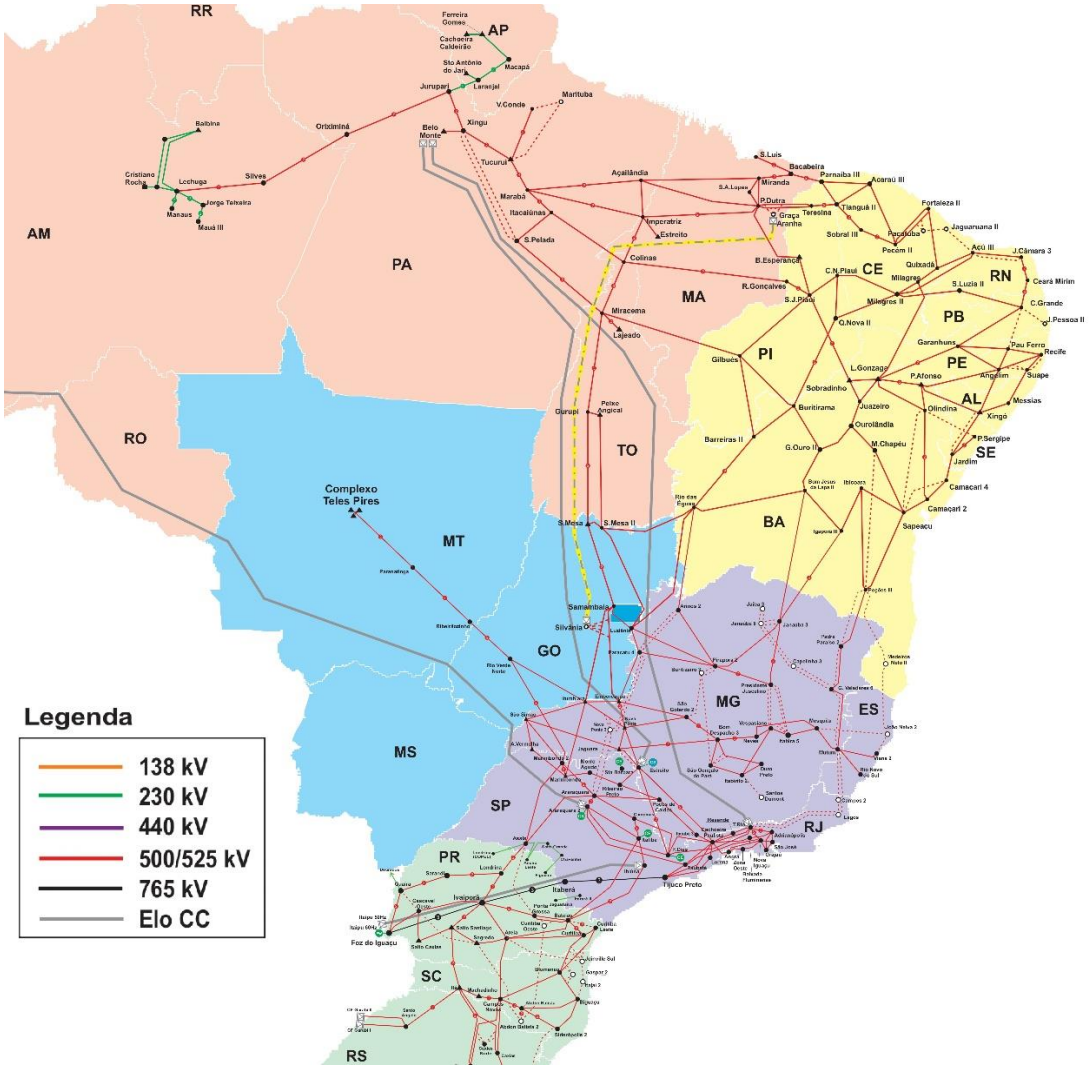
Os danos causados pela interrupção no fornecimento de energia elétrica são consideráveis. Interrupções breves, mesmo que por alguns minutos, têm o potencial de resultar em prejuízos significativos. Essas consequências são ainda mais graves quando as interrupções acontecem de maneira imprevista, diferentemente de quando são planejadas e anunciadas com antecedência. Uma falha inesperada no abastecimento elétrico pode acarretar problemas como (ACENDE BRASIL, 2014):

- Acidentes de trânsito devido ao comprometimento da sinalização;
- Males à saúde, especialmente de idosos, devido à perda de climatização;
- Ocorrência de incêndios ou explosões devido à perda de sensores e controles eletrônicos em ambientes industriais;
- Danos a maquinários industriais;

- Quedas na produção industrial e de vendas no comércio, perda de negócios;
- Atividades de vandalismo, furtos e saques.

Portanto, a garantia da qualidade no abastecimento de energia elétrica torna-se uma preocupação central durante o planejamento e a execução das atividades no setor elétrico. Quanto mais se investe na melhoria da qualidade do fornecimento energético, menor se torna o custo suportado pelos consumidores em relação a interrupções e prejuízos causados aos equipamentos (ACENDE BRASIL, 2014).

Figura 1.1 – Mapa do sistema de transmissão previsto até 2027 no Brasil.



Fonte: ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Mapa do Sistema de Transmissão - Horizonte 2027**, 2023. Disponível em: https://www.ons.org.br/_layouts/download.aspx?SourceUrl=https://www.ons.org.br/Mapas/Mapa%20do%20Sistema%20de%20Transmissao%20-%20Horizonte%202027.pdf. Acesso em 30 ago. 2023.

O monitoramento dos sistemas de transmissão de energia elétrica é uma das tarefas mais significativas desempenhadas pelas concessionárias de energia do país, visto que o cálculo da estimativa do tempo de vida útil dos cabos e componentes pode prevenir um comprometimento da ordem de milhões de reais da receita das concessionárias. Os esforços gastos no monitoramento do estado do sistema de distribuição apresentam como objetivo a redução de falhas devido à interrupção do fornecimento de energia elétrica, de danos a equipamentos e de custos de reparo (PINHEIRO; LINS, 2007).

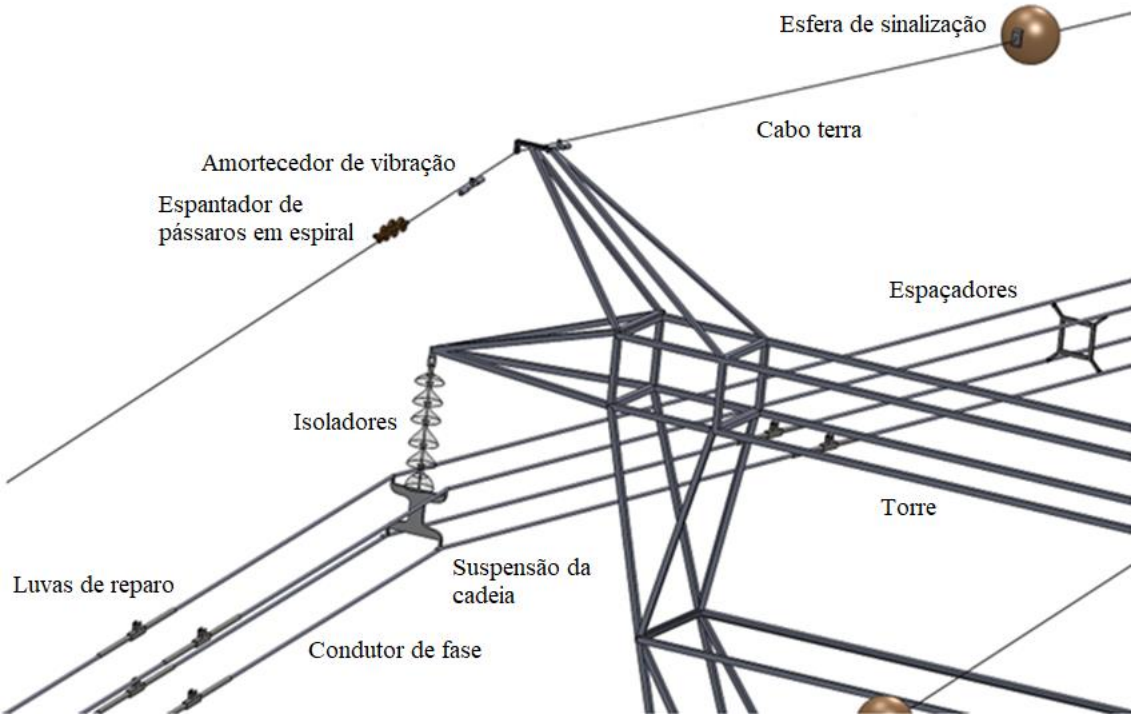
Boa parte dos componentes utilizados em redes de distribuição de energia elétrica não são submetidos a controles de qualidade rigorosos durante seu processo de manufatura, possibilitando a existência de imperfeições nos mesmos (ROCHA; SEQUEIRA, 2004). Além disso, esses elementos veem suas características elétricas deteriorarem-se ao decorrer do tempo devido a uma variedade de causas, como exposição às condições climáticas, processo de envelhecimento natural, atos de vandalismo e outras intervenções inadequadas por parte de seres humanos (FAGUNDES, 2005). Torna-se essencial realizar tarefas de manutenção corretiva e preventiva, com o propósito de resolver possíveis falhas que já tenham causado interrupções no fornecimento de energia ou que possam comprometê-lo eventualmente.

No cotidiano da inspeção e manutenção de cabos de alta tensão, inúmeras tarefas são realizadas rotineiramente. A partir dessas inspeções, é possível determinar se a manutenção deve ser de emergência ou programada. Essas tarefas incluem (COPEL, 2015):

- Inspeção detalhada dos cabos, para avaliação de integridade física e mecânica, verificando a existência de defeitos;
- Inspeção visual dos cabos condutores, espaçadores, isoladores de porcelana ou de vidro, e torres;
- Instalação ou retirada de esferas de sinalização aérea no cabo para-raios;
- Serviços de emenda do cabo, limpeza, reparos e instalações de novas linhas;
- Verificação das faixas de servidão, identificando objetos que possam representar riscos para a linha, bem como a erosão do solo, dentre outras questões.

A Figura 1.2 mostra um esquema com uma torre sustentando linhas de transmissão e seus respectivos acessórios, recorrentes ao longo de toda a extensão das linhas. O emprego de tais acessórios motiva inspeções e manutenções frequentes, que são realizadas diariamente em todo o território do país.

Figura 1.2 – Componentes presentes ao longo das linhas de transmissão.



Fonte: Autor.

A existência de riscos humanos ocasionados pelas operações de inspeção e manutenção em cabos de alta tensão, como a exposição constante dos operadores a intensos campos eletromagnéticos, ocorrência de descargas elétricas fatais e de queda dos operadores de linha viva (CPNSP, 2005), motiva o desenvolvimento de soluções para redução ou eliminação de tais riscos.

A Figura 1.3 mostra diferentes métodos rotineiramente usados na inspeção e manutenção de linhas de alta tensão. Os métodos mais comuns são (GONÇALVES et al., 2022) (COPEL, 2015):

- Dois operadores a bordo de um helicóptero fazem a inspeção visual. Um deles faz a inspeção com um binóculo, observando a estrutura física da rede e verificando as torres e a ligação dos condutores. O outro operador utiliza um aparelho de termovisão e outros sensores para verificar se há sobreaquecimento em condutores e conectores;
- Um operador a bordo de um helicóptero, vestido com uma roupa isolante, se mantém suspenso em uma plataforma. À medida que o helicóptero se aproxima do condutor, o operador utiliza um bastão para equalizar o potencial elétrico da plataforma com o potencial da linha de transmissão. Em seguida, o operador acopla ao condutor os

equipamentos de segurança e os dispositivos necessários à inspeção. Em seguida, ele se transporta para o condutor, permanecendo sentado ou agachado sobre o condutor. O helicóptero se afasta e o operador realiza a inspeção e/ou manutenção se arrastando sobre o condutor.

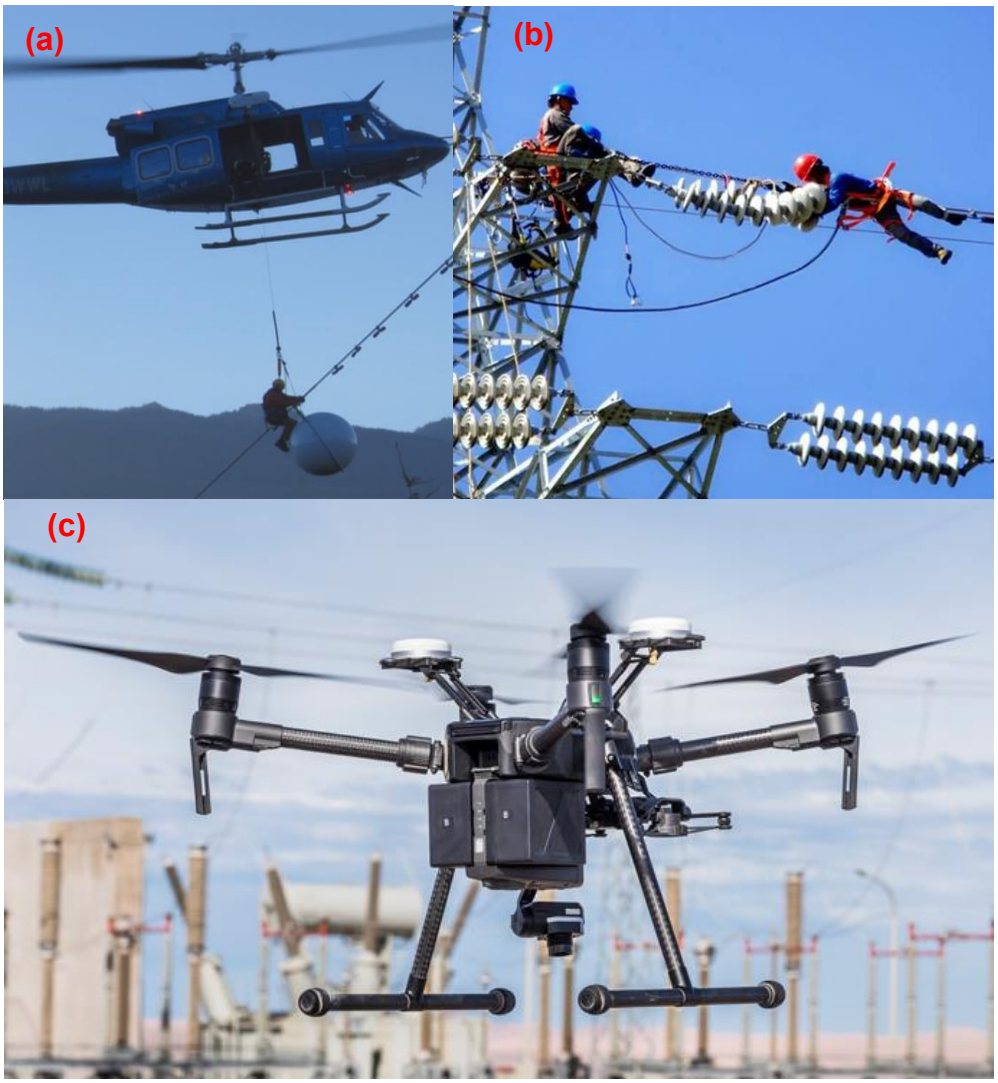
- Suspensão de um operador em uma plataforma com o auxílio de um veículo terrestre. A plataforma é eletricamente isolada do veículo para que não haja risco de curto-circuito. Para executar qualquer atividade no condutor, o operador equaliza o potencial da plataforma com o potencial da linha de transmissão. Neste caso, o operador permanece sobre a plataforma enquanto realiza a inspeção/manutenção e o veículo se movimenta na direção do condutor. Também existem plataformas que são posicionadas sobre os próprios cabos e os técnicos realizam a movimentação delas.
- Outra estratégia empregada regularmente é a utilização dos "*boom trucks*". Estes são caminhões que geralmente abrigam uma cabine instalada em sua extremidade, possibilitando a um operador controlar braços manipuladores. Entretanto, problemas como baixa mobilidade, controlabilidade e acessibilidade são constantes. Isso faz com que esta estratégia se limite a ser empregada na manutenção de elementos a baixas alturas.
- Inspeção dos cabos de alta tensão por VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados). Estes possuem câmeras com alta capacidade de zoom, câmera térmica e outros sensores para identificação dos pontos problemáticos das linhas de alta tensão.

Novas abordagens estão sendo pesquisadas em todo o mundo para automatizar os processos de inspeção e manutenção em linhas de transmissão. Os principais avanços incluem a identificação e mapeamento dos locais onde podem existir falhas em cabos através de equipamentos de GPS (*Global Positioning System*), utilização de câmeras sofisticadas e sensores em conjunto com equipamentos de aquisição de dados e computadores e a aplicação de robôs (GONÇALVES et al., 2022).

Em 2013, Pagnano, Höpf e Teti sugeriram como objeto de futuras pesquisas na área de inspeção o imperativo de se desenvolverem algoritmos de controle da aeronave que sejam robustos, garantindo assim alta estabilidade de voo e inspeções precisas em situações em que há a influência de ventos laterais fortes. Além disso, indicam a importância da implementação de sistemas de detecção e evasão de obstáculos, e ainda a inserção nos robôs de um mecanismo de rastreamento das linhas, como complemento ao já utilizado sistema de GPS. Atualmente já existem tecnologias para o rastreamento de linhas como as propostas por Tian, Wang, Zhu, (2015) e Zhou et al. (2016). Entretanto, o problema da

influência dos ventos nos VANTs continua sendo um desafio técnico. Existe um fabricante de drones que não recomenda operar o equipamento com ventos maiores que 8 m/s (DJI, 2016).

Figura 1.3 – Métodos usados na inspeção e manutenção de linhas de alta tensão: (a) Instalação de esferas de sinalização com o auxílio de helicóptero; (b) operadores realizando manutenção de cadeias de isoladores; (c) drone para inspeção de cabos de alta tensão.



Fonte: (a) INMR. **Long Lake Crossing Marker Ball & Insulator Replacement** (Video). Disponível em: https://www.inmr.com/replacing-insulators-ageing-long-span-lake-crossing-video/. Acesso em 30 ago. 2023.; (b) KV CABLE. **Power Line Insulator**, 2023. Disponível em: https://www.kvcable.com/cable-accessories/power-line-insulator/. Acesso em 30 ago. 2023.; (c) DRONEU. **How to Use Drones for Power-line Inspections**, 2018. Disponível em: https://www.thedroneu.com/blog/how-to-use-drones-for-powerline-inspections/. Acesso em 30 ago. 2023.

Montambault e Pouliot (2010) sugeriram o uso de robôs para tarefas de inspeção/manutenção com a colaboração de dispositivos robóticos, afirmando que parte da solução para o problema da inspeção automatizada de linhas de transmissão viria da colaboração entre várias plataformas, seja entre vários VANTs ou entre VANTs e robôs com rodas posicionados sobre as linhas. Atualmente, encontram-se estudos e aplicações que propõem a colaboração entre vários VANTs, como apresentado por Erdelj et al. (2019). Outros trabalhos já propõem o contato de VANTs diretamente com as linhas para tarefas de inspeção, como os de Mirallès et al. (2018) e Chang et al. (2017).

A questão da inspeção dos cabos de alta tensão está quase completamente resolvida graças à aplicação de drones que transportam câmeras de alta resolução e grande capacidade de zoom, assim como câmeras infravermelhas/térmicas (GUAN, 2021). As pesquisas ultimamente têm se concentrado no desenvolvimento de *softwares* para otimizar a análise dos dados a serem adquiridos nas inspeções (SILANO et al., 2021; BABA, 2022; MENG et al., 2021).

Enquanto os processos de inspeção dos elementos dos sistemas de transmissão estão em fase avançada, com a utilização de sistemas semiautomatizados como os drones, com as atividades de manutenção não ocorreu o mesmo. O problema da manutenção das linhas de alta tensão se encontra ainda em aberto, devido à sua complexidade (GONÇALVES et al., 2022). Essas operações ainda são realizadas basicamente com operadores de linha viva portando ferramentas manuais. Os métodos tradicionais de manutenção, como a utilização de helicópteros com operadores, mesmo auxiliados por automatização, apresentam riscos de queda e acidentes, além dos altos custos associados. As operações realizadas geralmente são corretivas, ou seja, para sanar um problema já ocorrido (COPEL, 2015).

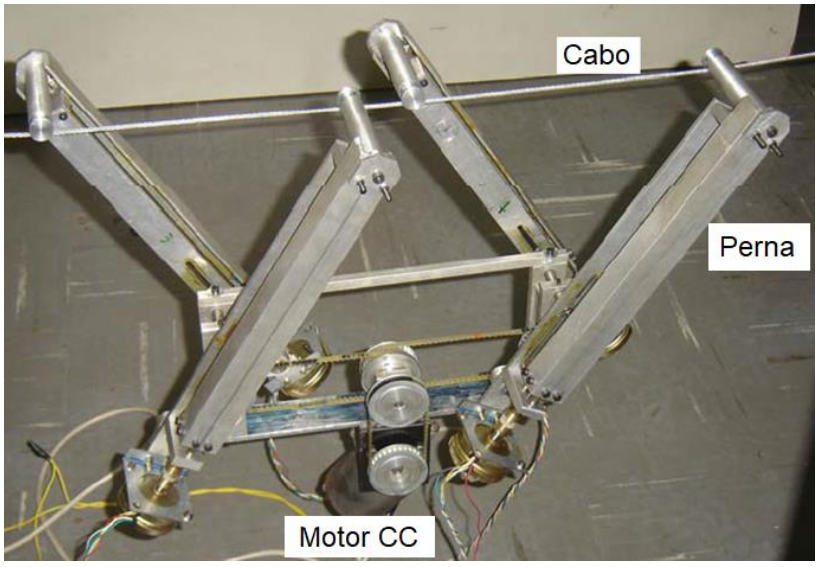
É indiscutível a existência de dificuldades para a manutenção das redes de energia, utilizando qualquer método. Isto é motivado pelo fato de que as linhas de transmissão, que emitem campos elétricos intensos, serem ambientes complexos e perigosos (CPNSP, 2005). Além disso, os dispositivos acoplados às linhas de transmissão apresentam configurações muito variáveis, em diversidade e tamanho (Fig. 1.2).

Com base na mobilidade dos seres vivos dotados de pernas, pode-se imaginar o desenvolvimento de um robô que seja capaz de caminhar no cabo, que tenha uma concepção estrutural simples e que consiga transpor obstáculos de diversas dimensões dispostos aleatoriamente. Este robô consequentemente possibilitaria uma unidade de controle simplificada. Se o robô caminhar pendurado no cabo, seu próprio peso auxiliará no seu equilíbrio. As dificuldades para que o robô satisfaça estes requisitos são grandes porque, além dos obstáculos tais como esferas, emendas e grampos, ele deve poder

atravessar as torres de sustentação dos cabos, ultrapassar os diversos tipos de isoladores, bem como alterar a direção de movimento, acompanhando o cabo.

A Figura 1.4 apresenta um robô com pernas de comprimentos variáveis suspenso por fio. Apesar das dificuldades elencadas anteriormente, os robôs móveis suspensos por cabo ainda continuam em desenvolvimento e representam soluções para problemas de manutenções pontuais, diminuindo os riscos assumidos pelos técnicos em contato com os cabos. Os obstáculos mais comuns a serem transpostos pelos robôs ao se locomoverem pelas linhas são os amortecedores de vibração, esferas de sinalização e as próprias torres, sendo estas últimas os maiores obstáculos a serem superados (Fig. 1.2).

Figura 1.4 - Robô suspenso por fio (GONÇALVES et al., 2022).



Fonte: GONÇALVES, R. S.; SOUZA, C. C.; HOMMA, R. Z.; SUDBRACK, D. E. T.; TRAUTMANN, P. V.; CLASEN, B. C. Review: robots for inspection and maintenance of power transmission lines. **Mechanisms and Machine Science**, Vol. 23, p. 119-142, 2022.

Os robôs que se movimentam nos cabos, apesar das diversas configurações já propostas, não atendem totalmente às necessidades. Cada modelo apresenta vantagens e desvantagens, mas sua aplicação tem sido praticamente inviável. Outros sistemas são dotados de rodas. Neste caso, ao se deparar com cada emenda de cabo, esfera ou grampo, os robôs não são capazes de transpor e continuar seu movimento (GONÇALVES et al., 2022). Para contornar este problema, são utilizados sistemas em que o robô é composto por várias partes, conectadas em série. Esta configuração torna o controle deste robô extremamente complexo, inviabilizando o sistema (BUEHRINGER et al., 2010).

Outro problema identificado no desenvolvimento dos robôs móveis aplicados nos cabos de alta tensão é a impossibilidade de ter-se um robô compacto multitarefas, isto é,

capaz de fazer inspeções e diferentes tarefas de manutenção.

Existe ainda o problema da interferência eletromagnética sobre os robôs, que é um grande entrave à ampla aplicação dos robôs de manutenção sobre as linhas, pelo fato destes terem de operar em contato ou muito próximos às linhas. A existência de dispositivos eletrônicos que operam em baixa tensão embarcados nestes robôs torna ainda mais complexa a questão, uma vez que estes dispositivos são muito sensíveis a pequenas variações de tensão, o que pode comprometer completamente suas funções relacionadas à comunicação remota, captação de imagens, acionamento de atuadores e outros dispositivos (NURIEV; GIZATULLIN; GIZATULLIN, 2017).

Em função dos riscos decorrentes das operações de manutenção nas linhas de alta tensão e das limitações apontadas aos métodos automatizados descritos, pode-se propor a utilização de robôs para automatização desta tarefa de manutenção em conjunto com drones (GONÇALVES; CARVALHO, 2013) (MONTAMBAULT; POULIOT, 2010).

Baseando-se no estado da arte apresentado, e levando em consideração todas as limitações dos métodos e pesquisas descritos, Gonçalves e Carvalho (2013) sugeriram a utilização de drones em conjunto com robôs móveis. Este dispositivo foi denominado drone-robô por ser formado por um drone que permite o acoplamento de diferentes módulos robóticos a serem aplicados em atividades de manutenção. Cada módulo apresenta uma função específica, que atende alguma demanda de operação a ser feita nas linhas de transmissão. Elementos como esferas de sinalização, espaçadores de linhas e amortecedores de vibração podem ser transportados e acoplados às linhas. O módulo robótico é deixado no cabo e após realizar a manutenção automatizada, o drone retira o módulo robótico do cabo, estando então apto a realizar novas manutenções. O foco nos robôs modulares se justifica pela dificuldade de se construir um robô leve e de tamanho compatível com as linhas que consiga agregar todas as operações necessárias de manutenção sobre estas.

Os robôs podem coletar informações durante o processo de inspeção, para análise posterior ou análise *online*, o que pode envolver diversas operações relacionadas aos cabos de alta tensão. A utilização de sensores e outros dispositivos de comunicação e ação embarcados auxiliarão no cumprimento da função a que os módulos foram projetados a desempenhar.

O principal objetivo dos dispositivos propostos nesta tese é reduzir a possibilidade de acidentes com os operários/técnicos que realizam este tipo de manutenção. O acoplamento destes módulos robóticos ao drone permite a transposição de todos os obstáculos presentes nos cabos de alta tensão e cabos para-raios (cabo terra) além de permitir a movimentação do drone-robô entre as torres.

O drone-robô também diminui os riscos aos operadores por não ser necessária a instalação destes nos cabos a partir da subida dos operadores às torres de alta tensão. Desta forma, o dispositivo proposto visa à redução nos riscos humanos associados às operações de manutenção em cabos de alta tensão e cabo terra, como a exposição a intensos campos eletromagnéticos, quedas e riscos de choque elétrico.

Deve-se destacar que os drones existentes no mercado não são desenvolvidos para aplicações diretamente ou próximas aos cabos de alta tensão, o que motiva o desenvolvimento de blindagens contra descargas eletrostáticas e interferências eletromagnéticas provenientes das linhas visando à proteção destes equipamentos.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo principal desenvolver soluções para manutenção de cabos de alta tensão e cabo terra (para-raios), utilizando sistemas drone-robôs.

1.2 Objetivos Específicos

1. Desenvolver e validar um módulo robótico a ser acoplado a um drone visando a limpeza de cadeias de isoladores ou de outros elementos das linhas de alta tensão;
2. Desenvolver e validar um módulo robótico para ser acoplado a um drone visando a remoção de detritos presente nas linhas de alta tensão;
3. Desenvolver e validar um módulo robótico para ser acoplado a um drone visando a realização de instalação e/ou remoção de amortecedores de vibração do tipo *stockbridge*;
4. Desenvolver e testar um sistema de blindagem eletromagnética e eletrostática para os drone-robôs que deverão trabalhar em contato com linhas de transmissão de até 138 kV.

Para se desenvolver os drone-robôs propostos nesta tese, contou-se com o apoio de outros pesquisadores do grupo de pesquisa do Laboratório de Automação e Robótica (LAR) da Universidade Federal de Uberlândia, que atuaram em frentes de trabalho distintas relacionadas ao desenvolvimento de cada solução. Esta tese foi desenvolvida com foco no projeto, construção e programação dos sistemas eletrônicos e de controle e automação dos drone-robôs, além da realização dos testes em laboratório e em campo dos drone-robôs. Outras etapas do desenvolvimento dos drone-robôs, como projeto em CAD/CAE, foram

abordadas por outros pesquisadores, tendo sido brevemente referidas nos capítulos desta tese a respeito de cada módulo.

1.3 Justificativa

A importância da utilização de sistemas automáticos ou semiautomáticos para a manutenção de redes de energia elétrica e/ou a instalação de componentes é reforçada pelas informações descritas anteriormente neste capítulo.

Para justificar a proposta desta tese, foram relatados e analisados os principais trabalhos que buscam soluções em inspeção e manutenção de linhas de alta tensão. De acordo com os trabalhos encontrados, pode-se dizer que a área de inspeção de linhas de alta tensão por robôs já está consolidada, enquanto a área de manutenção por robôs ainda encontra dificuldades significativas, que impedem sua implementação de forma ampla. Dentre elas, podemos citar a suscetibilidade a interferências eletromagnéticas; baixa autonomia de funcionamento; baixa capacidade de superação de obstáculos; peso alto e controlabilidade ineficiente, referentes aos robôs já desenvolvidos. Os robôs que se movimentam nos cabos, apesar das diversas configurações já propostas, não atendem totalmente às expectativas. Cada modelo apresenta vantagens e desvantagens, mas sua aplicação tem sido praticamente inviável.

Trabalhos recentes têm mostrado avanços paulatinos na área de manutenção, principalmente no segmento dos VANTs e robôs móveis, que conseguem transpor obstáculos com maior eficácia. Entretanto, mesmo com os avanços alcançados nas últimas décadas, muitos problemas ainda persistem, de modo que ainda não há notícia de robôs desenvolvidos para manutenção que possam ser aplicados na prática sem sofrer de algum dos problemas relatados. Ainda se encontra em aberto o desenvolvimento de um robô confiável, de baixo peso e autônomo, com alta capacidade de transposição de obstáculos e blindado contra interferências eletromagnéticas.

O sistema drone-robô proposto, em que um drone trabalha em conjunto com módulos robóticos autônomos, apresenta-se como uma proposta inovadora e promissora para solucionar a maior parte dos problemas relatados envolvendo manutenção de linhas de alta tensão.

Os protótipos desenvolvidos neste projeto poderão ser aplicados em companhias energéticas, após a sua validação. Com eles, as companhias terão a possibilidade de realizar operações de manutenção como a limpeza de cadeias de isoladores presentes no sistema de distribuição de energia elétrica; remoção de objetos estranhos que comprometem o funcionamento das linhas e a instalação ou substituição de amortecedores

de vibração *stockbridge*. Isto irá minimizar as possibilidades de interrupção na distribuição da energia e diminuir os riscos de acidentes com funcionários das companhias energéticas.

Para a sociedade, que é altamente dependente da eletricidade, a ausência desta pode inclusive levar pessoas a óbito, quando seres humanos estiverem dependentes de equipamentos hospitalares para sua sobrevivência. Desta forma, o uso destes drone-robôs poderá minimizar as interrupções de fornecimento de energia, diminuindo os prejuízos para a sociedade.

O uso do drone-robô também diminui os riscos aos operadores por não ser necessária a instalação/colocação dos robôs nos cabos por meio da subida dos operadores às torres de alta tensão. Desta forma o dispositivo proposto visa a redução nos riscos humanos associados com as operações de manutenção tradicionais em cabos de alta tensão e cabo para-raios como a exposição a intensos campos eletromagnéticos, quedas e riscos de choque elétrico.

Em comparação com as operações de manutenção realizadas com o auxílio de helicópteros, os custos e tempos gastos nas operações também são reduzidos significativamente com o emprego dos drone-robôs. Esta redução de custos para as concessionárias pode impactar positivamente no orçamento do consumidor final, que poderá receber o serviço de fornecimento de energia com menor custo. A eficiência das tarefas de manutenção também é aumentada, com um gasto de tempo consideravelmente menor na realização destas do que quando feitas por métodos tradicionais.

Os robôs de inspeção e manutenção que operam em contato com linhas vivas ou próximos a elas requerem sistemas de blindagem robustos que os livrem de efeitos danosos decorrentes dos fenômenos eletromagnéticos provenientes dessas linhas. Caso contrário, a operação dos robôs é completamente inviabilizada. Os trabalhos encontrados que descrevem o desenvolvimento de blindagem para robôs de inspeção e manutenção em geral empregam métodos empíricos de blindagem, por tentativa e erro sem detalhamento do procedimento de projeto adotado. Avaliando a literatura científica existente sobre o assunto, conclui-se que se encontra em aberto o desenvolvimento de uma metodologia teórica e prática de blindagem eletrostática e eletromagnética que possibilite a operação segura dos robôs nas linhas de transmissão.

A principal contribuição científica deste trabalho é apresentar uma metodologia inovadora de blindagem eletrostática e eletromagnética que mapeia os fenômenos eletromagnéticos provenientes das linhas de transmissão que podem afetar o funcionamento dos drone-robôs, propondo uma modelagem matemática que permita o projeto dos drone-robôs de modo a livrá-los das influências indesejáveis desses fenômenos.

1.4. Inovações propostas/almejadas com esta tese

Este trabalho tem como objetivo desenvolver tecnologias para a solução do problema da manutenção de linhas de alta tensão. Os avanços tecnológicos visados com este projeto são o desenvolvimento de robôs inovadores em relação às tecnologias existentes no mercado e às descritas na literatura científica.

As contribuições científicas dizem respeito à concepção e projeto dos drone-robôs embasados por modelagem matemática e ao desenvolvimento de blindagens contra descargas eletrostáticas e interferências eletromagnéticas que os drone-robôs venham a sofrer, que inclusive poderão ser aplicadas a todos os drone-robôs que porventura venham a ser construídos no futuro.

Em resumo, as principais inovações almejadas com este trabalho são:

- Projeto, construção e validação de um drone-robô para limpeza de cadeias de isoladores e outros elementos, que possua como funcionalidade especial a execução do procedimento de limpeza de forma semiautomatizada, segundo as recomendações das normas técnicas usuais;
- Projeto, construção e validação de um drone-robô para remoção de detritos presentes nas linhas, que realize a operação de forma automática e com a opção de dispensar operadores para inserir o módulo sobre a linha, sendo este posicionado sobre e retirado da linha com o auxílio de um drone;
- Projeto, construção e validação de um drone-robô para instalação ou desinstalação de amortecedores de vibração *stockbridge* das linhas, que realize as operações de forma automática e com a opção de dispensar operadores para inserir o módulo sobre a linha, sendo este posicionado sobre e retirado da linha com o auxílio de um drone;
- Desenvolver um procedimento embasado cientificamente de blindagem eletromagnética e eletrostática para todos os módulos robóticos que vierem a ser empregados em tarefas de manutenção de linhas de transmissão de até 138 kV.

1.5. Organização do trabalho

Esta tese está dividida em seis capítulos. Após este primeiro capítulo introdutório, o segundo capítulo aborda a revisão bibliográfica com os temas gerais pertinentes à tese, que são: sistema de transmissão de energia elétrica; robôs para inspeção de linhas de alta tensão; robôs para manutenção de linhas de alta tensão; fenômenos eletromagnéticos

provenientes das linhas de alta tensão; blindagem de robôs de inspeção e manutenção contra interferências eletromagnéticas e descargas eletrostáticas; projeto de blindagem de robôs de inspeção ou manutenção contra interferências eletromagnéticas; equipamentos básicos para construção dos drone-robôs.

Os capítulos terceiro, quarto e quinto apresentam o desenvolvimento das soluções para limpeza de cadeias de isoladores; remoção de detritos das linhas e instalação de amortecedores de vibração *stockbridge*, respectivamente. Cada um desses capítulos foi desmembrado em tópicos relativos a cada solução desenvolvida, e incluem as considerações que justificam o desenvolvimento dos módulos propostos.

O sexto capítulo expõe as conclusões gerais obtidas ao término desta tese e propõe sugestões de trabalhos futuros.

A tarefa adicional de “Implementar controle de atitude em um drone apropriado para transporte dos módulos robóticos, visando o seu posicionamento em relação às linhas, pouso na linha e alinhamento em relação a outros componentes existentes nos cabos de alta tensão” também foi proposta. O desenvolvimento referente a essa meta foi incluído no Apêndice A desta tese. O desenvolvimento de um sistema de visão para auxílio do pouso do drone sobre as linhas de alta tensão foi relatado no Apêndice B. O Apêndice C contém os esquemas elétricos dos módulos e o Apêndice D apresenta os códigos dos programas usados para a automatização dos módulos.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo abrange a revisão bibliográfica geral do trabalho, que se destina a contextualizar todas as soluções desenvolvidas nesta tese. A revisão envolve os seguintes temas: Sistema de distribuição de energia elétrica; Robôs para inspeção de linhas de alta tensão; Robôs para manutenção de linhas de alta tensão; Fenômenos eletromagnéticos provenientes das linhas de alta tensão; Blindagem de robôs de inspeção e manutenção contra interferências eletromagnéticas e descargas eletrostáticas; Projeto de blindagem de robôs de inspeção ou manutenção contra interferências eletromagnéticas; Equipamentos básicos para construção dos drone-robôs.

2.1. Sistema de transmissão de energia elétrica

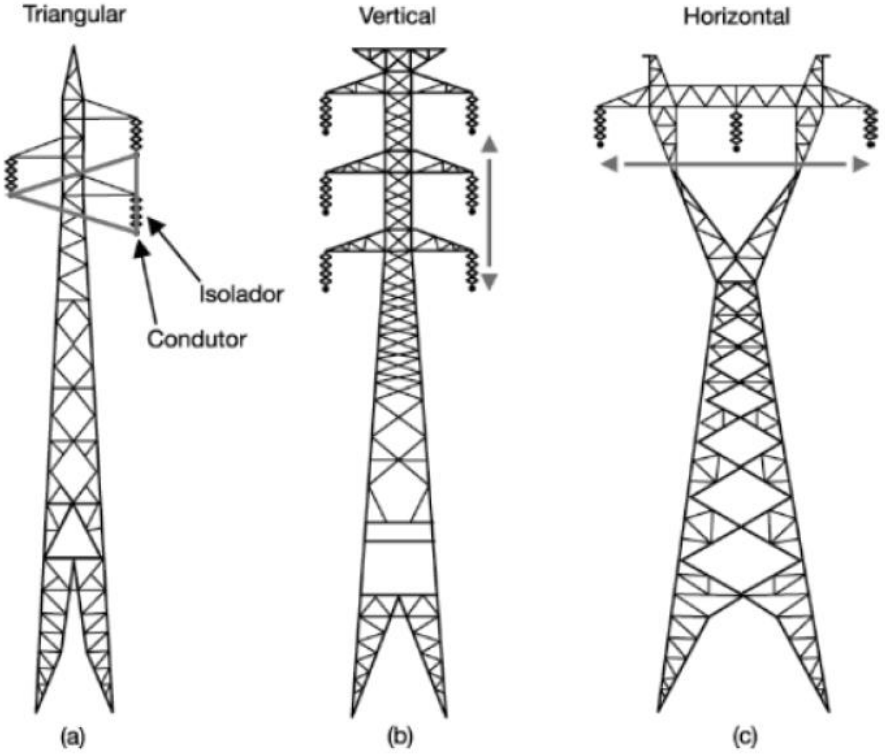
De modo geral, os sistemas de transmissão de energia elétrica são compostos por componentes como linhas de transmissão (LT), sistemas de proteção (relés, disjuntores e outros) e subestações. As linhas de transmissão são formadas por elementos como cabos condutores, cadeias de isoladores, ferragens, torres e cabos para-raios, que também são referidos como "cabos de guarda" (VASCONCELOS, 2017).

Em relação às torres de transmissão de energia elétrica, existem diferentes maneiras de classificá-las, com base em fatores como a disposição dos condutores, o número de circuitos e a função na linha. Em relação à disposição dos condutores, há três categorias: triangular, como mostrado na Fig. 2.1 (a); vertical, conforme ilustrado na Fig. 2.1 (b); e horizontal, representado na Fig. 2.1 (c) (VASCONCELOS, 2017).

No que diz respeito ao número de circuitos, existem as torres de circuito simples, representadas por três condutores de energia, conforme visto nas Fig. 2.1 (a) e 2.1 (c). Além disso, existem as torres de circuito duplo, que possuem um circuito com três condutores do

lado esquerdo e outros três do lado direito, conforme exemplificado na Fig. 2.1 (b) (PINTO, 2014).

Figura 2.1 - Torres de transmissão com disposição dos condutores (a) triangular de circuito simples, (b) vertical de circuito duplo (c) horizontal de circuito simples.



Fonte: PINTO, M. O. **Energia elétrica: geração, transmissão e sistemas interligados.** LTC, Rio de Janeiro, 2014.

Os condutores são os componentes ativos essenciais da linha de transmissão. É por meio deles que ocorre a transferência de energia elétrica. Nesse sentido, as normas NBR 5.369/1971 e NBR 7.270/1998 estipulam os padrões para cabos de alumínio (CA) e cabos de alumínio com alma de aço (CAA) a serem utilizados como condutores nas linhas de transmissão (VASCONCELOS, 2017).

Para dimensionamento dos robôs de inspeção e/ou manutenção, é preciso conhecer o perfil da torre e dos cabos em que ele irá trabalhar, para evitar colisões e consequentemente, possíveis danos ao robô ou ao sistema de transmissão. Neste projeto, será levado em consideração o sistema de transmissão das Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC).

As tensões transmitidas pelas linhas da CELESC são de 69 kV e 138 kV. As torres são verticais de circuito duplo. A altura das torres mais utilizadas varia entre 29 e 34 metros e algumas torres apresentam até 72 metros de altura. As distâncias padrão entre cabos nas

torres de transmissão de 69 kV são de 2,2 metros entre fases e de 2 metros de distância em relação ao cabo disposto na região superior da torre. Já para as linhas de 138 kV, existem 3,2 metros entre fases e 2,5 metros de distância em relação ao cabo disposto na região superior da torre (cabo para-raios).

Nas linhas da CELESC, existe diferença entre as dimensões dos cabos para-raios e os cabos das fases. Os cabos terra são cabos tipo para-raios em fibra ótica, com 24 fibras. O diâmetro externo nominal é de 18,75 mm. Já os cabos de distribuição possuem bitola mínima de 170,45 mm². Os cabos utilizados são dos tipos CA e CAA.

Quando os cabos interagem com as torres, surge a curva catenária. A catenária é a curva que surge no cabo de alta tensão quando este é apoiado em seus extremos pelas torres, por efeito de seu próprio peso. No contexto da pesquisa sobre o robô móvel suspenso por cabo, a sua importância ocorre porque, conforme a distância entre as torres de apoio do cabo varia, o robô pode enfrentar dificuldades para superar a inclinação próxima a uma dessas torres. O gráfico representando a forma da curva da catenária pode ser encontrado na Fig. 2.2. A tensão presente no cabo e a sua curvatura podem ser deduzidas com base nos parâmetros do cabo e na distância entre as torres (FUCHS; ALMEIDA, 1982).

Figura 2.2 – Linhas de transmissão entre torres, com destaque para catenária.



Fonte: APRENDENDO ELÉTRICA. **Por que os fios das torres não ficam esticados?**, 2020. Disponível em: https://aprendendoeletrica.com/por-que-os-fios-das-torres-nao-ficam-esticados/. Acesso em: 19 jan. 2024.

Importante considerar que os limites para o ângulo de subida dos módulos robóticos sobre o cabo serão delimitados pela tração do motor e a aderência entre as rodas e o cabo.

Faz-se então imprescindível a determinação do ângulo máximo da catenária, para definir qual será a possível trajetória que será desempenhada pelos módulos robóticos.

2.2 Robôs para inspeção de linhas de alta tensão

Novas abordagens estão sendo pesquisadas em todo mundo para automatizar o processo de inspeção e manutenção em linhas de transmissão. Os principais avanços incluem a identificação e mapeamento dos locais onde podem existir falhas em cabos através de equipamentos de GPS (*Global Positioning System*), utilização de câmeras sofisticadas para visualizar problemas, utilização de sensores, equipamentos de aquisição de dados e computadores (utilizados para processamento dos dados obtidos dos sensores e imagens para a identificação dos locais dos problemas) e a aplicação de robôs móveis que atuam sobre as linhas em atividades de inspeção e manutenção e Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) para inspeção (GONÇALVES et al., 2022). Chen et al. (2021) apresenta uma revisão de trabalhos envolvendo diferentes técnicas para reconhecimento de ambiente por robôs de inspeção.

Como vantagens, a utilização de VANTs para inspeção de linhas de transmissão apresenta redução significativa no tempo gasto nas operações de inspeção e aumento considerável da eficiência das mesmas, além de diminuir os riscos com os funcionários (ZHU, LI, YAN, 2018) (LI et al., 2016). Quando comparada com a utilização de robôs móveis suspensos, a utilização dos VANTs proporciona inspeção muito mais rápida (LI, 2015).

Pode-se elencar várias vantagens relacionadas à utilização de VANTs para a aplicação em inspeções, quais sejam (LI, 2015):

- Superação ampla das restrições impostas pelo terreno;
- Um mesmo VANT pode inspecionar linhas de transmissão de diversos níveis de tensão;
- Realização rápida da inspeção, com rápida detecção automatizada de defeitos;
- Baixo custo de utilização e manutenção frente ao uso de helicópteros;
- Pode identificar uma variedade de defeitos nas linhas de transmissão;
- Maior aproximação das linhas e torres quando comparado a utilização de helicópteros.

Dentre os problemas da utilização dos VANTs pode-se destacar (LI, 2015):

- Baixa autonomia quando comparado com o uso de helicópteros;
- Limitações de voo em função de intempéries, chuvas e ventos fortes;

- Problemas na regulamentação em vários países que impedem a operacionalização de VANTs fora do alcance da visão humana;
- Interferências eletromagnéticas que podem afetar o funcionamento dos VANTs;

Atualmente o problema da inspeção dos cabos de alta tensão está praticamente resolvido com a utilização de VANTs que podem portar câmeras de alta resolução e com grande capacidade de zoom, câmera de infravermelho e sensores para identificar o efeito corona. As pesquisas atuais têm se concentrado no desenvolvimento de softwares para otimizar a análise dos dados adquiridos com o objetivo de realizar as manutenções necessárias e em pesquisas para aumentar a autonomia dos VANTs a partir da recarga de baterias pelo pouso ou em proximidade com os cabos de alta tensão. Exemplos de trabalhos nesse sentido são os de Bhola et al. (2018), Nguyen, Jenssen, Roverso, (2019); Simic, Bil, Vojisavljevic (2015) e Simic, Bil, Vojisavljevic (2016).

Bhola et al. (2018) desenvolveram um método de detecção das linhas de energia em imagens captadas por um VANT. A abordagem de processamento de imagens é baseada em métodos espectrais-espaciais.

Erdelj et al. (2019) apresentaram um algoritmo que automatiza a substituição dos VANTs usados nas operações de inspeção, de forma que o serviço se torna ininterrupto. Foi utilizado o protocolo de comunicação MAVLink para implementação do algoritmo, que é um protocolo padrão de VANTs comerciais.

Nguyen, Jenssen e Roverso (2019) apresentam um sistema de visão automático atrelado a um VANT de inspeção, baseado em um algoritmo *deep learning*. Este algoritmo é capaz de detectar e classificar automaticamente componentes presentes nas linhas, além de falhas significativas que demandam manutenção, por meio das imagens captadas pelo VANT durante as operações de inspeção. Takaya et al. (2019) também apresentam um sistema de inspeção que pode ser adaptado amplamente em modelos de aeronaves multirotores de produção industrial.

Dentro da tecnologia dos sensores e dispositivos de captura de imagens aplicados à inspeção, Teng et al. (2017) propuseram a utilização de um sensor LIDAR. O sensor é acoplado a um VANT e foi utilizado no mapeamento de montanhas. Eles citam como vantagens da utilização do sensor embarcado no VANT o seu menor custo de implementação e maior agilidade de inspeção em comparação com a aplicação de sensores LIDAR baseados no solo além de proporcionarem alta resolução (angular de 0,125° e de alcance de 4 cm), o que permite que o sensor possa ser aplicado de forma vasta no campo de inspeção de linhas de alta tensão.

Ainda no emprego da tecnologia de sensores LIDAR, Pu et al. (2019) introduziram uma abordagem de varredura de corredores de linhas de transmissão que é capaz de detectar automaticamente características importantes das linhas como os tipos de solo em que estão alicerçadas, tipo de cabos, torres, vegetação circundante e tipo de construção.

Pagnano, Höpf e Teti (2013) sugerem como objeto de futuras pesquisas na área o imperativo de se desenvolverem algoritmos de controle da aeronave que sejam robustos, garantindo assim alta estabilidade de voo e inspeções precisas em situações em que há a influência de ventos laterais fortes. Além disso, indicam a importância de sistemas de detecção e evasão de obstáculos, e ainda um mecanismo de rastreamento das linhas, além do já utilizado sistema de GPS.

Alguns trabalhos apresentam soluções de inspeção em que VANTs realizam as tarefas de inspeção em contato direto com as linhas de alta tensão. Um trabalho encontrado que concretiza esta ideia é o trabalho de Miralles et al. (2018). Neste trabalho, é descrita a construção de um VANT com capacidade semiautomática de pouso em uma linha de transmissão carregando uma carga útil. Este VANT está sendo pesquisado pela empresa *MIR Innovation* vinculada a Hydro-Québec e possuiu um sensor LIDAR para realizar inspeções detalhadas nos cabos de alta tensão permitindo identificar falhas no revestimento dos cabos, Fig. 2.3.

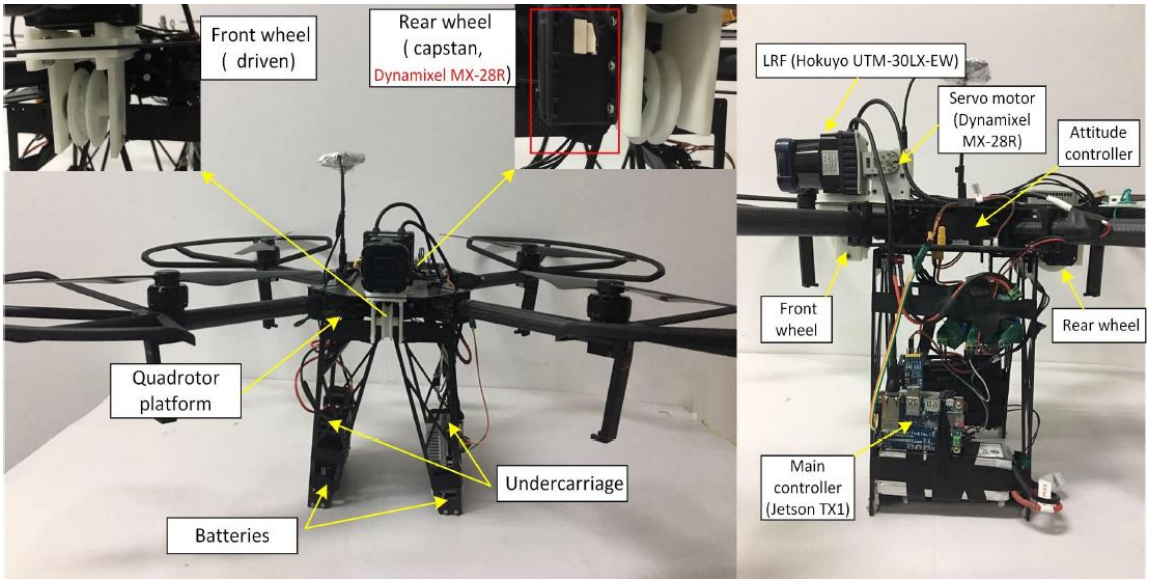
Figura 2.3 - VANT pousado sobre uma linha de transmissão simulada.



Fonte: MIRALLÈS, F., HAMELIN, P., LAMBERT, G., LAVOIE, S., POULIOT, N., MONTFROND, M. AND MONTAMBAULT, S. **LineDrone technology: Landing an unmanned aerial vehicle on a power line.** 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, p. 6545-6552, 2018. DOI: 10.1109/ICRA.2018.8461250

Outro trabalho que apresenta um VANT construído para pouso em linhas de transmissão é o de Chang et al. (2017). O robô de inspeção possui modos de operação híbridos, sendo capaz de sobrevoar e pousar em um cabo para-raios e mover-se sobre a linha como robô com rodas. Ele conta ainda com um algoritmo adaptativo que permite que obstáculos ao redor das linhas possam ser reconhecidos automaticamente e então contornados efetivamente pelo robô. Ainda, como vantagem, o robô apresentou um gasto de potência médio menor que outros robôs já utilizados na inspeção de linhas de transmissão. Não são citadas informações a respeito de como o sistema lida com a questão da interferência eletromagnética proveniente dos campos magnéticos induzidos pelas linhas de alta tensão. A Figura 2.4 mostra o VANT construído.

Figura 2.4 – Robô híbrido construído por Chang et al. (2017).



Fonte: CHANG, W., YANG, G., YU, J., LIANG, Z., CHENG, L., & ZHOU, C. **Development of a power line inspection robot with hybrid operation modes**. 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, p. 973-978, 2017. DOI: 10.1109/IROS.2017.8202263

A empresa Skive Airborne Robotics também desenvolveu um drone (Fig. 2.5), com capacidade de locomover-se ao longo do cabo de alta tensão utilizando-se de um sistema LIDAR para realizar as inspeções do sistema de distribuição de energia elétrica.

Figura 2.5 – Drone projetado para locomoção sobre cabo de alta tensão da empresa Skive Airborne Robotics.



Fonte: SKIVE AVIATION AIRBORNE ROBOTICS, **SKIVE Powerline Robot.** 2015. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=S3iCIUA5B0s. Acesso em: 18 ago. 2023.

Montambault e Pouliot (2010) previram que para os próximos anos, parte da solução para o problema da inspeção automatizada de linhas de transmissão viria da colaboração de várias plataformas, como por exemplo, entre vários VANTs, ou entre VANTs e robôs com rodas em linhas.

Com o advento dos drones, a tarefa de inspeção do sistema de transmissão de energia está praticamente resolvida. Para manutenção, ainda não existem trabalhos abordando drones que pousam nas linhas para realizar tais tarefas. Portanto, o problema da utilização de robôs para manutenção continua ainda em aberto.

2.3 Robôs para manutenção de linhas de alta tensão

O emprego de robôs para manutenção de linhas de alta tensão pode diminuir os custos relacionados às operações de manutenção e inspeção, que envolvem mão de obra humana; aumentar consideravelmente a eficiência das tarefas e reduzir os riscos à integridade do ser humano, já que diminuiria a necessidade do trabalho de operadores em contato direto com as linhas.

Nesse contexto, destaca-se o imperativo de se desenvolver e otimizar robôs para manutenção dos componentes presentes nas linhas de transmissão com desenvolvimento

de modelos e protótipos. Estes robôs apresentam-se em diversos formatos e modelos, como os robôs móveis e os VANTs. Muitos trabalhos recentes têm se concentrado na busca de soluções nesta área.

Motivados pelas dificuldades e riscos inerentes ao trabalho realizado exclusivamente por operadores humanos nas linhas de alta tensão, novas pesquisas vêm sendo desenvolvidas no segmento dos robôs móveis, a serem empregados nas tarefas de manutenção em contato direto com as linhas de transmissão. Podemos citar os trabalhos recentes de Disyadej et al (2019), Miller, Abbasi e Mohammadpour (2017) (Fig. 2.6(a)) e Yan et al. (2020).

Em geral, as vantagens da aplicação de robôs de manutenção são (GONÇALVES et al., 2022):

- Podem realizar tarefas de manutenção sem influência de operadores;
- Reduzem os riscos para trabalhadores de linhas de energia;
- Reduzem os custos.

Por outro lado, as desvantagens são:

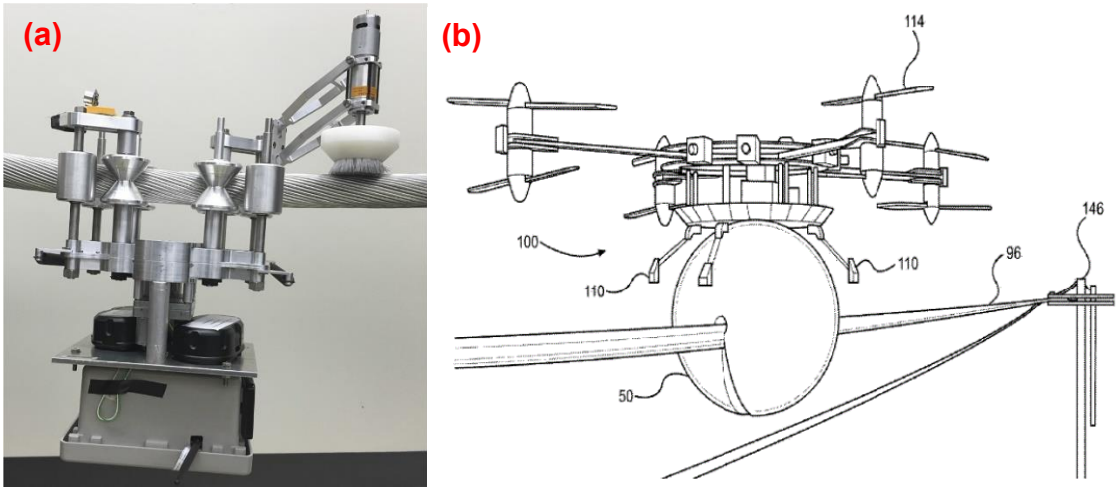
- Baixa capacidade de controle;
- Capacidade muito limitada de superar obstáculos;
- Grande massa e baixa portabilidade.

Nos cabos de transmissão e no cabo para-raios existem diversos elementos que se tornam obstáculos para os robôs móveis como as 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 (Fig. 1.2). Assim, as soluções presentes na literatura que utilizam robôs móveis suspensos por cabos não conseguem transpor facilmente todos os tipos de obstáculos existentes, são complexos e difíceis de serem colocados nos cabos. VANTs têm sido propostos como alternativas para que estes obstáculos sejam transpostos com maior facilidade.

São raras ainda as aplicações de VANTs em tarefas de manutenção, encontrando-se somente exemplos de robôs para a limpeza do gelo nos cabos, instalação de esferas de sinalização (Fig. 2.6 (b)) e para limpeza das cadeias de isoladores (GONÇALVES et al., 2022). Algumas aplicações encontradas envolvem o uso de drones para auxiliar na colocação (*stringing*) das linhas de alta tensão, ligando linhas de guia de uma torre para a outra (DRONENERDS, 2023). Outra aplicação ainda está ligada ao acoplamento de um lança-chamas ao drone, que é utilizado para remoção de detritos das linhas

(GLOBALDRONEUAV, 2018). Embora seja viável seu uso, apresenta prejuízos ambientais e à própria integridade da linha.

Figura 2.6 – Exemplos de trabalhos que desenvolvem robôs para manutenção: (a) robô para limpeza de linhas; (b) VANT para instalação de esferas de sinalização.



Fonte: (a) MILLER, R., ABBASI, F., MOHAMMADPOUR, F. Power line robotic device for overhead line inspection and maintenance. **Industrial robot: an international journal**, Vol. 44, Iss 1, p. 75-84, 2017. DOI: 10.1108/IR-06-2016-0165
(b) MCNALLY, J., **Method for installing an object using an unmanned aerial vehicle**, US 9932110 B2, 2018.

2.4 Fenômenos eletromagnéticos provenientes das linhas de alta tensão

O projeto dos drone-robôs prevê que estes trabalhem próximos ou em contato com cabos em que trafegam tensões de 69 kV ou 138 kV. Em função do potencial de serem infligidas intensas interferências eletromagnéticas e descargas elétricas indesejáveis nos drone-robôs, uma das atividades desempenhadas neste trabalho foi o projeto e implementação de sistemas de blindagens contra interferências eletromagnéticas e descargas eletrostáticas que podem atingir os drone-robôs. Para tanto é preciso discorrer sobre os fenômenos eletromagnéticos que podem surgir da interação dos drone-robôs com as referidas linhas.

As linhas de alta tensão são ambientes complexos e perigosos, com fortes emissões de campos eletromagnéticos (CPNSP, 2005). Os fenômenos elétricos ocasionados pelas linhas são:

a) Irradiação de campos eletromagnéticos devido à frequência de operação das linhas

Devido às altas tensões e correntes que trafegam nas linhas de alta tensão, são emitidos campos eletromagnéticos intensos, de modo a produzir efeitos danosos tanto a equipamentos eletroeletrônicos quanto à seres vivos (PELLERIN et al., 2004).

Os autores Ungureanu, Rusu, e Baran (2007) identificaram que as emissões eletromagnéticas das linhas de transmissão ocorrem em três faixas de frequência específicas: 30 a 3000 Hz, que está relacionada à frequência de tensão AC encontrada em linhas de transmissão de 50 a 60 Hz e suas respectivas frequências harmônicas; 0,15 a 3 MHz, criadas por descargas corona, que podem ser observadas tanto em cabos quanto em cadeias de isoladores; e 30 a 300 MHz, que decorre do campo produzido também pelo efeito corona.

b) Arcos elétricos ocasionados pela ruptura dielétrica do ar (descargas por lacuna)

O arco elétrico pode ser descrito como um fenômeno em que há circulação substancial de corrente elétrica em um material geralmente não condutor, como o ar, quando este se desloca em velocidades elevadas. Apresenta um padrão de comportamento irregular e caótico em sua forma devido à convecção de gases, jatos de plasma e influência de forças eletromagnéticas. Os arcos elétricos geram calor extremo, resultando em explosões, ondas de pressão e outros efeitos adversos, representando perigos para os trabalhadores que estão expostos a esse fenômeno (QUEIROZ; SENGER, 2012).

A capacidade destrutiva de um arco elétrico é vasta. Ele tem o poder de mover objetos a longas distâncias, produzir calor comparável à superfície do sol e pode causar surdez ou cegueira em um indivíduo. Uma vez liberada, a energia de um arco elétrico tem o potencial de prejudicar seriamente uma empresa, interrompendo suas operações até que toda a infraestrutura elétrica seja completamente restaurada (ABRACOPEL, 2021).

c) Descargas parciais (PD)

A Descarga Parcial (PD) é uma forma de descarga em que os eletrodos não se conectam completamente, o que pode resultar em danos significativos ao isolamento e uma considerável redução na vida útil de equipamentos de alta tensão. Ocorre quando o campo elétrico local ultrapassa um valor de limiar, provocando uma falha parcial no meio ao redor. A PD é caracterizada por sua natureza transitória e pela presença de correntes pulsantes que duram de alguns nanossegundos a poucos microssegundos. (RAYMOND et al., 2015).

d) Efeito corona

O efeito corona é um fenômeno que ocorre quando o ar ao redor de um condutor se ioniza devido a uma diferença de potencial entre uma das fases e o solo que atinge um valor crítico de ruptura. A tensão de ruptura necessária para tal ocorrência depende de diversos fatores, como a pressão atmosférica, a quantidade de umidade no ar e o tipo de tensão envolvida (corrente alternada ou corrente contínua) (VASCONCELOS, 2017).

Os impactos do efeito corona são altamente indesejados na operação de LTs, embora sejam praticamente inevitáveis, principalmente em LTs com tensões superiores a 100 kV. É relevante destacar que componentes defeituosos, como ferragens e pinos mal ajustados, podem originar pulsos eletromagnéticos que afetam a faixa de frequência modulada. Em resumo, os efeitos podem ser resumidos em quatro características principais: geração de ruído audível, produção de ozônio, perda de energia e interferência eletromagnética, sobretudo nas frequências usadas pelas rádios de amplitude modulada (PINTO, 2014).

Do exposto anteriormente, é imprescindível que robôs de inspeção ou manutenção que venham a trabalhar próximos ou em contato com linhas de alta tensão sejam blindados contra efeitos danosos dos fenômenos mencionados.

2.5 Blindagem de robôs de inspeção e manutenção contra interferências eletromagnéticas e descargas eletrostáticas

A interferência eletromagnética é citada por muitos autores como sendo um dos desafios de engenharia relacionados à implementação de robôs autônomos para inspeção ou manutenção de linhas de alta tensão (LIU et al., 2016) (MONTAMBAULT; POULIOT, 2008) (VISSER; GOUWS, 2013) (HLALELE; DU, 2013) (ALHASSAN, et al. 2020).

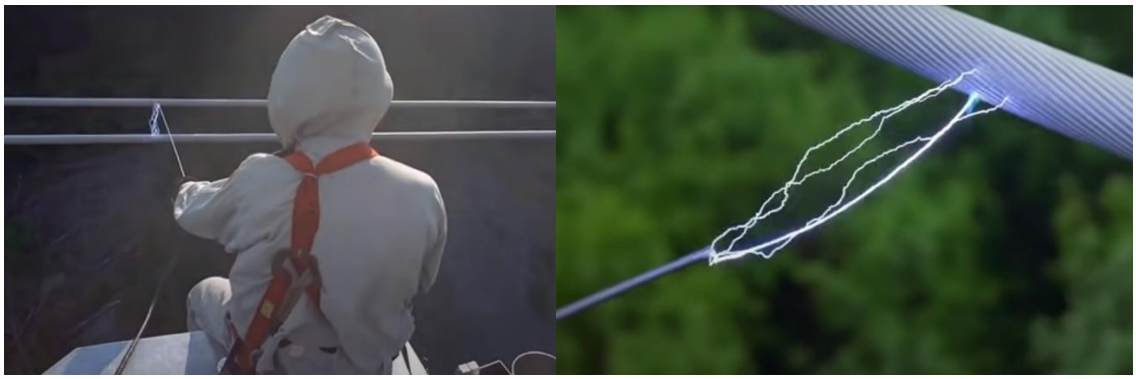
No caso dos VANTs, essas interferências podem levar à perda parcial ou completa dos sinais de informação transmitidos ao controlador destas aeronaves, e consequentemente, ao funcionamento inadequado dos equipamentos a bordo do VANT. Este fenômeno pode levar até à perda total da controlabilidade da aeronave (NURIEV; GIZATULLIN; GIZATULLIN, 2017).

Já os efeitos das descargas eletrostáticas são ainda mais prejudiciais, pois podem danificar a estrutura de um componente que se aproxima da linha de alta tensão (PERMATA et al., 2019). Esse fenômeno pode ainda gerar um desequilíbrio na transmissão de energia elétrica, provocando danos na rede elétrica e pausas de fornecimento do serviço (ABRACOPEL, 2021).

Dentre as informações apresentadas no trabalho Barnett et. al (2020) realizaram um levantamento de informações relativas à faixa de frequência das emissões eletromagnéticas das linhas de alta tensão, considerando todos os fenômenos citados anteriormente. Os autores destacam que emissões produzidas pelas linhas dependem do tipo de descarga e de sua ocorrência. Emissões que decorrem de ruptura dielétrica do ar raramente excedem 1,5 GHz. Emissões por descarga corona chegam até 3 MHz, emissões por descargas em lacunas (*gap*) raramente passam de 1 GHz e emissões por descarga parcial (PD) podem chegar até 6 GHz. Os autores concluem que em geral, não existe na literatura um consenso sobre quais são os limites dessa faixa de frequências das emissões.

Durante operações de inspeção e manutenção utilizando mão de obra humana em linhas de transmissão, é imprescindível que procedimentos de segurança sejam adotados para evitar quaisquer riscos à integridade física dos operadores, que seriam ocasionados pela influência das interferências eletromagnéticas ou contato direto com as linhas. Uma das estratégias utilizadas para tanto é a equalização de potencial elétrico ("*bonding on*") do sistema helicóptero ou torre-operador com o da linha a ser reparada (Fig. 2.7). Este tipo de precaução se estende para assegurar a integridade de robôs e VANTs que venham a entrar em contato com linhas pelas quais permeiam potenciais elevados.

Figura 2.7 – Processo de equalização de potencial realizado por um operador de linha viva.



Fonte: WORLD CHANNEL. **Extreme Jobs - High Voltage Power Line Inspection**. Vídeo – disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=9YmFHAFYwmY). Acesso em 28 ago. 2023.

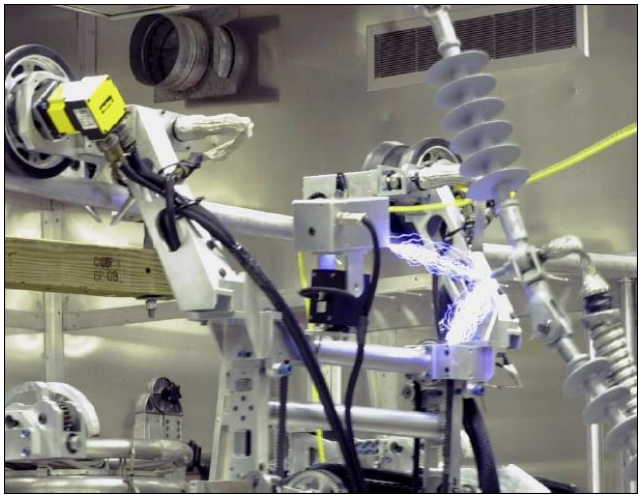
Para mitigar os efeitos mencionados, faz-se necessária a implementação de técnicas de blindagem eletrostática e eletromagnética à estrutura dos robôs.

Na literatura, são encontrados trabalhos em que robôs de inspeção ou manutenção, projetados com a blindagem presente na própria carcaça, são testados em relação à sua capacidade de resistir aos efeitos de interferência provenientes das linhas nas quais irão

atuar. Malaviarachchi et al. (2016) desenvolveram um robô que, com testes de bancada em laboratório, provou resistir a tensões de até 56 kV sem danos à sua estrutura. O robô POLIBOT foi testado em contato com linhas vivas e provou suportar tensões de até 207 kV (LIMA; BOMFIN; MOURÃO, 2017). Lee et al. (2009) desenvolveram uma ferramenta para inspeção de isoladores de linhas de até 154 kV. Já Wu et al. (2010) descrevem um robô de manutenção com compatibilidade eletromagnética de até 500 kV.

Montambault e Pouilot (2008) desenvolveram um robô com rodas para inspeção em linhas com tensões de até 735 kV. Os autores asseguraram que toda a estrutura robótica conduzisse eletricidade para evitar surgimento de diferenças de potencial nesta. Isoladores e sistemas de proteção foram instalados em torno das baterias e circuitos embarcados. A Figura 2.8 mostra o robô desenvolvido sendo testado.

Figura 2.8 - Robô de inspeção sendo testado em contato com linhas a 500 kV.



Fonte: MONTAMBAULT, S.; POULIOT, N. Design And Validation Of A Mobile Robot For Power Line Inspection And Maintenance. **Springer Tracts In Advanced Robotics**, Vol. 42, p. 495–504, 2008. DOI: 10.1007/978-3-540-75404-6_47

Wang e Wang (2016) afirmam ser necessário implementar uma zona de potencial equivalente em toda a estrutura dos robôs, quando estes forem empregados em contato com linhas de alta tensão. Para tanto, todos os componentes do robô devem estar conectados com baixa resistência de contato. Além disso, os autores sugerem que os cabos, sensores, baterias e circuitos devem ser protegidos por objetos condutores.

Fang e Wang (2010) ressaltam o fato de que todas as partes condutoras dos robôs de manutenção/inspeção devem estar interconectadas com cabos para que assim o mesmo potencial elétrico permeie toda a estrutura robótica. Além disso, determinados circuitos embarcados devem estar protegidos por isolamento de interferências eletromagnéticas.

Liu et al. (2016) testaram diferentes métodos de blindagem eletromagnética em robôs de inspeção. Os autores destacam o uso de revestimento condutor a base de cobre e a adição de componente anti-oxidação como método eficaz para blindagem eletromagnética.

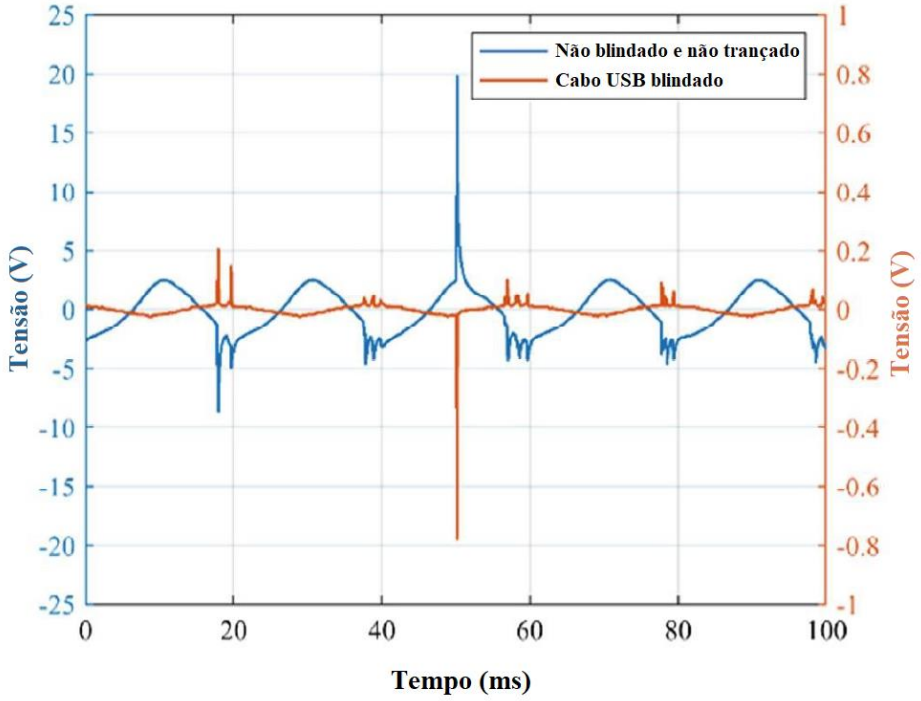
Sobre o assunto da proteção dos robôs móveis contra interferências, dificuldades ainda se fazem presentes. A literatura descrita não entra em detalhes sobre como foram projetadas as blindagens, a metodologia adotada, salvo o trabalho de Barnett et al. (2020). Outros como Montambault e Pouliot (2008), e Liu et al. (2016) relatam de maneira geral algumas técnicas empregadas na blindagem, tais como a utilização e uma estrutura completamente condutora e interligada, o aparamento de arestas para evitar pontas que atraem descargas elétricas, entre outras. Isto posto, conclui-se que a maioria dos trabalhos adotou uma abordagem empírica para blindagem contra efeitos eletromagnéticos e eletrostáticos.

Barnett et al. (2020) discorrem sobre a atenuação de interferências eletromagnéticas em robôs de inspeção de linhas de alta tensão e apresentam estratégias de blindagem eletromagnética baseadas principalmente na metodologia de cálculo proposta por Ott (2009). É um dos poucos trabalhos que versam sobre o assunto de forma mais abrangente. Por isso, será tratado em mais detalhes.

Neste trabalho, os autores abordaram o problema da blindagem de duas formas: primeiro, o projeto da blindagem para resistir aos campos de 60 Hz, e em seguida avaliaram o efeito de interferência de arcos elétricos incididos sobre as blindagens. Um dos testes realizados foi no sentido de verificar a suscetibilidade dos cabos não blindados e os cabos USB a interferências causadas pelas descargas elétricas. A Figura 2.9 mostra o gráfico temporal do sinal elétrico trafegando tanto no cabo não blindado quanto no cabo USB, no momento da aplicação do arco elétrico.

Pelo gráfico da Fig. 2.9, pode-se verificar que o arco incidido gerou um pico de interferência de aproximadamente 20 V no cabo não blindado, e de -0,8 V no cabo USB. Este resultado mostrou que mesmo com os cabos no interior de uma blindagem sólida, pode haver acoplamento com os sinais na faixa de frequência dos transmitidos via USB ou outro protocolo, o que pode causar a queima de algum componente eletrônico embarcado. Como os arcos formados por ruptura dielétrica do ar possuem caráter não linear, é difícil precisar exatamente a intensidade e a faixa de frequência da interferência emitida por essas descargas.

Figura 2.9 – Gráfico temporal da forma de onda de tensão obtida na ocorrência da aplicação de um arco elétrico sobre a blindagem do robô, no estudo realizado por Barnett et al. (2020).



Fonte: Adaptado de BARNETT, S. B.; SWANSON, A. G.; LORIMER, T.; BROWN, M. **Electromagnetic Interference Mitigation in a High Voltage Inspection Robot**. NÉMETH, B. (Ed.), Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering, ISH 2019, Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 598, Springer, Cham, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-31676-1_32

Para mitigar este efeito transiente de interferência, os autores propuseram a utilização de um protocolo de comunicação com velocidades mais intensas, visando desacoplar o sinal transmitido das possíveis frequências de interferência emitidas pelo arco. Além disso, propõem o uso de comunicação por fibra ótica; a diminuição da resistência de terra das blindagens e por fim, o uso de uma abordagem multicamadas na blindagem, de forma que uma das camadas possa fazer o papel de terra.

Poucos trabalhos existem ainda que desenvolvem soluções para o problema da interferência eletromagnética sobre VANTs, a fim de que eles possam trabalhar em contato com as linhas. Em um estudo a respeito da influência direta de uma descarga elétrica sobre VANTs, Gaynutdinov e Chermoshentsev (2016) destacaram a avaliação da imunidade da eletrônica embarcada no VANT como um aspecto importante a ser considerado.

A empresa PLP desenvolveu um drone para instalação de espantadores de pássaros em linhas de 35 kV (Fig. 2.10). O drone voa em direção à linha, e ao entrar em contato com

esta o espantador é instalado. Arcos elétricos de baixa intensidade foram observados se formando entre a estrutura do drone e a linha, na ocasião do contato

Figura 2.10 – Drone para instalação de espantadores de pássaros em contato com linha viva de 35 kV.



Fonte: PLP. **UAV Installation Services - Bird Diverters**, 2020. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=PfkRt2W7NAk. Acesso em 01 set. 2023.

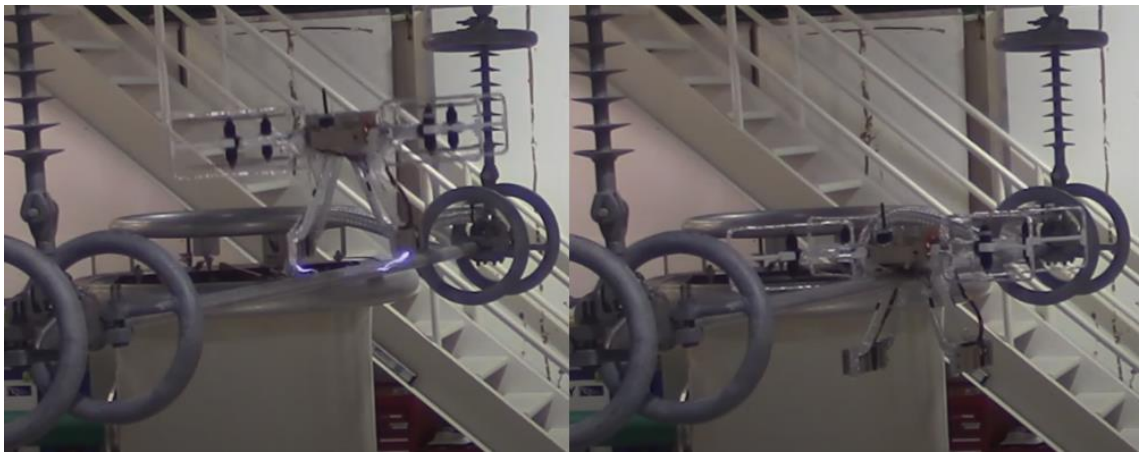
A respeito dos fenômenos envolvidos na emissão eletromagnética das linhas, ainda há dificuldade de encontrar na literatura descrições detalhadas dos métodos usados na blindagem dos robôs ou VANTs atuantes nas linhas.

As descargas eletrostáticas que decorrem da ruptura da rigidez dielétrica do ar, provenientes das linhas, possuem um grande potencial destrutivo, podendo danificar completamente um robô ou VANT que esteja próximo das linhas. Com a aplicação das blindagens, mesmo não causando perda total, as descargas podem danificar a estrutura. Portanto, é preciso dimensionar as blindagens com espessura grande o suficiente para evitar tais danos. Para blindagem nestes casos, o uso de materiais condutores é necessário. Sólidos metálicos ou maleáveis devem ser empregados para proteção dos componentes alvo. É possível e desejável realizar um projeto de blindagem que contemple ao mesmo tempo proteção contra interferências eletromagnéticas e contra descargas eletrostáticas.

A empresa Hydro-Quebéc desenvolveu um drone para pouso sobre linhas de até 315 kV. Em um teste sobre uma bancada de laboratório, foi utilizada uma blindagem de material condutor em torno da fuselagem do drone (Fig. 2.11). Protetores de hélice foram também inseridos, e foram permeados por folhas de metal condutor. Os testes foram bem-sucedidos em realizar voos próximos das hélices e do trem de pouso. Uma estrutura foi inserida em

torno das hélices para direcionar as descargas, semelhante a um para-raios, para evitar danos. O sistema eletrônico foi inserido numa caixa sólida condutora, com uma antena para comunicação deixada no exterior da caixa. Após o processo de acoplamento elétrico, o drone foi pousado com sucesso sobre a linha de 315 kV (HYDRO-QUEBÉC, 2016).

Figura 2.11 – Pouso de um drone sobre uma bancada de teste a 315 kV.



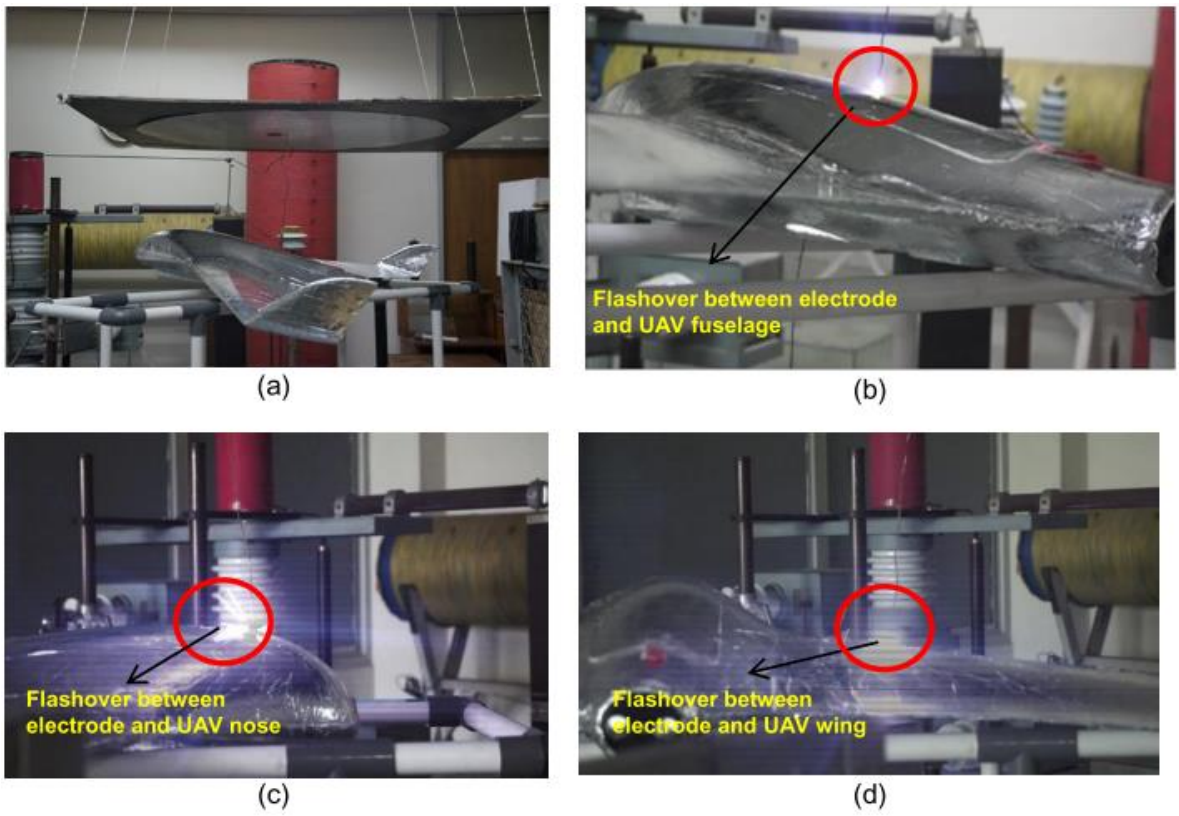
Fonte: HYDRO-QUEBÉC. **Unmanned aerial vehicle (UAV) landing on a 315 kV test bench**, 2016. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=RgmUvay3BwA. Acesso em 01 set. 2023.

Permata et al. (2019) testaram blindagens com folhas de alumínio de espessuras de 0,15 mm e 0,30 mm envolvendo a fuselagem de um veículo aéreo não tripulado. Os experimentos tiveram como objetivo avaliar a resistência das blindagens citadas ao efeito de descargas elétricas de tensão 150 kV e ao efeito da indução eletromagnética no interior da fuselagem do veículo. A Figura 2.12 mostra os testes realizados.

Os autores concluíram que as tensões e campos elétricos induzidos medidos no VANT blindado são muito menores que aqueles valores obtidos sem a blindagem. O dano físico causado pelas descargas na fuselagem do veículo pode ser eliminado ao se utilizar uma blindagem de alumínio de espessura de 0,30 mm.

Outro efeito do uso de estruturas sólidas formadas por materiais condutores é o de evitar a indução de choques elétricos nas partes não metálicas do robô, pelo surgimento de uma diferença de potencial entre a linha e determinado componente não blindado. Portanto, idealmente deve-se utilizar somente componentes mecânicos condutores na estrutura, com a resistência do material a menor possível.

Figura 2.12 - Teste de descarga de alta tensão sobre estrutura blindada de um VANT: (a) Instalação experimental para medir o campo elétrico gerado; (b) Descarga na fuselagem do VANT a 1 cm de distância; (c) Descarga no nariz do VANT a 1 cm de distância; (d) Descarga na asa do VANT a 1 cm de distância.



Fonte: PERMATA, D.; GURNING, M. C.; MARTIN, Y.; SITORUS, H. B. H.; MUDA, M. A.; SINAGA, H. H. Electromagnetic interference shielding in unmanned aerial vehicle against lightning strike. **Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)**, vol. 17, no. 2, p. 915-919, 2018. DOI: 10.12928/telkomnika.v17i2.9029

A blindagem de superfícies não suscetíveis à indução de tensões e correntes, como as que estão presentes na estrutura dos drones, consiste em recobrir estas superfícies com metais condutores maleáveis. Esta técnica possui como finalidade a evasão de cargas elétricas da estrutura, pelo efeito de "*bonding on*", ou acoplamento elétrico. Protege-se assim a estrutura da aeronave de danos decorrentes de descargas por centelha provocadas por ruptura dielétrica do ar.

2.6 Projeto de blindagem de robôs de inspeção ou manutenção contra interferências eletromagnéticas

No projeto de blindagens contra interferências eletromagnéticas, deve-se atentar à largura de banda das frequências dos campos eletromagnéticos emitidos pelas linhas, bem como suas intensidades. É a partir dessas informações que o projeto de uma blindagem será bem-sucedido, pois esta deve ser capaz de eliminar ou atenuar o máximo possível os efeitos danosos sobre os componentes eletrônicos alvo.

As seguintes recomendações gerais para projeto da blindagem dos sistemas drone-robôs devem ser consideradas (OTT, 2009; BARNETT et al. 2020; MONTAMBAULT, POULIOT, 2008):

- O método básico para blindagem é aquele no qual caixas metálicas sólidas (gaiolas de Faraday) são construídas para abrigar circuitos eletrônicos e cabeamentos, por estes serem mais suscetíveis aos efeitos da interferência. Importante ressaltar que quanto maior for a condutividade do material de fabricação da caixa, melhor o efeito de isolamento.
- Uma blindagem ideal é aquela na qual não há aberturas que possam permitir a passagem de campos eletromagnéticos e cuja espessura seja suficiente para atenuar as ondas absorvidas pelas paredes da blindagem o máximo possível, para que ao passar pelas paredes, estas ondas não afetem os circuitos que se encontram no interior. Porém, a frequência da emissão é que irá determinar a eficiência da blindagem, determinando assim qual deve ser a sua espessura para que seja efetiva.
- As aberturas na blindagem diminuem a sua efetividade, principalmente na atenuação de altas frequências. Nesse sentido, podem reduzir o efeito da blindagem: frestas que surgem entre chapas componentes da gaiola de Faraday, frestas surgidas nos furos fabricados para acomodar parafusos, parafusos fixados serem de material diferente daquele da caixa e pontas que surgem na estrutura, que são foco de atração de cargas elétricas.
- A variável que mais afeta os vazamentos pelo efeito de aberturas é a maior dimensão linear da abertura, e não a área. Então, quanto mais pontuais e circulares forem as aberturas, menor será o prejuízo às blindagens.

A avaliação matemática dos efeitos de atenuação das blindagens pode ser também obtida. Um procedimento de cálculo para tal é encontrado no livro-texto “Engenharia de Compatibilidade Eletromagnética”, de Henry Ott (OTT, 2009).

Com o roteiro de equações apresentadas por (OTT, 2009), é possível encontrar em decibéis (dB) a atenuação proporcionada pelas blindagens. A atenuação em dB é sempre relativa, ou seja, depende da intensidade do campo incidente na blindagem. Sabendo o valor médio dos campos elétrico/magnético emitidos pelas linhas, é possível encontrar o valor das emissões que atravessam as blindagens.

Este método de cálculo visa quantificar uma resposta da blindagem a fontes pontuais de interferência, tanto de campo elétrico quanto magnético. Como o procedimento vale somente para superfícies planas, os resultados dos cálculos não são absolutos. Servem para se ter uma referência da eficácia das blindagens.

O modelo matemático básico para cálculo da efetividade de blindagem (*shielding effectiveness*) leva em conta os efeitos de reflexão e absorção dos campos incidentes. Quanto maior a frequência de emissão, menor é a atenuação por reflexão, e maior por absorção. Os efeitos de reflexão calculados valem para uma incidência normal das emissões. Superfícies curvas aumentam o efeito da reflexão.

A metodologia prática de cálculo de atenuações, proposta em Ott (2009), pode ser dividida nas seguintes etapas:

a) Cálculo para determinar se o campo é próximo ou distante:

Inicialmente é preciso determinar se o campo é considerado próximo ou distante. Se o campo for distante, a onda pode ser considerada plana, considerando as frequências mínimas e máximas que precisam ser avaliadas. Para que o campo seja considerado próximo, os seguintes critérios devem ser atendidos para os dois limites de frequência: Caso o termo da esquerda seja menor ou igual que a distância da fonte emissora (r), a onda é considerada plana. Nestes casos, a atenuação encontrada é aplicada tanto para os campos elétrico e magnético. Se o campo for próximo, a onda não é plana e então o tratamento matemático para campo magnético deve ser distinto do aplicado ao campo elétrico. Caso contrário, a atenuação ao campo elétrico e ao magnético devem ser avaliadas em conjunto. Esse fato pode ser avaliado a partir da Eq. (2.1).

$$\frac{\lambda}{2\pi} = \frac{v}{2\pi f} \geq r \tag{2.1}$$

Onde λ é o comprimento de onda da onda incidente, f a frequência da onda incidente e v a velocidade da onda eletromagnética, sendo $v = \lambda f$.

A Equação (2.2) é usada para avaliação dos efeitos de reflexão e absorção, onde *S* é a efetividade da blindagem, *A* é o efeito de absorção, *R* de reflexão e *B* é um fator de correção que corresponde ao efeito de paredes de blindagem finas:

$$S = A + R + B\ [dB] \tag{2.2}$$

b) Cálculo da efetividade para o caso de a onda não ser plana:

Cálculo da efetividade da blindagem para o campo elétrico (S_E)

Nesta abordagem, a avaliação para os campos elétrico e magnético é realizada separadamente. O cálculo do efeito de absorção do campo elétrico (A_E) é dado pela Eq. (2.3), sendo *t* a espessura da blindagem em polegadas, μ_r a permeabilidade magnética relativa do material e σ_r a condutividade relativa do material da blindagem.

$$A_E = 3{,}34t\sqrt{f\mu_r\sigma_r} \tag{2.3}$$

O cálculo do efeito de reflexão do campo elétrico (R_E) é dado pela Eq. (2.4):

$$R_E = 322 + 10log\left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 r^2}\right) \tag{2.4}$$

Para campos elétricos, o fator B pode ser negligenciado:

$$B_E = 0 \tag{2.5}$$

Embora as Eq. (2.3) e (2.4) envolvam a permeabilidade magnética do meio de blindagem como variável, elas são indicadas para calcular a atenuação do efeito do campo elétrico, de acordo com o método proposto por Ott (2009). Isso ocorre porque a Eq. (2.3) é derivada da equação da *skin depth* (δ), que é a espessura na qual a intensidade da onda é aproximadamente 37% do seu valor original quando penetra no material de blindagem (Eq. (2.9)). Ao substituir as variáveis nas equações anteriores, a eficácia da blindagem para o campo elétrico (S_E) pode ser calculada da seguinte forma:

$$S_E = A_E + R_E + B_E = 3{,}34t\sqrt{f\mu_r\sigma_r} + 322 + 10log\left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 r^2}\right) \tag{2.6}$$

Cálculo da efetividade da blindagem para o campo magnético (S_M)

Para estimar a atenuação do campo magnético, o cálculo para o efeito de absorção (A_M) é o mesmo que no caso do cálculo do campo elétrico, utilizando a Equação (2.3). O efeito de reflexão (R_M) é calculado pela Eq. (2.7), com *r* sendo em metros:

$$R_M = 14{,}6 + 10\log\left(\frac{fr^2\sigma_r}{\mu_r}\right) \tag{2.7}$$

No cálculo do fator *B* para o campo magnético (B_M) deve-se usar a Eq. (2.8), com sendo a δ "*skin depth*", em polegadas:

$$B_M = 20\log\left(1\text{-}e^{-2t/\delta}\right) \tag{2.8}$$

O cálculo de δ para o alumínio é feito por meio da Eq. (2.9), na qual μ_r é a permeabilidade magnética do alumínio, e σ_r é a condutividade relativa do alumínio:

$$\delta = \frac{2{,}6}{\sqrt{f\mu_r\sigma_r}} \tag{2.9}$$

A efetividade final do campo magnético é determinada pela Equação (2.10):

$$S_M = A_M + R_M + B_M = 3{,}34t\sqrt{f\mu_r\sigma_r} + 14.6 + 10\log\left(\frac{fr^2\sigma_r}{\mu_r}\right) + B_M = 20\log\left(1\text{-}e^{-2t/\delta}\right) \tag{2.10}$$

c) Cálculo se o campo for distante (onda plana)

Se o campo distante for considerado, as atenuações tanto para os campos elétricos quanto magnéticos são tratadas em conjunto. Um único valor de atenuação em dB é encontrado para ambos os tipos de campos na Eq. (2.2), para determinar a eficácia de blindagem, o termo de reflexão (*R*) é calculado de acordo com a Eq. (2.11).

$$R = 168 + 10\log\left(\sigma_r/\mu_r f\right) \tag{2.11}$$

Na Equação (2.2), a perda por absorção (*A*) ainda é calculada com a Eq. (2.3) e o fator B pode ser negligenciado.

d) Cálculo da efetividade final

Após encontrar as eficácias S_E e S_M, as Eq. (2.12) e (2.13) são aplicadas para calcular os campos atenuados, com os valores de eficácia S_E e S_M encontrados:

$$S_E = 20log\left(\frac{E_0}{E_f}\right) \tag{2.12}$$

Onde E_0 é o campo elétrico incidente, e E_f é o campo elétrico atenuado.

$$S_M = 20log\left(\frac{H_0}{H_f}\right) \tag{2.13}$$

Da mesma forma, H_0 é o campo magnético incidente, e H_f é o campo magnético atenuado.

Ao final da exposição dos itens 2.5 e 2.6, destaca-se que esta tese apresenta um procedimento inovador de blindagem eletromagnética e eletrostática para robôs de inspeção e manutenção, que se configura como uma contribuição científica relevante, ainda ausente dos principais trabalhos que tratam do assunto.

2.7 Equipamentos básicos para construção dos drone-robôs

2.7.1. Drone hexacóptero EFT E610

O drone usado no desenvolvimento de todos os drone-robôs desse projeto foi o hexacóptero modelo EFT E610. Este drone foi montado no LAR (Laboratório de Automação e Robótica) da UFU. Este modelo de drone foi selecionado devido à sua capacidade de carga (*payload*) de até 12 kg, considerada suficiente para transporte dos módulos robóticos. A Figura 2.13 mostra uma foto do drone citado.

Figura 2.13 – Hexacóptero EFT E610.



Fonte: DRONES COMPANY. **Drone Pulverizador Arris E-610 - Tanque 10 Litros - Kit Completo Para Vôo**, 2023. Disponível em: https://www.dronescompany.com.br/drone-pulverizador-arris-e-610-10-litros. Acesso em 01 set. 2023.

O hexacóptero EFT E610 foi idealizado para ser utilizado na área da agricultura. Ele acompanha um reservatório com capacidade de 10 litros para transporte de líquidos. A Figura 2.14 mostra este reservatório, e a Fig. 2.15 mostra as dimensões do hexacóptero. As características gerais do drone em questão são:

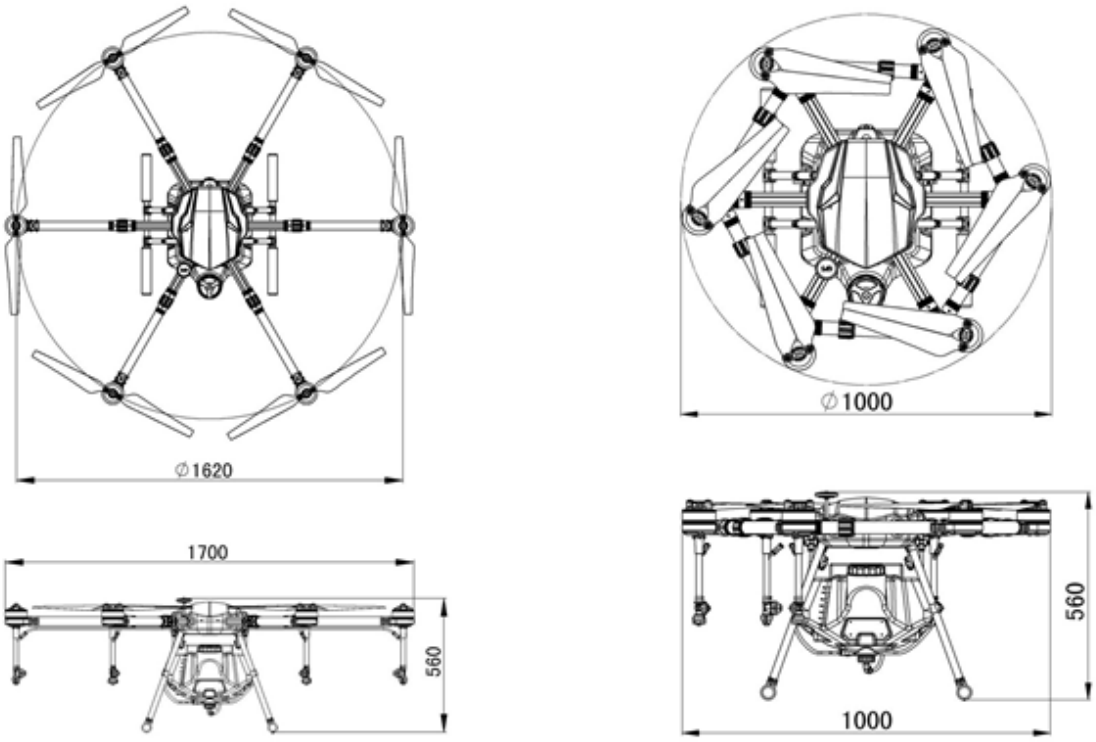
- Tamanho expandido: 1495 x 1380 x 500 mm;
- Tamanho dobrável: 945 x 848 x 500 mm;
- Capacidade do tanque: 10 litros;
- Peso do quadro: 5 kg (excluindo o sistema de *spray*);
- Hélice dobrável de fibra de carbono;
- Tensão de alimentação: 44,4 V (baterias LiPo 12S);
- Peso máximo de decolagem: 25 kg.

Figura 2.14 – Tanque com capacidade de 10 litros.



Fonte: RCDRONE. **EFT E610P agriculture drone - 10L 10KG 15-35min 6-Axis sprayer drone**, 2023. Disponível em: https://rcdrone.top/products/eft-e610p-agriculture-drone. Acesso em: 01 set. 2023.

Figura 2.15 – Dimensões do Hexacóptero EFT E610, em milímetros.



Fonte: RCDRONE. **EFT E610P agriculture drone - 10L 10KG 15-35min 6-Axis sprayer drone**, 2023. Disponível em: https://rcdrone.top/products/eft-e610p-agriculture-drone. Acesso em: 01 set. 2023.

Os componentes do drone adaptado são:

- Estrutura (*frame*) do hexacóptero fabricado em alumínio, fibra de carbono e plásticos diversos;
- 6 motores DC hobbywing XRotor Pro X6;
- Controlador de voo Pixhawk 2.1 Cube Black;
- GPS RTK Hex;
- 6 ESCs (*Electronic Speed Controllers*) 80A;
- Rádio controle Skydroid H16
- Tanque com capacidade de 10 litros.

O módulo controlador de voo utilizado no drone em questão é o modelo The Cube Pixhawk 2.1. A Figura 2.16 ilustra este controlador. Possui como características principais (PX4, 2020):

- Processador de 32 bits modelo STM32F427 Cortex-M4F® core de *clock* 168 MHz;
- Memória RAM de 256 KB;
- 2 MB de memória *flash*;
- 14 saídas PWM ou para servo mecanismos;
- Co-processador STM32F103 de 32 bits para o caso de falhas;
- Opções de conexão periféricas como UART, I2C, CAN;
- Suporte a cartão MicroSD para armazenamento de informações sobre voos;
- *Display* de LED multicolorido para sinalização;
- Indicador de áudio piezo múltiplos-tons.

Figura 2.16 – Controlador de voo Pixhawk 2.1 Cube Black (PX4, 2020).



Fonte: PX4. **Pixhawk 2.1 Cube Black**. 2020 Disponível em: https://docs.px4.io/main/en/flight_controller/pixhawk-2.html. Acesso em 04 ago. 2023

O *firmware* utilizado, isto é, o programa básico de operação do controlador, foi o Ardupilot. Este é um *firmware* de código aberto, que possui a capacidade de controlar de maneira eficaz diversos tipos de veículos automatizados, a saber: aviões convencionais, planadores, multirotores, helicópteros, veleiros, barcos a motor, submarinos, veículos terrestres, entre outros (ARDUPILOT, 2020).

A interface do usuário com o Ardupilot ocorre pelo *software* Mission Planner. Por meio dele, é realizada a configuração e calibrações do drone. É possível visualizar em tempo real as características do voo, bem como a alteração de todos os parâmetros referentes à configuração do controlador. A Figura 2.17 mostra a interface do *software* em questão.

Figura 2.17 – Interface do *software* Mission Planner.



Fonte: Autor.

O *firmware* Ardupilot permite que o drone apresente diversos modos de voo, que determinam diferentes comportamentos que o drone pode assumir durante operações de voo. Os modos predominantemente utilizados foram:

- *Loiter*: modo de voo em que o drone se mantém voando fixo num ponto do espaço. Após qualquer movimento manual, o drone se reestabelece voando em uma posição fixa no ar.
- *Circle*: o drone executa um movimento circular em torno de um ponto central imaginário, com raio definido anteriormente, com a parte frontal sempre voltada para

este ponto. Os parâmetros velocidade angular de giro e raio de giro podem ser configurados pelo usuário.

- *Guided*: modo de voo em que os movimentos realizados são pré-programados. Neste modo, os movimentos manuais também podem ser realizados, porém a prioridade é para os comandos pré-programados.
- *Land*: neste modo o drone realiza automaticamente e de forma suave um pouso vertical.

O controlador Pixhawk 2.1 permite que o controle manual de atitude do drone seja realizado por meio de um rádio controle. Movimentos de decolagem, pouso, *yaw*, *pitch* e *roll* são todos controlados por manches presentes no rádio controle. Fez-se necessário um procedimento de ajuste automático do controlador (*autotune*), que é uma funcionalidade incluída no *firmware* Ardupilot. Este procedimento garante o funcionamento estável do drone, principalmente nos modos de voo que dependem de localização de GPS.

2.7.2 Influência dos ventos

Um dos maiores entraves ao funcionamento dos drones é a influência dos ventos, que dependendo de sua magnitude, podem instabilizar completamente a operação destes. Nesse sentido, é importante estipular condições seguras de trabalho aos drone-robôs, de modo que só possam decolar e realizar as tarefas de manutenção caso estas condições sejam asseguradas.

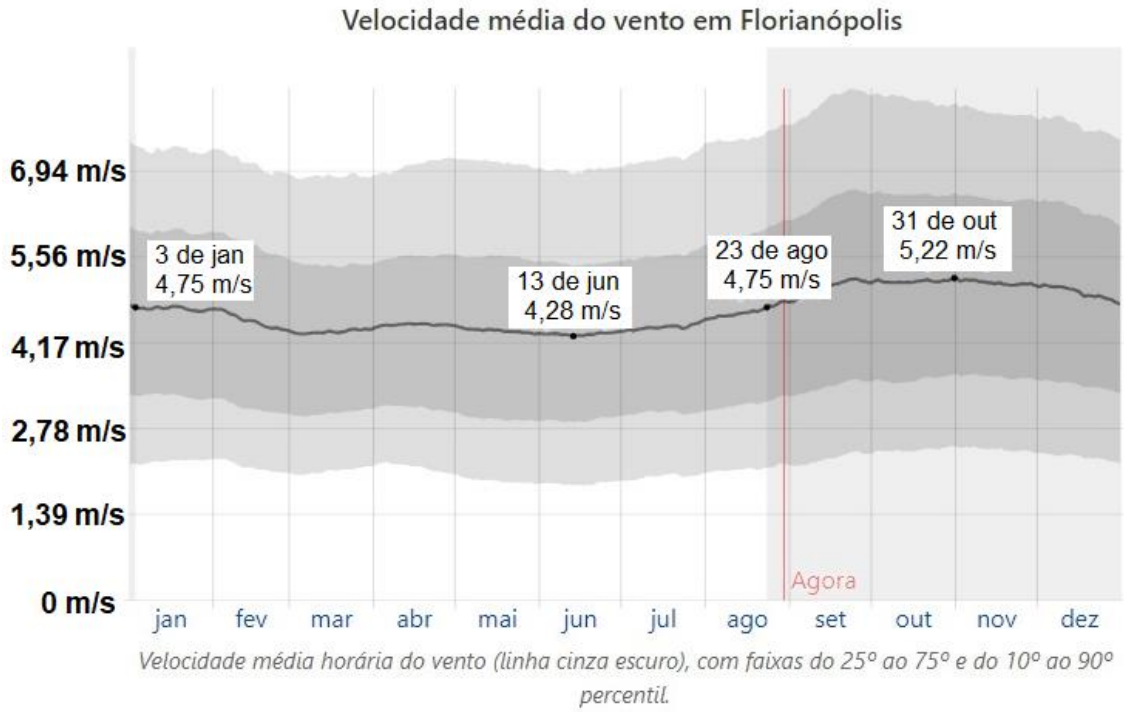
O drone EFT E610, que é o modelo empregado neste projeto, não apresenta informações dadas pelo fabricante sobre a velocidade máxima do vento que ele suporta. Entretanto, o fabricante DJI, afirma que o drone similar Agras MG-1 só pode realizar voos em ambientes com ventos de até 8 m/s (DJI, 2016).

As aplicações dos drone-robôs em desenvolvimento nesta tese se darão nas linhas de alta tensão da CELESC. Os postes de transmissão desta podem chegar até a 60 m de altura. As normativas da CELESC impedem inclusive, que operadores de linha viva realizem manutenções em certas condições. Essas normativas são importantes também para se limitar as situações em que o drone irá voar.

A Figura 2.18 ilustra um gráfico que representa a velocidade média horária do vento na cidade de Florianópolis ao longo do ano. O gráfico exibe o vetor médio horário do vento, incluindo sua velocidade e direção, a uma altura de 10 metros acima do solo. É importante destacar que a sensação de vento em um local específico é fortemente influenciada pela topografia local e por outros fatores. Enquanto a média horária apresentada no gráfico fornece uma visão geral, é importante ressaltar que a velocidade e a direção do vento

variam significativamente em momentos individuais, com flutuações muito maiores do que as médias horárias. Além disso, o gráfico mostra que a velocidade média horária do vento em Florianópolis experimenta pequenas variações sazonais ao longo do ano (WEATHERSPARK, 2023).

Figura 2.18 – Velocidade média do vento na região de Florianópolis, estado de Santa Catarina.



Fonte: WEATHERSPARK. **Clima e condições meteorológicas médias em Florianópolis no ano todo**, 2023. Disponível em: https://pt.weatherspark.com/y/30020/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Florian%C3%B3polis-Brasil-durante-o-ano. Acesso em 29 ago. 2023.

Nos momentos esporádicos e imprevisíveis de ventos fortes, no caso de vendavais e chuvas intensas, a operação dos drone-robôs deverá ser suspensa imediatamente. Portanto, para a realização das manutenções é necessário que o clima atual seja compatível com os requisitos mínimos de segurança de voo.

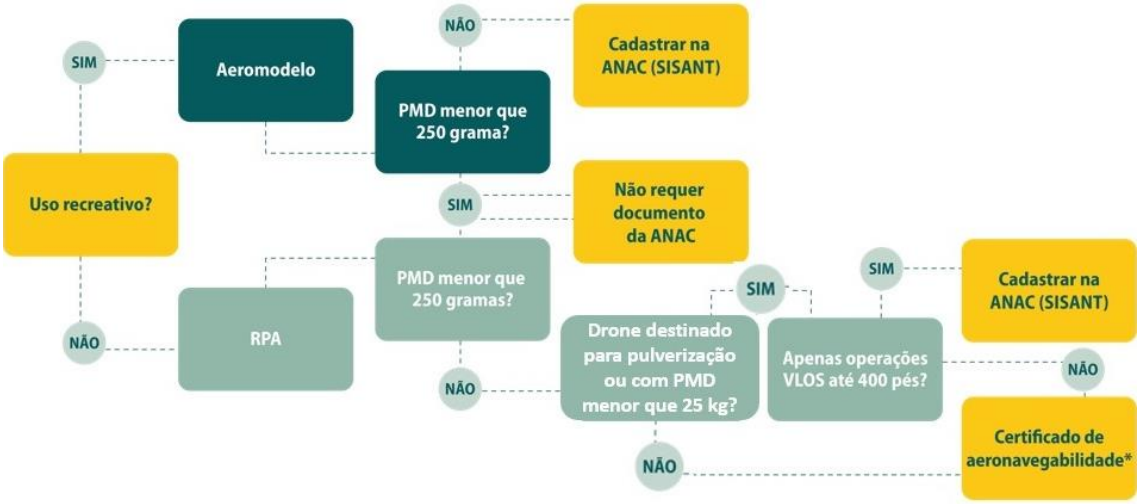
Com base em todas as considerações e estudos feitos, definiu-se que o drone irá sobrevoar as linhas e realizar operações de manutenção somente exposto a ventos de até 8 m/s. A previsão do tempo também será considerada, antes da realização de qualquer tarefa de manutenção. Caso o clima esteja sujeito à fortes condições instáveis, como chuvas e temporais, o voo deverá ser suspenso, ou nem mesmo o drone deverá decolar.

2.7.3 Certificação da aeronave junto ao órgão competente (ANAC)

Ainda no aspecto da segurança de voo, trabalhou-se na certificação do drone junto à Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Esta agência é o órgão governamental responsável pela regularização dos aeromodelos a voarem em solo brasileiro. O drone foi certificado na categoria de drone de massa menor que 25 kg. A responsabilidade dos voos que ocorrem próximos às linhas da CELESC é da própria companhia.

A Figura 2.19 mostra um fluxograma de orientação ao registro de drones na ANAC. O drone utilizado neste projeto se enquadra na categoria de uso não recreativo e massa 25 kg, requerendo o cadastro junto a ANAC (SISANT). Este cadastro é obtido eletronicamente após cadastro da aeronave no sistema de aeronaves Não Tripuladas (SISANT) na página da ANAC na internet (GOV.BR, 2023).

Figura 2.19 – Fluxograma de registro de VANTs junto ao órgão competente (ANAC).



Fonte: ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. **Drones - Registros e Certificados**, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/drones/registros-e-certificados-de-drones. Acesso em 01 set. 2023.

2.7.4. Placa Raspberry Pi

O Raspberry Pi 3B+ é um computador portátil com suporte ao sistema operacional Linux. Também pode ser usado como microcontrolador, por possuir barramento de entrada e saída (I/O). Apresenta como características básicas (RASPBERRY PI, 2020):

- Processador Quad-core de 64 bits e 1,4GHz de *clock*;
- Memória SDRAM LPDDR2 de 1 GB;
- Suporte à rede sem fio LAN em duas bandas;

- Conexão Bluetooth 4.2/BLE;
- Conexões Ethernet, HDMI, USB e P2;
- Barramento de entrada e saída de 40 pinos;
- Conexões que suportam câmera e display touchscreen;
- Armazenamento expansível via cartão MicroSD;

Neste projeto, a placa Raspberry Pi foi utilizada como processador embarcado para execução dos programas de automatização dos drone-robôs. A Figura 2.20 mostra o Raspberry Pi modelo 3 B+ utilizado nesta tese.

Figura 2.20 – Computador portátil Raspberry Pi modelo 3 B+ (RASPBERRY PI, 2020).



Fonte: RASPBERRY PI, **Raspberry Pi 3 Model B+**, 2020. Disponível em: https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/ Acesso em 04 ago. 2023.

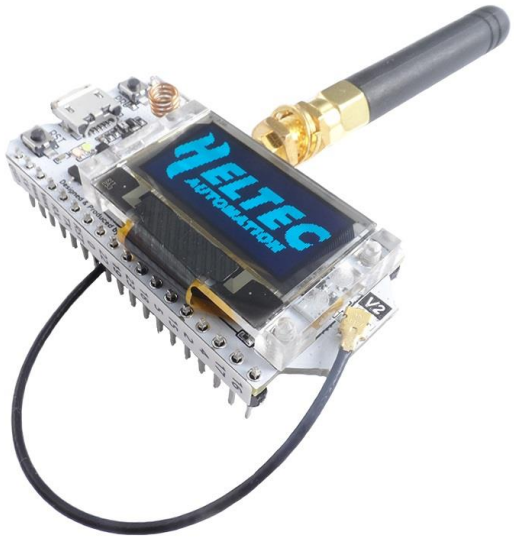
2.7.5. Placa WiFi LoRa ESP32

A WiFi LoRa ESP32 é uma placa produzida pela empresa Heltec Automation. Apresenta comunicação WiFi e pelo protocolo LoRaWAN. É utilizada em aplicações que envolvem Internet das Coisas (IoT). Apresenta as seguintes características básicas (HELTEC AUTOMATION, 2018):

- Microprocessador: ESP32 (MCU dual-core de 32 bits + núcleo ULP), com chip LoRa SX1276/SX1278;
- Interface micro USB com regulador de tensão completo, proteção contra curto-circuito, blindagem RF e outras medidas de proteção;

- Interface de bateria SH1.25-2 embarcada, sistema integrado de gerenciamento de bateria de lítio (gerenciamento de carga e descarga, proteção contra sobrecarga, detecção de energia da bateria, comutação automática de energia USB/bateria);
- Conexões de rede integradas WiFi, LoRa e Bluetooth, Wi-Fi embarcada, antena 3D de metal dedicada de 2,4 GHz para Bluetooth;
- Tela OLED de matriz de pontos 128x64 de 0,96 polegadas integrada;
- Chip USB para porta serial CP2102 integrado;
- Suporte ao ambiente de desenvolvimento Arduino;
- Suporte à biblioteca Arduino® ESP32 + LoRaWAN;

Figura 2.21 – Placa WiFi LoRa ESP32.



Fonte: HELTEC AUTOMATION. **WiFi LoRa 32 (V2)**, 2018. Disponível em: https://heltec.org/project/wifi-lora-32/. Acesso em: 29 ago. 2023.

Neste trabalho, esta placa foi utilizada para comunicação do operador em solo com os drone-robôs próximos ou em contato com a linha de alta tensão, uma vez que a comunicação entre as placas LoRa não é afetada por interferências eletromagnéticas provenientes destas linhas.

CAPÍTULO III

DRONE-ROBÔ PARA LIMPEZA DE CADEIAS DE ISOLADORES

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do drone-robô para limpeza de cadeias de isoladores. O drone-robô em questão foi idealizado para permitir a identificação dos isoladores por câmera e realizar a limpeza, que é efetuada por meio de um módulo robótico. Este módulo é acoplado ao drone e carrega uma lavadora portátil de alta pressão a bateria, um reservatório para água desmineralizada e um sistema eletrônico de controle.

O presente capítulo contempla a revisão da literatura envolvendo o estado da arte relativo às estratégias usadas na limpeza de cadeias de isoladores. Com base nessa revisão, a justificativa para a construção do sistema proposto é apresentada. Em seguida, são descritas a metodologia empregada no desenvolvimento do drone-robô; os resultados obtidos com as respectivas discussões decorrentes e as conclusões formuladas após o término deste Capítulo.

3.1 Revisão bibliográfica

Para realização do isolamento elétrico das linhas de alta tensão em relação às torres, são necessários dispositivos conhecidos como isoladores. Os isoladores devem apresentar características dielétricas e características mecânicas padronizadas em norma, tendo em vista a natureza severa do trabalho que irão realizar. Os isoladores sujam devido aos efeitos de poeira, sal, dejetos de pássaros e substâncias químicas provenientes de fumaças diversas (HADIPOUR, SHIRAN; 2017). Estes depósitos de sujeira formam uma camada condutora na superfície do isolador que pode causar o fenômeno de *flashover,* que é geralmente imprevisível caso manutenções preventivas não sejam realizadas periodicamente (HADIPOUR, ABEROMAND, JAMEII; 2016).

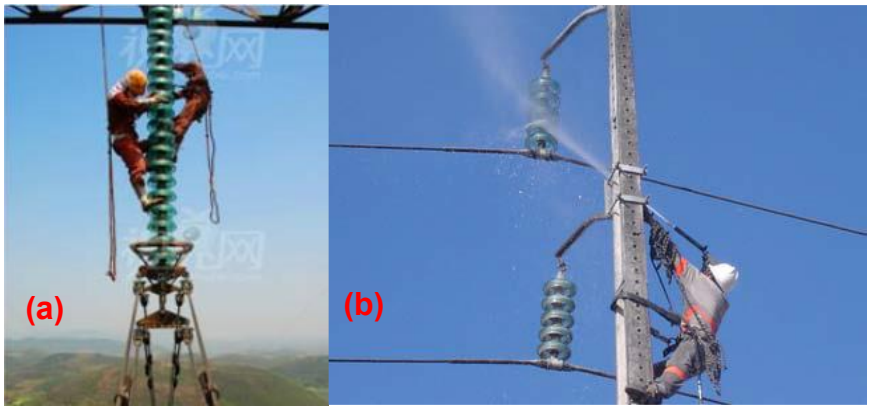
De acordo com Miller (1989), o *flashover* é um fenômeno caracterizado pela ruptura

dielétrica ao longo da superfície de isoladores. Após a ocorrência do fenômeno, a manutenção deve ser corretiva, ocasionando a necessidade de operações que demoram horas para serem concluídas. Portanto, a limpeza dos isoladores é fundamental para evitar falhas no sistema de transmissão de energia elétrica (COPEL, 2015).

A limpeza tradicional das cadeias de isoladores geralmente é realizada por operadores na linha viva (denominada "*Hot line washing*"), ou quando do desligamento destas. Esta limpeza pode ser realizada pelos técnicos utilizando-se de panos, Fig. 3.1(a), por lavadoras de alta pressão posicionadas nas torres, ou portadas pelos técnicos, Fig. 1(b-c). A limpeza pode ser realizada também com a utilização de caminhões associados a plataformas, Fig. 3.2, ou caminhões associados a dispositivos robóticos, Fig. 3.3, no caso de baixas tensões (no sistema de distribuição) em aplicações dentro das cidades.

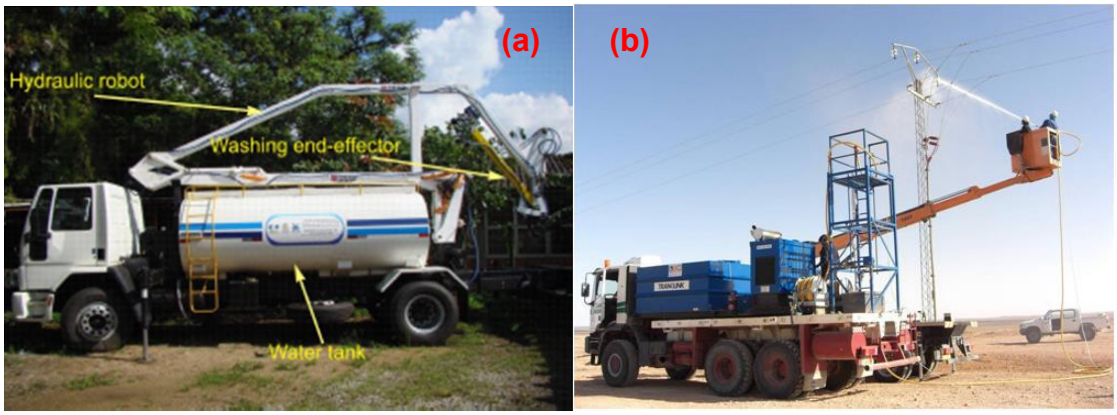
A limpeza de isoladores apresenta como riscos aos eletricistas a queda destes, lesão corporal ou alergias, choque elétrico, cortes por isolador danificado, lesão por esmagamento de membros e abalroamento do equipamento com a estrutura e/ou acessórios e lesão corporal por queda de ferramental. O tempo médio para execução desta tarefa é de 1,5 horas por estrutura (COPEL, 2015).

Figura 3.1 - (a) Limpeza de cadeia de isoladores com panos em linhas desligadas; (b) Limpeza de cadeia de isoladores com lavadoras de alta pressão.



Fonte: (a) WANG, L.; WANG, H.; SONG, Y.; PAN, X. Development of a bio-inspired live-line cleaning robot for suspension insulator strings. **International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology**, 17, 24, p. 1–24, 2016. DOI: 10.5013/IJSSST.a.17.48.24
(b) SOUSA, R. O.; PONTES, R. S. T.; AGUIAR, V. P. B,; LUNA, A. M.; ANDRADE, C. T. C. **Technique of dry washing of the insulators of the electrical nets of distribution**. 11ª Conferência Espanhola-Lusa de Engenharia Elétrica, 2009. Disponível em: http://www.aedie.org/webrevista/articulos/num1/163-sousa.pdf. Acesso em 15 set. 2023.

Figura 3.2 - (a) Limpeza de isoladores por caminhões. (b) Caminhão tanque para Limpeza de isoladores; (b) braço robótico.

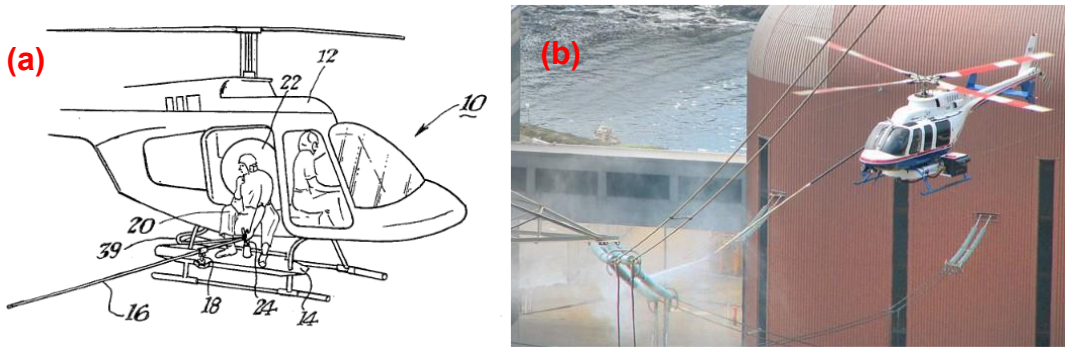


Fonte: (a) SIMAS, H.; BARASUOL, V.; KINSELER, R.; RAPOSO, E.; MARTINS, D.; PIERI, E. R.; DE NEGRI, V. J.; STEMMER, M.; CASTELAN, E. B. Kinematic conception of a hydraulic robot applied to power line insulators maintenance. **ABCM Symposium Series in Mechatronics**, V. 4, p. 739-748, 2010. (b) LCMHILINE. **Live Line Insulator Washing**, 2014. Disponível em: http://lcmhiline.com/livelineinsulator.php. Acesso em: 18 ago. 2023.

Na limpeza de cadeias de isoladores, são utilizados também helicópteros (Fig. 3.3). Estes dispositivos apresentam vantagens como tanque para armazenamento de líquidos embarcado e bomba de alta pressão e vazão. O reabastecimento é realizado em local selecionado em terra. A limpeza de isoladores utilizando-se de helicóptero com lavadora de alta pressão acoplada foi descrita inicialmente por Kurtgis (1984). Entretanto, a lavagem por helicóptero apresenta desvantagens, como necessidade de operadores treinados para orientar o jato de água com precisão, alto tempo gasto na decolagem e pouso dos helicópteros e custos elevados de operação.

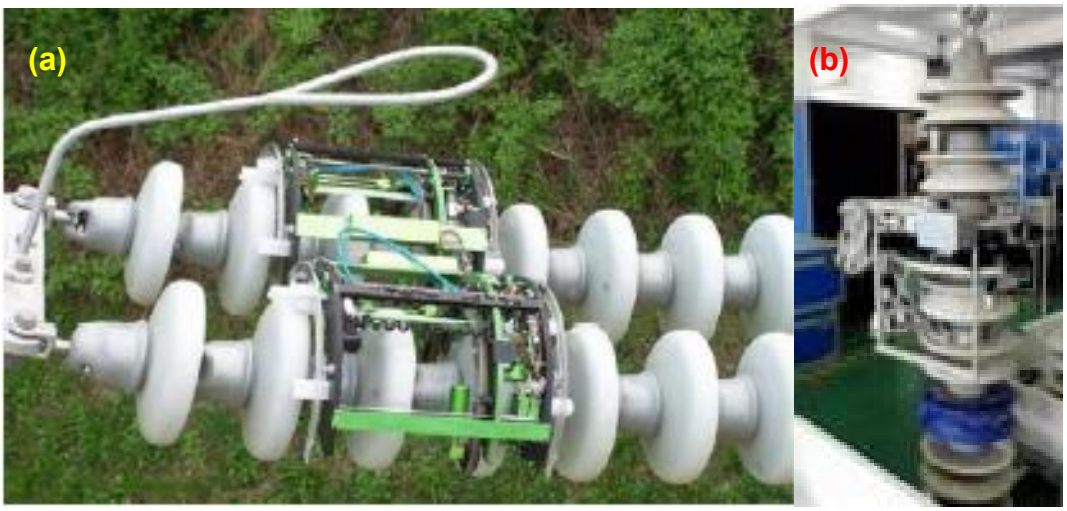
Encontram-se na literatura modelos de robôs utilizados para limpeza de cadeias de isoladores. Esses robôs são dispositivos complexos, que se movimentam ao longo ou em torno dos discos dos isoladores para realizar a limpeza mecânica destes. Existem robôs para limpeza de isoladores baseados no princípio de locomoção de lagartas. Nos trabalhos de Byun et al. (2006) e de Wang et al. (2016) são apresentados robôs para limpeza e inspeção de isoladores que englobam os discos da cadeia de isoladores e realizam a limpeza destes com escovas, sendo capazes de se locomover ao longo da cadeia de isoladores. (Fig. 3.4).

Figura 3.3 – (a) Adaptação de uma lavadora de alta pressão em um helicóptero; (b) Lavagem de isoladores por helicóptero.



Fonte: (a) KURTGIS, M. P. **Method for washing voltage transmission line insulators**, 1984. US4477289. (b) PJ HELICOPTERS. **Projects**. Disponível em: https://www.pjhelicopters.com/projects. Acesso em: 18 ago. 2023.

Figura 3.4 - (a) Robô desenvolvido para limpeza de isoladores; (b) Modelo semelhante desenvolvido por Wang et al. (2016).



Fonte: (a) BYUN, S. H., CHO, B. H., PARK, J. Y., LEE, J. K. **Implementation of control system for insulator cleaning robot**. SICE-ICASE International Joint Conference, p. 3044-3047, 2006. DOI: 10.1109/SICE.2006.314708
(b) WANG, L.; WANG, H.; SONG, Y.; PAN, X. Development of a bio-inspired live-line cleaning robot for suspension insulator strings. **International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology**, 17, 24, p. 1–24, 2016. DOI: 10.5013/IJSSST.a.17.48.24

A utilização destes robôs apresenta desvantagens, como complexidade de manutenção dos protótipos e a necessidade de inserção dos robôs nos isoladores pelos técnicos, acarretando riscos humanos e problemas de ergonomia. Destaca-se também a

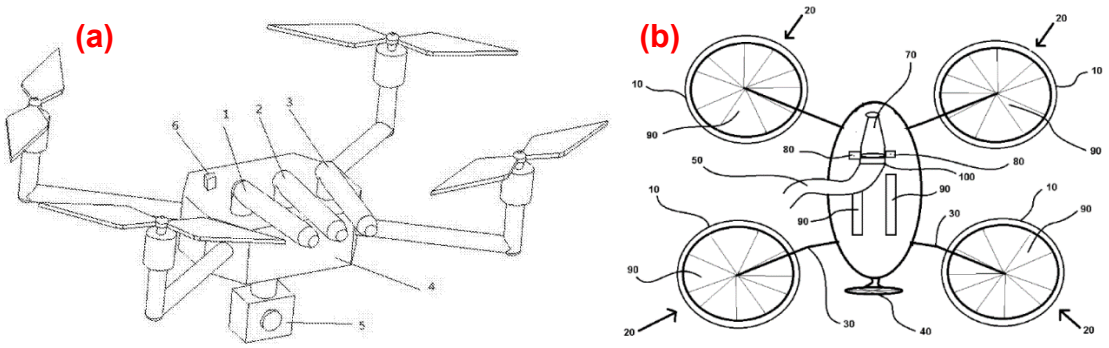
existência de diferentes tipos e tamanhos de isoladores, o que dificulta a adoção de um projeto mecânico que atenda a todos os modelos.

Considerando os métodos de limpeza abordados, um método promissor seria o de limpeza por drone. Este método eliminaria os riscos de acidentes com operadores possuindo ótimas características geométricas que facilitam o voo ao contornar obstáculos, atingindo facilmente o ponto de limpeza. Caso esteja conectado à terra, os fornecimentos de água e energia podem ser praticamente ilimitados. Sem o cabo, a liberdade de voo é enorme, possibilitando alcançar locais de acesso dificultado. A desvantagem é a baixa autonomia de voo, pois uma das maiores limitações é a baixa capacidade de carga das baterias. Nestes casos, o abastecimento de água também é menor, pois um reservatório grande impossibilita a operação aérea devido à carga excessiva que deve ser carregada pelo drone. Entretanto, o reabastecimento pode ser realizado rapidamente.

Existem algumas aplicações de drones para limpeza de isoladores. No trabalho de Tengfei et al. (2015), é apresentado um drone com três bicos para limpeza de isoladores. Um bico é responsável pelo produto de limpeza, outro pela água limpa e o terceiro por um *spray* de alta pressão. O processo de limpeza é monitorado por uma câmera com as imagens enviadas a uma estação no solo em que o operador determina se a limpeza foi realizada por completo.

A ideia da utilização de um drone para combate a incêndios foi proposta por Moore (2011). O drone é alimentado por um cordão umbilical que contém a alimentação por cabo para o drone e uma mangueira para o fornecimento de água (Fig. 3.5).

Figura 3.5 – (a) Drone para limpeza de isoladores; (b) Drone para combate a incêndios.



Fonte: (a) TENGFEI, S.; RONGHAI, L.; XIN, Z.; ZHANGQIN, W.; XINLIANG, G.; YINGCHUN, Y.; HONGWEI, X. **Electrified insulator cleaning method based on unmanned aerial vehicle**. CN105170523A, 2015.
(b) MOORE, J. **UAV fire-fighting system**. US 2013/0134254 A1, 2011.

Existe também o trabalho desenvolvido por Hadipour et al. (2016) que apresenta a ideia da utilização de um helicóptero do tipo aeromodelo para realizar a limpeza de isoladores a partir da utilização de uma fonte de água como um caminhão tanque (HADIPOUR, ABEROMAND, JAMEII; 2016).

A empresa Aerones desenvolveu um drone que pode ser aplicado no degelo de turbinas eólicas. Este drone possui alimentação elétrica e de água realizada por meio de cabos ligados ao solo. A Figura 3.6 mostra a aplicação deste drone.

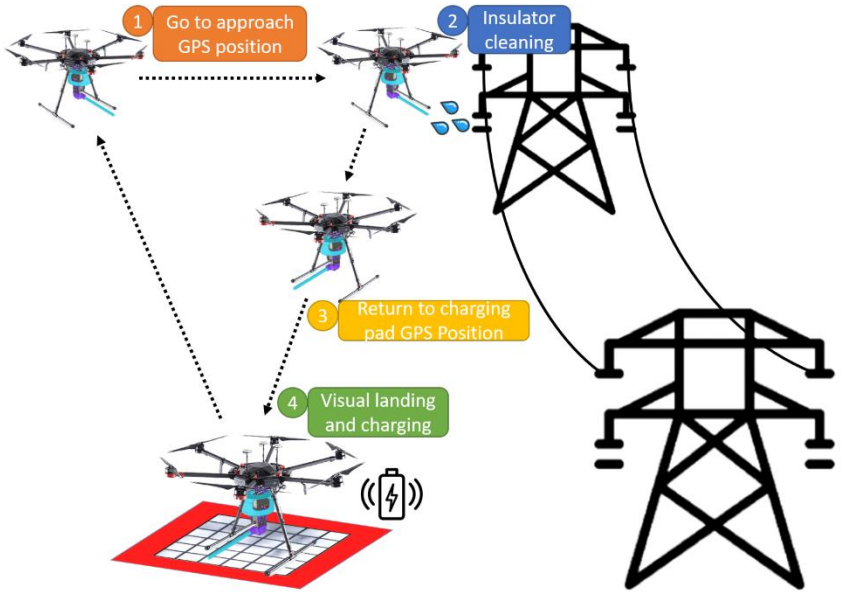
Figura 3.6 - Drone desenvolvido pela *Aerones* aplicado a degelo de turbinas de vento.



Fonte: AERONES. **Aerones wind turbine cleaning drone + interview**. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=mP5LZYpFggM. Acesso em 18 ago. 2023.

Lopez et al. (2021) desenvolveram um drone para limpeza de isoladores. Conta ainda com um sistema para carregamento das baterias ao pousar em uma plataforma de carregamento (Fig. 3.7). A aplicação proposta não foi testada em linhas vivas e não apresenta projeto de blindagem eletromagnética.

Figura 3.7 – Drone para limpeza de cadeias de isoladores.



Fonte: LOPEZ, R. L.; SANCHEZ, M. J. B.; JIMENEZ, M. P.; ARRUE, B. C.; OLLERO, A. autonomous UAV system for cleaning insulators in power line inspection and maintenance. **Sensors**, 21, 8488, 2021. DOI: 10.3390/s21248488

3.2 Justificativa

O drone-robô para limpeza de cadeias de isoladores foi idealizado como um dispositivo que visa a minimizar a possibilidade de acidentes com os técnicos de linha viva que realizam as inspeções/manutenções dos cabos de alta tensão. Também objetiva diminuir a ocorrência de falhas devido à interrupção do fornecimento de energia elétrica, danos a equipamentos de consumidores industriais e residenciais e custos de manutenção, aumentando a eficiência do sistema energético. Ressalta-se ainda o que as tarefas de manutenção poderão ser realizadas mais rapidamente que o são atualmente.

As soluções presentes na literatura de robôs móveis que se deslocam sobre as linhas não são capazes de transpor todos os obstáculos presentes sobre as linhas de alta tensão. Deve-se destacar que as linhas de transmissão e cabo para-raios possuem dispositivos utilizados para fins específicos como esferas de sinalização, grampos, cadeias de suspensão, cadeias de isoladores, amortecedores de vibração, luvas, emendas, espaçadores e espantadores de pássaros, torres de diferentes tipos, que constituem obstáculos para a movimentação dos robôs. O drone-robô proposto neste Capítulo poderá ser utilizado em tarefas nos cabos de alta tensão como em cabos guia, sendo capaz de transpor todos os obstáculos existentes nestes, inclusive as torres.

A respeito da limpeza de isoladores utilizando-se de drones ou helicópteros, verifica-se que a maioria das soluções existentes não apresenta automatização de suas operações e autonomia de voo de modo a estarem desligadas completamente do solo (sem necessitar de alimentação de água proveniente do solo, com reservatório completamente embarcado no drone). Os métodos de limpeza que utilizam o fornecimento de água ao drone com reservatório em terra apresentam risco de curto-circuito, caso o jato de água da limpeza seja contínuo. A presente invenção difere das presentes na literatura por possuir um reservatório próprio sem a necessidade de uma fonte externa de alimentação de água. Ainda com o drone completamente autônomo em relação ao solo, aproveita-se o isolamento elétrico proveniente do ar atmosférico, que atua como dielétrico, evitando descargas elétricas indesejadas.

Durante o desenvolvimento desta tese, foi publicado o trabalho de Lopez et al. (2021). O sistema proposto por esses autores também permite a limpeza dos isoladores por um drone atrelado a um sistema de visão e com reservatório de água. Entretanto, não foi validado experimentalmente realizando a limpeza de isoladores em linha viva, e não apresenta qualquer blindagem contra os efeitos de interferências eletromagnéticas.

Resumidamente, as inovações propostas com o drone-robô para limpeza das cadeias de isoladores são:

- Procedimento de lavagem seguro, com menor risco ambiental, embasado matematicamente e cientificamente, inclusive com projeto inovador de blindagem eletromagnética e eletrostática.
- Capacidade de transposição de todos os obstáculos existentes nas linhas de transmissão, inclusive torres;
- Limpeza de isoladores com automatização que permite acionamento e desligamento remoto da lavadora por comandos enviados por um operador em solo;
- Sensoriamento da operação de limpeza, que envolve monitoramento da distância do drone em relação à cadeia lavada por meio de uma câmera de profundidade.
- Permite determinar se é necessário realizar a limpeza da cadeia de isoladores e ainda, após a limpeza com água desmineralizada, determinar se a limpeza foi efetiva.
- Solução validada experimentalmente realizando limpeza simulada de isoladores energizados em até 138 kV.

3.3. Metodologia

Esta seção descreve a metodologia empregada no desenvolvimento do drone-robô proposto. Contempla a montagem, configuração e programação do drone. Também abrange o desenvolvimento do módulo robótico de limpeza, desde a concepção, projeto em CAD/CAE, projeto do sistema eletrônico até a concretização do protótipo. Por fim, são apresentados os testes em laboratório e os testes em campo para validação do sistema.

3.3.1 Concepção do drone robô para limpeza de isoladores

Para projetar este drone-robô, foram levadas em consideração recomendações normativas, como a norma *IEEE Guide for Maintenance Methods on Energized Power Lines,* 957-2005 (IEEE, 2005) que trata de procedimentos seguros e adequados para realização da limpeza de isoladores, por diferentes métodos. Dessa forma, os procedimentos de limpeza do presente módulo serão adequados às recomendações presentes nesta norma.

A norma citada prevê os tipos de limpeza tradicionalmente utilizados:

- Limpeza a água: A principal forma de limpeza de isoladores é a partir da utilização de água, nas seguintes pressões: alta pressão (2750 kPa a 7000 kPa, 400 psi a 1000 psi); média pressão (2100 kPa a 2750 kPa, 300 psi a 400 psi) e baixa pressão (1400 kPa ou 200 psi);
- Limpeza a seco com ar comprimido;
- Limpeza com pano.

A Tabela 3.1 apresenta os contaminantes de isoladores que podem ser lavados com água em função da pressão empregada na limpeza.

Pela Tabela 3.1, verifica-se que para a remoção de sal, pode-se aplicar limpeza tanto em alta quanto em baixa pressão. A água expelida pela lavadora deve ser desmineralizada e em formato de gotícula, para evitar curto-circuito entre a cadeia de isoladores e o drone.

A cidade onde a limpeza de isoladores será realizada na validação deste drone-robô é costeira, o que ocasiona uma deposição de alta concentração de sal na superfície dos isoladores. Para os testes em laboratório, foi depositada uma concentração de sal maior do que a encontrada na prática na superfície dos isoladores. Isso foi feito para garantir que a salinidade presente nos isoladores em campo possa ser efetivamente removida pelo sistema de limpeza desenvolvido.

Tabela 3.1 – Pressão recomendada para remoção de contaminantes de isoladores conforme norma IEEE 957-2005.

Contaminante	Limpeza com água a:	
	Baixa pressão	Alta pressão
Sal	X	X
Cimento/cal		
Poeira da terra	X	X
Poeira de fertilizante	X	X
Poeira metálica		
Poeira de carvão	X	X
Cinza vulcânica	X	X
Excremento de pássaro	X	X
Químico	X	
Fumaça de veículo	X	X
Efluente de torre de resfriamento	X	X
Fumaça/fuligem de carvão	X	X
Orgânico	X	X
Gelo/neve		X
Petróleo/graxa		

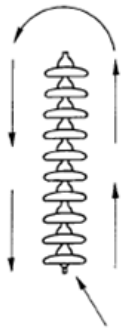
Fonte: IEEE. **IEEE guide for maintenance methods on energized power-lines**. ANSI/IEEE Std 516 1987, 1988, 7–44, p.1-75, 2005. DOI: 10.1109/IEEESTD.2005.339594.

Embora este drone-robô tenha sido projetado para limpeza de cadeias poluídas com sal, outros poluentes também podem ser removidos, dependendo de suas características (IEEE, 2005).

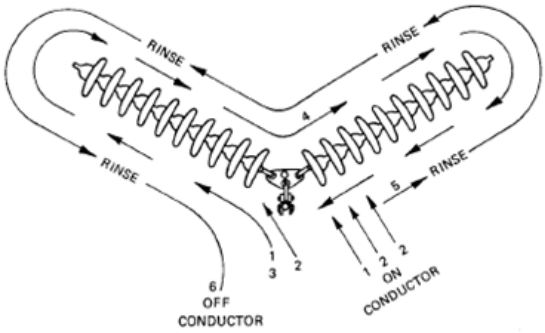
A Figura 3.8 ilustra o método sequencial para limpeza de isoladores por helicóptero. O procedimento a ser empregado para limpeza pelo drone será análogo.

Considerando os critérios a serem atendidos, selecionou-se a lavadora modelo WG629E do fabricante Worx (Fig. 3.9). Esta possui como características faixa de pressão entre 6,5 bar (94 psi) e 22 bar (320 psi). Esta lavadora é conectada diretamente ao reservatório de água do drone, possuindo bomba e compressor internos e alimentação à bateria. No manual, o fabricante informa que a vazão média é de 2,5 l/min.

Figura 3.8 - Procedimento para limpeza dos isoladores com helicóptero, segundo a norma IEEE 957-2005.



Passo 1. Sempre entre em contato com o condutor primeiro com jato de água sob pressão total.
Passo 2. Mova o jato para cima ligeiramente fora do centro.
Passo 3. Mova o jato para baixo ligeiramente fora do centro.
Passo 4. Repita os passos 2 e 3 para enxague.
Passo 5. Retire o jato de água sob pressão total do condutor



Passo 1. Sempre entre em contato com o cundutor primeiro com jato de água sobr pressão total.
Passo 2. Limpe os três primeiros discos de cada lado.
Passo 3. Mova o jato para cima ligeiramente fora do centro e volte na cadeia.
Passo 4. Continue o movimento na outra cadeia e depois desça.
Passo 5. Enxague repetindo os passos.
Passo 6. Retire o jato de água sob pressão total do condutor.

Fonte: IEEE. **IEEE guide for maintenance methods on energized power-lines**. ANSI/IEEE Std 516 1987, 1988, 7–44, p.1-75, 2005. DOI: 10.1109/IEEESTD.2005.339594.

Figura 3.9 – Lavadora Portátil Worx WG629E.



Fonte: WORX. **Limpador de alta pressão portátil à bateria 20 V MAX lithium-ion bivolt**. 2023. Disponível em: https://ferramentasworx.com.br/index.php/wg629e-9/. Acesso em: 04 ago. 2023

Testes práticos realizados no Laboratório de Automação e Robótica avaliaram se a vazão real era igual à informada pelo fabricante. Concluiu-se que a vazão real era de 1,6 l/min, menor que a informada. Isso permite que durante as operações de limpeza, se façam dois esvaziamentos de tanque por carga das baterias, ou seja, durante o tempo estimado de voo de 10 minutos do drone.

A norma especifica uma distância de segurança de 3,66 m para limpeza de isoladores a 69 kV e de até 4,57 m para limpeza de isoladores a 230 kV, utilizando água comum, visando a segurança dos técnicos. Entretanto, como a água a ser utilizada será desmineralizada, não há risco de formação de arco elétrico, e portanto, a limpeza pode ser feita a qualquer distância com a utilização do drone-robô.

Em relação à eficácia da limpeza, a distância adequada para limpeza dos isoladores foi verificada por um teste em ambiente com ventos fortes, entre a posição 4 e 5 na escala Beaufort (aproximadamente 8 m/s). As medidas de distância entre a ponta da lavadora e o poste a ser lavado foram medidas com auxílio de uma trena simples. Após os testes realizados, concluiu-se que a lavagem deve ser feita no mínimo a 1,5 m de distância, para que os isoladores sejam atingidos com força considerável, e no máximo a 1 m de distância, para evitar possíveis danos ao drone, cadeia de isoladores e descargas elétricas. Os testes também determinaram que é possível limpar duas cadeias de isoladores seguidas, com 8 litros de água no tanque do drone.

Por fim, a Tab. 3.2 resume as especificações relativas à limpeza das cadeias de isoladores definidas para o projeto do drone-robô em questão.

Tabela 3.2 - Especificações relativas ao sistema de limpeza do drone-robô de limpeza.

Método de limpeza	Limpeza com água desmineralizada
Tipos de contaminantes alvo da lavagem	Sal
Tipo de isolador a ser lavado	De vidro ou cerâmico
Pressão	94 psi a 320 psi (média pressão)
Vazão	1,6 l/min
Formato do jato	Em gotícula
Cadeias limpas por tanque cheio (8 L)	Duas por tanque
Distância de segurança	1,5 m a 1,0 m da cadeia
Velocidade máxima do vento	4 m/s

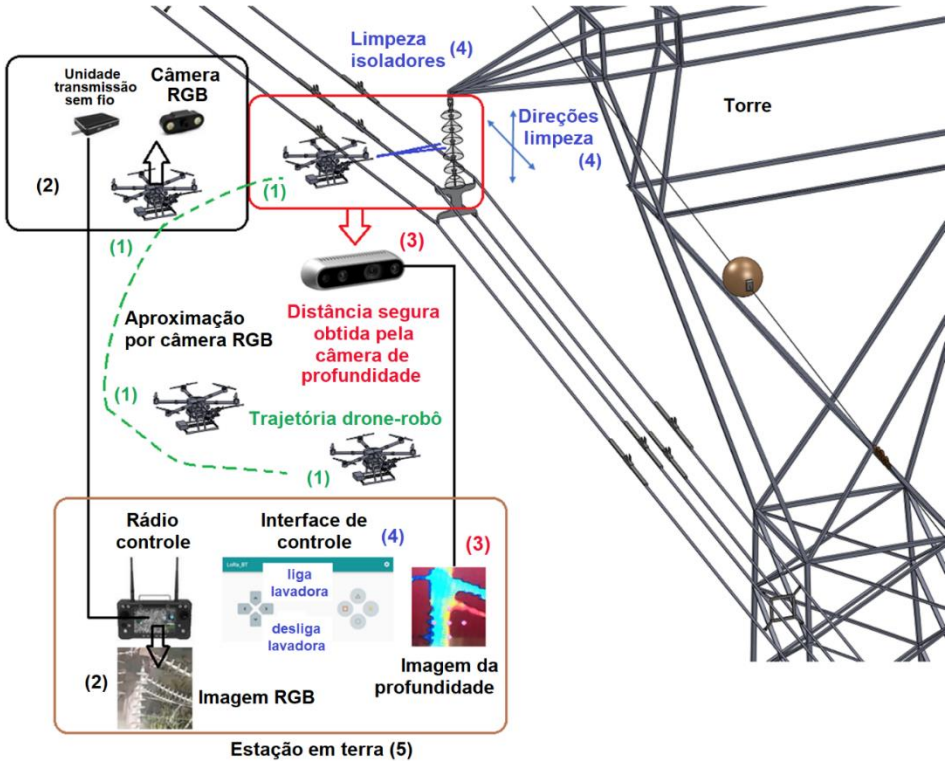
3.3.2 Projeto e construção do drone-robô para limpeza de isoladores

O drone-robô para limpeza de cadeias de isoladores foi idealizado como um robô em que a um drone é fixado um módulo de fácil desmontagem para permitir a limpeza. Inicialmente, o drone-robô proposto posiciona-se próximo à cadeia de isoladores utilizando

uma câmera RGB no drone, que transmite a imagem em tempo real para o controle remoto do drone na estação terrestre. O voo do drone é conduzido manualmente por um operador via rádio controle. Em seguida, um algoritmo de visão de uma câmera de profundidade fornece a distância do drone em relação à cadeia de isoladores, com indicações de uma distância segura entre o drone-robô e a cadeia de isoladores. Se a distância estiver dentro da faixa segura de limpeza, o sistema de pressão é ativado, e o operador do drone inicia os movimentos (para cima, para baixo e lateralmente) para limpar a cadeia de isoladores (Fig. 3.10). A verificação da eficácia da limpeza é feita por meio da aquisição de imagens da cadeia de isoladores usando um drone específico para inspeção.

A Figura 3.10 expõe conceitualmente a proposta do drone robô. A movimentação do drone-robô é realizada por meio de comandos manuais enviados por um operador (Fig 3.10 item 1). Para facilitar a movimentação, uma câmera RGB acoplada ao drone é utilizada (Fig 3.1 item 2), transmitindo as imagens para a estação terrestre (Fig 3.10 item 5). O posicionamento do drone-robô em relação à cadeia de isoladores é realizado por meio de uma câmera de profundidade (Fig 3.10 item 3). Quando o drone está em uma região adequada para limpeza, o sistema de limpeza (Fig 3.10 item 4) é ativado a partir da estação terrestre (Fig 3.10 item 5). Os movimentos para limpar a cadeia são realizados manualmente (Fig 3.10 item 4).

Figura 3.10 - Conceito da operação proposta para o drone-robô.



Fonte: Autor.

Os componentes-alvo da limpeza podem ser isoladores, cabos, esferas de sinalização, entre outros, sendo este trabalho focado na limpeza de cadeias de isoladores. No módulo robótico, está presente uma lavadora portátil com um dispositivo para acionamento da mesma via rádio controle. Também está acoplado ao módulo um tanque de água de fácil abastecimento com capacidade máxima de 10 litros. A Figura 3.11 mostra o drone EFT E610 utilizado com suas respectivas características.

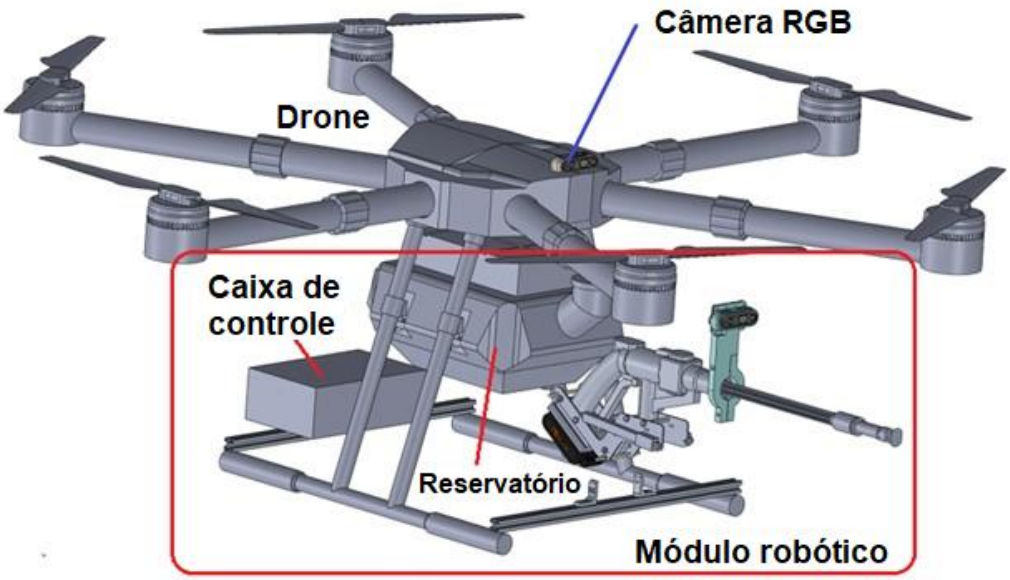
Figura 3.11 - Hexacóptero EFT E610 utilizado e suas características.



Fonte: Autor.

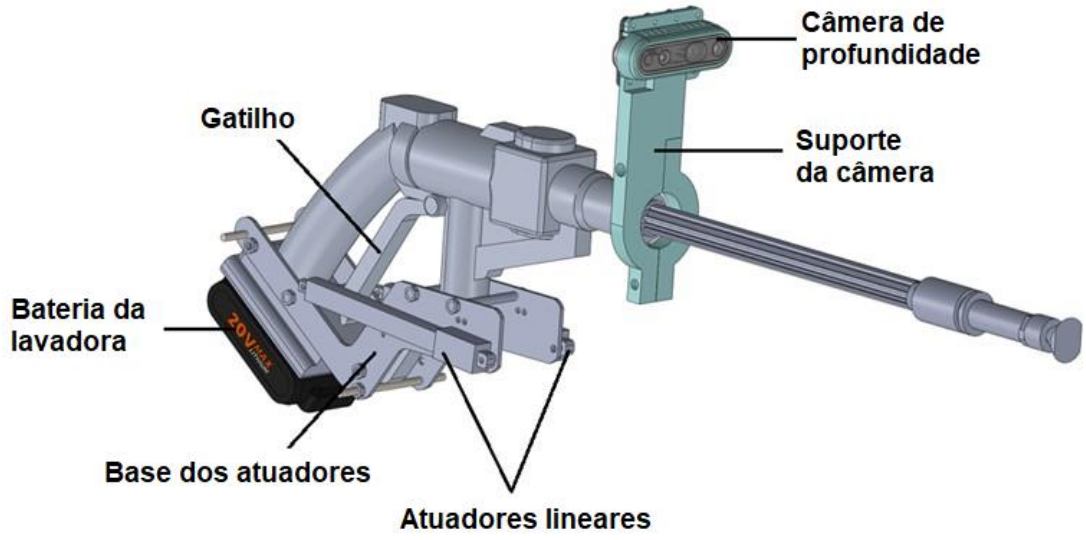
As Figuras 3.12 e 3.13 mostram o drone-robô desenhado em CAD. Ele é composto por uma lavadora portátil alimentada por bateria, um sistema de acionamento do gatilho para a lavadora, uma câmera de profundidade e um sistema de controle. Vigas de alumínio fixadas ao trem de pouso do drone foram utilizadas para fixar tanto a caixa contendo componentes do sistema eletrônico quanto a lavadora de alta pressão. Este módulo robótico estará com sua estrutura sempre fixa ao drone, durante a sua operação. Ele apresenta funcionamento híbrido, abrangendo tanto funções comandadas via rádio controle quanto funções que devem ser desempenhadas automaticamente. Dessas funções, as automáticas são o acionamento e desligamento da lavadora de alta pressão por comando disparado do solo.

Figura 3.12 – Desenho em CAD do Drone-robô para limpeza de cadeias de isoladores.



Fonte: Autor.

Figura 3.13 – Desenho em CAD do módulo robótico para lavagem de cadeias de isoladores.



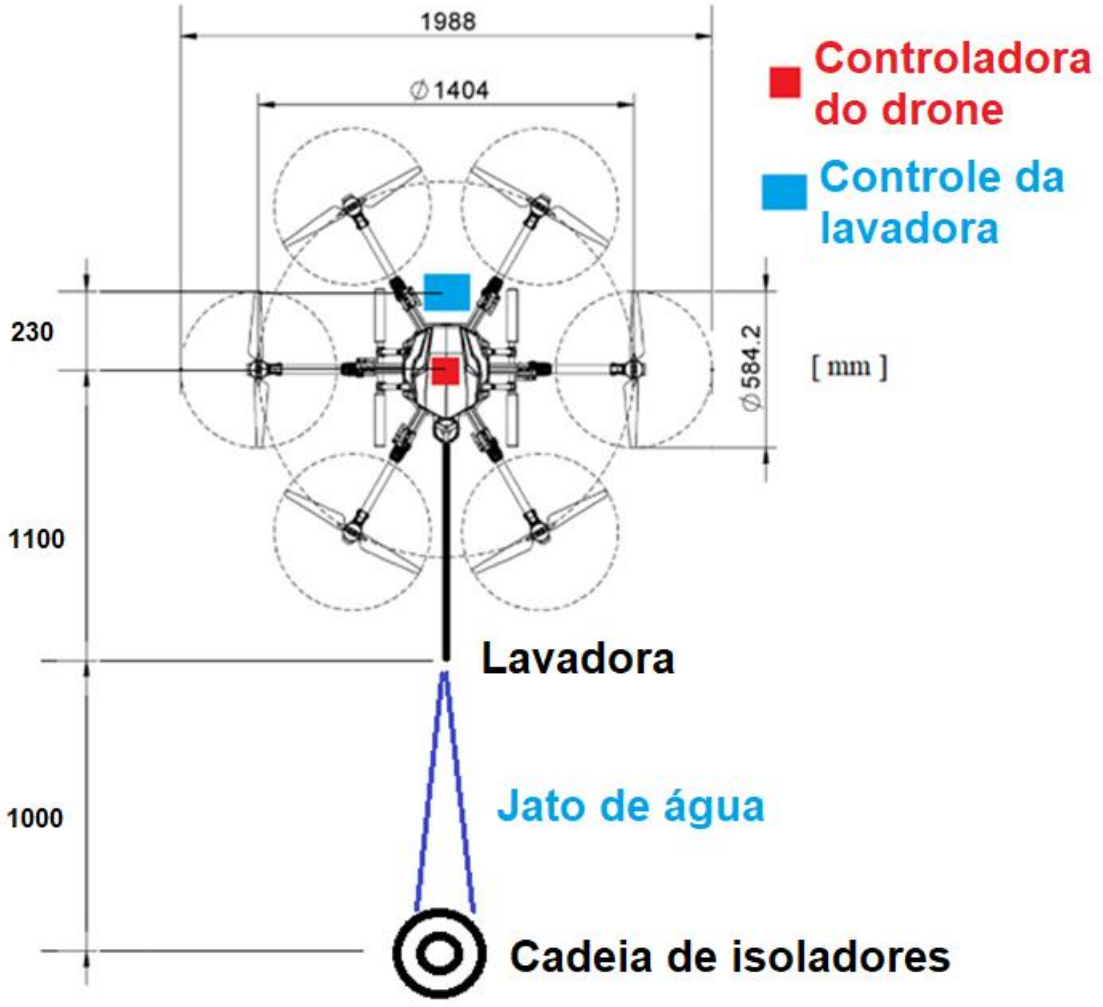
Fonte: Autor.

3.3.3 Desenvolvimento de blindagem eletromagnética e eletrostática para o drone-robô de limpeza de isoladores

Para realização da blindagem do drone-robô é preciso considerar primeiramente as distâncias envolvidas entre a fonte de interferência e o robô. As distâncias consideradas

para cálculo são mostradas na Fig. 3.14, bem como as dimensões da estrutura do drone-robô, em uma vista superior.

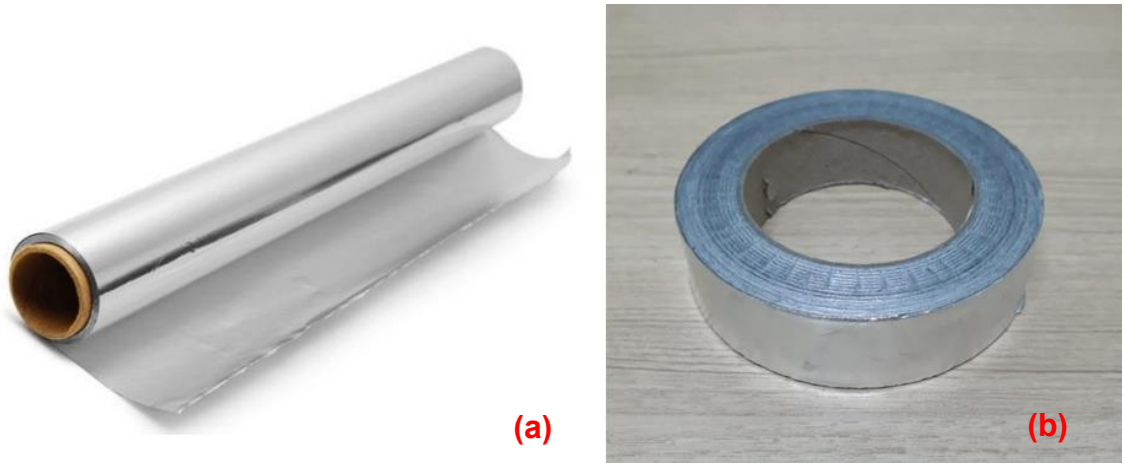
Figura 3.14 – Vista superior do drone-robô para limpeza, com medidas em milímetros.



Fonte: Autor.

Para realizar a blindagem eletrostática da estrutura do hexacóptero EFT E610, decidiu-se pela utilização de folhas de liga de alumínio 8011ho com espessura de 0,1 mm. Esta liga possui alta maleabilidade. Além das folhas, utilizou-se uma fita adesiva de alumínio, cuja espessura é de 0,18 mm. A estratégia adotada para blindagem do drone EFT E610 foi o envolvimento da estrutura do drone com várias camadas de folhas de alumínio, fixadas por segmentos da fita de alumínio, conforme a espessura necessária para a blindagem efetiva. A Figura 3.15 mostra estes materiais.

Figura 3.15 – (a) Bobina de papel alumínio 8011ho de 0,10 mm de espessura e (b) fita adesiva de alumínio, de espessura 0,18 mm.



Fonte: (a) ALUMINIO ALURE. **Folha de alumínio para latonagem de 60 cm x 0,10 mm**. 2020. Disponível em: https://www.aluminioalure.com.br/ifjtkiz3f-folha-de-aluminio-para-latonagem-60cm-x-010mm-com-2-metros. Acesso em 10 ago. 2023. (b) Autor.

Para proteger o sistema eletrônico do módulo robótico (controlador da lavadora, Fig. 3.14), foi utilizada uma caixa prismática para que os componentes eletrônicos pudessem ser inseridos em seu interior, como mostrado na Fig. 3.14. O projeto da blindagem para o sistema de controle do drone (Fig. 3.14) também foi realizado.

Portanto, para o projeto da blindagem, foi utilizado o método de cálculo de atenuação sugerido por Ott (2009) (seção 2.6 desta tese) para examinar o impacto da blindagem na faixa de frequência de 30 a 3000 Hz e para o fenômeno de descarga parcial (PD).

O trabalho de Vasquez-Arnez et. al (2010) concentrou-se na avaliação por câmera ultravioleta da presença do efeito corona em isoladores que operam em linhas de 138 kV. Em geral não se observaram ocorrências significativas de efeito corona neste caso, apenas centelhas aleatórias que podem ser desprezadas. Portanto, os efeitos das frequências emitidas na segunda e terceira faixas propostas por Ungureanu, Rusu e Basan (2007), de 0,15 MHz até 3 MHz e de 30 MHz até 300 MHz, podem ser desprezados, por serem causados por efeito corona.

No entanto, pode-se considerar uma situação crítica em que ocorram descargas parciais (PD) na cadeia de isoladores, cujo campo elétrico emitido exceda a rigidez dielétrica do ar. O efeito da blindagem projetada sob essa condição crítica também foi avaliado.

Inicialmente, propôs-se que a blindagem do sistema de controle do drone fosse realizada com folhas de alumínio com espessura de 0,1 mm, e o sistema eletrônico do módulo, com uma caixa prismática com espessura de 0,7 mm. Se a blindagem proposta de 0,1 mm de espessura for suficiente para atenuar as interferências, a blindagem para o

sistema de controle do módulo também pode ser considerada projetada, uma vez que apresentará maior eficiência devido ao alumínio mais espesso e maior distância em relação à fonte de emissão de interferência.

O conjunto inicial de dados necessários para os cálculos envolvidos nesse procedimento é:

- $v = 3 \cdot 10^8$ *m/s* (velocidade das ondas eletromagnéticas);
- *r = 2,1 m* (distância mínima da fonte de interferência à qual o controlador do drone será exposto (Fig. 3.14);
- $\mu_r = 1$ (permeabilidade magnética relativa do alumínio);
- $\sigma_r = 0,61$ (condutividade relativa do alumínio);
- *t = 0,1 mm = 0,0039 in* (espessura da blindagem)

Os resultados dos cálculos são apresentados na seção 3.4.2.

No que diz respeito à blindagem eletrostática, as linhas energizadas mais próximas ao drone são impedidas de criar um arco em direção a ele devido às propriedades dielétricas do ar, caso o clima permita voos seguros. Isso elimina a necessidade de um projeto de blindagem eletrostática. A separação entre o drone e a cadeia de isoladores a essa distância é adequada para evitar descargas resultantes da ruptura dielétrica do ar. Considerando uma distância mínima de 1 metro entre a ponta da lavadora e as cadeias energizadas, decidiu-se não blindar a estrutura do drone, pois essa distância entre o drone e a cadeia é suficiente para evitar descargas devido à ruptura dielétrica do ar (Fig. 3.17).

3.3.4 Sistema de detecção de distância do módulo de limpeza

A operação de limpeza das cadeias de isoladores requer que o drone-robô desenvolvido para este fim opere em uma faixa de distância entre 1 m e 1,5 m da cadeia de isoladores, para que o jato de água possa lavar de forma efetiva a cadeia alvo. Enquanto o drone estiver voando no modo *Loiter*, é possível habilitar uma função em que o operador seja avisado da distância que o drone se encontra em relação a um obstáculo. Essa distância é medida com o auxílio de um sensor de distância.

Uma câmera de medição de profundidade foi utilizada para realizar a detecção da distância entre a cadeia de isoladores e o drone. O modelo é a Intel RealSense D455. Esta possui faixa nominal de medição de 20 mm a 4000 mm, com resolução de 1 mm.

Figura 3.16 – Câmera de profundidade modelo Intel RealSense D455.



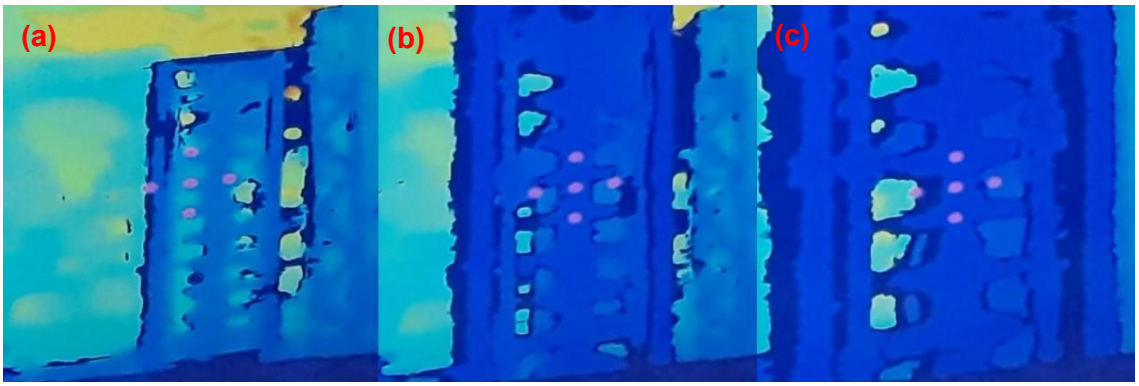
Fonte: INTEL. **Intel® RealSense™ depth camera D455**, 2023. Disponível em: https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d455/. Acesso em: 18 ago. 2023.

A câmera de profundidade é conectada via USB ao Raspberry Pi. As imagens capturadas pela câmera de profundidade são visualizadas por meio de comunicação HDMI sem fio, com o transmissor HDMI conectado à saída HDMI do Raspberry Pi.

A câmera foi posicionada no braço da lavadora a uma altura de 0,08 m usando uma peça impressa em 3D, como mostrado na Fig. 3.13. A altura foi determinada experimentalmente para capturar o centro da imagem sem interferência da ponta da lavadora.

O programa da câmera de profundidade, que foi implementado para funcionar em Raspberry Pi, apresenta a imagem obtida pela câmera, e para melhorar a detecção da distância por parte da câmera, foi implementado um diagrama de pontos, em que a distância de cada ponto era arquivada. No centro da imagem, foram posicionados cinco pontos de detecção, com um central e outros quatro inseridos à direita, esquerda, acima e abaixo do ponto central. Como a imagem da câmera de profundidade capta alguns pontos cegos (isto é, pontos em que a leitura de distância não é realizada), os cinco pontos servem como uma redundância na detecção, além de serem dispostos de modo a facilitarem na detecção da geometria do amortecedor, que é irregular. Das leituras de cada ponto, somente três são aproveitadas, sendo essas as que apresentam a menor distância obtida. De forma simultânea, um sinal sonoro é enviado, avisando ao operador em que estado se encontra a posição do drone. A Figura 3.17 mostra o programa em funcionamento, com o sensor diante de uma cadeia de isoladores.

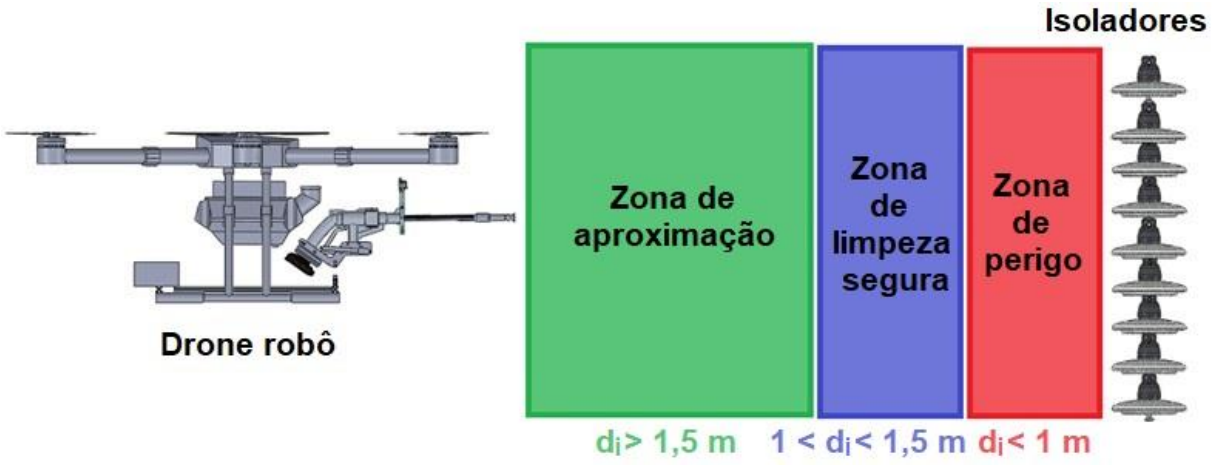
Figura 3.17 – Imagem obtida com a câmera de profundidade, exibindo diagrama de pontos, nas situações: (a) detecção fora do alvo; (b) distância ótima para lavagem; (c) muito próxima da cadeia (menor que 1 metro).



Fonte: Autor.

A leitura que apresenta a menor distância obtida é então capturada pelo programa. Em seguida, um sinal sonoro é enviado, notificando o operador sobre a posição do drone. Conforme o operador do drone-robô se aproxima da cadeia de isoladores utilizando a câmera RGB do drone, o sistema de visão desenvolvido calcula a distância da cadeia. Se a distância for inferior a 1,5 m e maior que 1,0 m, um sinal sonoro intermitente é emitido para indicar ao operador que ele está na distância de limpeza prescrita. Se a distância for inferior a 1 m, um sinal sonoro contínuo é emitido na estação de controle terrestre, e o piloto afasta o drone da cadeia, repetindo o procedimento de abordagem, conforme mostrado na Fig. 3.18. A Tabela 3.3 apresenta o algoritmo desenvolvido.

Figura 3.18 - Esquema de detecção da distância até a cadeia de isoladores pela câmera de profundidade.



Fonte: Autor.

Tabela 3.3 - Algoritmo do programa da câmera de profundidade.

```
1:  IniciarTransmissaoCamera ← ParametrosCamera
2:  enquanto (verdadeiro) faça
3:      MatrizProfundidade ← QuadrosProfundidadeImagem
4:      Distancia1 ← MatrizProfundidade(PosicaoImagem1)
5:      Distancia2 ← MatrizProfundidade(PosicaoImagem2)
6:      Distancia3 ← MatrizProfundidade(PosicaoImagem3)
7:      Distancia4 ← MatrizProfundidade(PosicaoImagem4)
8:      Distancia5 ← MatrizProfundidade(PosicaoImagem5)
9:      se (Distancia1 < Distancia2, 3, 4 e 5) então
10:         DistanciaAtual ← Distancia1
11:     senão se (Distancia2 < Distancia1, D3, D4 e D5) então
12:         DistanciaAtual ← Distancia2
13:     senão se (Distancia3 < Distancia1, D2, D4 e D5) então
14:         DistanciaAtual ← Distancia3
15:     senão se (Distancia4 < Distancia1, D2, D3 e D5) então
16:         DistanciaAtual ← Distancia4
17:     senão se (Distancia5 < Distancia1, D3, D4 e D5) então
18:         DistanciaAtual ← Distancia5
19:     se (DistanciaAtual ≤ 1 m) então
20:         Buzzer ← SomConstante
21:     senão se (DistanciaAtual ≥ 1.5 m) então
22:         Buzzer ← Silencio
23:     senão se (DistanciaAtual > 1 m e DistanciaAtual < 1.5 m) então
24:         Buzzer ← SomIntermitente
```

Fonte: Autor.

O módulo também possui uma câmera RGB para guiar a aproximação do elemento para limpeza por parte do operador. A imagem desta câmera pode ser visualizada diretamente no visor do rádio controle (Fig. 3.10). O rádio controle permite também a gravação das imagens captadas pela câmera.

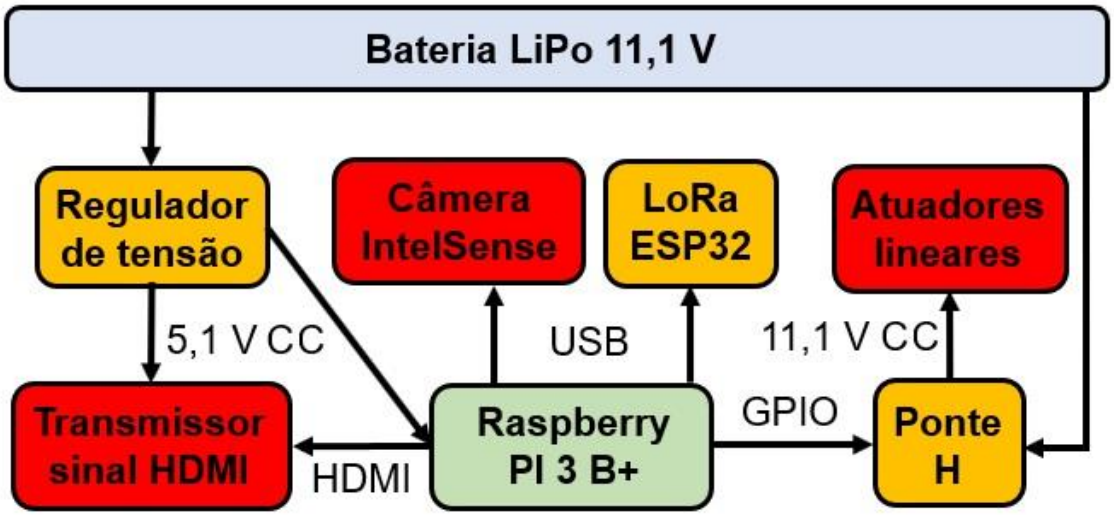
3.3.5 Sistema eletrônico do módulo de limpeza

Desenvolvido e testado o sistema de detecção de distância, partiu-se para a implementação do sistema eletrônico final do módulo de limpeza. O sistema eletrônico contou com a placa Raspberry Pi 3B+, responsável pelo funcionamento lógico do sistema e conexão com dispositivos periféricos.

Por interface USB presente no Raspberry Pi, foram ligados à placa de comunicação LoRa ESP32 e a câmera de profundidade IntelSense. Os dois atuadores lineares, usados para acionar a pistola lavadora, foram conectados a uma ponte H, que aciona os dois atuadores simultaneamente. Esta ponte H é acionada por uma saída digital comandada pela placa Raspberry Pi 3 B+. A imagem da câmera de profundidade foi transmitida por meio de um transmissor de sinal HDMI, que opera com seu respectivo receptor em terra. O sistema foi alimentado por uma bateria de 11,1 V, cuja tensão foi abaixada para 5,1 V para alimentar

os componentes do sistema. A Figura 3.19 mostra um esquema do sistema eletrônico descrito.

Figura 3.19 – Esquema do sistema eletrônico do módulo de limpeza das cadeias de isoladores.

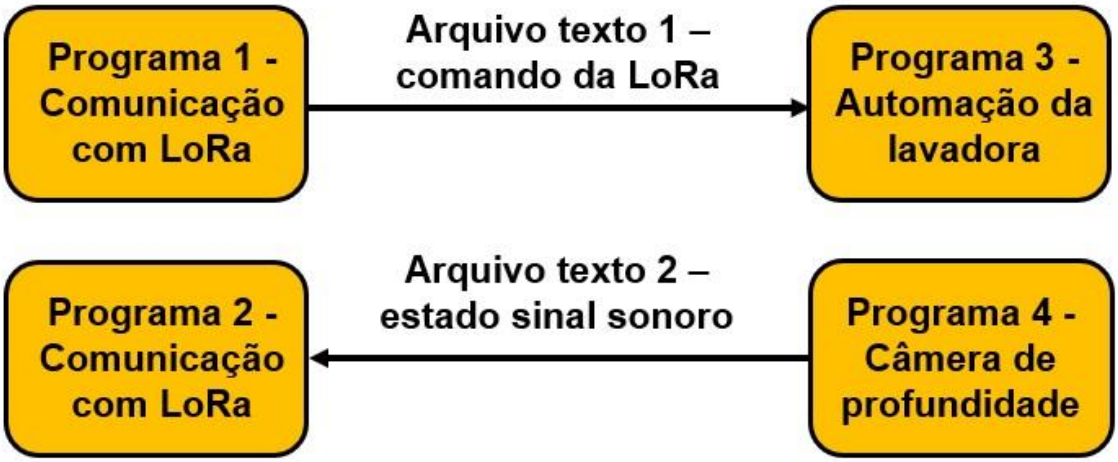


Fonte: Autor.

O sistema eletrônico foi inserido em uma caixa de alumínio de espessura de 0,7 mm, devido ao projeto de blindagem contra interferência eletromagnética descrito na seção 3.3.3. Ela foi furada para acomodar as antenas do transmissor de imagem HDMI, a chave liga/desliga, o cabo da câmera de profundidade e o cabo de alimentação do atuador linear.

A Figura 3.20 mostra um esquema do funcionamento dos programas e da comunicação entre eles. O programa da comunicação (programa 1) grava no arquivo de texto 1 o comando para execução da operação pretendida. O programa da automação da lavadora (programa 3) lê este arquivo e liga ou desliga a lavadora conforme a solicitação. O programa 4 envia para o programa 2 pelo arquivo de texto 2 o comando específico do tipo de sinal sonoro que a LoRa deverá emitir, isto é, se deverá ser silencioso, intermitente, ou contínuo, conforme explicado na seção 3.3.4.

Figura 3.20 – Esquema da comunicação dos programas para controle e automação do módulo de remoção de detritos.



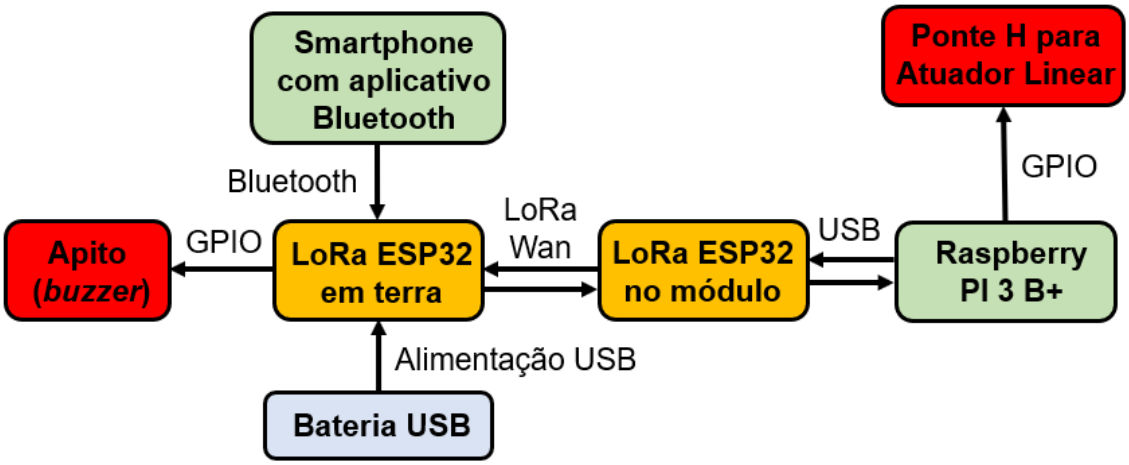
Fonte: Autor.

O programa 4 da Fig. 3.20 diz respeito à lógica de funcionamento da câmera de profundidade, cujo funcionamento foi descrito na seção 3.3.4.

O tráfego de mensagens da terra para o módulo ocorre da seguinte forma: o celular smartphone é conectado via *bluetooth* com a placa LoRa emissora. O aplicativo "*Bluetooth Serial Controller*" é programado para enviar mensagens para esta LoRa. A LoRa emissora envia a mensagem recebida para a LoRa receptora, presente no módulo, que se comunica via USB com o Raspberry Pi 3B+. O programa em execução no Raspberry Pi 3B+ interpreta essa mensagem e executa a ação requerida. As mensagens são enviadas todas por comunicação serial, isto é, em 1 via. Quando um botão do aplicativo é pressionado, apenas uma mensagem é enviada.

Esta comunicação também ocorre no sentido contrário: quando há a necessidade de avisar o operador em terra a respeito da posição do drone em relação às cadeias, a mensagem é enviada do Raspberry Pi 3B+ até a LoRa em terra, passando pela LoRa presente no drone. Um apito (*buzzer*) conectado à LoRa em terra emite sinais sonoros conforme a configuração de distância atual do drone. Uma bateria USB foi conectada à LoRa em terra para permitir a operação contínua. A Figura 3.21 mostra um esquema do tráfego descrito.

Figura 3.21 – Esquema do sistema de comunicação presente no módulo.



Fonte: Autor.

Botões da interface do aplicativo "*Bluetooth serial Controller*" foram configurados para desempenhar uma função cada. No caso, botões foram usados para ligar e desligar a lavadora. A Figura 3.22 mostra a interface do programa de comunicação *bluetooth*, com os botões que são utilizados no funcionamento do módulo em destaque.

Figura 3.22 – Interface de controle do aplicativo "*Bluetooth Serial Controller*", com botões configurados para uso em destaque.



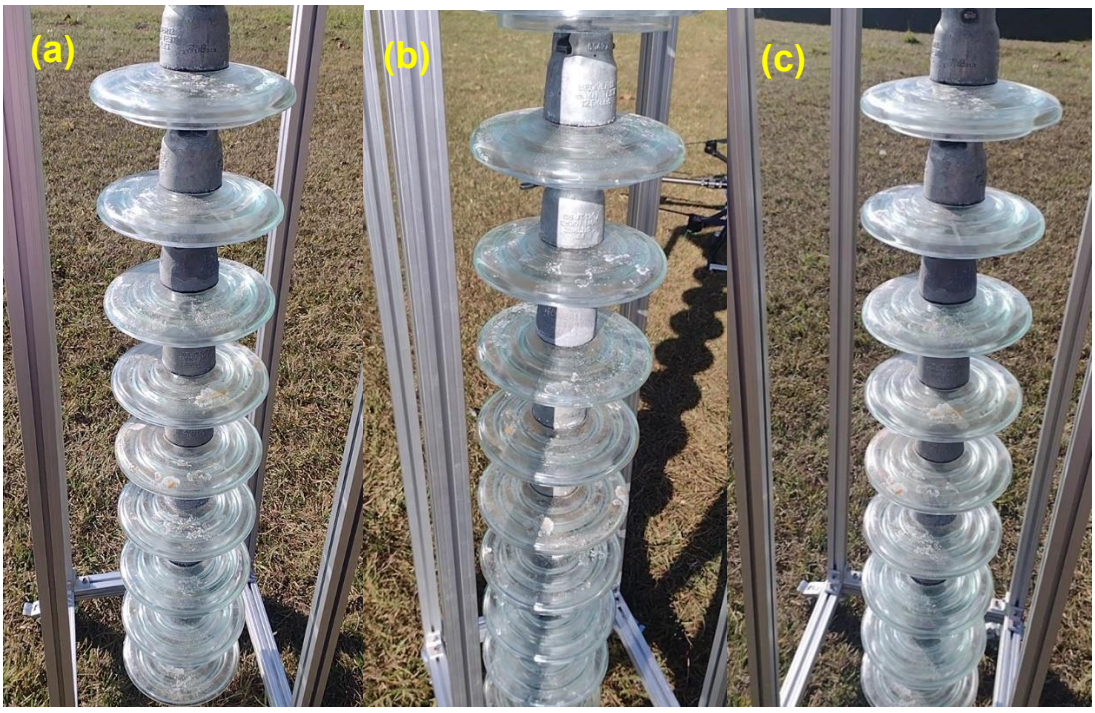
Fonte: Autor.

3.3.6 Testes em laboratório da lavagem de cadeias de isoladores com câmera de profundidade

Com o módulo de limpeza devidamente acoplado e testado junto ao drone EFT E610, foram propostos e efetuados testes de limpeza de uma cadeia de isoladores real em laboratório. A cadeia utilizada nos testes continha 10 isoladores. Os isoladores utilizados possuem diâmetro de 255 mm e passo (altura) de 146 mm. Eles são usados em linhas de 69 kV (5 discos) e 138 kV (9 ou 10 discos).

Um suporte foi confeccionado com vigas de alumínio para sustentar os isoladores, de forma que estes ficassem dispostos verticalmente (Fig. 3.22). Uma solução salina de concentração 35 % foi adicionada à superfície dos discos de vidro dos isoladores para permitir uma avaliação visual da eficácia da limpeza. Nos testes de laboratório, uma concentração de sal mais alta foi depositada na superfície dos isoladores do que a encontrada na prática. Isso foi feito para garantir que a salinidade presente nos isoladores em campo pudesse ser efetivamente removida pelo drone-robô desenvolvido. A Figura 3.23 mostra os discos cobertos com solução salina antes e depois da limpeza.

Figura 3.23 - Cadeia de isoladores construída para testes, com isoladores cobertos com uma solução salina a 35% (a) Perspectiva frontal; (b) Perspectiva lateral esquerda; (c) Perspectiva lateral direita.



Fonte: Autor.

Nos testes de limpeza, o drone-robô foi manualmente aproximado da cadeia e o jato da lavadora foi acionado por rádio controle. A limpeza com jato de água foi realizada apenas frontalmente em relação à cadeia, com movimentos verticais de subida e descida do drone-robô, visando atingir todos os isoladores da cadeia.

Com o sistema de detecção de distância usando uma câmera de profundidade, foram realizados testes sobre a eficácia do sistema em manter uma distância segura da cadeia de isoladores. O sistema de aviso sonoro foi utilizado para monitorar a distância entre o drone e a cadeia de isoladores. A imagem da câmera de profundidade foi exibida em uma tela portátil, permitindo a visualização de quando a cadeia estava em uma posição adequada para limpeza. Os resultados destes testes são descritos na seção 3.4.3.

3.3.7 Testes de validação em uma companhia energética

Após os testes em laboratório, foram realizados testes nas linhas de alta tensão de uma companhia energética para verificar o sistema de blindagem, a estabilidade do drone contra interferências eletromagnéticas e o sistema de visão para controlar a distância do drone à cadeia de isoladores. Testes de lavagem em uma cadeia de isoladores foram realizados em uma subestação de fornecimento de eletricidade, onde a tensão dos isoladores é de 138 kV. No teste foi utilizada uma cadeia disposta verticalmente.

O reservatório do drone foi preenchido com 8 litros de água desmineralizada, com o objetivo de evitar a condução de eletricidade dos isoladores para o drone-robô. A operação foi guiada com o auxílio da câmera RGB frontal do drone-robô e da câmera de profundidade. O drone-robô foi posicionado pelo operador em frente à cadeia para realizar a limpeza, respeitando a distância de segurança. Os resultados do teste são mostrados na seção 3.4.4.

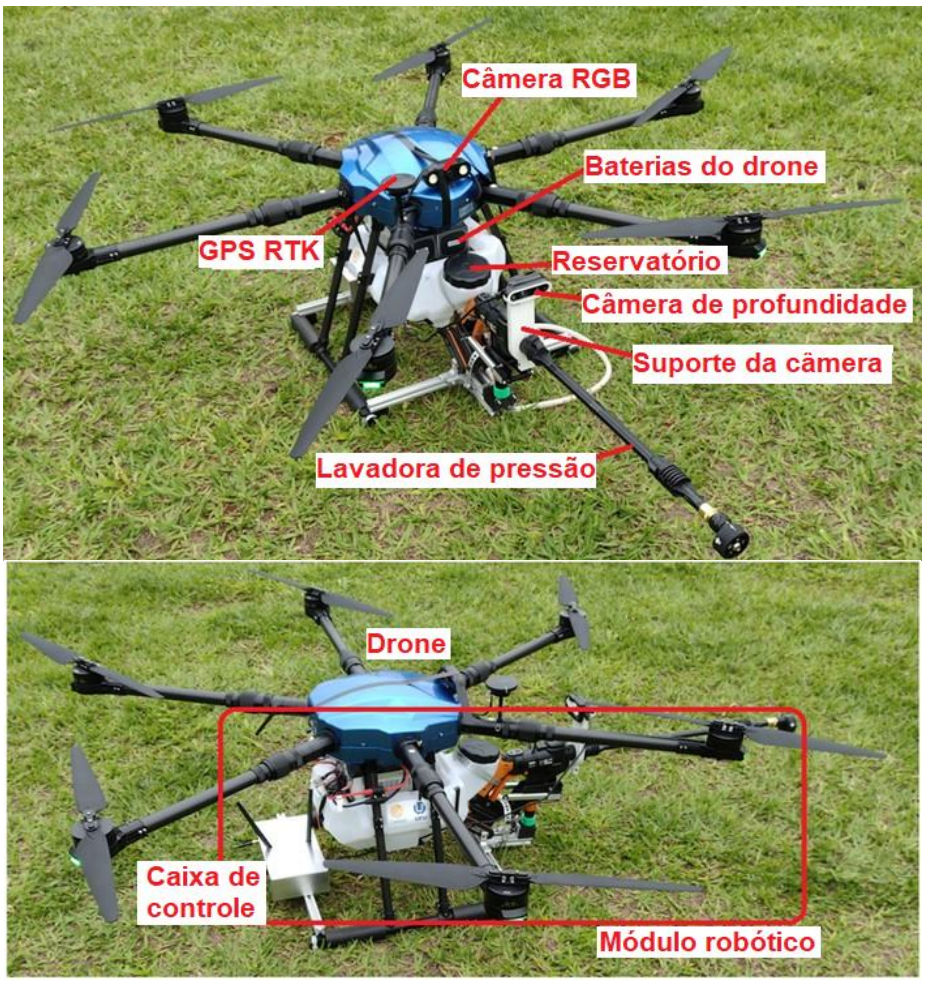
3.4 Resultados e discussões

3.4.1 Protótipo de drone-robô para limpeza de cadeias de isoladores

A Figura 3.23 mostra o protótipo final do drone-robô, destacando seus principais componentes.

Este módulo robótico funciona com sua estrutura fixada ao drone. Possui funcionalidade híbrida, englobando tanto funções controladas por rádio quanto funções semiautomatizadas. Entre essas funções semiautomatizadas estão a manutenção de uma distância segura em relação ao alvo de limpeza e a ativação da lavadora por comando terrestre.

Figura 3.24 - Protótipo de drone-robô. (a) vista geral; (b) vista lateral.



Fonte: Autor.

Perfis de alumínio foram fixados ao trem de pouso do drone para garantir tanto a fixação da caixa que contém o sistema de controle do módulo robótico quanto a lavadora. Uma base para montagem dos atuadores lineares na lavadora foi impressa em 3D, conforme mostrado na Fig. 3.25.

O sistema para acionar o gatilho da lavadora foi desenvolvido medindo a força necessária para operá-lo usando uma célula de carga, obtendo um resultado próximo a 2 kg. Assim, foram utilizados dois atuadores lineares, cada um com um curso de 100 mm, velocidade de 30 mm/s, alimentação de 12 V e uma força de 25 N cada (Fig. 3.25). A ativação do gatilho é realizada a partir da unidade de controle terrestre.

Figura 3.25 - Lavadora do módulo de limpeza com os componentes correspondentes.



Fonte: Autor.

O drone projetado possui uma capacidade total de decolagem de 25 kg. Considerando a massa do módulo robótico de 3,5 kg e a massa de outros elementos, como o chassi, baterias, etc., assim, o módulo robótico possui uma capacidade de armazenamento de água de 8 litros.

3.4.2 Resultados dos cálculos do projeto da blindagem do drone-robô de limpeza

Foram realizados cálculos de atenuação de campos elétricos e magnéticos para as seguintes faixas de frequência:

- Campo elétrico na faixa de 30 a 3000 Hz;
- Campo magnético na faixa de 30 a 3000 Hz;
- Campos elétrico e magnético na faixa de 300 MHz a 6 GHz;

Campo elétrico na faixa de 30 a 3000 Hz

Para determinar se o campo que incide sobre a blindagem está próximo ou distante, utiliza-se a Eq. (2.1), levando em consideração as frequências mínima e máxima que precisam ser avaliadas, que são 30 Hz e 3000 Hz. Para que o campo seja considerado próximo, os seguintes critérios devem ser satisfeitos para os dois limites de frequência:

A frequência mínima resulta em 1591549,4 > 2,1, enquanto a frequência máxima resulta em 15915,5 > 2,1. Com base na Eq. (2.1), fica evidente que o sistema encontra emissões de campo próximo. Portanto, é crucial abordar separadamente as interferências do campo elétrico e do campo magnético.

Para a faixa de frequência de 30 Hz a 3000 Hz do campo elétrico (com uma espessura de blindagem de t = 0,1 mm) a efetividade mínima encontrada foi de 209,658 dB na frequência de 3000 Hz, utilizando a Equação (2.6). O multiplicador de atenuação para essa faixa de frequência é extraído da Equação (2.12), resultando na Equação (3.1):

$$20\ log\ (E_0/E_f) = 209.658 \tag{3.1}$$

$$E_f = 3.289 \cdot 10^{-11} \cdot E_0 \tag{3.2}$$

No trabalho de Pellerin et al. (2004), avaliou-se experimentalmente a emissão de campos elétricos em áreas rurais devido a linhas de transmissão próximas. Um dos resultados foi a observação de que o campo elétrico produzido pela frequência de 60 Hz é sempre maior em amplitude do que o emitido pelos harmônicos (Pellerin et. al, 2004).

Já o trabalho de Liu et. al (2016) afirma que o campo elétrico máximo emitido por uma linha de transmissão de 220 kV é de 19 kV/m (190 V/cm). Caso a blindagem seja eficaz em mitigar o campo gerado por uma linha de 220 kV, também será capaz de atenuar o campo gerado por uma linha de 138 kV, que seguramente será de amplitude menor. Com base nessas informações, para efeito de avaliação da atenuação alcançada pela blindagem projetada, pode-se considerar o valor do campo elétrico de 190 V/cm como sendo o valor máximo do campo emitido por uma linha de 220 kV com frequência fundamental de 60 Hz.

O campo elétrico incidente no circuito interno da estrutura blindada pode ser determinado utilizando a Eq. (3.2):

$$E_f = 3.289 \cdot 10^{-11} \cdot 190\ V/cm = 6.250\ nV/cm \tag{3.3}$$

A insignificância de um campo elétrico da ordem de grandeza de nV/cm pode ser descartada em relação à indução de tensões indesejadas em circuitos alimentados com 5 V a 11,1 V, que é o caso atual. Considerando que a blindagem atende à efetividade mínima necessária para proteger contra a amplitude mais alta do campo elétrico atual, espera-se que ela seja mais bem-sucedida em diminuir os campos elétricos de várias frequências dentro da faixa avaliada.

É sugerido que em um ambiente seco, a frequência do campo elétrico emitido por descargas em lacunas possa chegar a até 6 GHz (PAKALA; CHARTIER, 1971). Nas descargas em lacunas, a ruptura dielétrica do ar é completa, ao invés de parcial. Em relação às interferências emitidas por campos gerados por descargas parciais (PD), devido à falta de informações sobre a frequência dos campos emitidos, esse valor máximo de frequência

para descargas em lacunas será assumido nos cálculos de atenuação para o campo elétrico das descargas parciais.

Campo magnético na faixa de 30 a 3000 Hz

Considerando o campo magnético emitido na faixa de 30 a 3000 Hz, uma estrutura com espessura de 0,1 mm não fornece blindagem adequada contra campos magnéticos, utilizando a Equação (2.10).

De acordo com Stewart, Dale e Klein (1993), linhas de energia de 138 kV emitem um campo magnético próximo de 15 μT em seu centro. Este valor de campo magnético foi adotado como referência. Se o sistema eletrônico do módulo puder funcionar normalmente sob campos magnéticos desta amplitude ou maior, então a blindagem do campo magnético pode ser considerada desnecessária.

Para verificar essa possibilidade, a interferência causada pelas emissões de campo magnético de frequência de 60 Hz foi inspecionada utilizando uma configuração experimental que incluía um forno de micro-ondas, um gaussímetro e uma sistema eletrônico semelhante ao utilizado no drone robô de limpeza de isoladores, que foi envolvida em uma caixa de alumínio com espessura de 1 mm. O campo magnético emitido foi medido usando o gaussímetro TAMB-3D da Globalmag, que possui uma resolução de 0,001 mT e uma faixa nominal de 5 mT. Este teste é descrito no Capítulo 4, na seção 4.3.6. Os resultados obtidos se aplicam também à avaliação para este drone-robô.

Durante a emissão do campo magnético, o circuito não apresentou funcionamento anormal quando exposto a um campo magnético máximo de 200 μT. Isso pode ocorrer porque os campos magnéticos dessa amplitude são muito fracos para causar interferência ou devido à ausência de acoplamento magnético (frequência contínua e ausência de frequência de transmissão via protocolo USB) de sinais indesejados do campo magnético ao qual o módulo foi exposto.

Campo elétrico e magnético na faixa de 300 MHz a 6 GHz;

Aplicando o critério da Eq. (2.1) para determinar a partir de qual frequência o campo elétrico é considerado distante, obtemos o valor de 22,736 MHz. Portanto, na faixa de 300 MHz a 6 GHz, o campo é considerado distante, de modo que as atenuações tanto para o campo elétrico quanto para o campo magnético são tratadas em conjunto. É encontrado um único valor de atenuação em dB para ambos os tipos de campos. Nesse caso, na Equação

(2.2), para determinar a eficácia da blindagem, o termo de reflexão (R) é calculado de acordo com a Eq. (2.11).

Na Equação (2.2), a perda por absorção (A) ainda é calculada com a Eq. (2.3) e o fator B pode ser negligenciado. Na faixa de frequência de 300 MHz (acima da frequência máxima emitida pelo efeito corona, conforme afirmado por Ungureanu, Rusu e Baran (2007)) e 6 GHz, a menor eficácia de blindagem (S) encontrada foi de 258,967 dB (na frequência de 300 MHz), usando a Eq. (2.2).

Aplicando a Eq. (2.12) para determinar o multiplicador de atenuação para esse caso, obtém-se:

$$20 \log (E_0/E_f) = 258.967 \text{ dB} \tag{3.4}$$

$$E_f = 1.126 \cdot 10^{-13} \cdot E_0 \tag{3.5}$$

Considerando o valor do campo elétrico como o necessário para a ruptura parcial da resistência dielétrica do ar, que é de 30 kV/cm (30000 V/cm) (NOR; RAMLI, 2007), o campo elétrico após a atenuação é determinado de acordo com a Equação (3.6):

$$E_f = 1.126 \cdot 10^{-13} \cdot 30000 \text{ V/cm} = 3.379 \text{ nV/cm} \tag{3.6}$$

Assim como na atenuação previamente obtida, o campo elétrico atenuado aqui está na ordem de nV/cm, podendo ser negligenciado. Como o campo neste caso é considerado distante, a atenuação encontrada em dB (258,967 dB) também se aplica ao campo magnético nessa faixa de frequência. Esse alto valor de atenuação prova ser suficiente para a proteção contra campos elétricos e magnéticos.

Através dessas análises, é confirmada a proteção do sistema contra as interferências eletromagnéticas referenciadas, aplicáveis tanto à caixa de controle do drone quanto ao sistema eletrônico do módulo de controle.

3.4.3 Resultados dos testes em laboratório da lavagem de cadeias de isoladores

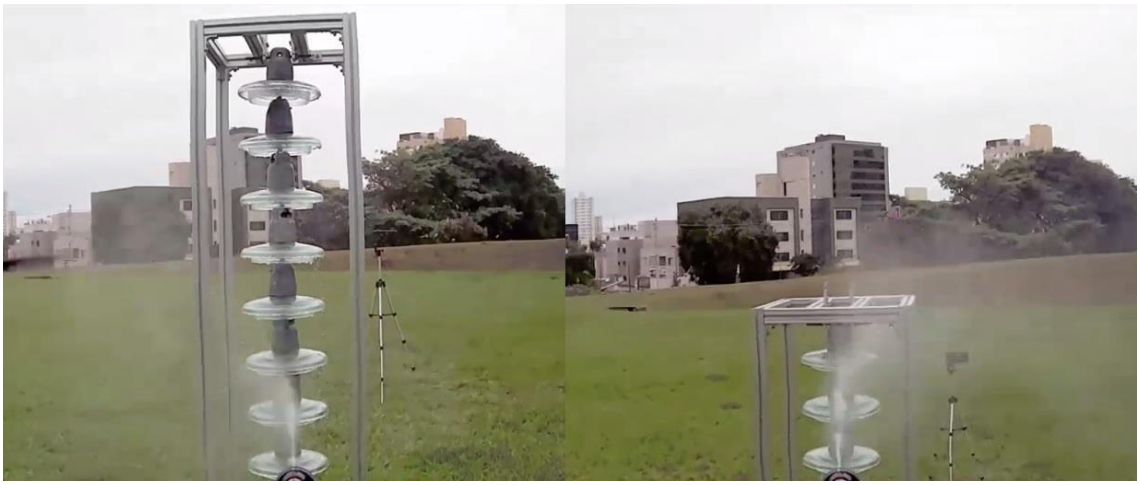
As Figuras 3.26 e 3.27 mostram imagens do teste de lavagem das cadeias em laboratório.

Figura 3.26 – Limpeza da cadeia de isoladores vertical com drone equipado com câmera de profundidade.



Fonte: Autor.

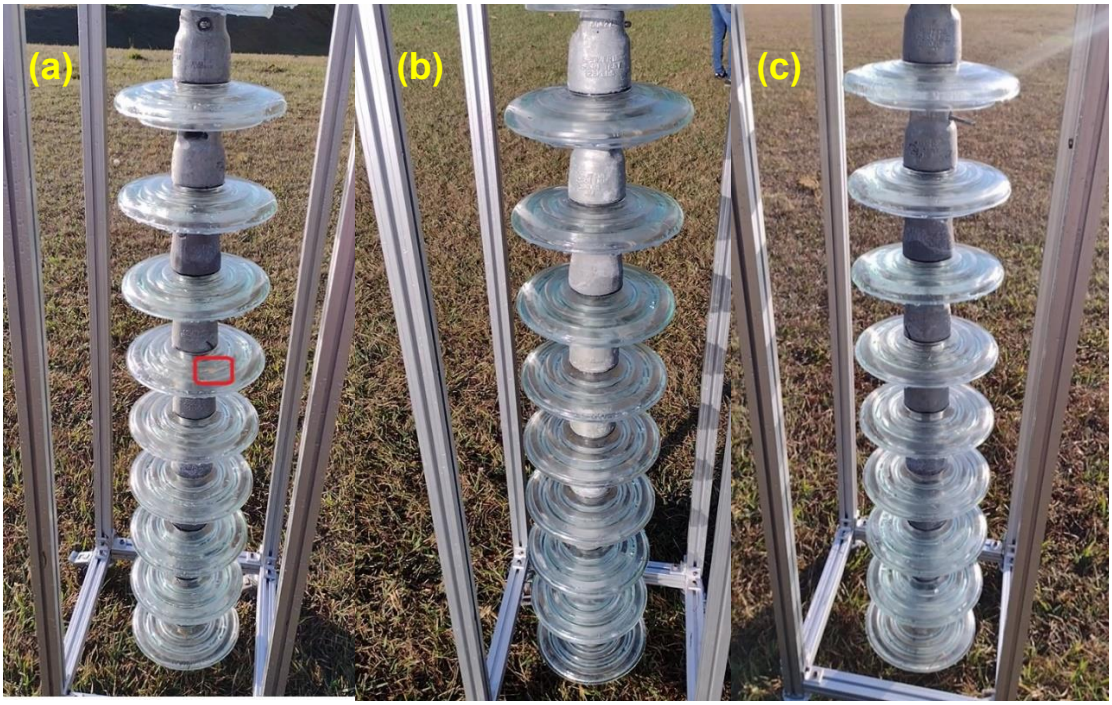
Figura 3.27 – Limpeza de isoladores vista pela câmera RGB do drone.



Fonte: Autor.

Ao fim do teste, foi avaliada visualmente a quantidade de sal efetivamente lavada. Notou-se que o jato de água foi capaz de lavar a parte das superfícies que receberam diretamente o jato. Entretanto, pequenas partes opostas e laterais não foram limpas. A Figura 3.28 mostra a cadeia lavada, com indicação das regiões limpas e sujas destacadas em regiões em vermelho.

Figura 3.28 – Cadeia de isoladores após limpeza: (a) Perspectiva frontal; (b) Perspectiva lateral esquerda; (c) Perspectiva lateral direita.



Fonte: Autor.

Da Figura 3.28 pode-se inferir que a limpeza foi bem-sucedida, com algumas manchas de sujeira não removidas destacadas em vermelho. Vale ressaltar que essas manchas poderiam ser removidas com limpezas subsequentes após a identificação por meio da aquisição de imagens pós-limpeza dos isoladores. Apesar da eficácia da limpeza, é necessário automatizar o voo com os movimentos de subida, descida e laterais sendo realizados pelo sistema de visão. A solução apresentada depende das habilidades do operador do drone-robô.

Percebeu-se que a câmera de profundidade foi eficaz em detectar a cadeia de isoladores. Os sinais sonoros também foram cruciais para o desempenho do piloto ao direcionar o drone corretamente para a limpeza da cadeia.

3.4.4 Resultados dos testes em campo de validação da lavagem de cadeias de isoladores

As Figuras 3.29 a 3.31 mostram as imagens obtidas durante a lavagem de uma cadeia de isoladores disposta verticalmente.

Figura 3.29 - Drone-robô para lavagem de uma cadeia de isoladores em linha de transmissão de 138 kV energizada.



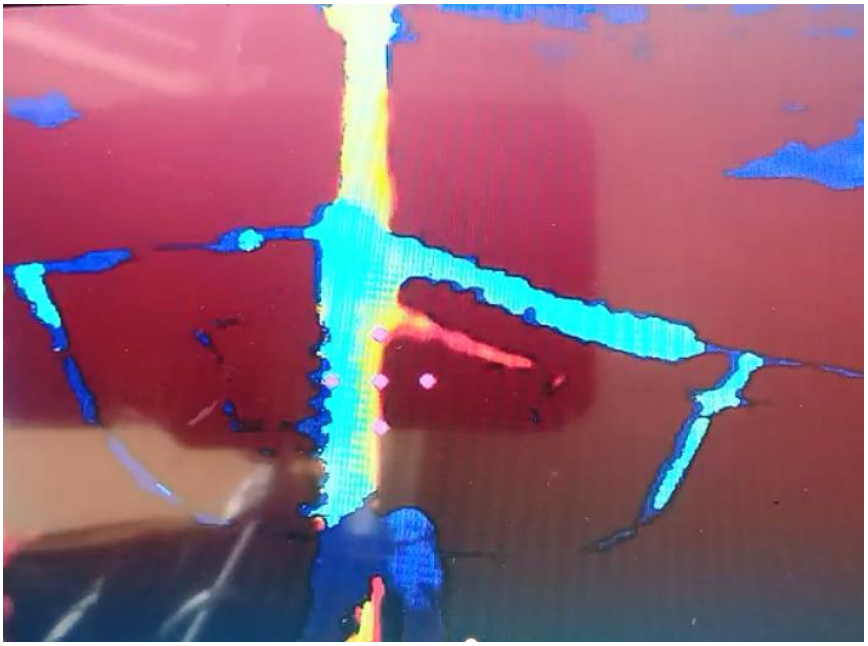
Fonte: Autor.

Figura 3.30 - Visão da câmera RGB durante o teste experimental.



Fonte: Autor.

Figura 3.31 - Sistema de visão em profundidade desenvolvido para manter uma distância segura da cadeia de isoladores.



Fonte: Autor.

Em relação aos testes de campo, as dificuldades encontradas para essa operação de limpeza com o drone-robô proposto referem-se à pilotagem do drone em operações com risco de colisão ou falha do equipamento, o que pode causar interrupção no fornecimento de energia. É imprescindível que o drone-robô seja guiado por um piloto devidamente treinado para se familiarizar com o sistema e adquirir experiência de voo, evitando assim acidentes e garantindo que as limpezas sejam realizadas com a maior qualidade possível. Além disso, é necessário implementar um sistema de controle automatizado durante a limpeza para aumentar a segurança operacional e reduzir o risco de acidentes.

O sistema de visão, por mais que tenha auxiliado na limpeza, não permitiu voos completamente seguros, necessitando de aprimoramentos no sentido de integrar melhor a visualização de cada câmera à disposição do piloto. O sistema de visão precisa de melhorias para integrar melhor a visualização das câmeras RGB e de profundidade disponíveis para o operador do drone-robô.

Durante ou após os testes, não foi percebido nenhum efeito elétrico prejudicial sobre o sistema eletrônico embarcado no drone, o que mostra que da distância alcançada a blindagem do sistema eletrônico foi suficiente para evitar interferências eletromagnéticas e descargas eletrostáticas.

No *link* a seguir encontram-se vídeos dos testes experimentais: https://drive.google.com/drive/folders/1qBgXeeWx15E939XAxi51_8Bij0KcnoP8?usp=drive_link

Neste Capítulo, foi comprovada a possibilidade de limpar cadeias de isoladores com o drone-robô proposto, oferecendo uma solução ágil e eficaz que reduz as chances de acidentes com os funcionários. Importante ressaltar que o drone-robô proposto não é uma solução definitiva, isto é, apresenta limitações de uso, como todo método de inspeção/manutenção, seja ele realizado por máquinas ou seres humanos.

As limitações da solução desenvolvida incluem o tempo máximo de voo e a capacidade limitada do reservatório de água disponível para limpeza. Esses problemas podem ser resolvidos com o fornecimento de várias baterias ou carregadores rápidos. Apesar da capacidade limitada do reservatório, é fácil reabastecê-lo no solo. Trabalhos futuros propõem a automação dos procedimentos de limpeza necessários e a aplicação em larga escala da solução.

CAPÍTULO IV

DRONE-ROBÔ PARA REMOÇÃO DE DETRITOS DE LINHAS DE ALTA TENSÃO

O drone-robô apresentado neste Capítulo foi idealizado como um dispositivo para realizar a remoção de detritos de linhas de alta tensão, evitando que o cabo venha a ser danificado ou que o meio ambiente seja prejudicado com a emissão de gases de combustão. A limpeza se dará pelo disparo de um maçarico de pequenas proporções, utilizando-se de um mecanismo de chama concentrada com acionamento intermitente, quando o robô detectar um detrito no seu trajeto sobre a linha de alta tensão, queimando o ponto de sustentação do detrito sobre a linha. O módulo robótico que realizará a limpeza poderá ser fixado a um drone e liberado sobre a linha de alta tensão para efetuar a manutenção ou colocado manualmente no cabo por técnicos.

4.1 Revisão bibliográfica

Este Capítulo apresenta o desenvolvimento de um módulo robótico que pode ser acoplado a um drone para posicionamento no cabo, ou colocado manualmente para permitir a remoção de detritos nos cabos de alta tensão ou cabo para-raios. Esses detritos incluem tênis, pipas, plásticos, restos de balões, entre outros, conforme mostrado na Fig. 4.1.

Em relação à remoção de objetos estranhos nas linhas de alta tensão, soluções propostas para esta finalidade foram encontradas na literatura. Um robô para limpeza de detritos em cabos de alta tensão através de ferramentas de corte e aquecimento elétrico (por resistência e sem combustível) acopladas a um robô foi apresentado por Cao et al. (2015). O robô é uma plataforma móvel que permite o deslocamento ao longo do cabo.

Figura 4.1 – Exemplo de detritos em linhas do sistema de transmissão.



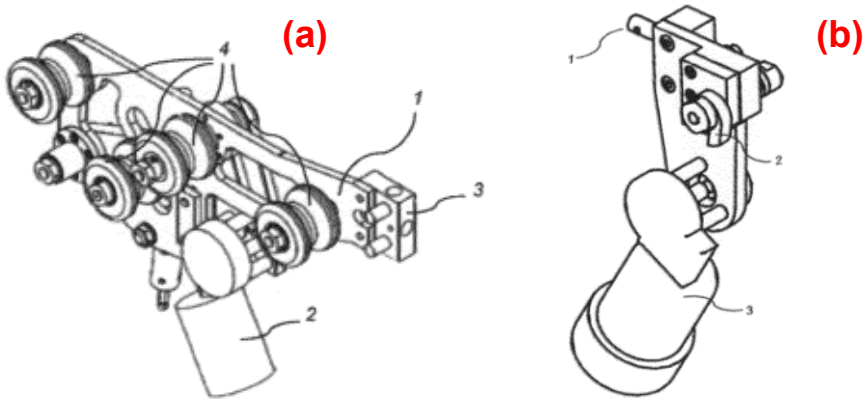
Fonte: Autor.

Existem soluções também de robôs móveis aplicados na remoção do gelo nos cabos de alta tensão como apresentadas por Montambault e Pouliot (2003) e por Gongping et al. (2011). Cheng et al. (2016) apresentaram um robô com lâmina para retirada de objetos estranhos nas linhas de alta tensão. A lâmina está acoplada a roda. No trabalho de Ying et al. (2017) é apresentado um mecanismo para remoção de gelo dos cabos de alta tensão em que este é posicionado e movimentado ao longo do cabo pela utilização de um drone.

Foram adaptadas novas ferramentas no robô LineROVer inclusive uma ferramenta para remoção de objetos estranhos nas linhas de alta tensão. Esta ferramenta possui uma garra para prender o objeto e um braço articulado com um disco de corte (ZHANG et al., 2013).

Foi também apresentado um robô para inspeção e manutenção de cabos de alta tensão, que possui uma ferramenta com escova rotativa para limpeza dos cabos (MILLER; ABBASI; MOHAMMADPOUR, 2017). No trabalho de Thomazini e Gelfuso (2016) é apresentado um robô móvel para limpeza e inspeção de cabos de alta tensão remotamente acionado por rádio controle. A inspeção é realizada manualmente pelo envio das imagens a uma estação no solo. O robô é capaz de adaptar uma ferramenta para poda de árvores e outra para o corte de objetos a partir de uma tesoura (Fig. 4.2).

Figura 4.2 - (a) Robô móvel; (b) ferramenta para limpeza.



Fonte: THOMAZINI, D.; GELFUSO, M. V. **Dispositivo para limpeza e inspeção de cabos e isoladores da rede elétrica à distância**. BR 102014020138-6 A2, 2016.

Atualmente o método mais empregado para remoção de detritos é o que envolve a aplicação de drones com a adaptação de lança-chamas (Fig. 4.3). Já existem no mercado soluções prontas para serem instaladas em drones comerciais custando em torno de mil e quinhentos dólares (THROWFLAME, 2023), Fig. 4.4. O uso desse sistema tem gerado controvérsia, considerando se esta seria a forma mais eficiente e correta de realizar a limpeza dos cabos de alta tensão (CARPENTERS EQUIPMENT, 2017). Questões ambientais têm sido levantadas como: incineração do material, que provoca fumaças que contaminam o ambiente e não permitem a reciclagem destes materiais; operação de remoção em muitos casos não ser completa, remanescendo detritos no cabo; possiblidade de incêndios nas redondezas devido à grande quantidade de combustível utilizado no lança-chamas.

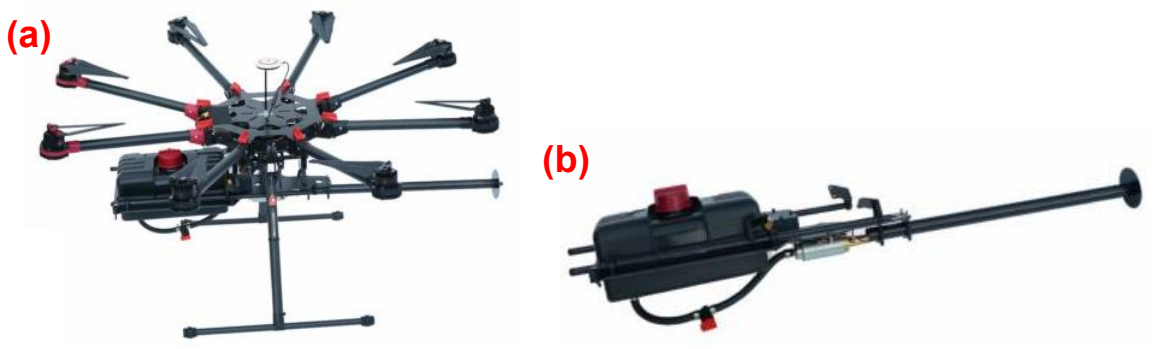
Figura 4.3 - Drone com lança chamas realizando a limpeza de detritos.



Fonte: GLOBALDRONEUAV. **UAV elimination of high pressure line foreign body**, 2018. Disponível em: https://globaldroneuav.com/news/Uav-elimination-of-high-pressure-line-

foreign-body.html. Acesso em: 19 jul. 2023.

Figura 4.4 - Adaptação de lança-chamas em drones: (a) drone com lança-chamas; (b) solução comercial.



Fonte: THROWFLAME. **TF-19 WASP flamethrower drone attachment**, 2023. Disponível em: https://throwflame.com/products/flamethrower-drone-kit/. Acesso em: 19 jul. 2023.

4.2 Justificativa

Com base na revisão bibliográfica realizada, as soluções para a remoção de detritos dos cabos de alta tensão ou cabos para-raios ainda se encontram majoritariamente no estágio de ideias patenteadas, sem validação prática, ou se traduzem em robôs móveis de arquitetura complexa, peso elevado e com dificuldades em superar diferentes tipos de obstáculos presentes nos sistemas de transmissão de energia. Algumas das soluções propostas incluem discos de corte, que podem apresentar riscos à integridade dos cabos. Os resultados obtidos com esses protótipos ainda se mostram insuficientes para resolver os problemas identificados, dado que as pesquisas correlatas frequentemente resultaram em empreendimentos custosos, infrutíferos e, em última instância, abandonados.

A arquitetura drone-módulo robótico permite que todos os obstáculos presentes no sistema de transmissão de energia elétrica sejam transpostos, e oferece grande autonomia de movimento nas áreas em que as manutenções deverão ser realizadas. Isso possibilita que manutenções em vários pontos das redes de transmissão sejam realizadas com rapidez, dispensando a locomoção dos operadores para cada ponto específico que deverá passar pela manutenção. Além disso dispensa a subida de operadores às torres, eliminando riscos de queda, choques elétricos e efeitos prejudiciais à saúde decorrentes de interferências eletromagnéticas.

Relativo ao módulo de remoção de objetos estranhos das linhas, não foram encontrados dispositivos que apresentem as vantagens da arquitetura drone-módulo

robótico. Os trabalhos existentes no âmbito dos robôs móveis possuem limitações como pouca capacidade de transpor obstáculos e necessidade de operadores para sua colocação nas linhas, sendo que as massas destes robôs são elevadas. Além disso, neste trabalho está sendo proposta a operação de limpeza do elemento estranho feita a partir de uma chama concentrada com acionamento intermitente que não danifica a estrutura do cabo nem ameaça o meio ambiente.

Assim, este trabalho apresenta um novo módulo robótico desenvolvido para remoção de detritos em cabos de alta tensão ou para-raios de tal forma que sua colocação nos cabos possa ocorrer de forma manual (massa menor que 10 kg) ou pelo transporte a partir de um drone.

Resumidamente, as principais inovações propostas com esse trabalho são: desenvolvimento de uma solução inédita, cientificamente embasada, para remoção de objetos estranhos das linhas de alta tensão, livres de riscos de acidentes com operadores e que não danifiquem as linhas e que poluam o mínimo o meio ambiente, contendo projeto inovador de blindagem eletromagnética e eletrostática.

4.3 Metodologia

O desenvolvimento do módulo robótico para a remoção de detritos das linhas de transmissão de energia envolveu a concepção de um projeto mecânico estrutural, de um sistema de alimentação elétrica e de controle. Além disso, é detalhado o procedimento de blindagem contra efeitos eletrostáticos e interferências eletromagnéticas provenientes das linhas.

Esta seção descreve a metodologia usada no desenvolvimento deste drone-robô. A sequência aplicada foi: modelagem matemática, desenho em software de CAD, simulações CAE, construção do protótipo, testes em laboratório, testes de validação.

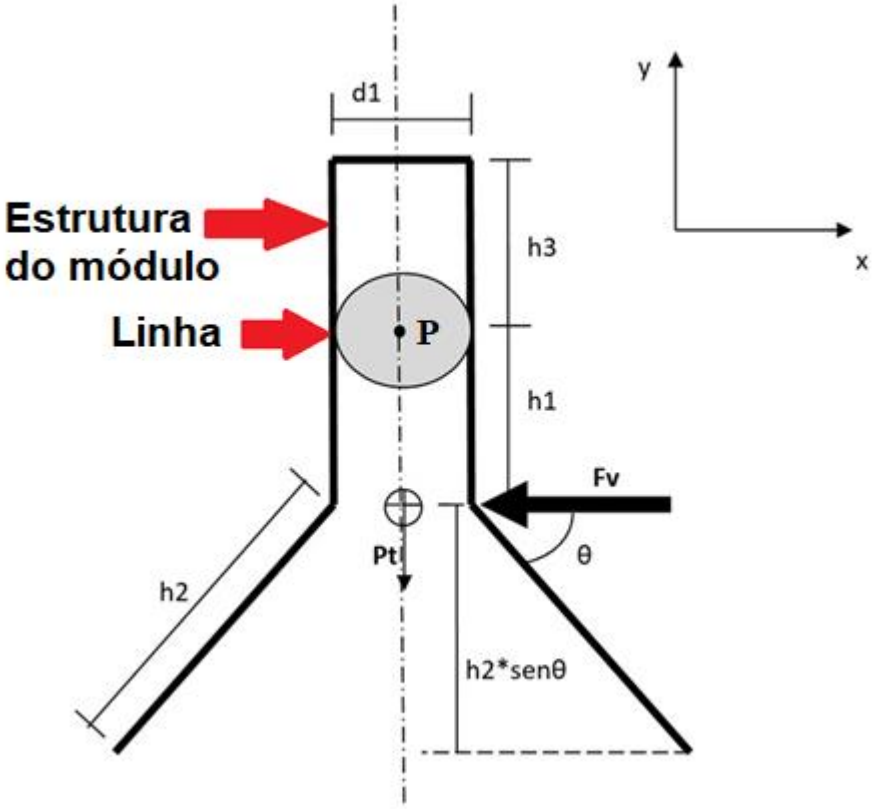
4.3.1 Modelagem matemática

A modelagem matemática do módulo de remoção de detritos abrangeu cálculos do equilíbrio do módulo, dos momentos existentes e da tração necessária para movimentação deste.

No plano xy da Figura 4.5 é proposta a estrutura base do módulo robótico que é simétrica em torno do eixo y. A preocupação com o modelo nesse plano específico ocorre devido ao momento produzido no eixo z. Apesar de existir também a massa dos componentes fixados ao módulo, a ideia é que os pesos sejam contrabalanceados e que,

assim, as forças também se tornem simétricas em torno do eixo y. Deste modo, é assumido que a força do vento F_v não produz deslocamento, apenas momento em torno de z, Fig. 4.5.

Figura 4.5 – Esquema representativo da vista frontal do módulo de remoção de detritos.



Fonte: Autor.

Na Figura 4.5 as variáveis são:

- *Pt*: força peso atuante sobre a estrutura do módulo
- *Fv*: força aplicada pelo vento sobre a estrutura
- *θ*: ângulo entre a estrutura inclinada e a horizontal
- *d1*: distância que separa as duas chapas laterais da estrutura
- *h1*: cota do centro do cabo até o início da chapa dobrada da estrutura lateral
- *h2*: comprimento da estrutura inferior esquerda
- *h3*: cota do centro do cabo até o topo da estrutura

O principal momento no ponto P (eixo z) é a força do vento (F_v), conforme a Eq. 4.1.

$$\sum M_Z = F_v \cdot h1 \tag{4.1}$$

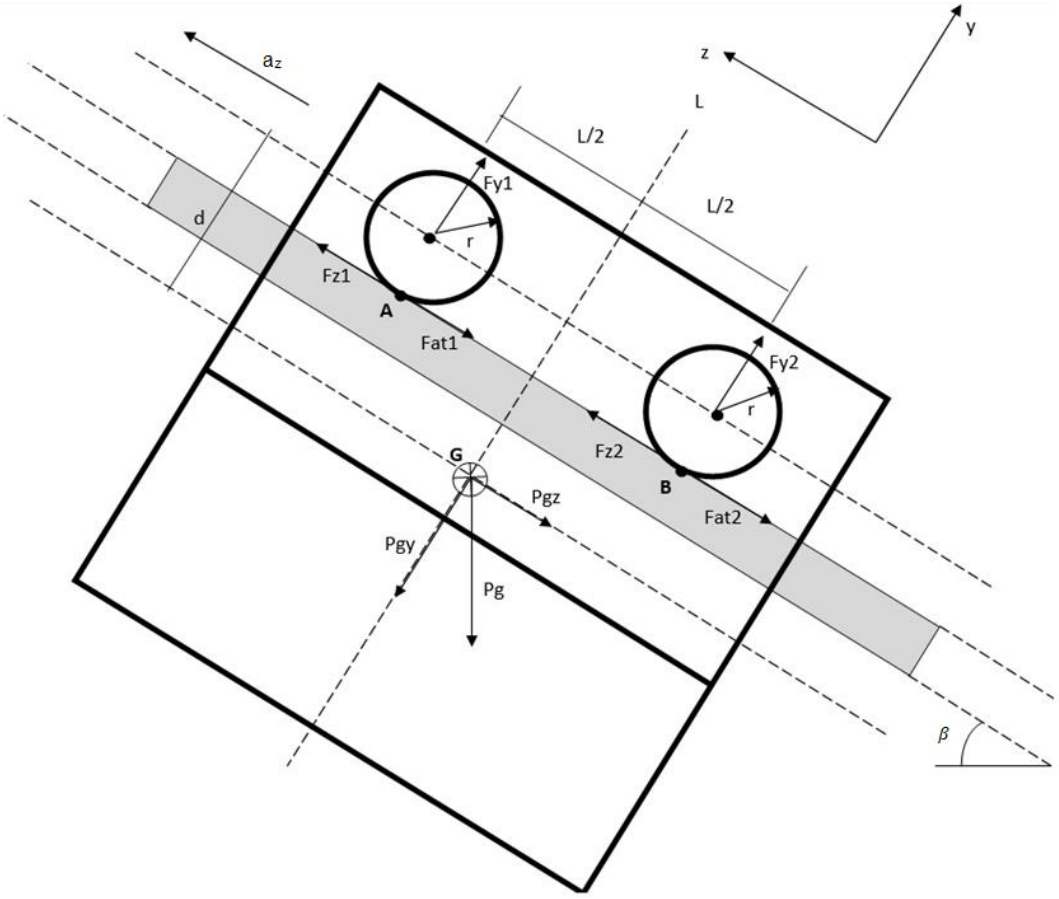
Na tentativa de minimizar os efeitos de F_v, o ideal é que se desloque a força do vento para o ponto P. Assim sendo, tem-se a Eq. 4.2:

$$h3 = h1 + h2 \cdot sen\theta \tag{4.2}$$

Para *h3* não ser muito grande, deve-se ter *h1+h2*senθ* pequenos, sendo que *h1* pode ser minimizado de forma direta, enquanto *h2* pode ser minimizado diretamente ou por meio da redução do ângulo *θ*.

A Figura 4.6 mostra o esquema do módulo robótico em uma vista lateral. Deste modo é possível descobrir a ação das forças F_y e F_z para se determinar o torque necessário que o motor deve ter para conseguir movimentar o módulo sobre o cabo. Foi feita a somatória dos momentos em torno dos pontos A, B e G.

Figura 4.6 – Esquema representativo da vista lateral do módulo de detritos.



Fonte: Autor.

Na Figura 4.6, as variáveis são:

- P_g – força peso sobre a estrutura
- P_{gz} – componente da força peso na direção z
- P_{gy} – componente da força peso na direção y
- a_z - aceleração desenvolvida na direção z
- β – ângulo da catenária do cabo
- L – distância entre os centros das duas rodas em z
- d – distância entre o centro das duas rodas e o centro de massa no eixo vertical em y
- F_{at1} – força de atrito na roda A
- F_{at2} – força de atrito na roda B
- F_{z1} – força de tração na roda A
- F_{z2} – força de tração na roda B
- F_{y1} – força normal aplicada pelo cabo na roda 1
- F_{y2} – força normal aplicada pelo cabo na roda 2
- m – massa do módulo robótico

Considerando o equilíbrio de momentos em torno do ponto A (M_A), tem-se (Eq. 4.3):

$$\sum M_A = 0 \tag{4.3}$$

Adotando o sentido horário como positivo, tem-se (Eq. 4.4):

$$-F_{y2} \cdot L + P_{gy} \cdot \frac{L}{2} - P_{gz} \cdot (d-r) + m \cdot a_z \cdot (d - r) = 0 \tag{4.4}$$

Com (Eq. 4.5):

$$P_{gy} = P_g \cdot \cos\beta \;;\; P_{gz} = P_g \cdot sen\,\beta \tag{4.5}$$

Reorganizando os termos, tem-se a expressão para F_{y2} (Eq. 4.6):

$$F_{y2} = \frac{-(P_{gz} - m \cdot a_z) \cdot (d - r) + \frac{1}{2} \cdot P_g \cdot L}{L} \tag{4.6}$$

Considerando o equilíbrio de momentos em torno do ponto B (M_B), tem-se (Eq. 4.7):

$$\sum M_B = 0 \tag{4.7}$$

Adotando o sentido horário como positivo, tem-se (Eq. 4.8):

$$F_{y1} \cdot L - P_{gy} \cdot \frac{L}{2} - P_{gz} \cdot (d - r) + m \cdot a_z \cdot (d - r) = 0 \tag{4.8}$$

Reorganizando os termos, tem-se a expressão para F_{y1} (Eq. 4.9):

$$F_{y1} = \frac{(P_{gz} - m \cdot a_z) \cdot (d - r) + \frac{1}{2} \cdot P_{gy} \cdot L}{L} \tag{4.9}$$

Considerando o equilíbrio de momentos em torno do ponto G (M_G), tem-se (Eq. 4.10):

$$\sum M_G = 0 \tag{4.10}$$

Adotando o sentido horário como positivo, tem-se (Eq. 4.11):

$$(F_{y1} - F_{y2}) \cdot \frac{L}{2} - (F_{z1} + F_{z2}) * (d - r) + (F_{at1} + F_{at2}) \cdot (d - r) = 0 \tag{4.11}$$

Se considerarmos $F_{z1} = F_{z2} = F_z$, tem-se que (Eq. 4.12):

$$2F_z = \frac{(F_{y1} - F_{y2}) \cdot \frac{L}{2} + (F_{at1} + F_{at2}) \cdot (d - r)}{d - r} \tag{4.12}$$

Substituindo F_{y1} e F_{y2} da Eq. 4.12 pelas expressões das Eq. 4.6 e 4.9, após manipulações matemáticas, encontra-se (Eq. 4.13):

$$2F_z = (P_{gz} - m \cdot a_z) + F_{at1} + F_{at2} \tag{4.13}$$

As forças de atrito são calculadas conforme a equação 4.14, onde μ_1 é o coeficiente de atrito dinâmico (Eq. 4.14):

$$F_{at1} = \mu_1 \cdot F_{y1} \;;\; F_{at2} = \mu_1 \cdot F_{y2} \tag{4.14}$$

Pelo equilíbrio de forças, como $F_{y1}+F_{y2} = P_{gy}$, encontra-se a expressão para o cálculo da força F_z (Eq. 4.15):

$$F_z = \frac{\left(P_{gz} - m \cdot a_z \right) + \mu_1 \cdot P_{gy}}{2} \tag{4.15}$$

Para determinar o torque do motor, utiliza-se a Eq. 4.16:

$$\tau = F_z \cdot r \tag{4.16}$$

Considerando as grandezas físicas reais do módulo, calculou-se o torque máximo a ser desempenhado pelo motor. Esse resultado se encontra na seção 4.4.1.

4.3.2 Projeto mecânico em CAD

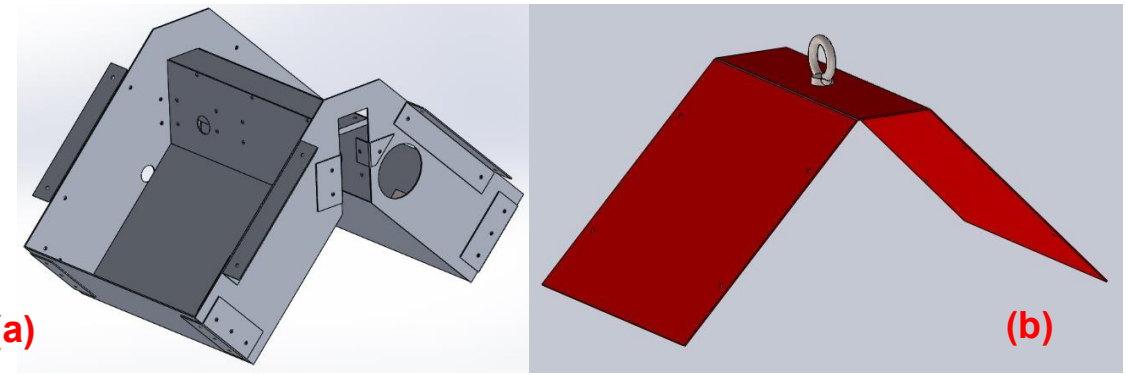
A estrutura do módulo de remoção de detritos foi concebida como uma geometria compacta e simétrica em relação ao plano vertical. Tendo em vista que o módulo deverá ser deixado na linha por um drone, a estrutura incluiu uma abertura angular na parte inferior, que facilita o posicionamento deste modulo na linha de alta tensão. A geometria do módulo foi definida para que ele se equilibre sobre a linha de transmissão de energia sem que a força do vento o faça cair. Para isso, foi imprescindível que o centro de massa do conjunto estivesse abaixo da linha de transmissão, obtido pelo projeto mecânico do módulo. A Figura 4.7 contém o desenho das estruturas inferior e superior projetadas em CAD. A Figura 4.8 mostra três componentes fabricados de material PLA.

Destaca-se que o módulo robótico proposto para remoção de detritos pode ser colocado e retirado do cabo com a utilização de um drone, como meio de transporte, ou colocado e retirado do cabo com o auxílio de técnicos. A Figura 4.7(b) ilustra a tampa superior adaptada com um olhal para colocação manual do módulo no cabo com a utilização de varas de manobra pelos técnicos. A Figura 4.10 apresenta a versão do módulo robótico para ser transportado pelo drone com a utilização de uma fechadura magnética.

A preocupação com os impactos da interferência eletromagnética é significativa, pois ela pode afetar o funcionamento ou danificar de forma permanente os componentes elétricos ou eletrônicos. Este é o motivo pelo qual uma estrutura fechada, composta de alumínio foi adotada. A ideia principal consiste em isolar os componentes internos dos efeitos da eletricidade e do magnetismo, uma vez que a diferença de potencial nas linhas de

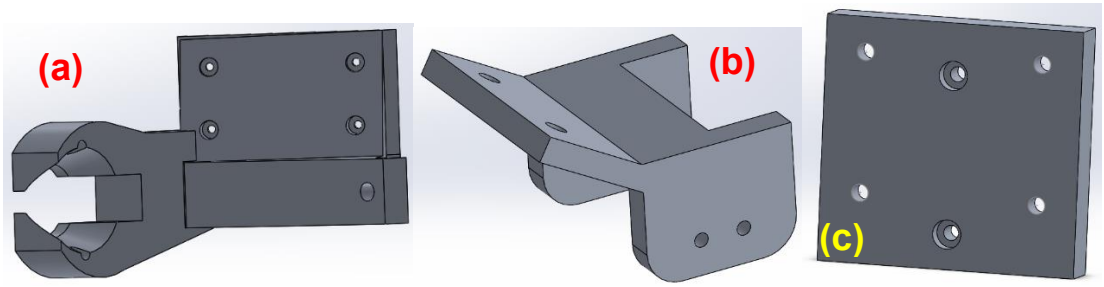
transmissão pode chegar a 138 kV. A modelagem matemática da blindagem do módulo é descrita na seção 4.3.6.

Figura 4.7 – (a) Desenho das estruturas inferiores e das estruturas dianteira e traseira com as cantoneiras do módulo de remoção de detritos; (b) Desenho da estrutura superior do módulo de remoção de detritos.



Fonte: Autor.

Figura 4.8 – Componentes fabricados em impressora 3D: (a) Suporte do atuador e do maçarico do módulo de remoção de detritos; (b) Suporte da câmera do módulo de remoção de detritos; (c) Suporte do motor do módulo de remoção de detritos.



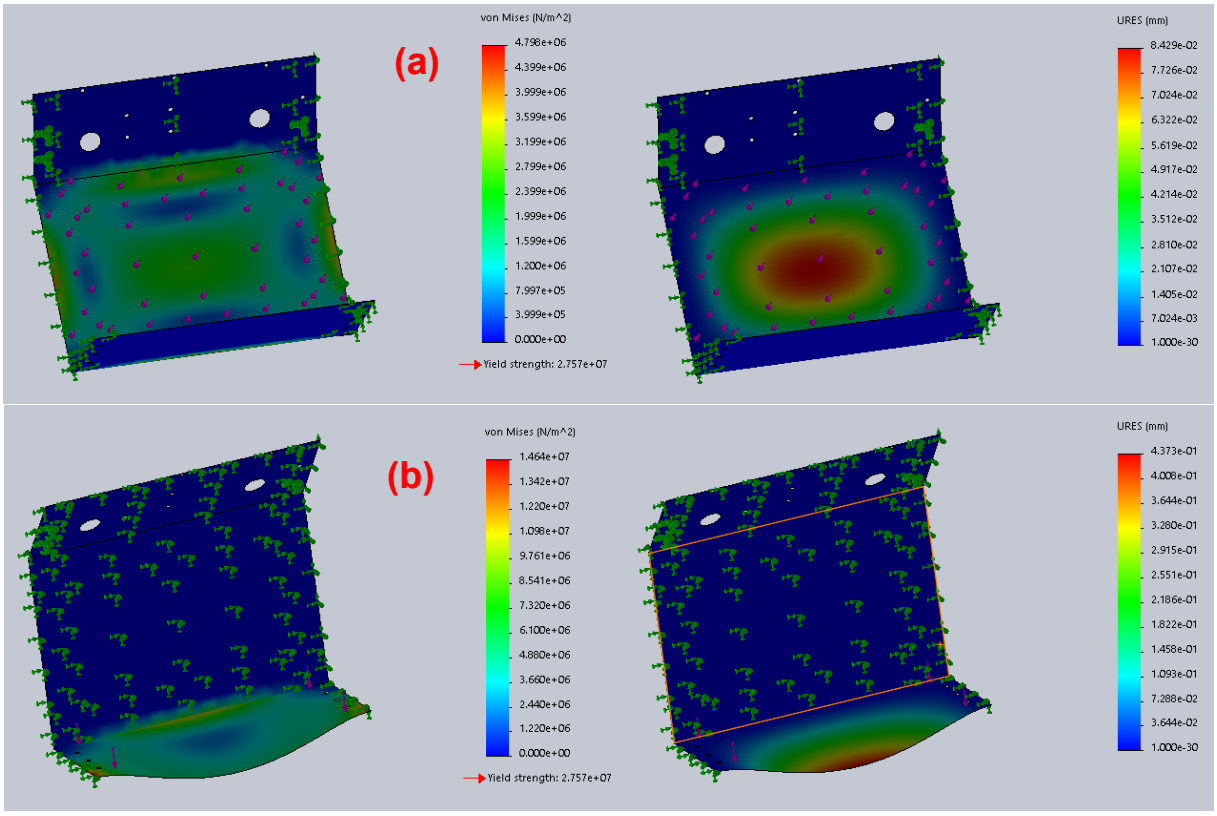
Fonte: autor.

4.3.3 Simulações CAE

A resistência do módulo, projetado em CAD, foi simulada por meio de elementos finitos, no *software* Solidworks. A estrutura foi solicitada com uma carga de 20 N, que equivale aproximadamente ao peso dos elementos componentes sustentados pela estrutura em cada lado. A Figura 4.9 apresenta os resultados das simulações CAE.

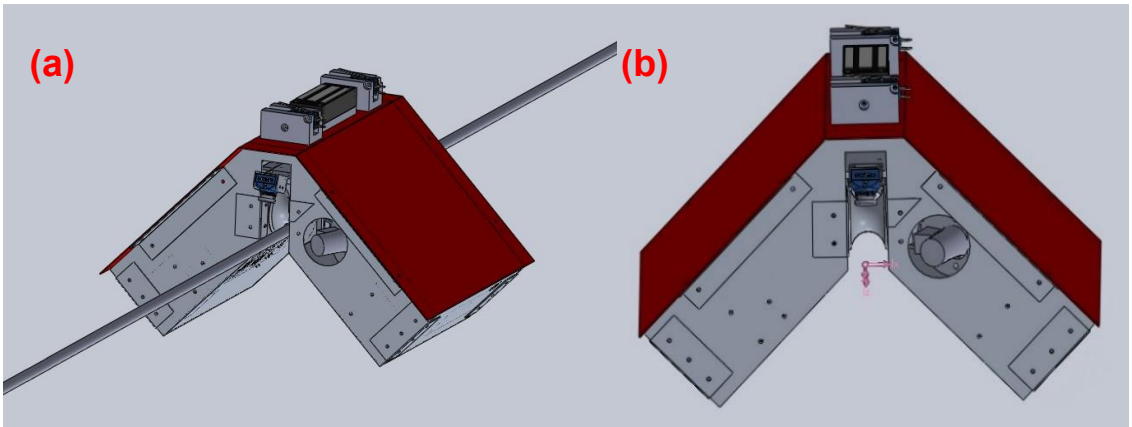
São utilizadas 2 polias motoras que funcionam como rodas para o módulo de remoção de detritos. Na simulação CAE, o módulo é visto equilibrado sobre o cabo em função do centro de massa estar localizado abaixo deste, Fig. 4.10. Das simulações apresentadas, mostrou-se o equilíbrio conseguido, sem que o módulo pudesse cair da linha.

Figura 4.9 – Simulação em elementos finitos da resistência da estrutura do módulo: (a) solicitação sobre estrutura lateral; (b) solicitação sobre estrutura inferior.



Fonte: autor.

Figura 4.10 – Imagens da simulação em CAE do módulo de remoção de detritos: (a) movimentação sobre um cabo de aço; (b) destaque para o centro de massa.



Fonte: Autor.

4.3.4 Projeto do sistema de controle e automação do módulo

Para o desenvolvimento do sistema de controle, foram utilizados dos equipamentos: duas baterias Tattu 5200 mAh, um computador portátil Raspberry Pi 3B+, dois

microcontroladores LoRa, dois módulos de relés, dois servomotores Dynamixel XM 540-W270 (que apresenta torque de parada de 10,6 Nm, alimentação de 12,0 V e consumo de corrente de 4,4 A), um condicionador de sinal U2D2 para os servomotores, uma câmera e um transmissor de sinal RC832, um celular para receber as imagens, além de um maçarico Honest e um atuador linear de curso 50 mm, força de 20 N, velocidade 13 mm/s, e alimentação 12 V.

O Raspberry Pi 3B+ foi programado em linguagem Python. Foi utilizada uma biblioteca para movimentação dos motores em modo de velocidade, isto é, controla-se a velocidade do motor. O acionamento dos relés foi realizado por meio do barramento GPIO do Raspberry Pi 3B+.

Duas antenas foram deixadas de fora do módulo de alumínio para receber e transmitir sinais. O transmissor da câmera envia o sinal em rádio frequência para ser recebido pelo celular. A LoRa receptora possui uma antena para receber os sinais, que são enviados por USB para o Raspberry Pi 3B+ com o intuito de movimentar o módulo ou acionar a chama do maçarico.

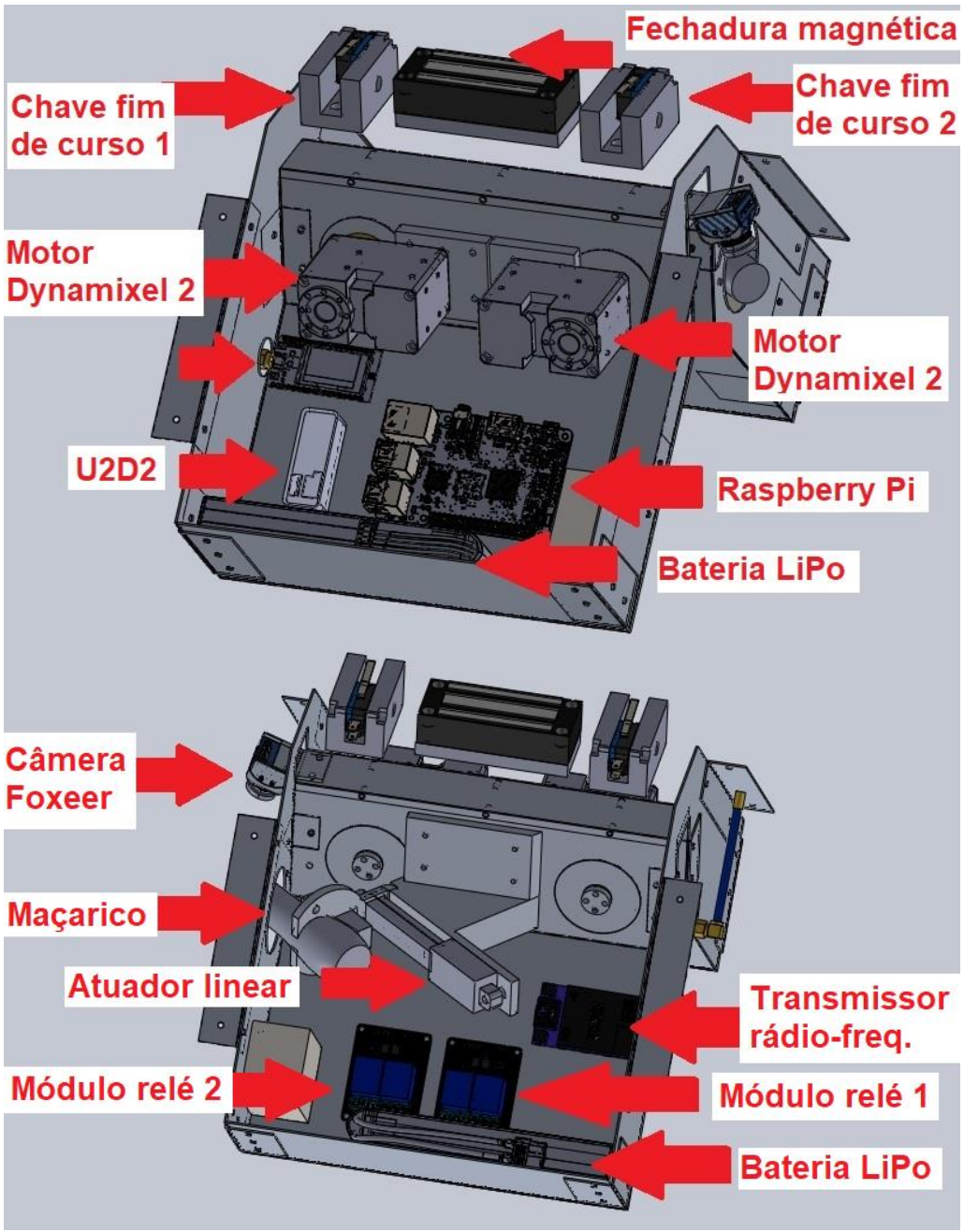
Os servomotores Dynamixel XM 540 são responsáveis por movimentar as polias, que fazem com que o módulo se movimente para frente ou para trás pelo cabo. Para que ele funcione adequadamente, é preciso utilizar o condicionador de sinal U2D2. Foram programados movimentos mais longos e mais curtos, para serem acionados pelo aplicativo controlador serial, instalado no celular, denominado unidade de controle no solo. Para isso, foram inseridas no programa em Python duas funções distintas de movimentação, uma com duração de 3 segundos e outra de 1 segundo. A função de 3 segundos implementa os deslocamentos maiores, e a função de 1 segundo permite ajustes finos de posicionamento perante os detritos presentes na linha.

A chama do maçarico é acionada pelo atuador linear. A chave liga/desliga aciona toda a parte eletrônica do módulo. Assim que o módulo está pronto para ser utilizado, um *buzzer* emite um sinal sonoro. A Figura 4.11 mostra o desenho do módulo em CAD, com os componentes mencionados em destaque.

O módulo robótico possuía a opção de ser deixado e buscado na linha de transmissão por um drone. Para esta função, foi fixado um eletroímã na tampa superior do módulo para possibilitar o acoplamento magnético do módulo a uma chapa metálica no drone. Três chaves de fim de curso foram instaladas no módulo: duas na tampa superior, ao lado do eletroímã (Fig. 4.11), e uma na estrutura inferior. Quando uma das chaves de fim de curso na tampa superior entra em contato com a chapa metálica do drone, o eletroímã é energizado, acoplando o módulo ao drone. Após o acoplamento, o módulo pode ser transportado pelo drone. O desacoplamento automatizado ocorre quando a chave de fim de

curso inferior entra em contato com o cabo, o eletroímã é desligado e o módulo é liberado para funcionamento sobre a linha. A operação de busca do módulo sobre a linha pelo drone é realizada por um novo acionamento do eletroímã, conforme explicado anteriormente. Quando ocorre o acoplamento entre o módulo e o drone, um sinal sonoro é enviado ao solo, para avisar o operador do drone desta situação.

Figura 4.11 – Desenho do módulo robótico com componentes do sistema eletrônico em destaque.

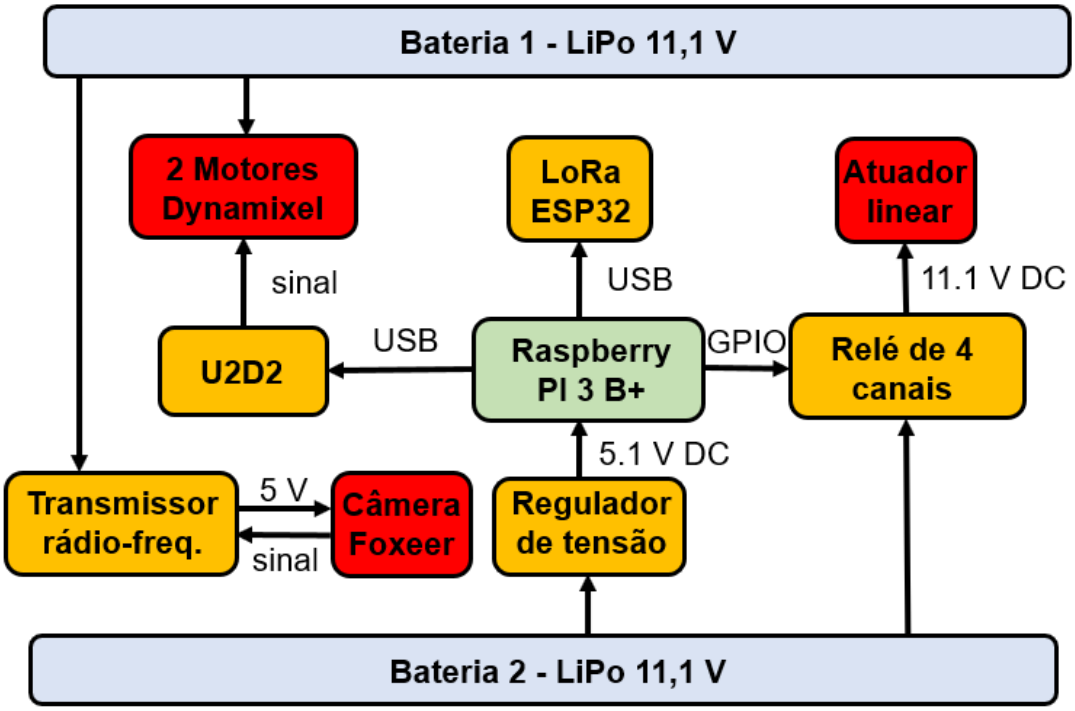


Fonte: Autor.

Para a melhor visualização do operador, existe uma câmera acoplada ao módulo robótico. Ela possibilita identificar os materiais que devem ser incinerados para a desobstrução da linha na qual a limpeza está sendo feita. As imagens captadas pela câmera são enviadas para o operador por meio de um transmissor rádio frequência modelo RC832.

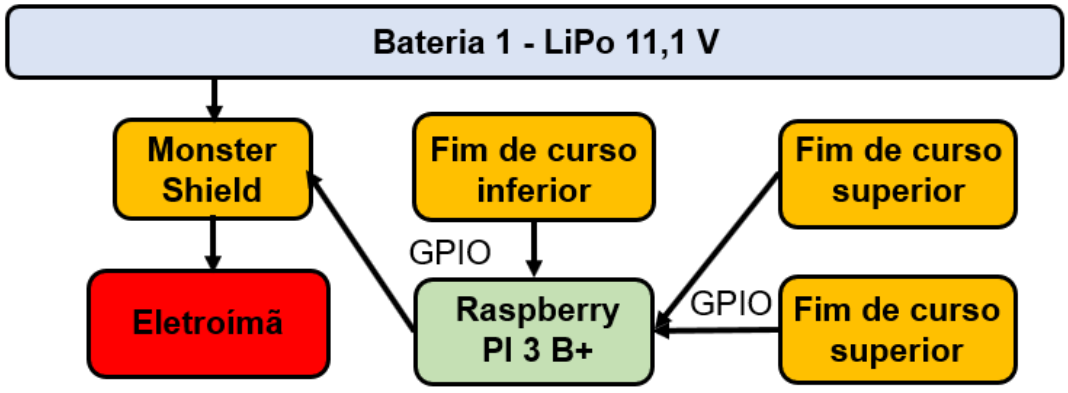
O maçarico é acionado por meio de um atuador linear (Fig. 4.11). O comando para o atuador é dado pelo operador assim que ele visualizar algum objeto estranho na linha de transmissão de energia. As Figuras 4.12 e 4.13 mostram esquemas do sistema eletrônico do módulo para remoção de detritos.

Figura 4.12 – Esquema do sistema eletrônico do módulo de remoção de detritos.



Fonte: Autor.

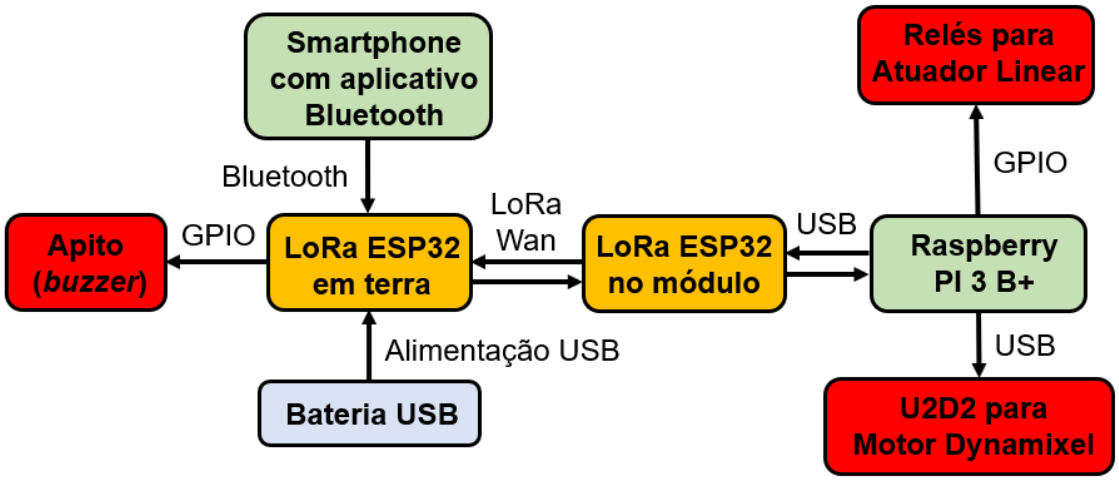
Figura 4.13 – Parte do sistema eletrônico responsável pelo acionamento do eletroímã.



Fonte: Autor.

O tráfego de mensagens para o módulo é semelhante ao descrito na seção 3.3.5, para o módulo de limpeza de cadeias de isoladores. A diferença é que neste caso, mensagens também são enviadas ao Raspberry para acionamento dos motores Dynamixel. A Figura 4.14 ilustra o tráfego em questão.

Figura 4.14 – Comunicação do sistema eletrônico.



Fonte: Autor.

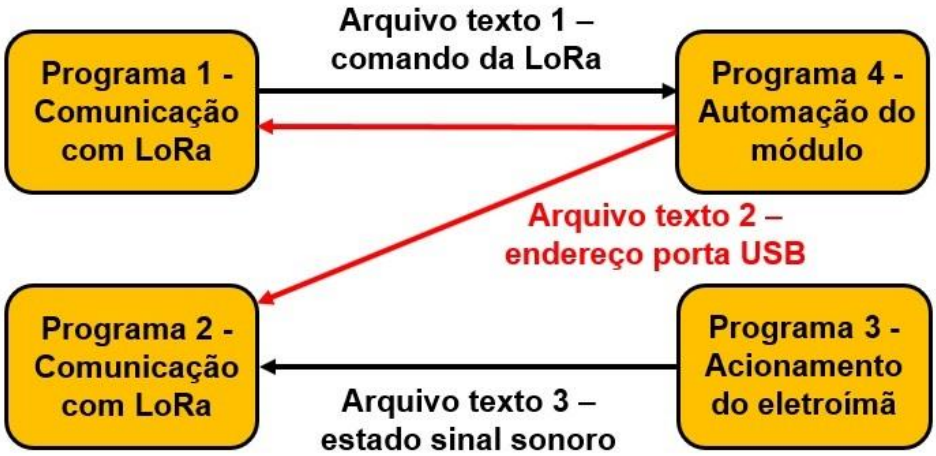
4.3.5 Programas de controle do módulo de remoção de detritos

Os programas para operação do módulo, foram desenvolvidos para execução pelo Raspberry Pi 3B+ e apresentam estrutura em linguagem Python: o primeiro, dedicado exclusivamente a receber os sinais via LoRa, o segundo para envio de sinais sonoros por mensagens via LoRa, o terceiro para controlar a lógica de acionamento da fechadura magnética em conjunto com os fins de curso e o quarto para executar os comandos de movimentação automática do módulo. A comunicação entre os programas foi estabelecida pela escrita e leitura de arquivos de texto (.txt) em comum, de forma que os programas podiam ler sinais provenientes do outro por meio destes arquivos (Fig. 4.15).

O programa da comunicação (programa 1) grava no arquivo de texto 1 o código da operação pretendida. O programa das funções de movimentação (programa 4) lê este arquivo e executa os comandos já estipulados para a operação do módulo, incluindo rotinas para envio de mensagens aos motores Dynamixel e ao atuador linear, para acionamento do maçarico. Este programa ainda possui uma rotina dedicada à realizar o endereçamento das portas USB do Raspberry Pi, que por meio do arquivo de texto 2, comunica com os programas 1 e 2 qual será a porta USB dedicada à comunicação do Raspberry Pi com a LoRa. A Figura 4.16 mostra o fluxograma do programa de automatização do módulo (programa 4).

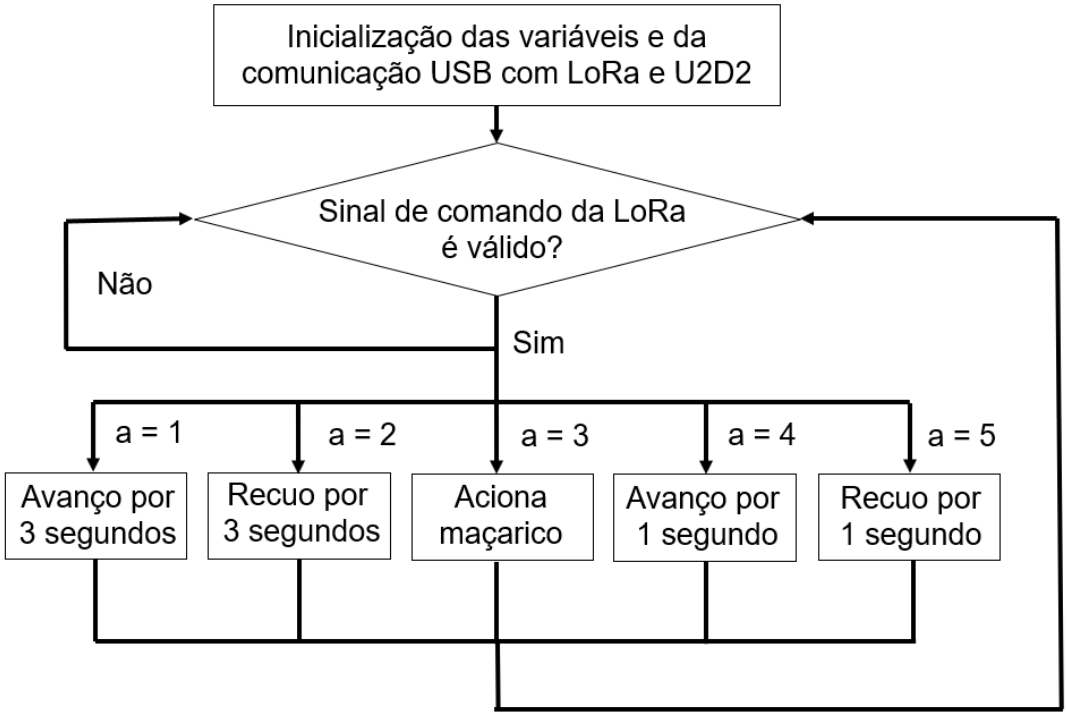
O programa 3 envia para o programa 2 por meio do arquivo de texto 3 o comando para emissão de sinal sonoro pela LoRa, conforme explicado na seção 4.3.4.

Figura 4.15 – Esquema da comunicação dos programas para controle e automação do módulo de remoção de detritos.



Fonte: Autor.

Figura 4.16 – Fluxograma do programa de automação do módulo destinado à execução pelo Raspberry Pi.



Fonte: Autor.

A variável “a” na Fig. 4.16 representa o sinal de comando enviado inicialmente a partir do aplicativo de celular “*Arduino Bluetooth Controller*”. Cada botão da interface do aplicativo foi configurado para desempenhar uma das funções descritas no fluxograma da Fig. 4.16. A Figura 4.17 mostra a interface do programa de comunicação *bluetooth*, com os botões que são utilizados no funcionamento do módulo em destaque.

Figura 4.17 – Interface de controle do aplicativo *Arduino Bluetooth Controller*, com botões configurados para uso em destaque.



Fonte: Autor.

Por fim, o programa que comanda o acionamento do eletroímã interage com o sinal elétrico obtido pelo fechamento de três fins de curso instalados no módulo. Caso um dos fins de curso superiores seja acionado, um sinal é dado para acionamento do eletroímã. Esse acionamento só pode ser revertido se o fim de curso inferior for acionado, o que indica que o módulo pousou na linha. Esse fato faz com que o programa permita o acionamento do eletroímã novamente pelo aperto de uma das chaves superiores. Após esse novo acionamento, o programa impede o desligamento do eletroímã, podendo este ser desligado somente se o módulo como um todo for desligado. Isso foi implementado dessa forma para evitar possíveis desligamentos indesejados durante o transporte do módulo pelo drone até o solo.

4.3.6 Blindagem eletromagnética e eletrostática do drone-robô para remoção de detritos

O drone robô em questão irá trabalhar sobre linhas de alta tensão de 69 kV e 138 kV. Faz-se necessária a implementação de blindagens eletrostáticas e eletromagnéticas para que o drone-robô possa trabalhar sem possibilidade de danos a si próprio ou à linha alvo. A

estratégia adotada para tal é desenvolver uma blindagem que ao mesmo tempo garanta proteção contra as interferências eletromagnéticas provenientes das linhas e contra efeitos danosos das descargas eletrostáticas que porventura possam surgir.

Conforme apresentado na seção 2.4, os fenômenos que causam interferência eletromagnética são os campos eletromagnéticos emitidos devido à frequência de trabalho das linhas (60 Hz); ao efeito corona; a descargas parciais (PD) e por fim aos arcos elétricos que possam ser direcionados à estrutura do drone-robô. Esses arcos causam interferências transientes, que podem ser danosas (BARNETT et al., 2020).

A metodologia de cálculo de atenuações, proposta por Ott (2009), foi utilizada para avaliação do efeito das blindagens, para as faixas de frequência de 30 a 3000 Hz por Ungureanu, Rusu e Baran (2007) (excluindo as faixas de frequência devidas ao efeito corona) e para frequências de 300 MHz até 6 GHz, em função da possibilidade de ocorrência de descargas por lacuna ou descargas parciais. Propôs-se inicialmente que as partes estruturais do módulo fossem fabricadas com espessura de 1 mm. Os dados iniciais para os cálculos são:

- $v = 3 \cdot 10^8$ *m/s* (velocidade das ondas eletromagnéticas);
- *r = 1 cm* (distância máxima à qual o módulo ficará exposto);
- $\mu_r = 1$ (permeabilidade magnética relativa);
- $\sigma_r = 0{,}61$ (condutividade relativa do alumínio);
- *t = 1 mm = 0,039 in* (espessura das blindagens)

As equações utilizadas para determinação das atenuações de campo elétrico e magnético fornecidas pelas blindagens são as apresentadas na seção 2.6 deste trabalho, que são as Equações (2.1) a (2.13). A seção 4.4.2 apresenta os resultados da metodologia de cálculo empregada.

O efeito das aberturas na estrutura do módulo não foi avaliado porque, de acordo com Ott (2009), quando as aberturas são distribuídas em diferentes superfícies do invólucro de proteção, a eficácia geral da blindagem não é significativamente afetada.

Um campo magnético de aproximadamente 15 μT a 60 Hz é emitido pelas linhas de energia de 138 kV, conforme Stewart, Dale e Klein (1993). Esse valor do campo magnético serve como referência. Se o sistema eletrônico puder operar normalmente sob campos magnéticos dessa magnitude ou superiores, então não é necessário nenhum tipo de blindagem para esse intervalo de frequência (60 Hz e harmônicos, correspondendo a uma faixa de 30 a 3000 Hz). Para verificar tal fato, o efeito de interferência do campo magnético emitido por uma fonte a 60 Hz foi ainda avaliado experimentalmente. Para tanto, foi utilizado

um aparelho micro-ondas doméstico e um gaussímetro para realizar as medições de campo magnético. O gaussímetro utilizado foi o TAMB-3D do fabricante Globalmag que possui como características metrológicas resolução de 0,001 mT e faixa nominal de 5 mT (Figura 4.18).

O módulo foi posicionado próximo ao gerador de campo magnético de modo a simular a interferência proveniente do cabo de alta tensão, cuja fonte se situará em contato com a estrutura inferior dos módulos robóticos. Foi medido o campo máximo emitido pelo gerador, e os campos incidentes em pontos determinados da estrutura do módulo. A Figura 4.18 mostra o experimento e os pontos em que o campo magnético foi medido. Os resultados destas medições se encontram na seção 4.4.2.

Figura 4.18 – Medição de campo magnético emitido por aparelho micro-ondas: (a) Medidor de campo magnético (gaussímetro) utilizado; (b) visão geral do teste; (c) destaque da região de medição.



Fonte: Autor.

Em relação à blindagem eletrostática, a contribuição de Permata et al. (2019) foi utilizada, uma vez que uma estrutura de um VANT, blindado com alumínio de 0,3 mm de espessura, foi suficiente para evitar danos à estrutura devido às descargas eletrostáticas de até 150 kV. Definiu-se que chapas de alumínio de 1 mm seriam então usadas para compor a estrutura do módulo, para que esta apresentasse massa pequena, e ao mesmo tempo boas características de blindagem. Dessa forma, a estrutura do módulo se encontrará livre de efeitos danosos de descargas elétricas.

Picos de tensão induzidos causados por arcos diretos na estrutura do módulo, não foram avaliados porque exigem um aparato experimental para isso (BARNETT et al., 2020).

O impacto do arco direto na estrutura foi avaliado quando o módulo foi inserido em contato com linhas energizadas, após a equalização de potencial (conferir na seção 4.4.7).

4.3.7 Testes iniciais do módulo de remoção de detritos em laboratório

Com a estrutura e o sistema eletrônico devidamente montados, foram realizados testes iniciais de funcionamento do módulo. Para tal, foi fixado um cabo de aço entre dois pilares, de forma que o módulo pudesse se movimentar sobre ele. O equilíbrio mecânico do módulo sobre a linha foi testado manualmente.

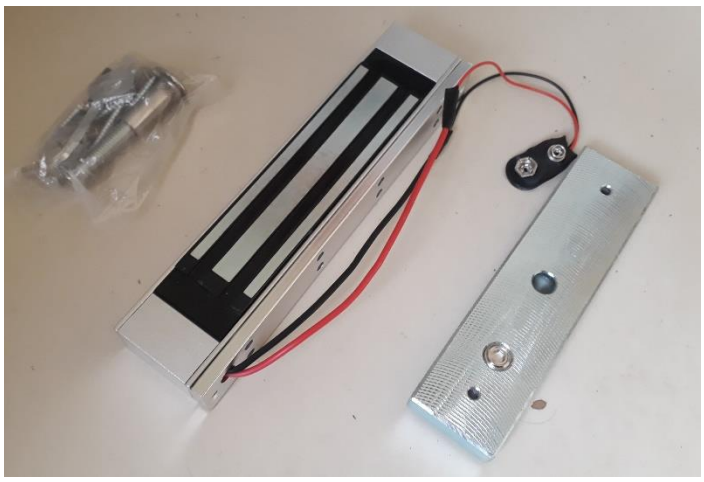
Os comandos de movimentação e de queima foram enviados ao módulo, pelo acionamento de botões no aplicativo "*Arduino Bluetooth Controller*", e a comunicação ocorreu conforme exposto na Fig. 4.14.

A imagem da câmera Foxeer, acoplada ao módulo, foi recebida via celular pelo aplicativo "*USB Camera*". Assim, foi possível ao operador, com a visão da imagem da câmera pelo celular, posicionar o módulo em um ponto ótimo para queima do objeto estranho. Foram então testadas a movimentação nos dois sentidos do cabo e, por fim, a queima de um objeto estranho pendurado ao cabo de aço. Os resultados destes testes são expostos na seção 4.4.3.

4.3.8 Testes iniciais de pouso sobre a linha com o drone EFT E610

De acordo com a ideia apresentada por Gonçalves e Carvalho (2013), o drone EFT E610 deverá acoplar os módulos robóticos por meio de um sistema de eletroímã. O drone então irá sobrevoar a linha de alta tensão alvo com um módulo acoplado. Para verificar a capacidade do drone EFT E610 em transportar um módulo robótico e deixá-lo sobre uma linha, e depois recolhê-lo, foram realizados testes com este objetivo. Desenvolveu-se uma solução para o transporte, com liberação e recolhimento automático dos módulos robóticos nas linhas, com o auxílio de um drone. O mecanismo de ligação entre o módulo e o drone foi feito com o uso de uma fechadura magnética. Uma fechadura magnética e uma placa metálica a ser utilizada em conjunto com a fechadura foram adquiridas (Fig. 4.16). Esta fechadura possui capacidade de carga de 180 kg e é acionada por uma tensão de 12 V. A placa metálica que é atraída pelo ímã da fechadura foi fixada na estrutura superior mostrada na Fig. 4.19.

Figura 4.19 – (a) Fechadura magnética A180 e (b) placa metálica utilizadas.



Fonte: Autor.

Suas características são:

- Caixa em aço com tratamento antiferrugem;
- Bloco magnético, concebido em plástico de engenharia industrial com alta durabilidade;
- Parafusos para fixação;
- Força de tração: 180 kgf;
- Tensão de Alimentação: 12 V CC;
- Corrente: 460 mA;
- Dimensões – Fechadura: 38x20x170 mm, Placa metálica: 33x10x130 mm.

A placa metálica foi fixada na estrutura do drone, e a fechadura, na estrutura do módulo construído para os testes iniciais. Este módulo teve parte de sua estrutura confeccionada em impressora 3D e outra com chapas de alumínio de 2 mm de espessura. Este módulo foi desenhado em CAD 3D e foi construído para simular o módulo de remoção de detritos de forma simplificada sem o sistema de controle e queima. A Figura 4.20 mostra o módulo simplificado fabricado.

Figura 4.20 – Módulo para simulação construído para testes iniciais do pouso/retirada no cabo com o drone EFT E610.



Fonte: Autor.

Uma estrutura metálica foi adquirida para suportar uma corda, que simulou um cabo de alta tensão, Fig. 4.21.

Figura 4.21 – (a) estrutura metálica para fixação da linha simulada, (b) drone EFT E610 com o protótipo do módulo acoplado.



Fonte: Autor.

4.3.9 Teste de liberação e retirada do módulo com sistema de controle já instalado com o drone EFT transportando o modulo de remoção de detritos

Foi realizado um teste simulado para deixar o módulo de remoção de detritos na linha, realizar uma limpeza de um objeto estranho e, em seguida, buscar o módulo. A estrutura metálica utilizada em laboratório foi instalada, com uma corda de 19 mm de espessura para

simular a linha. Um par de tênis foi deixado sobre a corda para posteriormente ser removido pelo módulo. A chama do sistema de queima concentrado ficaria responsável por queimar o cadarço do tênis, promovendo assim a sua queda da linha. O módulo seria movimentado até a posição correta para a queima, com a ajuda da câmera presente no módulo.

4.3.10. Testes em campo de liberação e atuação do módulo de detritos em linha viva

O local escolhido para os testes foi uma torre que apresenta linhas entre postes de altura de aproximadamente 20 metros. A tensão dessas linhas é de 138 kV. Um par de tênis foi colocado na linha para posterior remoção pelo módulo. Esse teste foi realizado com o auxílio de operadores de linha vida. Um olhal foi instalado no módulo com o intuito de permitir ao operador erguê-lo até a linha viva com uma vara de manobra. Os resultados são mostrados na seção 4.4.8

4.4 Resultados e discussões

4.4.1 Resultados dos cálculos do projeto do módulo de remoção de detritos – Cálculo do torque do motor

O torque necessário para o módulo locomover-se ao longo do cabo é dado pela Eq. (4.16). O coeficiente de atrito estático utilizado foi o de alumínio (rodas) e alumínio seco (cabo), adotado como sendo μ = 1,4 e a aceleração linear foi considerada como a_z = 0 m/s^2. A Tabela 4.1 apresenta os valores das grandezas físicas relativas ao módulo.

Tabela 4.1 – Resultados dos cálculos das variáveis de projeto do módulo

g [m/s²]	β [°]	β [rad]	sen β	cos β	m [kg]
9,807	57	0,995	0,839	0,545	4,103
P_g [N]	P_{gy} [N]	P_{gz} [N]	a_z [m/s²]	μ_1	r [m]
40,238	21,930	33,760	0	1,4	0,01

Substituindo as grandezas da Tabela 4.1 na Eq. (4.16), tem-se que:

$$\tau = F_z \cdot r = \frac{(33{,}760 - 4{,}103 \cdot 0) + 1{,}4 \cdot 21{,}930}{2} \cdot 0{,}01 = 0{,}322\ Nm \qquad (4.17)$$

No caso do ângulo da catenária ser igual β = 0° tem-se que o torque necessário para os motores é de:

$$\tau = \frac{(0\text{-}4{,}103\cdot 0) + 1{,}4\cdot 40{,}238}{2}\cdot 0{,}01 = 0{,}282\ Nm \qquad (4.18)$$

Em função do torque calculado e disponibilidade, foi utilizado o servomotor Dynamixel XM 540-W270-T (torque de parada de 10,6 Nm a 12,0 V, corrente de 4,4 A; velocidade sem carga de 3,1 m/s) para atender à demanda.

4.4.2 Resultados dos cálculos da blindagem eletromagnética

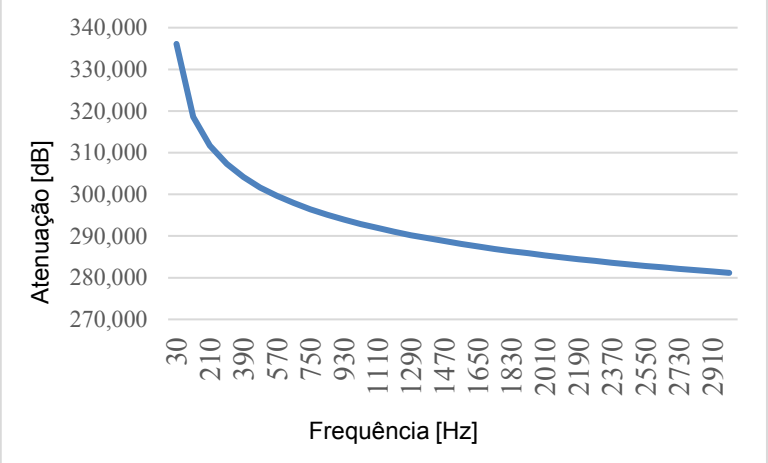
A seguir estão apresentados os resultados das avaliações das atenuações dos campos nas faixas de frequência propostas:

- Campo elétrico na faixa de 30 a 3000 Hz;
- Campo magnético na faixa de 30 a 3000 Hz;
- Campo elétrico na faixa de 300 MHz a 6 GHz;
- Campo magnético na faixa de 300 MHz a 6 GHz.

Campo elétrico na faixa de 30 a 3000 Hz;

A Figura 4.22 mostra o gráfico das atenuações obtidas para o campo elétrico nesta faixa de frequências, utilizando a Equação (2.6).

Figura 4.22 – Gráfico das atenuações do campo elétrico para faixa de frequências de 30 a 3000 Hz.



Fonte: Autor.

De acordo com o gráfico da Fig. 4.22, percebe-se uma tendência de diminuição da efetividade da blindagem com o aumento da frequência, e existe um ponto de mínima efetividade (na frequência de 3000 Hz). Logo, pelo gráfico da Fig. 4.22 a efetividade (S_e) mínima alcançada para a blindagem é de 281,165 dB. O multiplicador de atenuação obtido para essa faixa de frequência é obtido a partir da Eq. (2.12).

$$20 \log (E_0/E_f) = 281,165 \tag{4.19}$$

$$E_f = 8,745 \cdot 10^{-15} \cdot E_0 \tag{4.20}$$

Assim como feito no cálculos de atenuação referentes ao módulo de limpeza de cadeias de isoladores, aproveitam-se as contribuições de Pellerin et al. (2004) e Liu et. al (2016) de modo que, para avaliar a eficácia da atenuação da faixa de 30 a 3000 Hz, basta avaliar para a frequência de maior amplitude, que é a fundamental (60 Hz), que apresenta um valor intensidade de referência de 19 kV/m (190 V/cm).

Aplicando-se a Eq. (4.21), encontra-se o campo elétrico incidente no circuito interno à estrutura blindada:

$$Ef = 8,745 \cdot 10^{-15} \cdot 190 \text{ V/cm} = 1,662 \text{ pV/cm} \tag{4.21}$$

Em sistemas que operam à alimentação de 5 a 11,1 V, a influência de um campo elétrico da ordem dos pV/cm é ínfima, podendo ser desprezada do ponto de vista de indução de tensões indesejadas ao circuito. Como a menor efetividade S_E é suficiente para blindar contra a maior amplitude de campo elétrico presente, em contato praticamente direto com a linha, considera-se que para as outras frequências, a blindagem será mais efetiva.

Caso a espessura da blindagem seja de t = 0,7 mm, que é a espessura da caixa metálica utilizada para acomodar o sistema eletrônico de visão, a efetividade mínima é ligeiramente menor que a encontrada para a espessura de 1 mm (279,477 dB em comparação a 281,165 dB, na frequência de 3000 Hz). Portanto, os cálculos não foram aqui mostrados, já que a atenuação do campo elétrico se encontra na mesma ordem dos μV/cm, considerada suficiente para o caso.

Campo magnético na faixa de 30 a 3000 Hz;

Em relação aos campos magnéticos, Os cálculos foram realizados, semelhantes aos realizados para campos elétricos. A Tabela 4.2 mostra o cálculo da atenuação dos campos

magnéticos na faixa de frequência de 30 a 3000 Hz (com passo de 300 Hz), novamente utilizando a Equação (2.10).

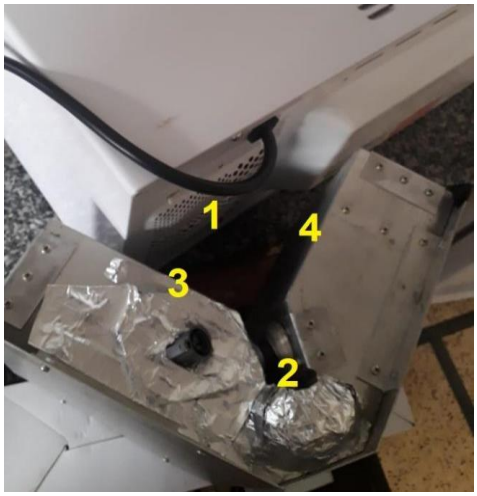
Tabela 4.2 – Resultados dos cálculos de atenuação do campo magnético para a blindagem de t = 1 mm, em diferentes frequências.

Frequência [Hz]	Absorção (Am) [dB]	Reflexão (Rm) [dB]	Fator B (Bm) [dB]	Efetividade (Sm)[dB]
30	0,002	-32,775	-37,807	-70,581
330	0,006	-22,362	-27,523	-49,879
630	0,008	-19,553	-24,785	-44,331
930	0,010	-17,862	-23,149	-41,001
1230	0,011	-16,648	-21,981	-38,617
1530	0,013	-15,700	-21,074	-36,761
1830	0,014	-14,922	-20,333	-35,242
2130	0,015	-14,263	-19,708	-33,956
2430	0,016	-13,691	-19,168	-32,842
2730	0,017	-13,185	-18,692	-31,860
3000	0,018	-12,775	-18,308	-31,065

Fonte: Autor.

Pela Tabela 4.2, concluiu-se que na teoria, uma estrutura de 1 mm de espessura é insuficiente para proteção contra interferência proveniente de campos magnéticos. O teste experimental proposto usando o forno de micro-ondas foi então conduzido, para verificar se o efeito do campo magnético nessa faixa de frequências é prejudicial ao funcionamento do módulo. A Figura 4.23 mostra a configuração do experimento realizado e os pontos em que o campo magnético máximo foi medido com os resultados apresentados na Tab. 4.3.

Figura 4.23 - Teste de emissão de campo magnético sobre o módulo.



Fonte: Autor.

Tabela 4.3 - Resultados das medições de campo magnético para cada posição do módulo testada, em μT.

Medidas em μT	Média (3 leituras)	Desvio padrão
Campo na fonte (1)	344	0
Próximo ao centro do módulo (2)	73	0
Lateral do módulo (4)	92	0
Lateral do módulo (3)	200	0

Durante o teste com a exposição e medição dos campos magnéticos emitidos, os comandos de movimentação das rodas e acionamento do maçarico foram enviados ao módulo e não foi percebido nenhum funcionamento anormal deste.

Portanto de acordo com esses testes, a estrutura de alumínio de 1 mm de espessura mostrou-se suficiente para blindagem, mesmo que pelos cálculos matemáticos não haja efeito de blindagem para campos magnéticos de baixa frequência. Isso se deu porque os campos magnéticos são muito baixos para causar interferência, ou porque não houve acoplamento magnético (frequência DC e nem frequência de transmissão pelo protocolo USB) de sinais indesejáveis provenientes do campo magnético ao qual o módulo foi exposto. Este resultado se expande para a utilização da espessura de 0,7 mm, para blindar o sistema eletrônico de visão.

Campo elétrico na faixa de 300 MHz a 6 GHz;

Considerando a condição estabelecida na Eq. (2.1) referente ao intervalo entre 300 MHz e 6 GHz, onde as descargas parciais acontecem, verifica-se que:

$$\frac{3 \cdot 10^8}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^8} = 0{,}1592 > 0{,}001 \tag{4.22}$$

$$\frac{3 \cdot 10^8}{2\pi \cdot 6 \cdot 10^9} = 0{,}0079 > 0{,}001 \tag{4.23}$$

Nesse contexto, o campo elétrico ainda é classificado como próximo, já que a distância entre os cabos elétricos do sistema de controle do módulo e a linha de alta tensão é extremamente reduzida, chegando praticamente a um contato físico. Consequentemente, a avaliação da atenuação dos campos é conduzida de maneira independente através de cálculos separados.

No que se refere ao campo elétrico, foi encontrada uma efetividade mínima de 1904,385 dB em uma frequência de 300 MHz. O fator de atenuação para esse intervalo de frequências é calculado através da aplicação da Eq. (2.12).

$$20 \log(E_0/E_f) = 1904{,}385 \tag{4.24}$$

$$E_f = 6{,}036 \cdot 10^{-96} \cdot E_0 \tag{4.25}$$

Considerando o limiar do campo elétrico requerido para induzir uma ruptura parcial na rigidez dielétrica do ar, estabelecido em 30 kV/cm (30000 V/cm) (NOR, RAMLI; 2007), o campo elétrico resultante após a atenuação é determinado empregando a fórmula presente na Eq. (4.25).

$$E_f = 6{,}036 \cdot 10^{-96} \cdot 30000 \text{ V/cm} = 1{,}810 \cdot 10^{-91} \text{ V/cm} \tag{4.26}$$

O valor do campo atenuado obtido é ínfimo, podendo ser considerado nulo.

Campo magnético na faixa de 300 MHz a 6 GHz.

No que diz respeito ao campo magnético, foi identificada uma atenuação mínima de 42,850 dB a uma frequência de 300 MHz, utilizando a Eq. (2.10). O fator de atenuação para essa faixa de frequência é calculado por meio da Eq. (2.13).

$$20 \log (H_0/H_f) = 42{,}850 \tag{4.27}$$

$$H_f = 7{,}203 \cdot 10^{-3} \cdot H_0 \tag{4.28}$$

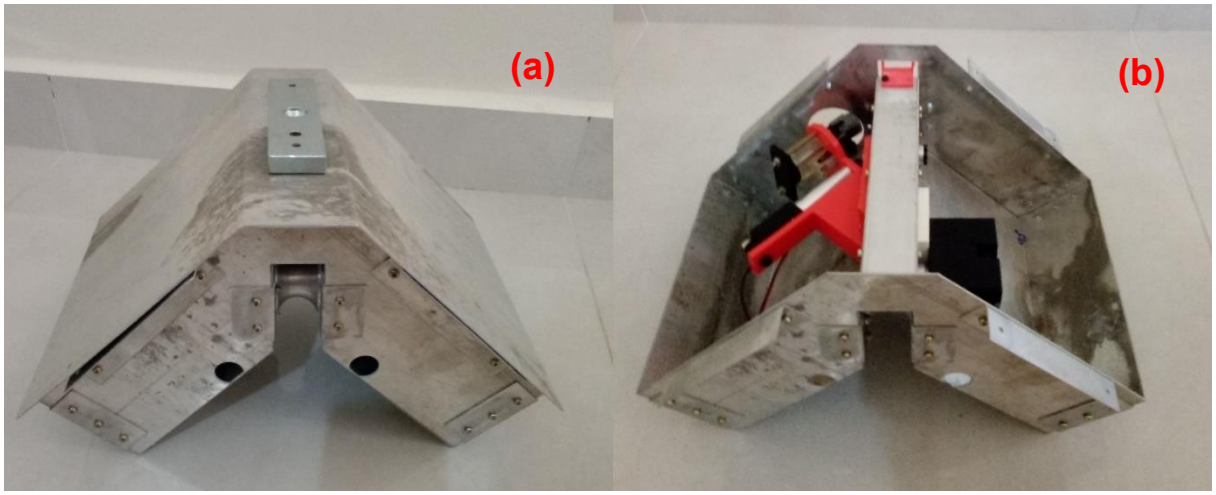
Não foi possível obter informações sobre a intensidade do campo magnético durante descargas parciais. Apesar disso, mesmo que a atenuação registrada nesse contexto seja relativamente menor (em uma ordem de grandeza de milésimos) em comparação com a atenuação no campo elétrico, essa redução pode ser suficiente para oferecer proteção contracampos magnéticos dentro da faixa de frequências considerada.

Com esses resultados, garante-se então a blindagem do módulo de remoção de detritos, para todas as faixas de frequência de campos eletromagnéticos avaliadas.

4.4.3 Fabricação e confecção do módulo de remoção de detritos

A estrutura do módulo fabricada e devidamente montada é mostrada na Fig. 4.24. A Tabela 4.4 apresenta os principais parâmetros do módulo robótico.

Figura 4.24 – Fotos da estrutura fabricada para o módulo de remoção de detritos. (a) Estrutura com tampa superior; (b) Estrutura sem tampa.



Fonte: Autor.

Tabela 4.4 – Principais características do módulo de remoção de objetos estranhos.

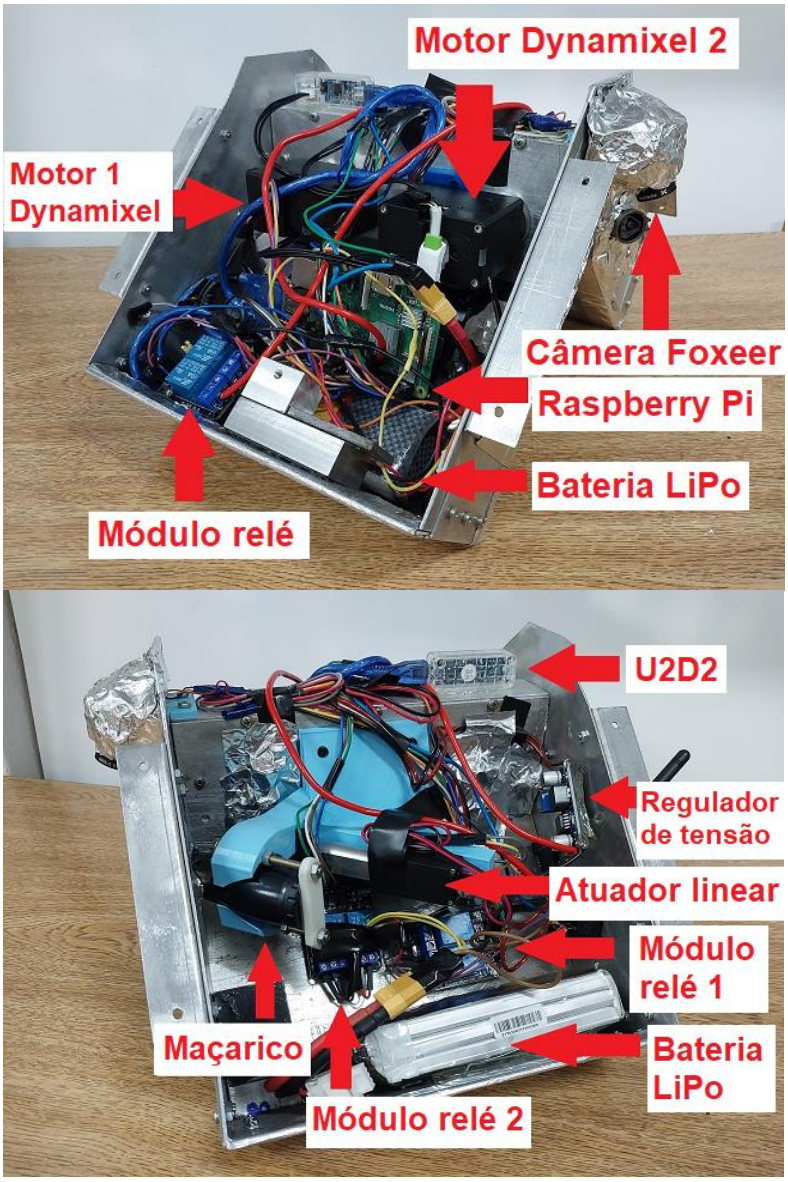
Dimensões	0,348 x 0,243 x 0,230 m
Massa total	4,103 kg
Velocidade média	0,0387 m/s (0,37 RPM)
Ângulo de subida da catenária máximo	57°
Velocidade do vento máxima	8 m/s
Distância de operação de comunicação	2 km (máx. 5 km) (ADELANTADO et al. 2017)
Autonomia	1 hora e 26 minutos

A estrutura do módulo foi projetada e fabricada em alumínio, de modo a reduzir a massa do conjunto. No total, seis chapas compõem a carenagem do módulo. Estas chapas são denominadas: estrutura inferior central, estrutura inferior direita, estrutura inferior esquerda, estrutura superior, estrutura dianteira e estrutura traseira. Todas as chapas possuem espessura de 1 mm, com exceção da estrutura inferior central, que possui 5 mm de espessura. As estruturas inferiores esquerda e inferior direita são dobradas com o intuito de sustentar os componentes elétricos e eletrônicos, além de minimizar a quantidade de frestas presentes na estrutura. Esta preocupação se justifica pela necessidade de reduzir interferências eletromagnéticas e eletrostáticas incidentes.

A estrutura superior também é dobrada e se encaixa nas demais chapas por meio das estruturas dianteira e traseira. A fixação de todas as chapas é realizada por meio de cantoneiras e conjuntos de parafusos e porcas. Antes dos testes experimentais nas linhas vivas todas as frestas são fechadas com folhas de alumínio com espessura de 0,1 mm.

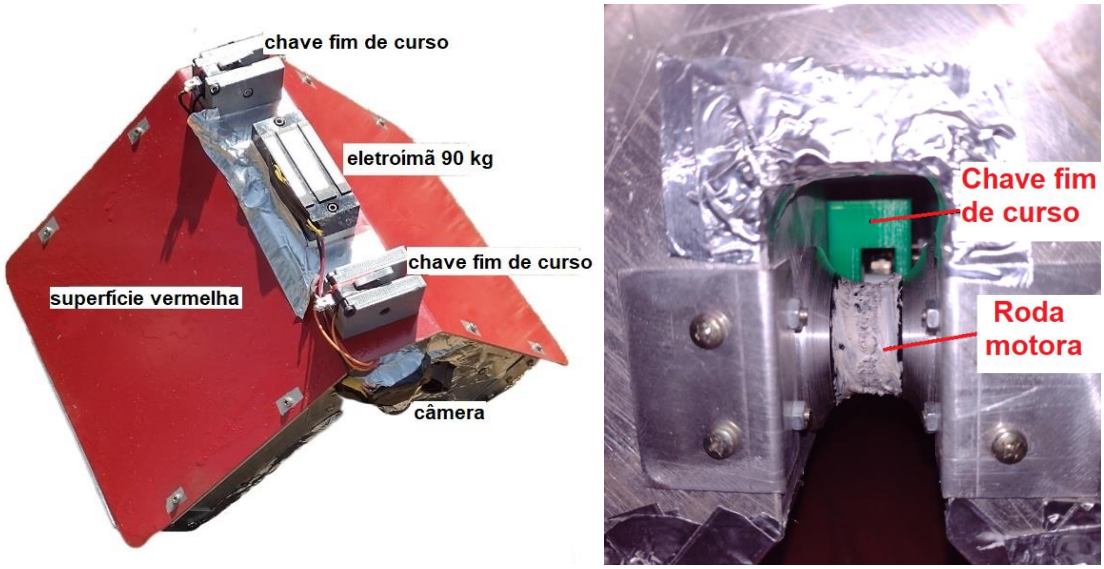
As chapas de alumínio dobradas e cortadas mostraram boa estabilidade, conforme simulações de CAD/CAE realizadas após a montagem do sistema, suficiente para suportar toda a massa dos componentes que compõem o módulo. O sistema eletrônico e componentes fabricados em impressão 3D foram então acoplados a esta estrutura, conforme Fig. 4.25 e 4.26.

Figura 4.25 - Módulo com o sistema eletrônico e outros componentes acoplados.



Fonte: Autor.

Figura 4.26 - Módulo com componentes externos em destaque.



Fonte: Autor.

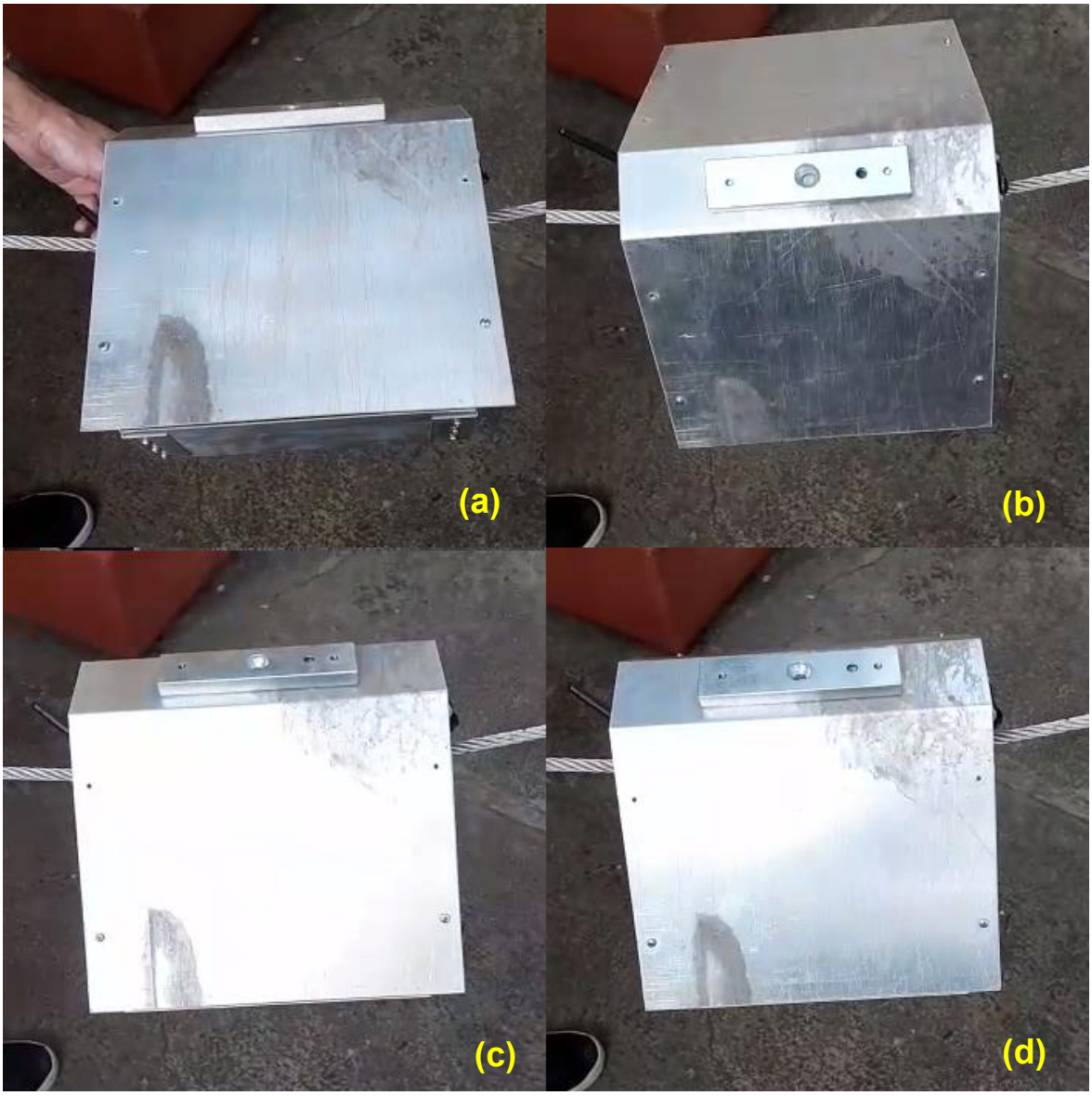
4.4.4 Resultados dos testes preliminares do módulo de remoção de detritos

Foram realizados testes preliminares de funcionamento do módulo de remoção de objetos estranhos sobre um cabo de aço. O módulo foi posicionado sobre um cabo de aço de diâmetro 10 mm. Primeiramente, foi testado o equilíbrio do módulo sobre a linha. Uma perturbação manual foi exercida sobre o módulo, de forma que ele ficasse inicialmente desalinhado, conforme Fig. 4.27.

Ao fim deste teste, o módulo provou-se bem dimensionado no quesito de manter-se em equilíbrio sobre uma linha, caso venha a ser alvo de ventos ou outras perturbações.

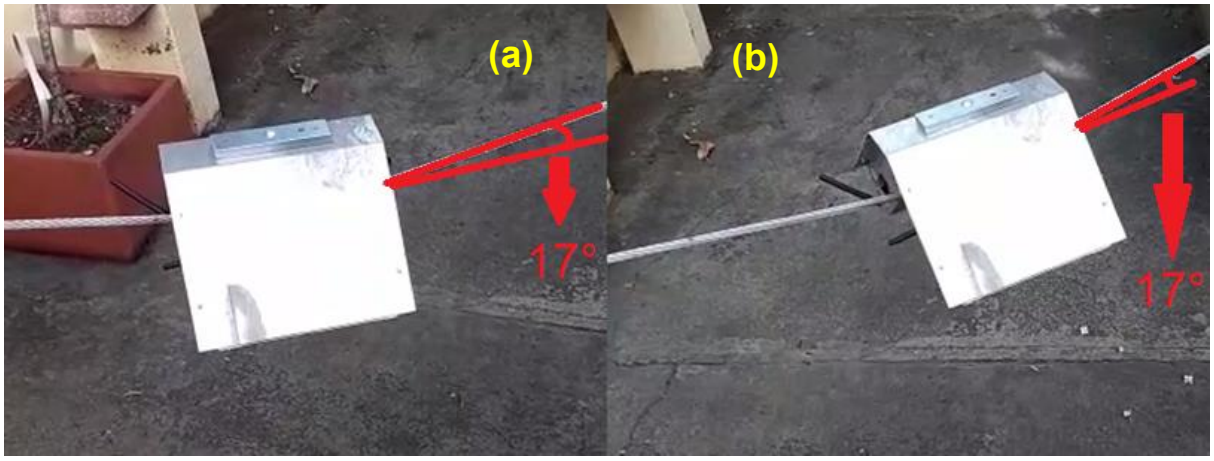
O próximo teste foi realizado no sentido de verificar a capacidade de movimentação do módulo sobre o cabo de aço. Foram enviados comandos de movimentação para os dois sentidos possíveis de movimento. A Figura 4.28 mostra um teste de movimentação realizado destacando o ângulo de subida alcançado com o protótipo.

Figura 4.27 – Teste de equilíbrio do módulo de remoção de detritos sobre o cabo de aço, mostrado em etapas sequenciais de (a) até (d).



Fonte: Autor.

Figura 4.28 - Teste de movimentação do módulo sobre um cabo de aço, em dois momentos (a) e (b).

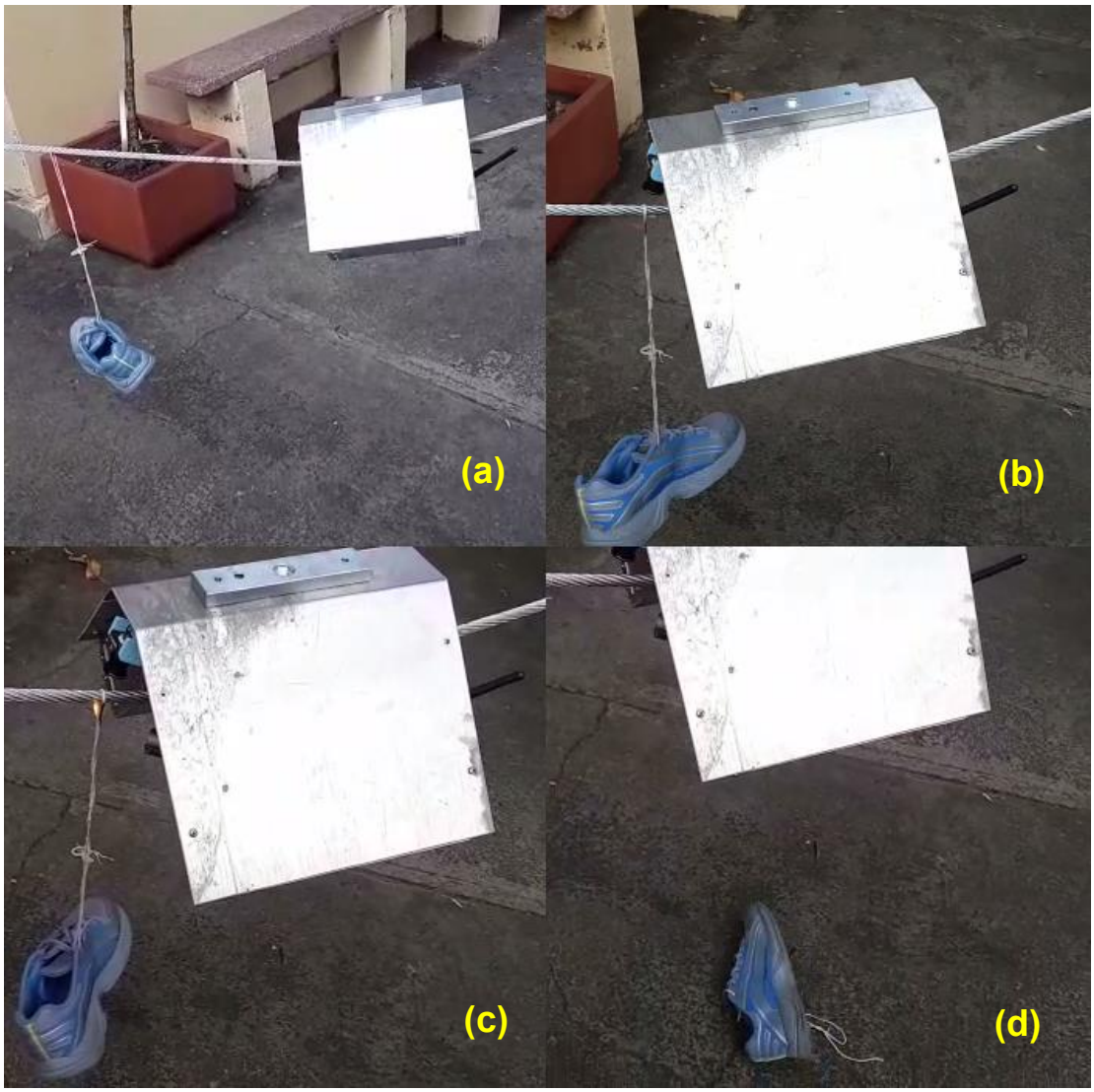


Fonte: Autor.

Notou-se que o módulo reagiu rapidamente aos comandos de movimentação enviados via celular, e a movimentação foi bem-sucedida.

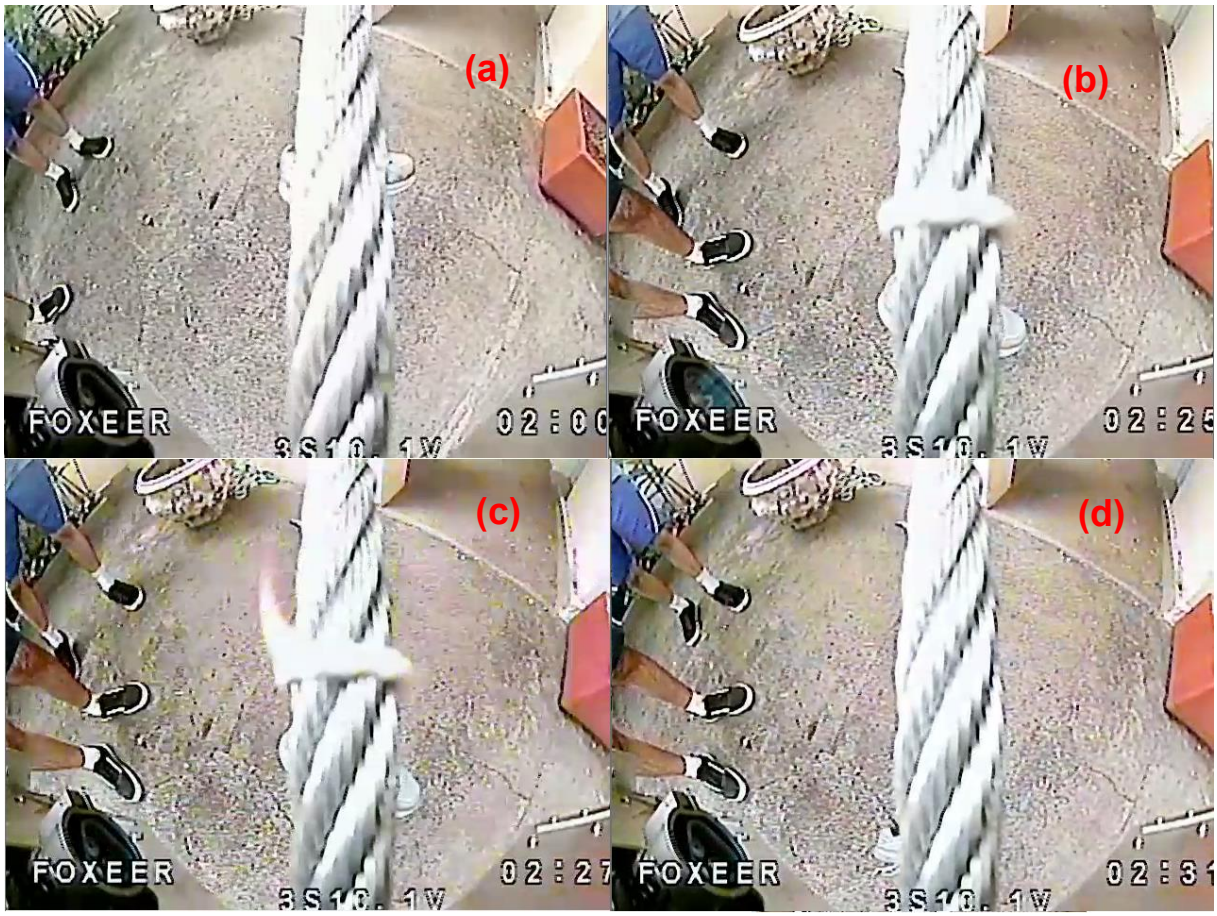
Por fim, foi realizado um teste de remoção de objetos estranhos. Um tênis foi pendurado no cabo para simular um objeto estranho possível de ser encontrado nas linhas reais. A Figura 4.29 mostra as etapas de um teste realizado. A Figura 4.30 mostra o mesmo teste, porém registrado pela perspectiva da câmera acoplada no módulo.

Fig. 4.29 - Teste de remoção de um tênis sobre o cabo com o acionamento do maçarico. (a) aproximação do módulo; (b) acionamento da chama; (c) visão da queima do barbante, (d) queda do tênis (objeto estranho).



Fonte: Autor.

Fig. 4.30 - Teste de remoção de um tênis sobre o cabo com o acionamento do maçarico, visto da perspectiva da câmera presente no módulo: (a) aproximação do módulo; (b) acionamento da chama; (c) visão da queima do barbante, (d) queda do tênis (objeto estranho).



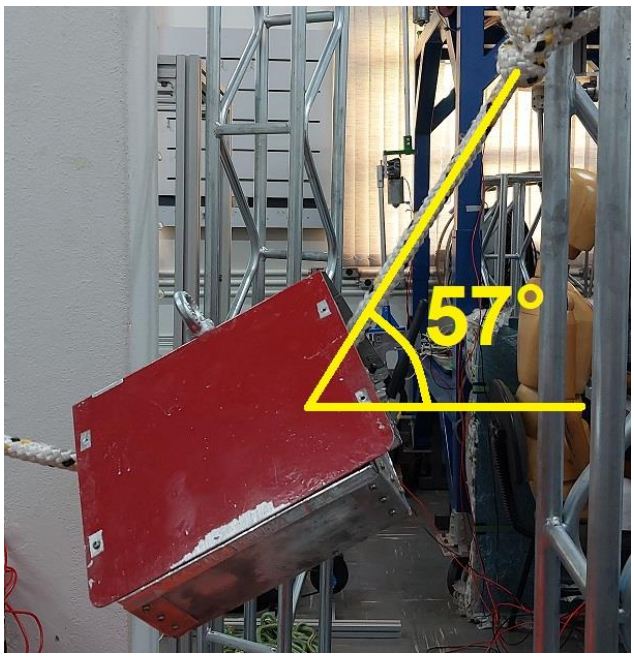
Fonte: Autor.

A visão fornecida pelo aplicativo de celular permitiu ao operador o posicionamento do módulo próximo ao objeto a ser removido e sua posterior queima.

Ao final dos testes, foi possível perceber a eficiência deste mecanismo, por atender a finalidade a qual foi proposto. A chama foi acionada três vezes, para que fosse possível efetuar a queima do segmento de barbante sobre o cabo.

Um teste foi realizado visando determinar experimentalmente o ângulo da catenária máximo que o módulo consegue atingir no seu movimento. A Figura 4.31 mostra o módulo na posição em que atinge o ângulo máximo de 57°.

Figura 4.31 - Ângulo máximo da catenária atingido pelo módulo.

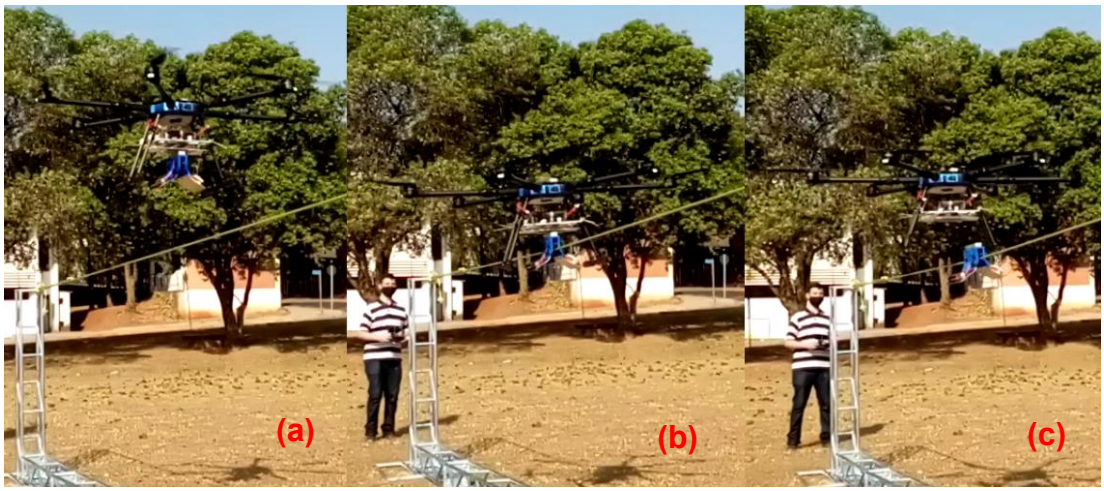


Fonte: Autor.

4.4.5 Testes de pouso e recolhimento do módulo simulado com o drone EFT E610

Foram realizados testes simulados de pouso do drone EFT E610 sobre uma linha de alta tensão simulada, carregando um protótipo de módulo robótico, e de recolhimento do módulo sobre a linha. A Figura 4.32 mostra um teste de pouso do protótipo sobre a linha, e a Fig. 4.33 mostra um teste de recolhimento deste protótipo simplificado apresentado na seção 4.3.8.

Figura 4.32 – Teste de pouso com módulo robótico: (a) posicionamento manual do drone em relação â linha, (b) contato do drone com a linha, (c) liberação do módulo na linha.



Fonte: Autor.

Figura 4.33 – Teste de recolhimento do módulo robótico: (a) posicionamento manual do drone em relação à linha, (b) contato do drone com o módulo, (c) recolhimento do módulo sobre a linha.



Fonte: Autor.

Os testes mostraram que o drone EFT E610 é capaz de transportar, liberar e recolher um módulo robótico sobre uma linha simulada. Um sistema de pouso vertical automático com sistema de visão integrado faz-se necessário, uma vez que o operador se depara com dificuldades reais no posicionamento do drone alinhado à linha para pouso, quando os movimentos são realizados todos manualmente. A fechadura magnética funcionou no transporte do módulo robótico pelo drone.

A descrição do sistema de visão desenvolvido para auxiliar na entrega e busca do módulo robótico pelo drone está detalhado no Apêndice B.

Atividades futuras incluem a implementação no drone EFT E610 de um sistema de visão e automatização do pouso sobre a linha de alta tensão, que permita ao operador do drone posicioná-lo estando distante de até 100 metros.

4.4.6 Resultados dos testes do módulo acoplado ao drone

A verificação do procedimento para liberar e buscar o módulo para remoção de detritos a partir de um drone foi simulada com um cenário não energizado, sendo o cabo simulado por uma corda presa em uma estrutura metálica. A Figura 4.34(a) mostra o drone e o módulo para remoção de detritos utilizado nos testes. A Figura 4.33(b) mostra a caixa de controle do sistema de visão com as funções de liberar e buscar o módulo.

Figura 4.34 - (a) Drone e módulo robótico para remoção de detritos; (b) Destaque da unidade de controle do sistema de visão acoplado ao drone.

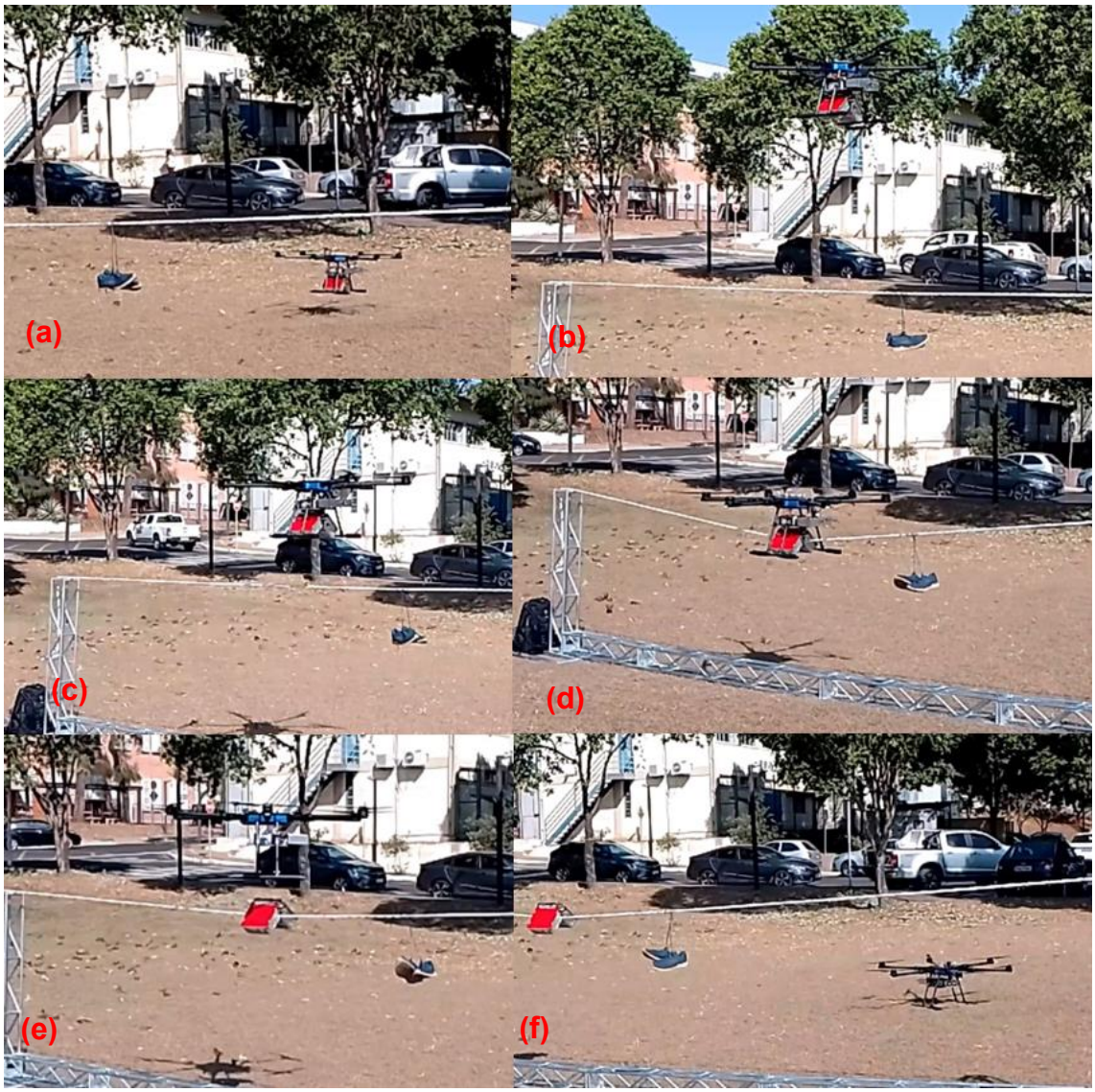


Fonte: Autor.

A Figura 4.35 mostra uma sequência de imagens ilustrando o procedimento para deixar o módulo robótico no cabo. Na Figura 4.35(a) o drone com o módulo acoplado começa o seu voo, na sequência é realizado o posicionamento manual do drone sobre o cabo utilizando-se de uma câmera RGB acoplada ao drone que envia o vídeo da atividade para tela do controle remoto modelo Skydroid H16, Fig. 4.35(b). Também é utilizado o sistema de visão para identificação do cabo e indicação de quando se deve realizar o pouso do módulo no cabo. Na Figura 4.35(c) tem-se o ajuste de alinhamento e aproximação ao cabo, para deixar o módulo no cabo, Fig. 4.35(d). Após o contato da chave de fim de curso inferior o eletroímã é desligado e um sinal sonoro é enviado para a unidade de solo. Após o sinal sonoro o operador do drone realiza o voo na vertical ascendente, Fig. 4.35(e) e finaliza a etapa da entrega do módulo com o pouso do drone, Fig. 4.35(f).

A Figura 4.36 mostra o funcionamento do sistema de visão para orientar os movimentos para deixar o módulo robótico no cabo (imagens apresentam reflexos de luz, uma vez que foram filmadas de uma tela exposta à luz solar).

Figura 4.35 - Procedimento para deixar o módulo no cabo: (a) início do voo; (b) posicionamento do drone acima do cabo; (c) aproximação do cabo; (d) entrega do módulo; (e) afastamento do drone do cabo; (f) finalização da tarefa com o pouso do drone.



Fonte: Autor.

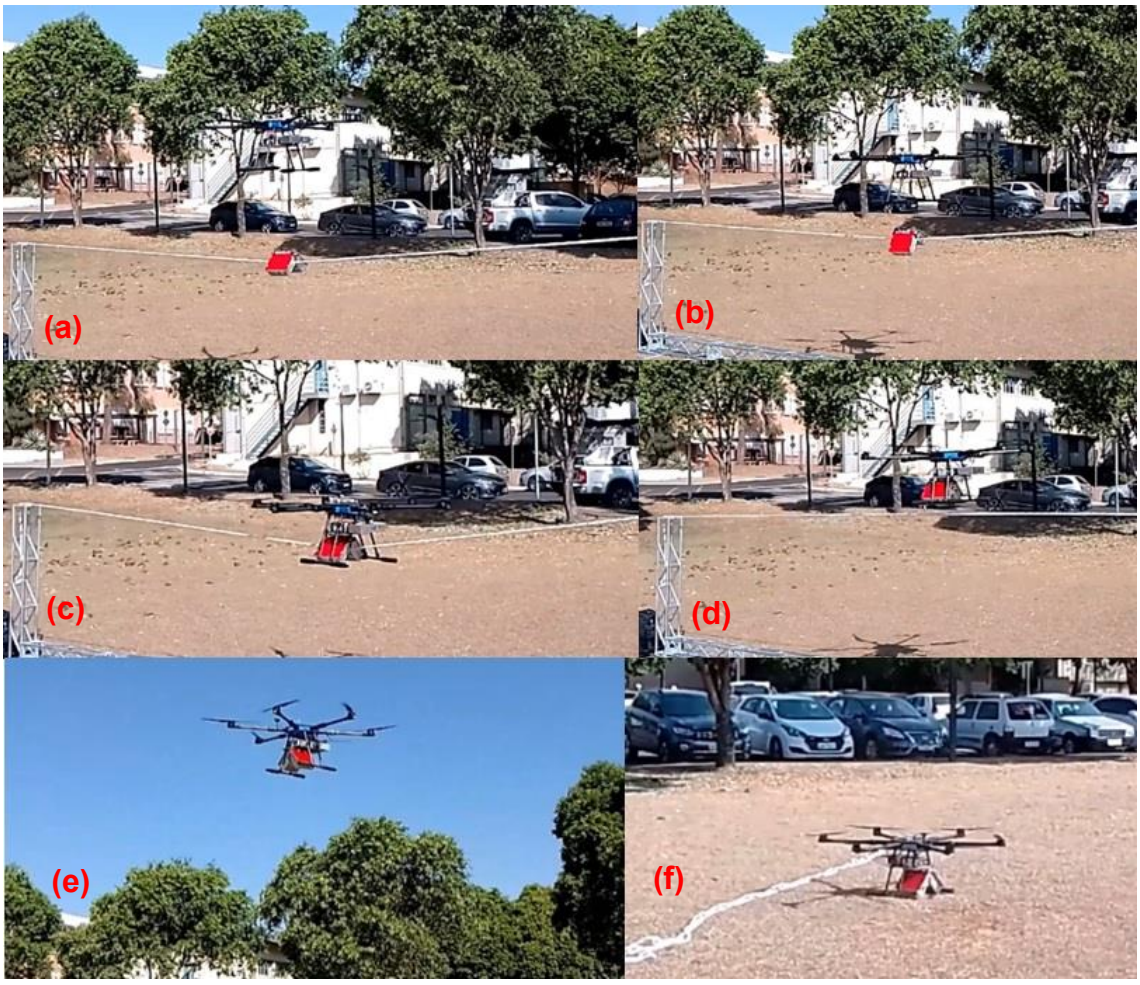
Figura 4.36 - Imagens do sistema de visão para entrega do módulo (a) seta indicando localização da linha, (b) linha detectada (c) aviso de que o pouso pode ser realizado.



Fonte: Autor.

A Figura 4.37 mostra a sequência para buscar o módulo utilizando-se do drone. A aproximação ao cabo ocorre com operações manuais do operador do drone, Fig. 4.37(a). Na sequência, com o auxílio do sistema de visão, é realizado o processamento de imagens para localização do módulo no cabo, Fig. 4.37(b), e realizado o pouso sobre o módulo para acoplamento no eletroímã, Fig. 4.37(c). Após ser identificado o acoplamento a partir do acionamento das chaves de fim de curso na parte superior do módulo, realizado por um sinal audível emitido pela unidade de recepção de controle no solo, o operador do drone faz a retirado do módulo com voo na vertical ascendente, Fig. 4.37(d). Manualmente o operador pousa o conjunto drone-robô, Fig. 4.37(e-f).

Figura 4.37 - Procedimento para retirada do módulo do cabo: (a) Posicionamento manual do drone sobre o cabo; (b) posicionamento fino no cabo a partir do sistema de visão; (c) acoplamento do drone no módulo; (d) retirada do módulo do cabo; (e) voo do drone para pouso; (f) pouso do conjunto drone-módulo robótico.



Fonte: Autor.

A Figura 4.38 mostra o funcionamento do sistema de visão para orientar os movimentos para buscar o módulo robótico no cabo (imagens apresentam reflexos de luz, uma vez que foram filmadas de uma tela exposta à luz solar).

Figura 4.38 – Imagens do sistema de visão para busca do módulo (a) descrição da tela, (b) mensagem avisando que o pouso pode ser realizado.



Fonte: Autor.

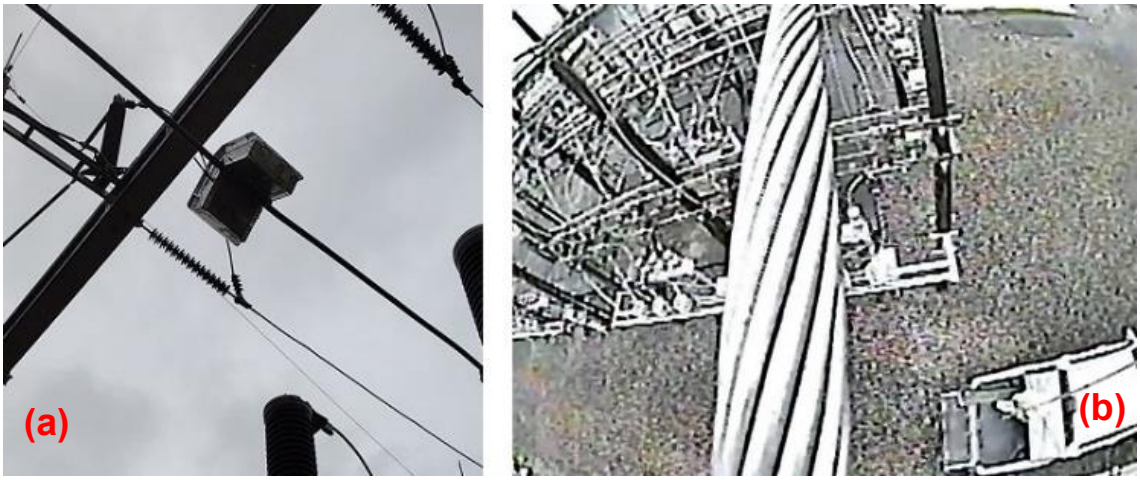
Das Figuras 4.35 a 4.38 verifica-se que é factível a ideia de utilizar o drone como meio de transporte para o posicionamento e retirada do módulo robótico do cabo de alta tensão ou para-raios. Esta solução permite que o módulo consiga uma flexibilidade maior de locomoção ao longo da linha utilizando-se do drone para transposição de obstáculos quando necessário. Destaca-se que a solução para liberar e buscar o módulo robótico ocorre de forma semiautomatizada, sendo o voo do drone realizado por um operador em solo.

4.4.7 Teste da interferência eletromagnética com o módulo de remoção de detritos colocado manualmente no cabo.

Para testar o efeito da blindagem eletromagnética projetada, foram realizados testes em uma subestação da CELESC em Joinville/SC. O módulo de remoção de detritos foi inserido em contato com uma linha de 138 kV, com o auxílio de uma vara de manobra (Fig. 4.39).

Percebeu-se que após a equalização de potencial, o módulo funcionou adequadamente sobre a linhas. Os comandos enviados via celular foram executados normalmente pelo robô. Após a retirada do módulo da linha, os componentes internos apresentaram funcionamento normal. Este teste mostrou a eficácia da blindagem projetada.

Figura 4.39 – Módulo de remoção de detritos sobre estrutura de uma subestação a 138 kV: (a) imagem da câmera externa; (b) imagem da câmera acoplada ao módulo.

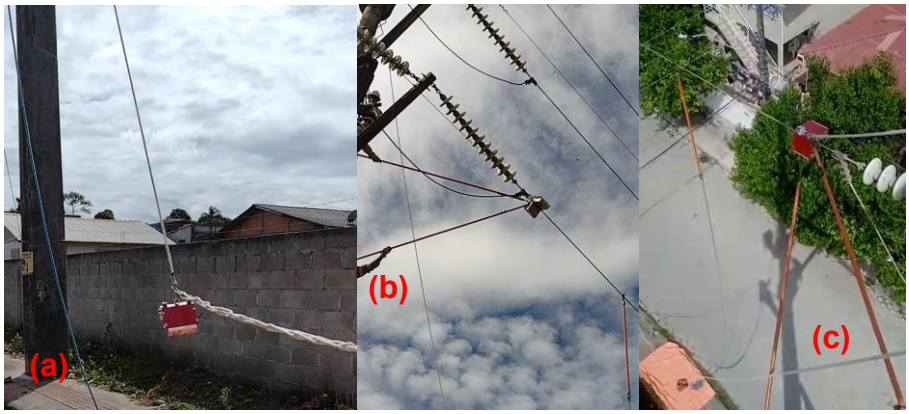


Fonte: Autor.

4.4.8 Testes de remoção de detritos sobre linha de 138kV energizada

Com o objetivo de testar o módulo robótico em operação na prática, foram realizados testes em linha viva de 138 kV com condutor de diâmetro de 18,29 mm. A tensão média no momento do teste foi de 141,221 kV e a corrente média de 255,55 A. Por questões de segurança, os testes foram realizados com o módulo na configuração para inserção manual pelos técnicos. O robô foi içado com o auxílio de um sistema de cordas, para transportá-lo do chão ao alto, e em seguida inserido no cabo com uma vara de manobra, por vários operadores especializados no trabalho com linhas vivas. A Figura 4.40(a) mostra o içamento do módulo por cordas, do solo em direção ao técnico posicionado no topo do poste.

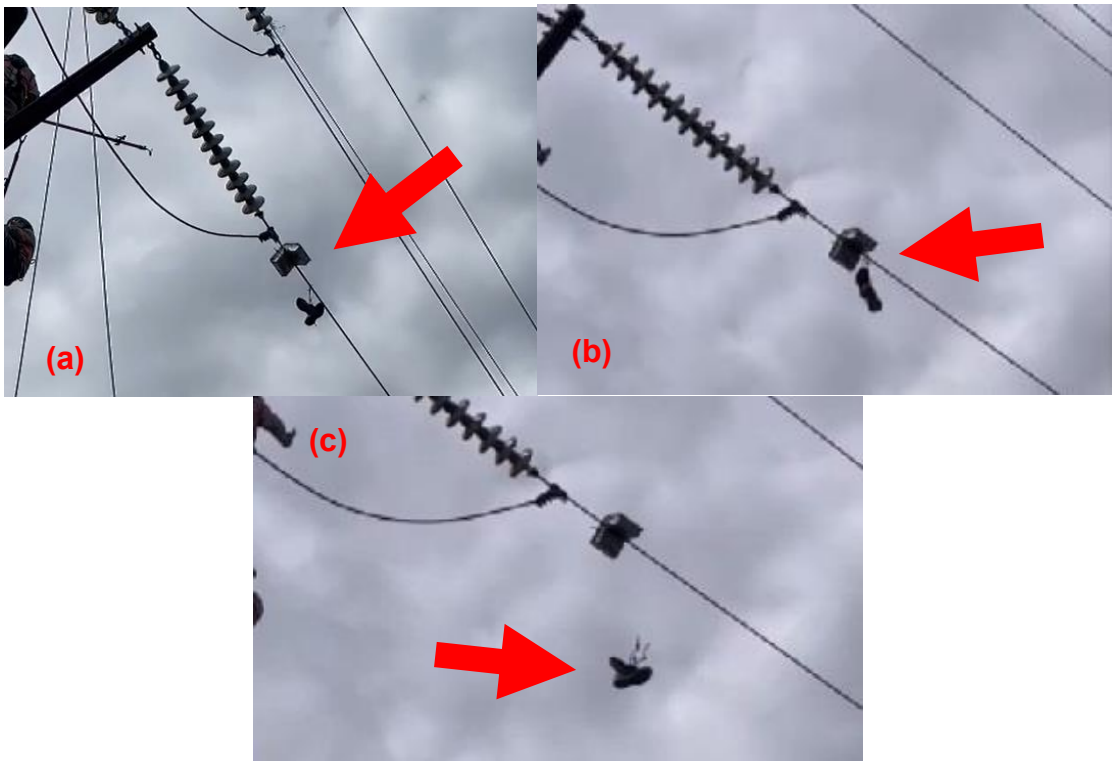
Figura 4.40 - Procedimento para inserção do módulo manualmente no cabo: (a) içamento do robô por corda; (b) posicionamento do robô no cabo energizado; (c) retirada da corda do módulo.



Fonte: Autor.

Quando do contato do robô no cabo, ocorre a equalização de potencial, Fig. 4.40(b). Após esta etapa, é verificado se o módulo robótico está recebendo os comandos necessários para sua movimentação. Logo em seguida, a queima do detrito é realizada. As Figuras de 4.41 a 4.43 mostram de diferentes ângulos o módulo robótico realizando a movimentação no cabo e a remoção do detrito (par de tênis).

Figura 4.41 – Remoção do par de tênis da linha de alta tensão, pela visão da câmera em solo: (a) movimentação do módulo, (b) aproximação do maçarico ao ponto de queima do tênis, (c) queima e queda do tênis.



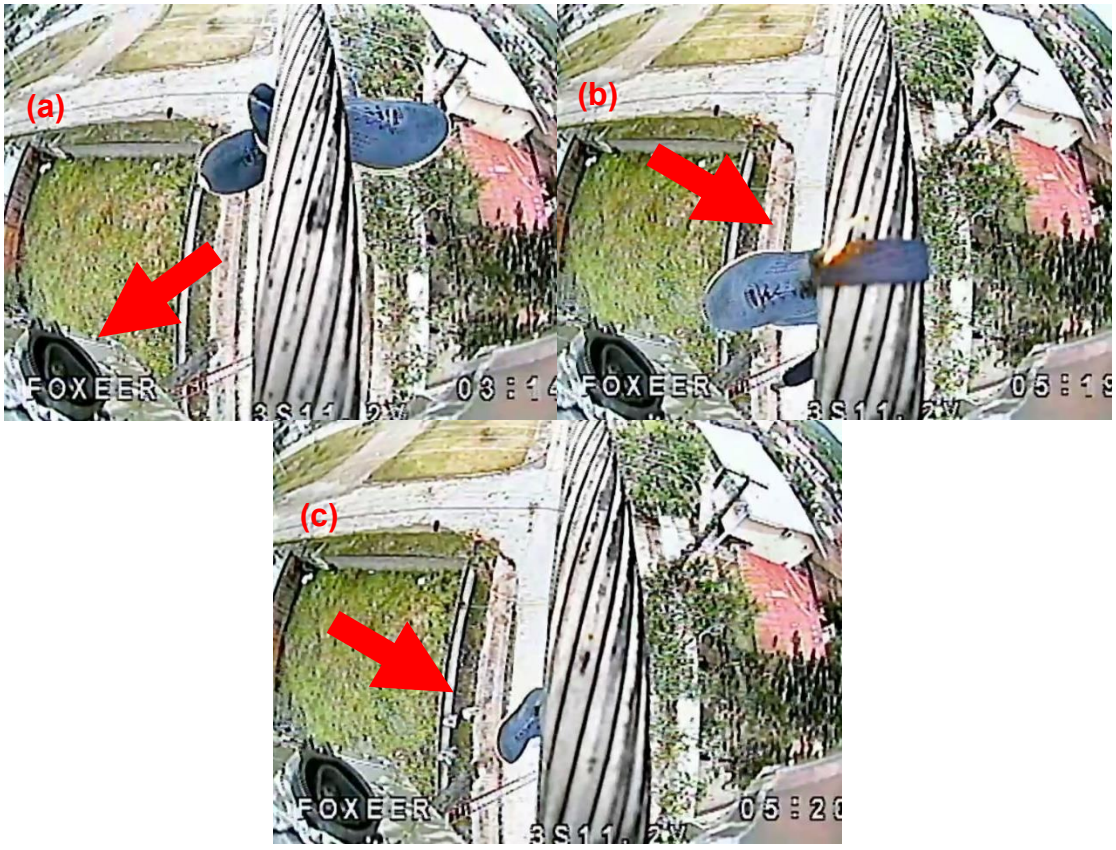
Fonte: Autor.

Figura 4.42 – Remoção do tênis da linha de alta tensão, pela visão da câmera na altura do poste: (a) aproximação do maçarico ao ponto de queima do tênis; (b) queima e queda do par de tênis.



Fonte: Autor.

Figura 4.43 – Remoção do par de tênis da linha de alta tensão, pela visão da câmera do módulo: (a) movimentação do módulo; (b) maçarico atuando no ponto de queima do cadarço do par de tênis; (c) queda do par de tênis.



Fonte: Autor.

Com os testes experimentais realizados na linha viva de 138kV verificou-se que a massa compacta do módulo robótico facilitou a colocação e retirada deste no cabo a partir da utilização de varas de manobra. A blindagem do módulo robótico funcionou permitindo o recebimento dos comandos enviados a partir da unidade de solo para movimentação ao longo do cabo. O sistema de transmissão de vídeo da câmera embarcada no módulo robótico permitiu o posicionamento deste para remoção do detrito simulado como sendo um par de tênis. O acionamento intermitente do maçarico permitiu a incineração do detrito sem a provocação de focos de incêndios e sem danificar o cabo de alumínio.

No *link* a seguir encontram-se vídeos dos testes experimentais: https://drive.google.com/drive/folders/1AElOC65P944Xz8pGmSt7kThyb79BbLCI?usp=drive_link

A utilização deste módulo elimina a necessidade de desligamento das linhas para a movimentação dos técnicos ao longo destas para a remoção dos detritos. Com a utilização do drone para liberar e buscar o módulo robótico, será eliminada também a necessidade de subida dos técnicos nos postes ou estruturas metálicas. Destaca-se a necessidade de validação do conjunto drone-módulo robótico em linhas vivas em trabalhos futuros.

Ao final deste Capítulo, validou-se o módulo desenvolvido, ao ser provado que, a blindagem, o funcionamento remoto por comandos em terra, o posicionamento via câmera e a queima funcionam na situação real como fora simulado no laboratório. Importante ressaltar que o módulo robótico pode operar de forma autônoma sobre a linha sem necessitar de ser transportado pelo drone. Basta que operadores de linha viva o coloquem sobre a linha. Inovações conseguidas com isto foram a dispensa de operadores de linha viva que se locomovem diretamente nas linhas, eliminação da necessidade de desligamento de linhas para operações de manutenção, além da rapidez e eficiência do processo.

Em testes simulados em laboratório, a solução completa do drone robô envolvendo o transporte do módulo pelo drone e retirada do cabo foi validada. Desenvolvimentos posteriores incluem a validação da operação de liberação e busca do módulo, com o auxílio do drone, sobre linhas energizadas.

CAPÍTULO V

DRONE-ROBÔ PARA INSTALAÇÃO DE AMORTECEDORES DE VIBRAÇÃO STOCKBRIDGE

O terceiro drone-robô proposto nesta tese é o drone-robô para instalação ou remoção de amortecedores de vibração do tipo *stockbridge*. O módulo robótico é transportado e deixado pelo drone no local ou próximo do local de instalação do amortecedor no cabo de alta tensão. O movimento de decolagem, até o posicionamento do drone sobrevoando a linha, é efetuado por meio de imagens de uma câmera RGB embarcada no drone, que permite ao operador as ações de voo manual. Um sistema de reconhecimento da linha e pouso automático permite a liberação do módulo sobre a linha. A partir de então, o módulo funciona de forma autônoma sobre o cabo. O início da operação do módulo é realizado por um operador que se situa em solo por comandos enviados por rádio frequência. Este módulo pode se locomover com o auxílio de rodas até a posição de instalação do amortecedor. Após o comando do operador, a instalação do amortecedor se dá de forma completamente automatizada, que envolve posicionamento do amortecedor na linha e seu aparafusamento.

Destaca-se que o módulo robótico pode ser posicionado também manualmente com a utilização de técnicos das companhias energéticas habilitados a trabalharem em linhas vivas.

Após a instalação do amortecedor, o drone pode recolher o módulo robótico retornando ao solo. A operação de instalação pode ser repetida para a instalação de um novo amortecedor caso necessário. Também é possível desinstalar amortecedores do tipo *stockbridge* previamente presentes na linha e trazê-los ao solo.

Este Capítulo detalha o desenvolvimento do drone-robô em questão. Contém a revisão da literatura; justificativa; metodologia aplicada; resultados e discussões; e por fim, conclusões relativas à esta etapa da tese.

5.1 Revisão bibliográfica

As linhas aéreas de transmissão de energia elétrica estão submetidas à ação de ventos que geram vibrações eólicas nestas. Estas vibrações podem provocar danos e fadiga aos cabos. Para controlar as vibrações induzidas pela ação dos ventos e diminuir os danos decorrentes, são instalados amortecedores de vibração do tipo *stockbridge* nos cabos condutores.

O amortecedor de vibração modelo *stockbridge* (Fig. 5.1) é um dispositivo mecânico acoplado às linhas de alta tensão que tem por fim atenuar as vibrações incidentes nas linhas, causadas pela influência dos ventos. A norma que regulamenta a aplicação de tais equipamentos é a IEC 61897, cuja descrição inclui “aplicação a amortecedores de vibração eólica destinados a condutores simples ou cabos de aterramento ou pacotes de condutores nos quais os amortecedores são diretamente fixados a cada subcondutor” (IEC, 2020).

Figura 5.1 - Modelo de amortecedor de vibração *stockbridge*.



Fonte: Autor.

A escolha do modelo de amortecedor de vibração do tipo *stockbridge* é feita a partir de estudos que levam em consideração o diâmetro, massa, tração, condições climáticas, topográficas e o vão entre as torres. Usualmente, estes amortecedores são aplicados em linhas de transmissão que utilizam somente um cabo por fase (MARCHI, MERINO, 2014). Estes amortecedores podem chegar a ter aproximadamente 600 mm de comprimento e massa entre 1 kg e 7 kg.

Na substituição manual do amortecedor de vibração do tipo *stockbridge* em cabo condutor geralmente é necessária uma equipe com no mínimo 3 pessoas. Essa operação pode envolver riscos de queda do eletricista, lesão por queda de ferramental ou materiais. Insetos e animais presentes na torre também são riscos. O transporte e acesso da equipe às linhas, a montagem dos equipamentos para alcançar o cabo e a descida dos eletricistas

das torres são tarefas complexas que consomem muito tempo de trabalho e podem causar diversos problemas de saúde. O tempo médio de instalação do amortecedor é de 20 minutos, sem levar em consideração o tempo para acesso, montagem dos equipamentos para alcançar o cabo e descida dos eletricistas das torres (COPEL, 2015).

A instalação dos amortecedores de vibração do tipo *stockbridge* pode ser feita também com o auxílio de helicópteros. Neste caso, o eletricista fica em uma plataforma fora do helicóptero e com pequenos movimentos sincronizados realiza as instalações utilizando-se de ferramentas especiais adaptadas para tal. Deve-se destacar que o uso de helicópteros pode apresentar riscos de queda ao técnico, riscos de colisão com os cabos e torres, indisposição, mal-estar do eletricista ou piloto e possibilidade de pane do helicóptero. Destaca-se ainda que os amortecedores *stockbridge* são instalados próximos das cadeias de isoladores e da torre, dificultando a instalação por helicópteros.

Conforme apresentado, os riscos aos operadores/técnicos são imensos na realização da instalação dos amortecedores de vibração *stockbridge*. Assim, diversos pesquisadores têm estudado soluções automatizadas, geralmente com o uso de robôs para realizar esta tarefa de manutenção (GONÇALVES; CARVALHO, 2013).

Na literatura existe um robô complexo capaz de transpor alguns obstáculos e alguns tipos de torres, que possui uma ferramenta capaz de instalar os amortecedores (Fig. 5.2). Este robô precisa de vários operadores para posicioná-lo no cabo de alta tensão em função de sua massa elevada (POULIOT; RICHARD; MONTAMBAULT, 2015).

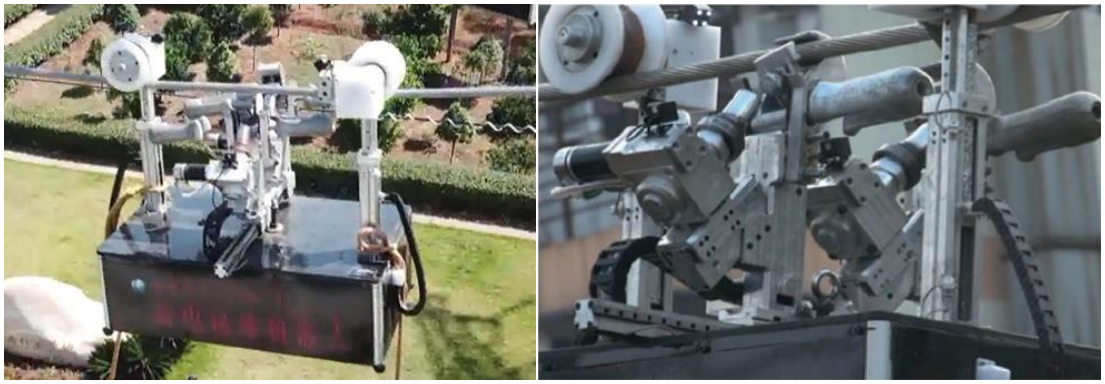
Figura 5.2 - Robô Linescout para instalação de amortecedores de vibração.



Fonte: POULIOT, N.; RICHARD, P.-L.; MONTAMBAULT, S. LineScout technology opens the way to robotic inspection and maintenance of high-voltage power lines. **IEEE Power and Energy Technology Systems Journal**, Vol. 2, nº 1, 2015. DOI: 10.1109/JPETS.2015.2395388.

Também foi encontrado um trabalho que apresenta um robô móvel suspenso por cabo capaz de realizar a tarefa de instalar amortecedores de vibração do tipo *stockbridge* a partir de mecanismos robóticos (Fig. 5.3). Este robô é capaz de transpor alguns obstáculos presentes nos cabos de alta tensão e precisa de operadores para colocá-lo no cabo (JIANG et al, 2019).

Figura 5.3 – Robô para instalação e remoção de amortecedores de vibração.



Fonte: JIANG, W.; YAN, Y.; YU, L.; PENG, M.; LI, H.; CHEN, W. Research on dual-arm coordination motion control strategy for power cable mobile robot. **Transactions of the Institute of Measurement and Control**, Vol. 41, no. 11, p. 3235-3247, 2019. DOI: 10.1177/0142331218822717

Chen (2020) propôs e construiu uma garra robótica pneumática para melhorar as capacidades de robôs aplicados na manutenção. O autor garante que ela pode levantar mais de 21 vezes o seu próprio peso e vários componentes, como um amortecedor de vibração *stockbridge*. Testes bem-sucedidos de resistência à interferência eletromagnética também foram realizados em tensões de 500 kV a 1000 kV com um robô com essa garra.

Não foram encontradas na literatura nem em fabricantes aplicações que envolvam VANTs para instalação ou remoção de amortecedores de vibração *stockbridge*. Desta forma, esta tese apresenta uma nova arquitetura de drone-robô para ser aplicado na manutenção do sistema de transmissão de energia elétrica para realizar a instalação/remoção de amortecedores de vibração do tipo *stockbridge*.

5.2 Justificativa

Idealmente, as linhas de transmissão devem funcionar sem pausas para manutenção, já que tal interrupção pode ocasionar prejuízos à sociedade, e em casos extremos causar até mesmo a morte de pessoas hospitalizadas que dependem de equipamentos médicos

para sua sobrevivência. Segue-se que as operações de manutenção sobre as linhas são imprescindíveis para garantir sua funcionalidade sem maiores problemas. Dentre os componentes fundamentais para o funcionamento adequado das linhas estão os amortecedores de vibração do tipo *stockbridge*.

A manutenção com a utilização de helicópteros, com operadores fixos em plataformas externas, também apresenta riscos de queda e maiores acidentes com os operadores, além dos altos custos associados ao uso e adaptação dos helicópteros, sendo esta modalidade raramente empregada devido aos riscos decorrentes da proximidade com as torres e cadeias de isoladores.

Os robôs suspensos por cabos, que são alternativas para os processos descritos, possuem a grande desvantagem de necessitarem de os operadores/técnicos escalarem a torre para o posicionamento dos robôs. Além disso, nos cabos condutores existem diversos elementos que se tornam obstáculos para os robôs móveis como cadeias de suspensão, esferas de sinalização, isoladores, luvas, espaçadores, grampos, amortecedores de vibração do tipo pré-formado ou *stockbridge*, espantadores de pássaros, emendas e diferentes tipos de torres. Assim, as soluções presentes na literatura não conseguem transpor facilmente todos os tipos de obstáculos existentes, são complexas, pesadas e difíceis de serem inseridas nos cabos.

Desta forma, a invenção apresentada nesta tese, que utiliza um módulo robótico acoplado a um drone difere dos presentes na literatura por permitir facilmente o transporte do módulo robótico à posição de instalação do amortecedor e por apresentar um mecanismo instalador do amortecedor de vibração do tipo *stockbridge* diferente dos existentes nos robôs presentes na literatura.

Não foram encontrados na literatura nem nos catálogos de empresas um sistema que agrega um drone e um robô modular compacto para instalação de amortecedores *stockbridge*, conforme esta tese propõe.

O principal objetivo desta invenção é reduzir a possibilidade de acidentes com os operários/técnicos que realizam este tipo de manutenção. O acoplamento deste módulo robótico ao drone permite a transposição de todos os obstáculos presentes nos cabos de alta tensão e cabo para-raios, além de permitir a movimentação do drone-robô entre as torres. Este drone-robô também diminui os riscos aos operadores por não ser necessária à sua inserção nos cabos pela escalagem das torres de alta tensão.

O módulo robótico desenvolvido possui massa pequena, menor que 12 kg, quando comparado com as outras soluções propostas que possuem massa elevada. Este módulo pode ser posicionado no cabo também a partir de técnicos utilizando-se de varas de manobra, quando da não possibilidade da utilização do drone.

O drone-robô proposto e desenvolvido possui relevância científica, pois foi concebido, projetado e construído com base em cálculos matemáticos e métodos científicos que comprovam a sua viabilidade, conforme descritos ao longo deste Capítulo. Além disso, apresenta projeto inovador de blindagem eletromagnética e eletrostática. Portanto, justifica-se a inovação da solução proposta, como promissora no setor de manutenção de linhas de transmissão.

5.3 Metodologia

Para o desenvolvimento do módulo robótico em questão, foi concebida uma estrutura que pode ser transportada por um drone a partir de uma base no chão e posicionada no cabo. Após essa etapa, o módulo se desloca de forma autônoma ao longo do cabo até o local de instalação do amortecedor *stockbridge*, onde ocorre a fixação deste por meio de um sistema de motores e eixos. Após a fixação, o módulo transpõe o amortecedor instalado, se movimentando ao longo do cabo até o ponto onde pode ser buscado pelo drone e trazido de volta à terra.

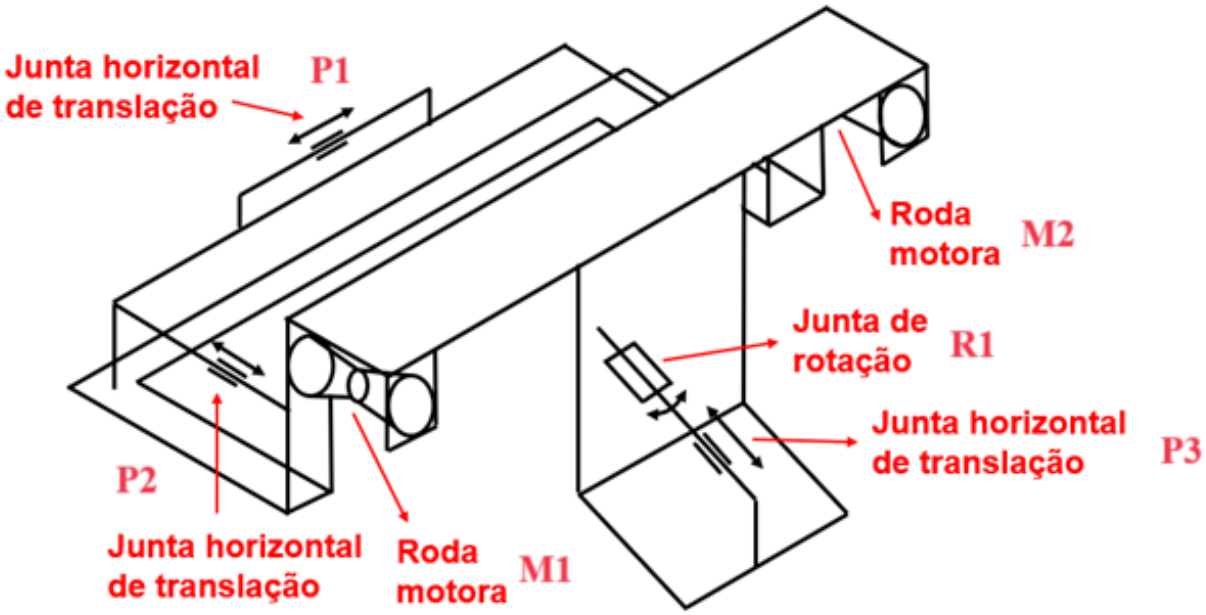
A estrutura mecânica proposta utiliza a sua própria geometria como guia durante o processo de posicionamento no cabo. Além disso, durante a instalação, o amortecedor é suportado dentro da estrutura, facilitando todo o processo.

O drone-robô para instalação de amortecedores *stockbridge* foi desenvolvido em várias etapas, desde sua concepção até a sua validação com testes realizados em campo. O desenvolvimento deste envolveu as seguintes etapas: modelagem matemática; projeto em CAD e CAE; fabricação da estrutura; projeto do sistema eletrônico e de controle; blindagem eletromagnética e eletrostática; testes em laboratório e por fim testes em campo, para validação do drone-robô em questão.

5.3.1 Modelagem matemática do drone-robô

A arquitetura base do módulo robótico, Fig. 5.4, foi desenvolvida em função das atividades necessárias para instalação do amortecedor no cabo. É necessário um sistema para prender o amortecedor na estrutura do robô (P1); um mecanismo para movimentar o amortecedor na direção do cabo, P2, (pois o centro do módulo robótico deve estar livre para o acoplamento deste no cabo pelo drone, e a presença do amortecedor neste local impediria tal acoplamento) e um mecanismo para aparafusamento do amortecedor, R1, (com um mecanismo de avanço/recuo para permitir que o centro do robô fique livre após a instalação), P3. A movimentação do módulo ao longo do cabo será realizada por duas rodas denominas M1 e M2. A Figura 5.4 apresenta o esquema cinemático do módulo robótico.

Figura 5.4 - Esquema cinemático do módulo de instalação de amortecedores.



Fonte: Autor.

Neste tópico é apresentada a modelagem matemática do módulo robótico para instalação/desinstalação de amortecedores do tipo *stockbridge*. Realizou-se primeiramente esta modelagem para posteriormente prosseguir com o projeto do módulo em CAD/CAE.

Os tópicos dessa modelagem matemática são:

- Cálculo da tração das rodas de translação do módulo;
- Torque necessário para o aperto do parafuso.
- Dimensionamento do fuso para fixação do amortecedor na estrutura;
- Torque necessário para translação do motoredutor em direção ao parafuso do amortecedor.

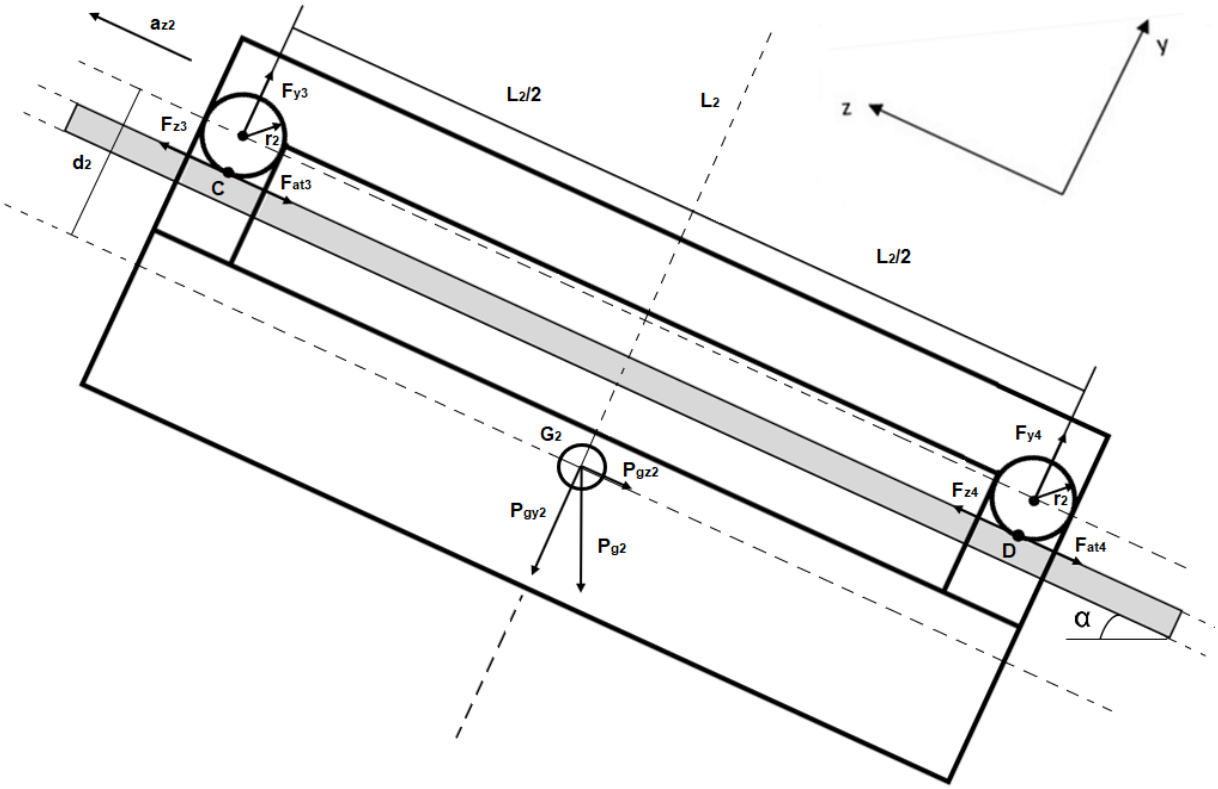
Cálculo da tração das rodas de translação do módulo

Este módulo apresenta em seu projeto duas rodas para translação completa da estrutura. Levando em conta dados como a massa total, centro de massa, e outras variáveis, calcula-se o torque de acionamento necessário para movimentar o módulo. Este cálculo leva em conta o coeficiente de atrito da roda, para evitar deslizamento em que a roda giraria em falso.

A Figura 5.5 mostra o esquema do módulo robótico em uma vista lateral. Por meio deste esquema é possível determinar a ação das forças F_{z3} e F_{z4} para o cálculo do torque

necessário que o motor deve desempenhar para conseguir movimentar o módulo sobre o cabo.

Figura 5.5 – Esquema representativo da vista lateral do módulo de instalação de amortecedores *stockbridge*.



Fonte: Autor.

Na Figura 5.5, as variáveis são:

- P_{g2} – força peso sobre o módulo
- P_{gz2} – componente da força peso na direção z
- P_{gy2} – componente da força peso na direção y
- a_{z2} - aceleração desenvolvida na direção z
- α – ângulo da catenária do cabo
- L_2 – distância entre os centros das duas rodas em z
- d_2 – distância entre o centro das duas rodas e o centro de massa no eixo vertical em y
- F_{at3} – força de atrito na roda sobre o ponto C
- F_{at4} – força de atrito na roda sobre o ponto D
- F_{z3} – força de tração na roda sobre o ponto C

- F_{z4} – força de tração na roda sobre o ponto D
- F_{y3} – força normal aplicada pelo cabo na roda sobre o ponto C
- F_{y4} – força normal aplicada pelo cabo na roda sobre o ponto D
- m_2 – massa do módulo robótico

Considerando o equilíbrio de momentos em torno do ponto C (M_C), tem-se (Eq. 5.1):

$$\sum M_C = 0 \tag{5.1}$$

Adotando o sentido horário como positivo, tem-se (Eq. 5.2):

$$-F_{y3} \cdot L_2 + P_{gy2} \cdot \frac{L_2}{2} - P_{gz} \cdot (d_2 - r_2) + m_2 \cdot a_{z2} \cdot (d_2 - r_2) = 0 \tag{5.2}$$

Com (Eq. 5.3):

$$P_{gy2} = P_{g2} \cdot \cos\alpha \;\; ; \;\; P_{gz2} = P_{g2} \cdot \operatorname{sen}\alpha \tag{5.3}$$

Reorganizando os termos, tem-se a expressão para F_{y3} (Eq. 5.4):

$$F_{y3} = \frac{-(P_{gz2} - m_2 \cdot a_{z2}) \cdot (d_2 - r_2) + \frac{1}{2} \cdot P_{g2} \cdot L_2}{L_2} \tag{5.4}$$

Considerando o equilíbrio de momentos em torno do ponto D (M_D), tem-se (Eq. 5.5):

$$\sum M_D = 0 \tag{5.5}$$

Adotando o sentido horário como positivo, tem-se (Eq. 5.6):

$$F_{y3} \cdot L_2 - P_{gy2} \cdot \frac{L_2}{2} - P_{gz2} \cdot (d_2 - r_2) + m_2 \cdot a_{z2} \cdot (d_2 - r_2) = 0 \tag{5.6}$$

Reorganizando os termos, tem-se a expressão para F_{y3} (Eq. 5.7):

$$F_{y3} = \frac{(P_{gz2} - m_2 \cdot a_{z2}) \cdot (d_2 - r_2) + \frac{1}{2} \cdot P_{gy2} \cdot L_2}{L_2} \quad (5.7)$$

Considerando o equilíbrio de momentos em torno do ponto G_2, (M_{G2}) tem-se (Eq. 5.8):

$$\sum M_{G2} = 0 \quad (5.8)$$

Adotando o sentido horário como positivo, tem-se (Eq. 5.9):

$$(F_{y3} - F_{y4}) \cdot \frac{L_2}{2} - (F_{z3} + F_{z4}) * (d_2 - r_2) + (F_{at3} + F_{at4}) \cdot (d_2 - r_2) = 0 \quad (5.9)$$

Se considerarmos $F_{z3} = F_{z4} = F_{zz}$, tem-se que (Eq. 5.10):

$$2F_{zz} = \frac{(F_{y3} - F_{y4}) \cdot \frac{L_2}{2} + (F_{at3} + F_{at4}) \cdot (d_2 - r_2)}{d_2 - r_2} \quad (5.10)$$

Substituindo F_{y3} e F_{y4} da equação 5.10 pelas expressões das equações 5.4 e 5.7, após manipulações matemáticas, encontra-se (Eq. 5.11):

$$2F_{zz} = (P_{gz2} - m_2 \cdot a_{z2}) + F_{at3} + F_{at4} \quad (5.11)$$

As forças de atrito são calculadas conforme a equação 5.12, onde μ é o coeficiente de atrito dinâmico (Eq. 5.12):

$$F_{at3} = \mu \cdot F_{y3} \; ; \; F_{at4} = \mu \cdot F_{y4} \quad (5.12)$$

Pelo equilíbrio de forças, como $F_{y3} + F_{y4} = P_{gy2}$, encontra-se a expressão para o cálculo da força F_{z3} (Eq. 5.13):

$$F_{z3} = \frac{(P_{gz2} - m_2 \cdot a_{z2}) + \mu_2 \cdot P_{gy2}}{2} \quad (5.13)$$

Para determinar o torque do motor, utiliza-se a Eq. 5.14:

$$\tau_2 = F_{z3} \cdot r_2 \tag{5.14}$$

Considerando as grandezas físicas reais do módulo, calculou-se o torque máximo do motor. Esse resultado se encontra na seção 5.4.1.

Torque necessário para aperto do parafuso do amortecedor

O próximo elemento a ser dimensionado é o motor encarregado de realizar a instalação do amortecedor *stockbridge*. A partir do manual do fabricante do amortecedor utilizado tem-se que o torque para aperto do parafuso do amortecedor *stockbridge* deve ser de 40 Nm. Portanto, o motor necessário para tal tarefa deve alcançar ou superar esse valor de torque.

Após pesquisas visando encontrar o modelo que atendesse aos requisitos de torque sem exceder os limites de peso do projeto, encontrou-se o motoredutor F006MW0310, fabricado pela Bosch. Este apresenta massa de 1,100 kg, tensão de alimentação de 24 V e torque máximo de até 48 Nm. Este motoredutor consome aproximadamente 16 A para alcançar um torque de 40 Nm.

Dimensionamento do fuso para transporte do amortecedor

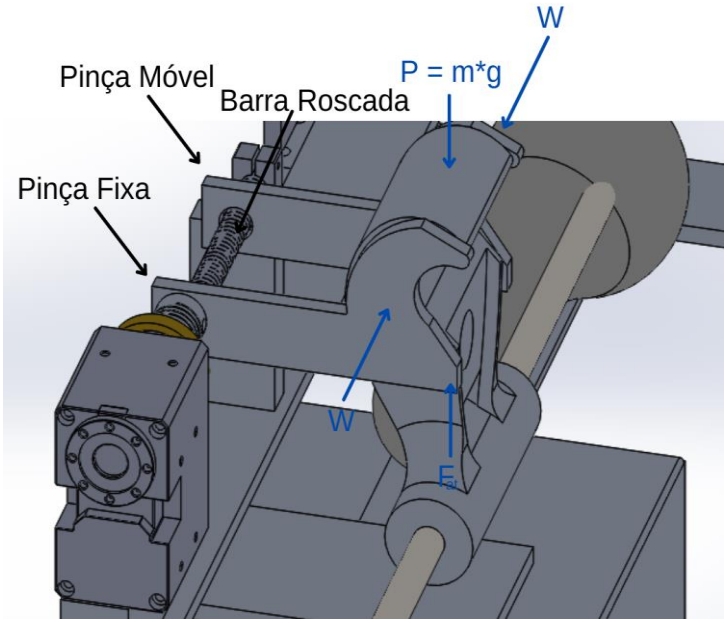
Para realizar a instalação do amortecedor *stockbridge*, foi necessário desenvolver um sistema que atendesse às exigências do projeto em relação à geometria e eletrônica. Dessa forma, foi projetado um sistema com um fuso de transmissão de potência, que é amplamente utilizado em dispositivos de elevação mecânica devido à sua capacidade de auto travamento (Fig. 5.6). Um sistema do tipo fuso foi escolhido para movimentar as pinças de suporte do amortecedor.

O sistema da Fig. 5.6 é composto por duas pinças, um fuso e um servomotor responsável por seu movimento. Para realizar a soltura do amortecedor, é necessário girar a barra, o que consequentemente faz com que a pinça gire em torno do eixo da barra. Após definir o mecanismo, é importante selecionar as propriedades ideais para o fuso e o servomotor. Nesse tipo de aplicação, é comum utilizar o perfil de rosca trapezoidal devido à sua alta resistência a esforços aplicados na direção do eixo.

Com base no passo e diâmetro do fuso, é necessário determinar o torque mínimo necessário para girar todo o sistema. Esse cálculo leva em consideração a exigência de que o fuso escolhido seja auto travante, e para garantir isso é necessário atender ao critério

exposto pela Equação (5.15) (JUVINALL; MARSHEK, 2006). Para que o sistema seja auto travante, o coeficiente de atrito (*f*) deve ser maior que o termo da direita da Eq. (5.15).

Figura 5.6 – Mecanismo de pinça projetado.



Fonte: Autor

$$f \geq L_r \cdot \frac{\cos(\alpha_n)}{\pi \cdot d_m} \tag{5.15}$$

Onde:

- f: coeficiente de atrito entre o material da rosca interna e o material da rosca externa (aço interagindo com latão - utilizado 0,51);
- L_r: passo da rosca;
- α_n: ângulo do perfil da rosca;
- d_m: diâmetro nominal da rosca.

Em seguida, dimensiona-se o motor que seja capaz de fornecer um torque mínimo necessário para suportar o amortecedor com segurança. Para isso, é necessário realizar um cálculo da força normal aplicada à superfície do amortecedor, a fim de evitar que ele escorregue. Para tanto, uma análise estática do sistema foi conduzida, utilizando a Eq. (5.16) como referência (JUVINALL; MARSHEK, 2006).

$$T = \frac{Wd_m}{2} \cdot \frac{f_r \pi d_m - L_r \cos(\alpha_n)}{\pi \cdot d_m \cos(\alpha_n) + f_r L} + \frac{W f_c d_c}{2} \quad (5.16)$$

$$W = \frac{m_a g}{2\mu} \quad (5.17)$$

Onde:

- f_r: coeficiente de atrito entre o material da rosca interna e o material da rosca externa, neste caso, latão interagindo com aço (0,51).
- f_c: coeficiente de atrito entre o material do colar da rosca e de seu apoio, neste caso, latão interagindo com aço (0,51);
- L_r: Passo da rosca (0,002 m);
- α_n: ângulo do perfil da rosca (15º);
- d_m: diâmetro nominal da rosca (0,008 m);
- d_c: diâmetro do colar (0,002 m);
- T: torque do motor [Nm];
- W: esforço a ser suportado pelas pinças [N];
- g: gravidade [m/s²];
- m_a: massa do amortecedor [kg]
- μ_p: coeficiente de atrito entre a pinça e o amortecedor (0,8).

Torque necessário para translação do motoredutor em direção ao parafuso do amortecedor

Para realizar o movimento do motoredutor em direção ao amortecedor para aparafusamento, o motor escolhido precisará mover uma carga de 1,100 kg por cerca de 50 mm. Usando a Eq. (5.18), pode-se calcular o torque necessário para que o motor execute essa tarefa:

$$T = \frac{W_m \cdot d_m}{2} \cdot \left(\mu_m \cdot \sec\left(\frac{15\pi}{180}\right) + \frac{\tan\left(\frac{\alpha\pi}{180}\right)}{1 - \left(\mu_m \cdot \sec\left(\frac{15\pi}{180}\right) \cdot \tan\left(\frac{\alpha\pi}{180}\right)\right)} \right) \quad (5.18)$$

Onde:

- T: torque do motor;

- W_m: carga que o mecanismo precisa carregar (1,100 kg);
- α_n: ângulo do perfil da rosca (15º);
- d_m: diâmetro nominal da rosca (0,008 m);
- μ_m: coeficiente de atrito do material, neste caso, latão interagindo com aço (0,51).

Os resultados dos cálculos da modelagem matemática são apresentados na seção 5.4.1.

5.3.2 Projeto em CAD do módulo de instalação de amortecedores

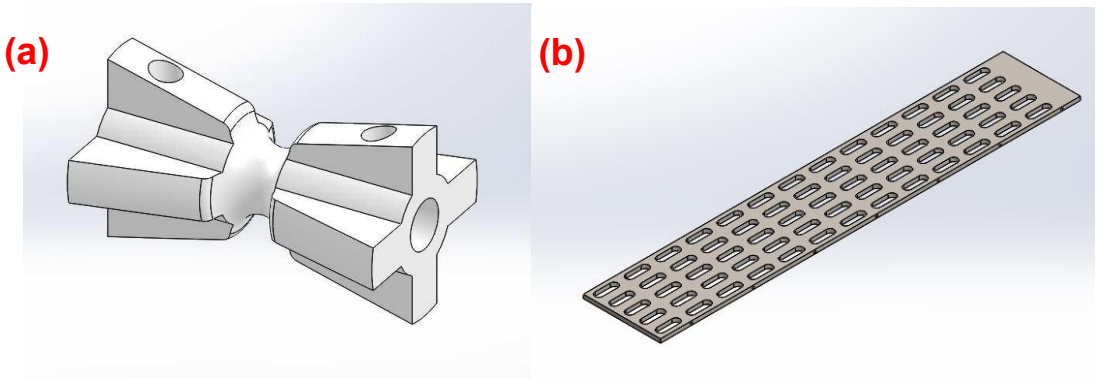
Após a elaboração do esquema cinemático e da modelagem matemática, foi iniciado o desenho do módulo com auxílio de um software de CAD, utilizando-se do software *SolidWorks*. O módulo foi idealizado como uma estrutura a ser transportada por um drone para ser deixado por cima da linha de alta tensão em que o amortecedor será instalado. A estrutura básica foi desenhada com uma abertura na parte inferior, para guiar o módulo quando for posicionado pelo drone na linha.

Como o amortecedor *stockbridge* possui uma geometria complexa, foi necessário um sistema para transladar o amortecedor do interior do robô em direção à linha, quando o robô já estiver sobre a linha de transmissão. Isso foi realizado para evitar que o amortecedor não se choque com a linha, durante o posicionamento do módulo sobre esta. Pelo mesmo motivo, o motoredutor responsável para parafusar o amortecedor também foi posicionado de modo a ser transladado do interior do módulo em direção ao parafuso do amortecedor. O módulo foi projetado tanto para a instalação quanto a desinstalação do amortecedor.

Dois motores de parafusadeira são usados para movimentação do módulo como um todo ao longo da linha. Rodas foram projetadas para permitir o movimento do módulo sobre a linha, de modo a conseguir transpor obstáculos, como o amortecedor já instalado. Foram utilizadas duas polias de material ABS fabricadas por meio de impressão 3D para realizar a translação do módulo ao longo da linha. Essas polias foram projetadas com um espaço interno para a passagem de um eixo de metal, permitindo a fixação do módulo aos acoplamentos elásticos e ao motor. Além disso, a polia possui uma curva central que a mantém alinhada com a linha, Fig. 5.7(a). Essa polia também apresenta cravos especialmente projetados para facilitar a transposição do amortecedor instalado.

Perfis de alumínio foram utilizados ao longo de toda a estrutura. Foi projetada uma placa metálica que, conectada ao drone por meio de uma fechadura magnética, possibilita o acoplamento ao módulo robótico, permitindo sua elevação do chão e soltura no cabo. Visando a redução de massa, a placa superior de alumínio foi furada em um padrão constante, Fig. 5.7(b).

Figura 5.7 – (a) Desenho da polia fabricada em ABS; (b) Placa superior de alumínio.



Fonte: Autor.

As restrições de projeto consideradas foram: massa total do sistema de no máximo 13 kg; centro de massa abaixo das rodas, para evitar quedas devido à perturbação proveniente de ventos; massas e momentos equilibrados dos dois lados do centro de massa, para que o módulo se movimente sem prejuízo de seu equilíbrio sobre a linha e durante o procedimento de instalação do amortecedor.

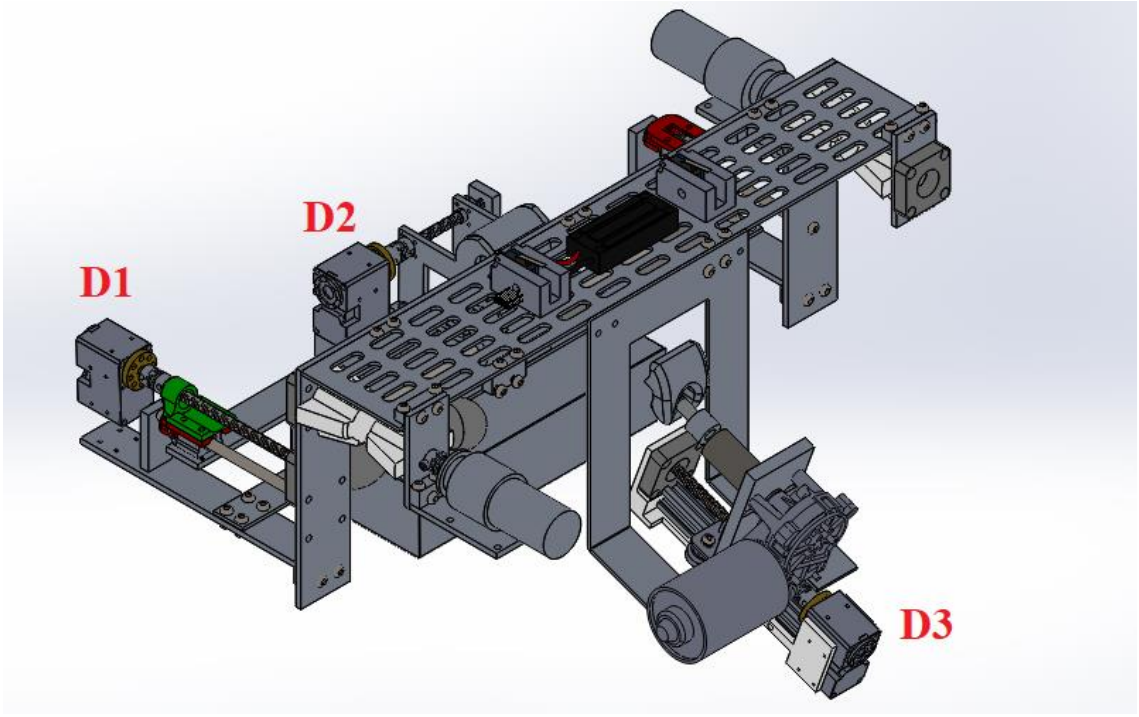
Foram usados 3 motores Dynamixel XM540 para fazer as movimentações (Figura 5.8).

- Dynamixel 1 (D1): responsável pelo movimento da estrutura que carrega o amortecedor;
- Dynamixel 2 (D2): responsável pelo movimento das pinças que fixam/soltam o amortecedor na linha;
- Dynamixel 3 (D3): responsável pelo movimento do motoredutor que realiza o parafusamento do amortecedor na linha;

Os componentes usados para o sistema de transporte do amortecedor (Fig. 5.9) foram:

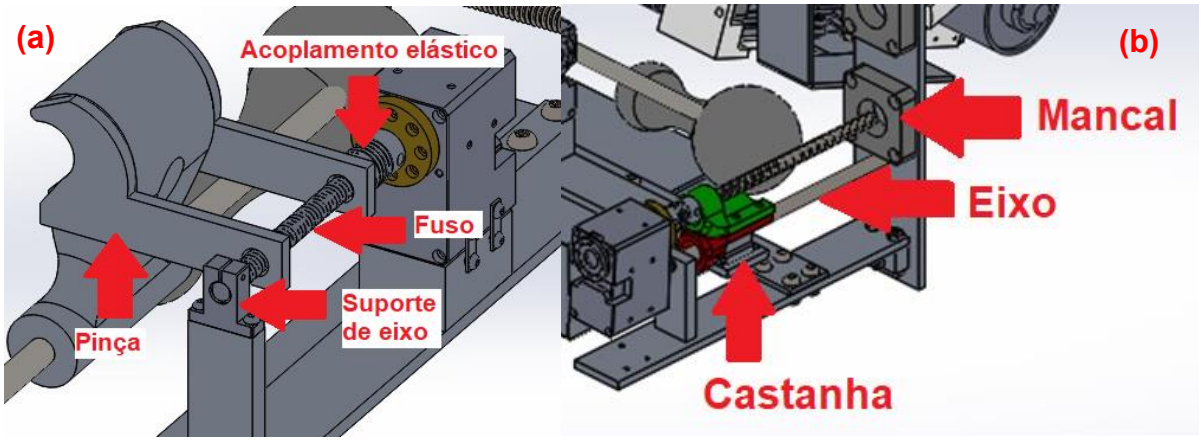
- Eixo retificado;
- Suporte para eixo retificado;
- Fuso (eixo roscado);
- Acoplamento elástico;
- Mancal de rolamento (8 mm);
- Castanha;
- Duas pinças, para transporte do amortecedor ao cabo.

Figura 5.8 – Vista isométrica do módulo robótico com destaque para os motores Dynamixel.



Fonte: Autor.

Figura 5.9 – Exemplos de utilização dos componentes mecânicos na construção do módulo robótico: (a) Região de fixação do amortecedor; (b) Região do mecanismo de translação do amortecedor.



Fonte: Autor.

No procedimento de instalação, a sequência de operações é:

1) O amortecedor é levado pelo módulo em direção ao cabo até encaixar neste,
2) O motor para aparafusamento é transladado em direção ao amortecedor,
3) O aparafusamento é realizado,
4) O amortecedor é solto das pinças de fixação,

5) As peças do módulo voltam para a posição original para permitir a busca do módulo pelo drone.

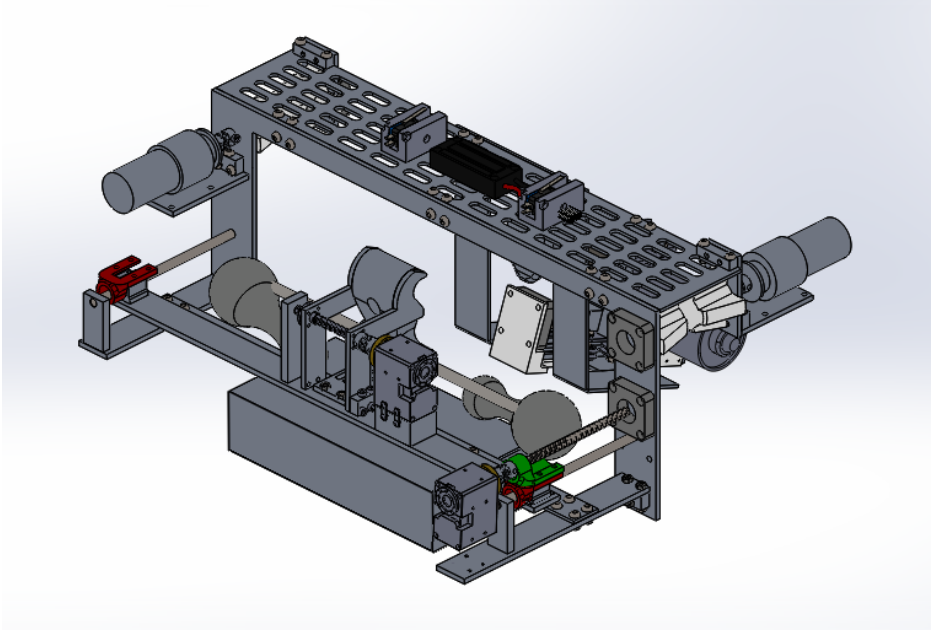
No procedimento de desinstalação, a sequência de operações é a seguinte:

1) Por câmera, o módulo é posicionado de modo que o bocal fique alinhado com a cabeça do parafuso do amortecedor a ser desinstalado.
2) As pinças do módulo são levadas ao cabo em direção ao amortecedor,
3) O motor para desaparafusamento é transladado em direção ao amortecedor,
4) O amortecedor é preso nas pinças de fixação no módulo,
5) O desaparafusamento é realizado,
6) As peças do módulo voltam para a posição original, antes da desinstalação, para permitir a busca do módulo pelo drone.

Um bocal universal foi usado para acoplar o motoredutor ao parafuso do amortecedor. Na instalação, o amortecedor é transportado ao cabo já com a cunha e o parafuso anteriormente rosqueados em sua estrutura. Dessa forma, quando o bocal é transladado em direção ao amortecedor, o parafuso é facilmente rosqueado até o final do curso da rosca do amortecedor a fim de prender adequadamente o amortecedor na linha.

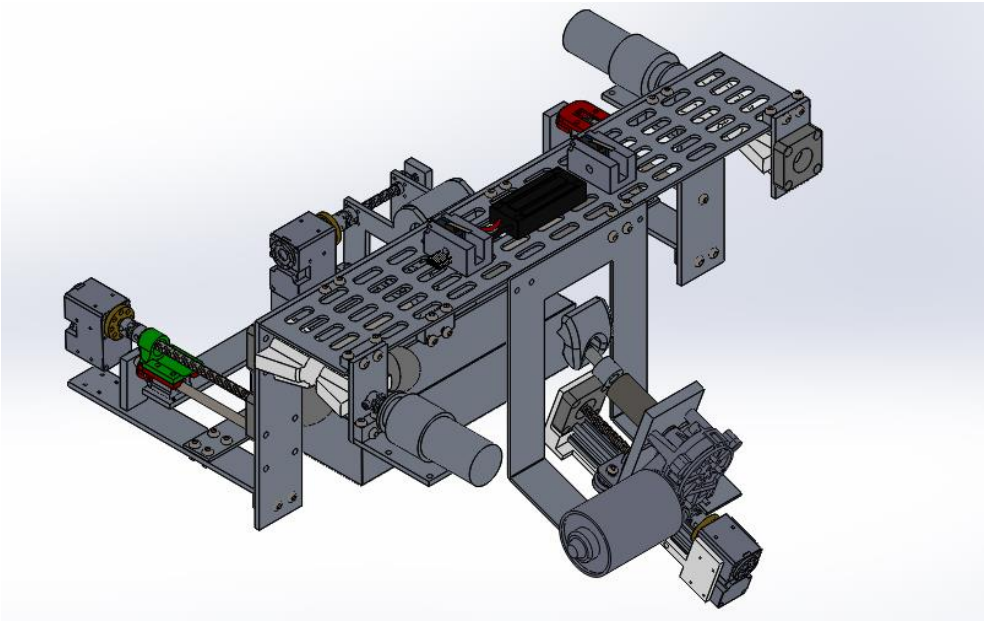
As Figuras 5.10 e 5.11 mostram vistas isométricas do desenho em CAD do módulo.

Figura 5.10 – Vista isométrica em CAD do módulo de instalação de amortecedores *stockbridge*.



Fonte: Autor.

Figura 5.11 – Vista isométrica em CAD do módulo de instalação de amortecedores *stockbridge* (lado oposto).

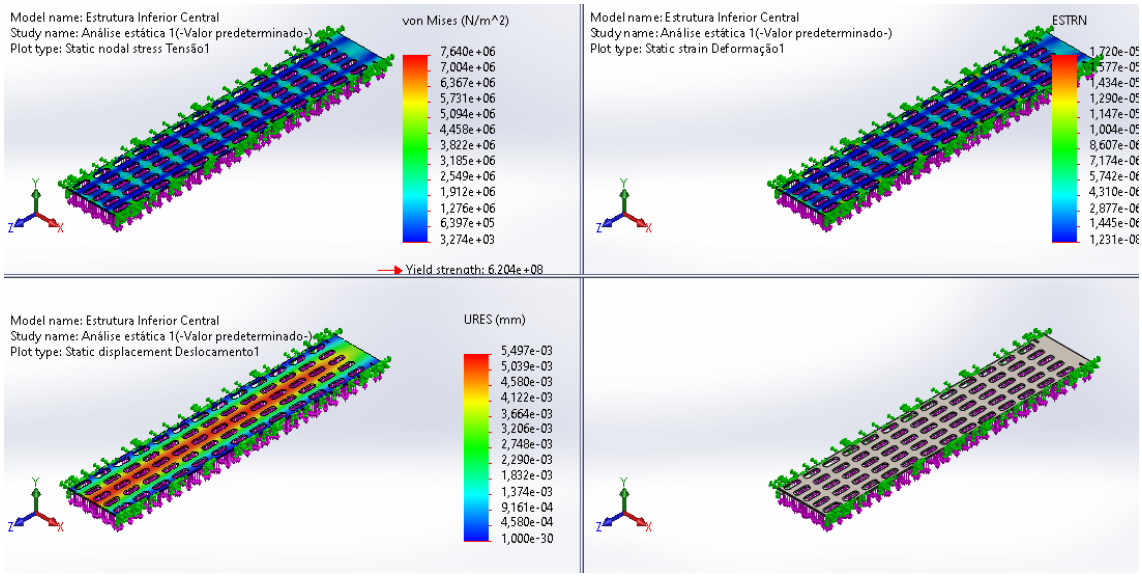


Fonte: Autor.

5.3.3 Simulações em CAE do módulo de instalação de amortecedores

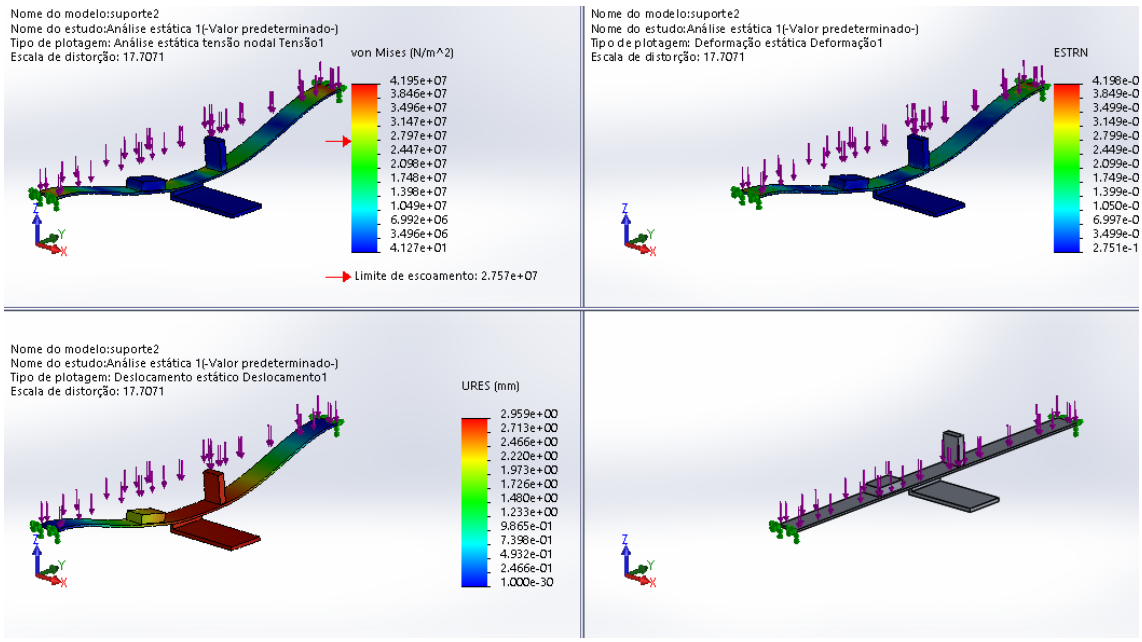
Finalizado o modelo CAD, passou-se para a simulação dos componentes da estrutura projetada. Simulações para avaliação da resistência da estrutura foram efetuadas no *Solidworks* pelo método de elementos finitos. Devido à restrição de massa imposta pelo uso de um VANT para transportar o módulo robótico desenvolvido, é crucial realizar análises estáticas para garantir a conformidade com o limite de peso e evitar possíveis falhas estruturais. As Figuras 5.12 e 5.13 mostram exemplos de simulações realizadas.

Figura 5.12 – Simulações de avaliação da resistência da estrutura do módulo: avaliação da placa superior de alumínio.



Fonte: Autor.

Figura 5.13 – Simulações de avaliação da resistência da estrutura do módulo: chapa suporte do amortecedor e das pinças.



Fonte: Autor.

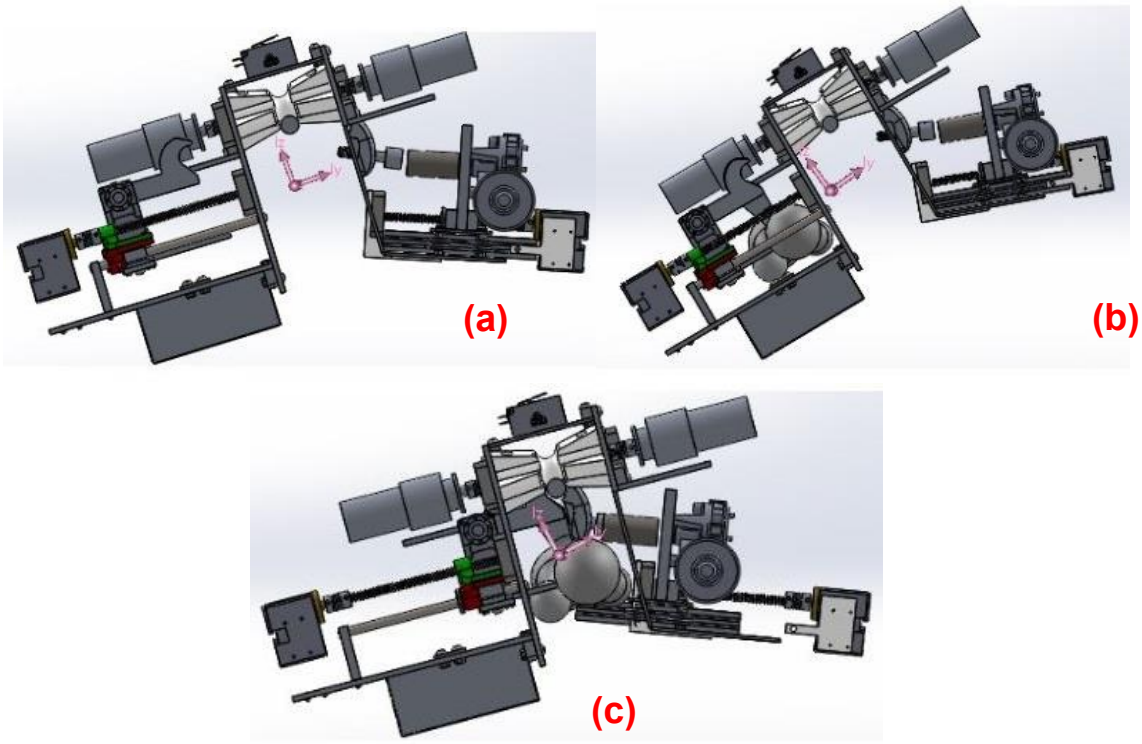
Para atender ao requisito de limitação de massa, foi necessário remover material da estrutura, levando em consideração as análises estáticas realizadas. Através dessas

análises, chegou-se à conclusão de que a liga de alumínio 1060 poderia ser utilizada na estrutura do módulo, pois o material não apresentou rupturas nas simulações CAE.

Em seguida, uma simulação em CAE mostrando o funcionamento completo do módulo foi realizada. Nessa simulação, foi avaliada a posição do centro de massa do módulo durante as operações, a fim de mostrar a estabilidade do mesmo em todos os momentos em que trabalha sobre a linha de alta tensão, de forma que não sofra quedas.

Além das análises estáticas, também foram realizadas simulações dinâmicas com o módulo sobre o cabo. Esses estudos permitiram realizar diversos testes visando melhorar a estabilidade do módulo no cabo e corrigir eventuais problemas relacionados ao centro de massa do projeto. É essencial que o centro de massa esteja o mais próximo possível do meio do cabo e abaixo dele, a fim de evitar a queda do módulo. A Figura 5.14 mostra os centros de massa das posições do módulo nas etapas de instalação do amortecedor.

Figura 5.14 – Simulação de instalação de amortecedor, com detalhe para posição do centro de massa: (a) módulo sem amortecedor; (b) amortecedor recuado; (c) amortecedor e motoredutor avançados em direção ao cabo.



Fonte: Autor.

A simulação em CAE permitiu o refinamento do projeto do módulo e mostrou a funcionalidade como um todo do sistema mecânico proposto, prevista para construção e validação nas próximas etapas.

5.3.4 Sistema eletrônico do módulo de instalação de amortecedores

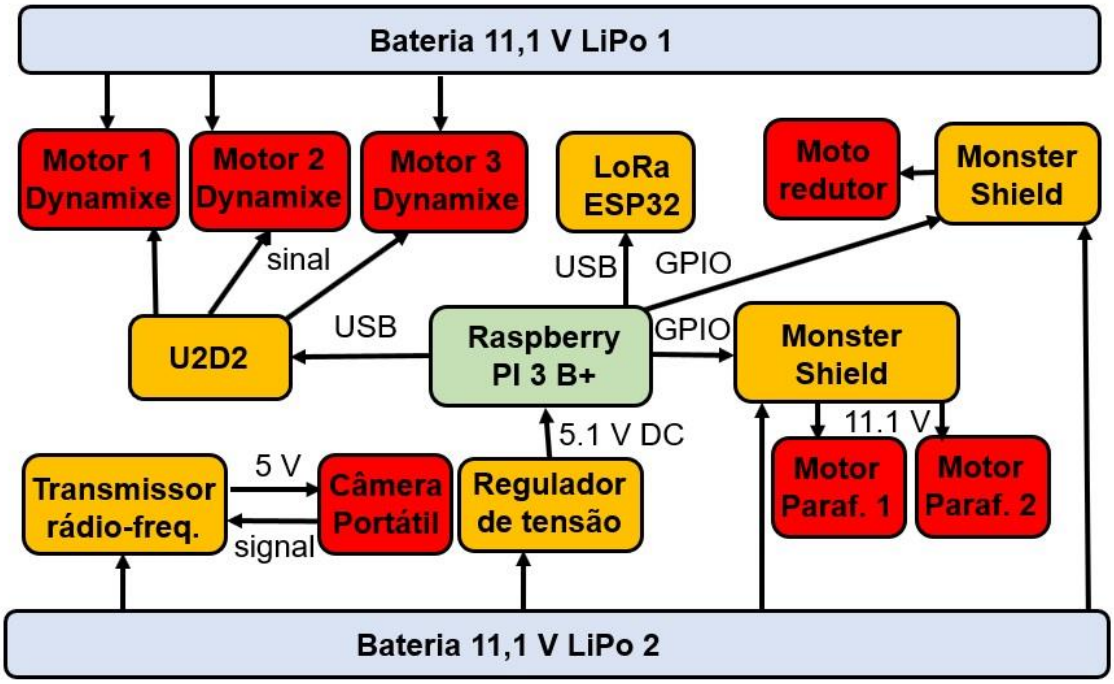
O sistema eletrônico do módulo de instalação de amortecedores é semelhante ao desenvolvido para o módulo de remoção de detritos, descrito na seção 4.3.4. O processamento dos algoritmos de controle foi todo realizado pelo Raspberry Pi 3 B+. *Drivers* dos motores, como as placas *Monster Shield* e U2D2 foram conectadas ao barramento de entrada e saída (GPIO) do Raspberry Pi. Uma placa LoRa ESP32, responsável por receber os comandos para o programa via celular, foi conectada ao Raspberry Pi via porta USB.

Os servomotores Dynamixel foram conectados em série. Cada motor apresenta um número de identificação. Um único dispositivo U2D2, controlador compatível com os servomotores, é usado para enviar o comando de movimento aos servomotores, que se movimentam de acordo com o número de identificação escolhido.

Uma fechadura magnética foi usada para permitir o acoplamento magnético do módulo com o drone. Duas chaves fim de curso foram dedicadas ao acionamento da fechadura magnética, de modo que, quando o drone entra em contato com elas, a fechadura é ligada e o acoplamento do módulo com o drone é efetuado. O sistema é o mesmo utilizado para o módulo de remoção de detritos, descrito na seção 4.3.4.

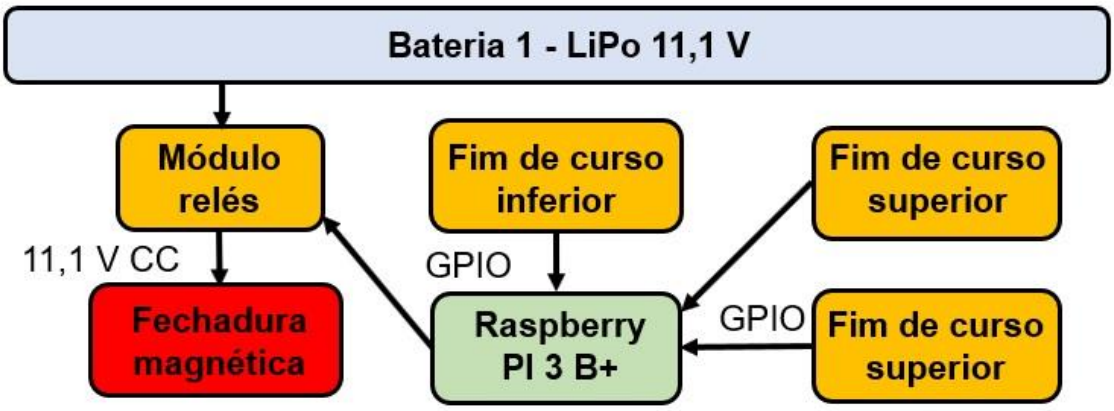
A alimentação do sistema contou com duas baterias LiPo de 11,1 V. Uma delas foi dedicada à alimentação dos motores Dynamixel. A outra foi responsável por alimentar o restante dos componentes, que foram o Raspberry Pi, os motores de parafusadeira e o motoredutor de parafusamento, além de uma câmera portátil. Um regulador de tensão abaixa a tensão da bateria de 11,1 V para 5,1 V para alimentar o Raspberry Pi 3B+. Um esquema do sistema é mostrado na Fig. 5.15.

Figura 5.15 – Sistema elétrico/eletrônico do módulo de instalação de amortecedores de vibração.



Fonte: Autor.

Figura 5.16 – Parte do sistema eletrônico responsável pelo acionamento da fechadura magnética.

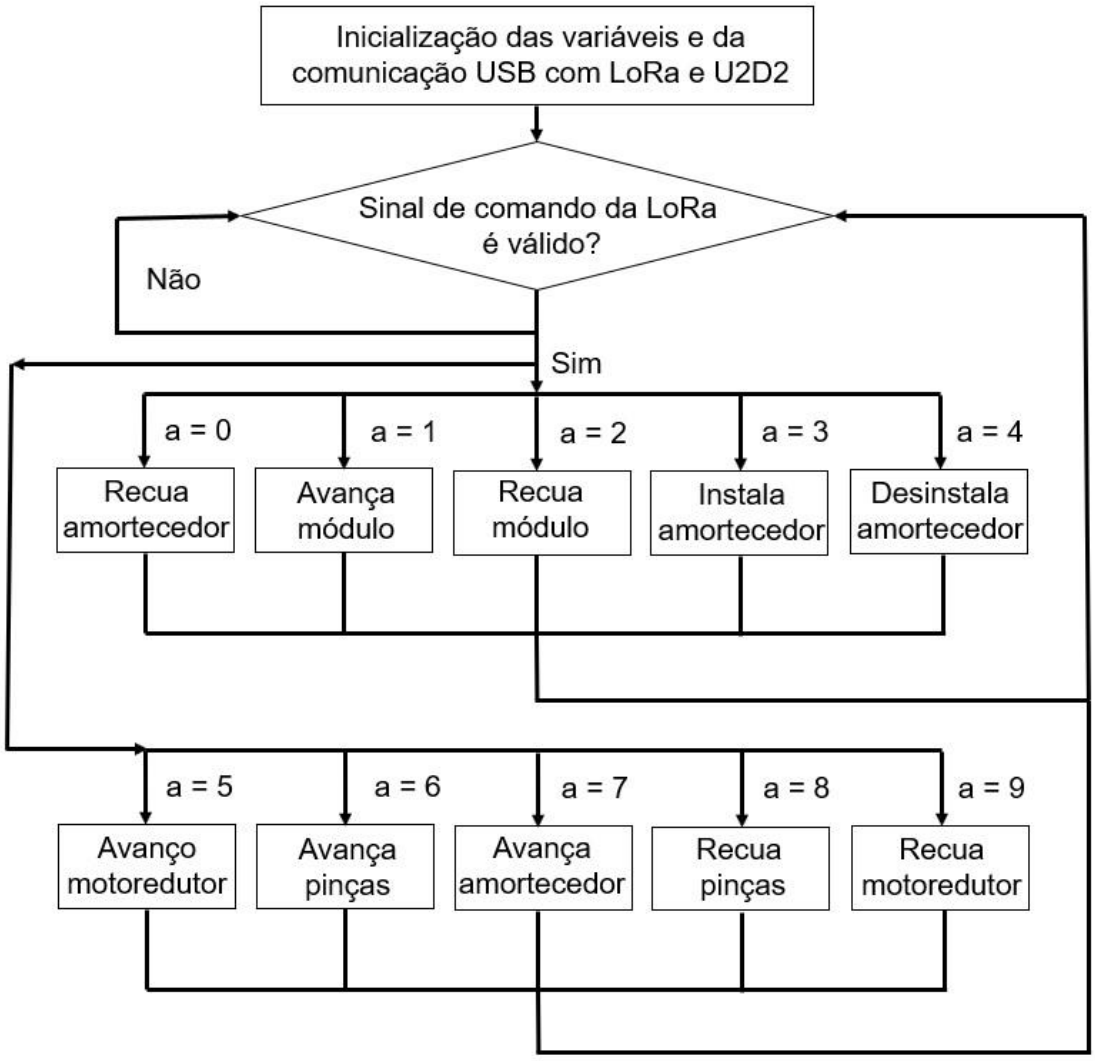


Fonte: Autor.

Para operação do Raspberry Pi, foram construídos quatro programas em linguagem Python. A estrutura e comunicação neste caso ocorre de maneira semelhante ao caso do módulo de remoção de detritos (conferir Fig. 4.15).

O algoritmo do programa de automação (Programa 4 da Fig. 4.15, semelhante ao do módulo de remoção de detritos, é exposto na figura 5.17.

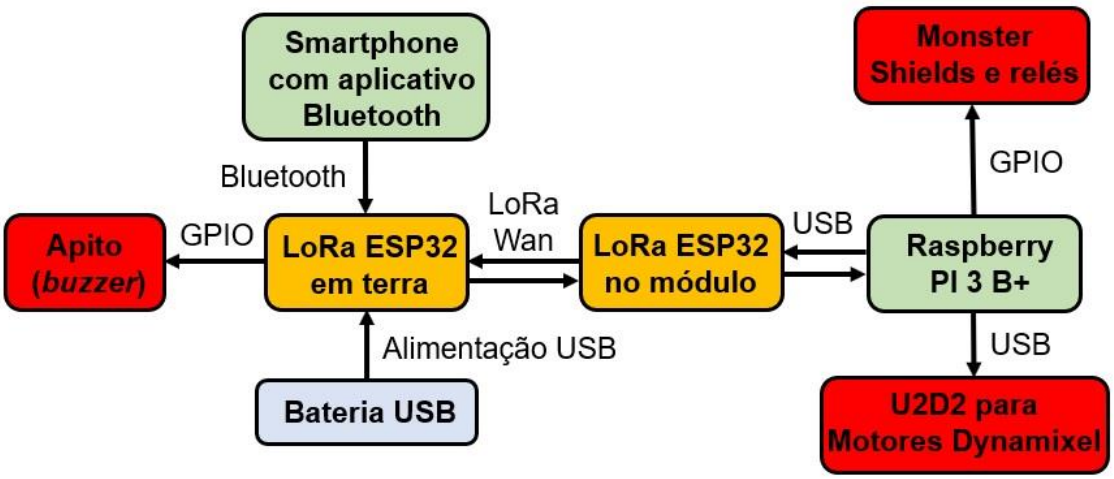
Figura 5.17 – Algoritmo do programa de movimentação executado pelo Raspberry Pi.



Fonte: Autor.

O sistema de comunicação utilizado é semelhante ao empregado no módulo de remoção de detritos (Figura 4.14).

Figura 5.18 – Sistema de comunicação do módulo.

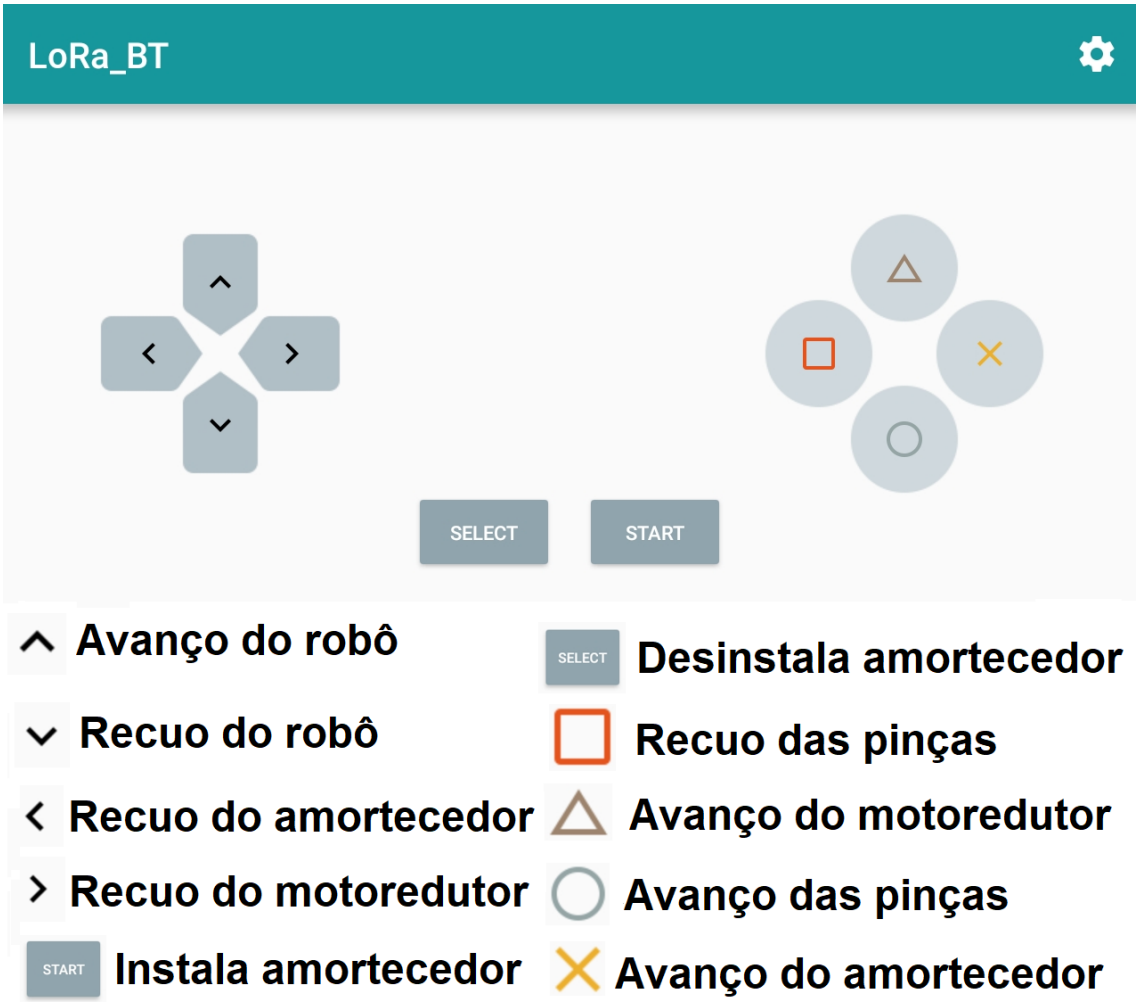


Fonte: Autor.

Assim como foi feito para os outros módulos desenvolvidos neste trabalho, cada botão presente na interface do aplicativo *Arduino Bluetooth Controller* foi configurado para acionar uma das funções do programa descrito na Figura 5.17. Ao se enviar um comando para instalação ou desinstalação do amortecedor, o comando executa todas as etapas envolvidas no processo de forma sequencial. Essa automação torna a operação do módulo mais eficiente, mais simples e menos propensa a erros de operador. A Figura 5.19 exibe a interface do programa de comunicação *bluetooth*, com uma legenda para a função de cada botão utilizado no funcionamento do módulo.

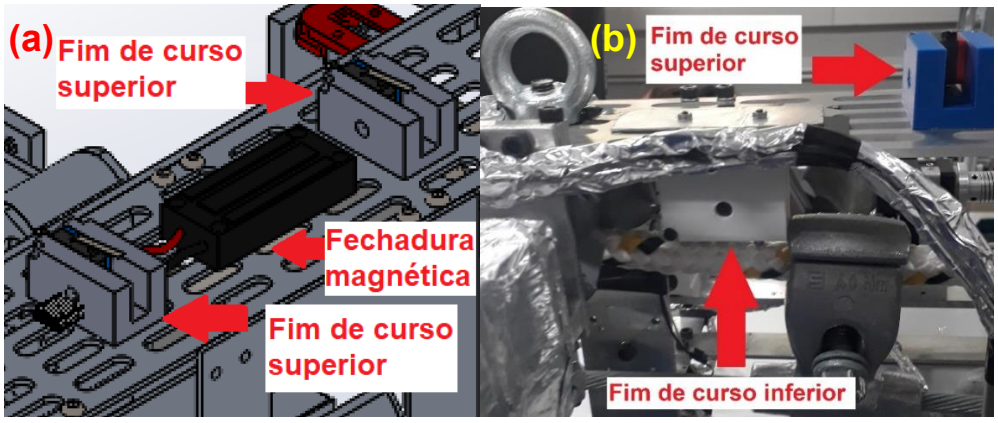
O mesmo sistema de acionamento da fechadura magnética empregado no módulo de remoção de detritos foi implementado neste módulo. Assim como descrito na seção 4.3.4, este sistema é composto por três fins de curso, dois fixados sobre a placa superior e um fixado na região inferior, próximo às rodas de translação do módulo. Os fins de curso superiores enviam sinal para o acionamento da fechadura magnética, e o inferior, para desligamento. Caso após o primeiro desligamento a fechadura magnética seja acionada novamente pelos fins de curso superiores, a fechadura magnética só poderá ser desligada com o desligamento total do sistema eletrônico do módulo. A Figura 5.20 mostra os componentes deste sistema.

Figura 5.19 – Interface do aplicativo *Arduino Bluetooth Controller*, com legenda dos botões configurados para comando do módulo.



Fonte: Autor.

Figura 5.20 – Sistema de acionamento da fechadura magnética com chaves fim de curso: (a) Desenho em CAD ilustrando fins de curso superiores e fechadura magnética; (b) foto do módulo ilustrando o fim de curso inferior instalado.

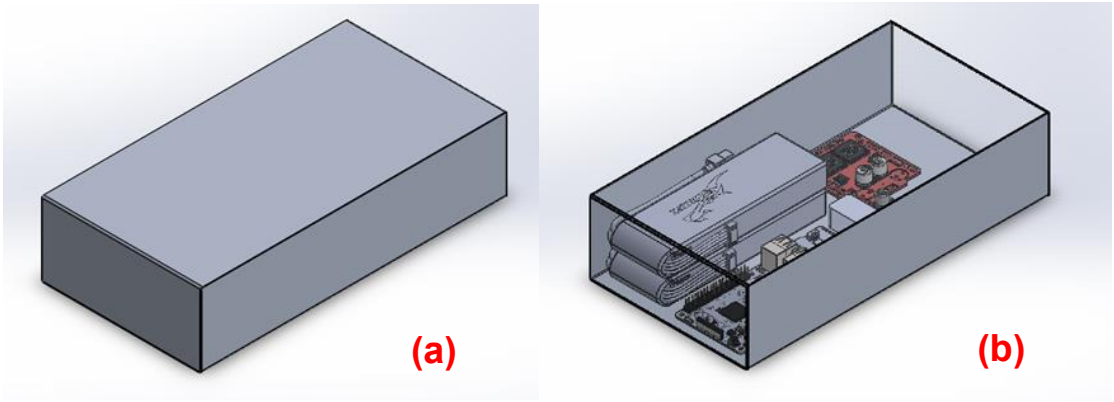


Fonte: Autor.

5.3.5 Blindagem eletromagnética e eletrostática do drone-robô para instalação de amortecedores de vibração

Detalhes específicos da blindagem deste módulo são destacados nesta seção, em função das diferenças em sua disposição geométrica e construção. Os cabos elétricos e os motores de parafusadeira foram totalmente cobertos por fita de alumínio de espessura 0,18 mm. Os componentes do sistema de controle foram inseridos no interior de uma caixa de alumínio de espessura 0,7 mm e dimensões 60 x 130 x 250 mm (Fig. 5.21).

Figura 5.21 – Desenho em CAD da caixa de alumínio usada para acomodar o sistema eletrônico: (a) caixa fechada; (b) visualização de componentes inseridos no interior.



Fonte: Autor.

Foram realizadas quatro aberturas na caixa: uma para fixação da chave liga/desliga, uma para passagem dos cabos para o exterior da caixa, uma para a antena de comunicação com a LoRa e outra para a antena do transmissor da câmera. Os cabos que saem do interior da caixa, que se interligam aos servomotores, ao motoredutor, à câmera, a fechadura magnética e aos fins de curso foram envolvidos com fita de alumínio de espessura 0,18 mm.

As faixas de frequência dos campos avaliados foram de 30 a 3000 Hz e de 300 MHz a 6 GHz, conforme Ungureanu, Rusu e Baran (2007) e Pakala e Chartier (1971), esta última com respeito à frequência das descargas parciais. Ainda de acordo com Pakala e Chartier (1971) nas descargas em lacunas *(gap discharges*), ocorre uma quebra completa do dielétrico do ar, em vez de uma quebra parcial. Considerando a falta de informações sobre a frequência dos campos emitidos por descargas parciais (*DP*), esse valor máximo de frequência para descargas em lacunas será utilizado nos cálculos de atenuação para o campo elétrico proveniente de descargas parciais.

A blindagem eletrostática do módulo foi efetuada deixando a estrutura mais próxima do contato com as linhas feita em chapas de alumínio de 3 mm, completando a equalização

de potencial. A caixa projetada para blindagem eletromagnética também possui o efeito de blindagem eletrostática.

Assim como para os módulos robóticos abordados anteriormente, foi utilizada a contribuição de Permata et al. (2019) em relação à blindagem eletrostática. Os testes realizados por esses autores com uma estrutura de UAV blindada com alumínio de 0,3 mm de espessura demonstraram ser suficientes para eliminar completamente os danos causados por descargas elétricas de tensão 150 kV aplicadas diretamente sobre a estrutura. A espessura mínima de blindagem empregada foi de 0,36 mm (correspondente a 2 camadas da fita de alumínio de espessura de 0,18 mm), garantindo a proteção contra descargas eletrostáticas, conforme indicado pelos autores mencionados.

Os cálculos realizados no projeto da blindagem eletromagnética estão descritos na seção 5.4.3. Já os resultados dos testes da blindagem eletromagnética e eletrostática do módulo em contato com linhas vivas estão na seção 5.4.5 desse Capítulo.

5.3.6 Teste do módulo em laboratório em linha simulada envolvendo instalação e desinstalação do amortecedor

Os testes de funcionamento do módulo foram realizados inicialmente em laboratório. Uma estrutura metálica foi montada em laboratório para simular uma linha de alta tensão, por meio de uma corda conectada entre duas estruturas metálicas. O módulo foi posicionado manualmente sobre a linha para realizar a instalação do amortecedor. As operações de movimentação, instalação do amortecedor e desinstalação foram testadas.

Posteriormente, com o amortecedor já instalado, a operação de desinstalação foi efetuada. Para realizar a desinstalação, foi instalada uma câmera que permite a visualização da posição do amortecedor. A imagem desta câmera é importante para posicionar corretamente o bocal na mesma linha do parafuso do amortecedor já instalado, de modo a permitir a desinstalação. Os resultados são descritos na seção 5.4.2.

5.3.7 Testes de validação em campo com inserção do módulo de amortecedores em linha viva por vara de manobra

De maneira semelhante ao teste de validação do módulo de remoção de detritos, foi feito um teste de inserção do módulo de instalação de amortecedores em linha viva com o auxílio de olhais. Como este módulo possui geometria mais complexa e extensa que o anterior, foram necessários dois olhais para erguê-lo com varas de manobra. Foi testado o equilíbrio deste módulo no cabo e os procedimentos para colocar e retirar manualmente este módulo.

Com o intuito de evitar problemas de retirada do módulo ou do amortecedor por parte dos operadores no caso de alguma falha no funcionamento do módulo, optou-se por testar somente a translação do módulo sobre a linha energizada, para comprovação da validade da blindagem. Os testes para instalação e desinstalação do amortecedor em linha viva serão realizados futuramente. Os resultados são mostrados na seção 5.4.4.

5.4 Resultados e discussões

5.4.1 Cálculos da modelagem matemática

Cálculo da tração das polias de translação do módulo

O torque necessário para o módulo locomover-se ao longo do cabo é dado pela Eq. (5.14). O coeficiente de atrito estático utilizado foi o de plástico ABS (rodas) e alumínio seco (cabo), adotado como sendo μ = 1,4 e a aceleração linear foi considerada como a_{z2} = 0 m/s². A Tabela 5.1 apresenta os valores das grandezas físicas relativas ao módulo.

Tabela 5.1 – Valores das grandezas físicas relativas ao modelo matemático proposto.

g [m/s²]	α [°]	α [rad]	sen α	cos α	m_2 [kg]
9,81	35,52	0,620	0,581	0,814	12,500
P_{g2} [N]	P_{gy2} [N]	P_{gz2} [N]	a_{z2} [m/s²]	μ	r_2 [m]
122,625	99,817	71,245	0	1,4	0,01

O ângulo de α = *35,52*° maximiza o torque encontrado pela Eq. (5.14). Substituindo as grandezas da Tabela 5.1 na Eq. (5.14), encontra-se o torque máximo necessário (Eq. 5.19):

$$\tau_2 = F_{z3} \cdot r_2 = \frac{(71{,}245 - 12{,}5 \cdot 0) + 1{,}4 \cdot 99{,}817}{2} \cdot 0{,}01 = 1{,}055 \ \ Nm \tag{5.19}$$

No caso de o ângulo da catenária ser igual a α = 0°, tem-se que o torque necessário para os motores é de (Eq. 5.20):

$$\tau_2 = \frac{(0 - 12{,}5 \cdot 0) + 1{,}4 \cdot 122{,}625}{2} \cdot 0{,}01 = 0{,}858 \ Nm \tag{5.20}$$

Para atender a demanda de torque em questão foi utilizado um motor de corrente contínua de parafusadeira modelo RS550S com capacidade de torque até 22 Nm, velocidade em vazio de até 400 rpm e alimentação de 12 V.

Dimensionamento do fuso para transporte do amortecedor

Em relação à seleção do perfil de rosca que atenda o critério da Eq. (5.15), ao substituírem-se os valores na equação encontrou-se a seguinte expressão (com f = 0,51 e α_n = 15°):

$$0{,}51 \geq L_r \cdot \frac{\cos(15°)}{\pi \cdot d_m} \quad ; \quad 0{,}51 \geq 0{,}307 \cdot \frac{L_r}{d_m} \quad ; \quad \frac{L_r}{d_m} \leq 1{,}626 \tag{5.21}$$

Dessa forma, com base nessa equação, optou-se por selecionar uma rosca com diâmetro nominal (d_m) de 8 mm e passo (L) de 2 mm, pois essas características são adequadas para garantir o auto travamento do sistema (Eq. 5.22):

$$\frac{2}{8} \leq 1{,}626 \quad ; \quad 0{,}25 \leq 1{,}626 \tag{5.22}$$

Com esses valores selecionados, a próxima etapa foi o cálculo do torque. A Tabela 5.2 mostra as grandezas utilizadas nesta determinação, realizada pela Eq. (5.16).

Tabela 5.2 – Variáveis utilizadas no cálculo do torque do motor para movimentação do fuso.

f_c	d_c [m]	L_r [m]	α_n (°)	d_m [m]
0,51	0,002	0,002	15°	0,008
g [m/s²]	m_a [kg]	μ_p	$W = m_a g/2\mu_p$ [N]	cos (α_n)
9,81	2,7	0,8	16,554	0,966

$$T = \frac{16{,}554 \cdot 0{,}008}{2} \cdot \frac{0{,}51 \cdot \pi \cdot 0{,}008 - 0{,}002 \cdot 0{,}966}{\pi \cdot 0{,}008 \cdot 0{,}966 + 0{,}51 \cdot 0{,}002} + \frac{16{,}554 \cdot 0{,}51 \cdot 0{,}002}{2} = 0{,}037\ Nm \tag{5.23}$$

Portanto, o valor do torque mínimo desempenhado pelo motor deve ser de 0,037 Nm. Em função deste valor, o motor selecionado foi o Dynamixel XM540-W270-T/R, do fabricante Robotis que de acordo com suas especificações, apresenta um torque máximo de

12,9 Nm, maior que o torque necessário para a movimentação e travamento do amortecedor por parte do sistema de fuso.

Torque necessário para translação do motoredutor em direção ao parafuso do amortecedor

A Tabela 5.3 mostra as grandezas utilizadas no cálculo do torque pela Eq. (5.18).

Tabela 5.3 – Variáveis utilizadas no cálculo do torque do motor para movimentação do fuso.

g [m/s²]	d_m [mm]	m_m [kg]	$W_m = mg$ [N]	μ_m	α_n (°)	tan ($\pi\alpha_n/180$)	sec ($\pi\alpha_n/180$)
9,81	0,008	1,100	15,451	0,51	15°	0,268	1,035

$$T = \frac{15{,}451 \cdot 0{,}008}{2} \cdot \left(0{,}51 \cdot 1{,}035 + \frac{0{,}268}{1-(0{,}51 \cdot 1{,}035 \cdot 0{,}268)}\right) = 0{,}052\ Nm \tag{5.24}$$

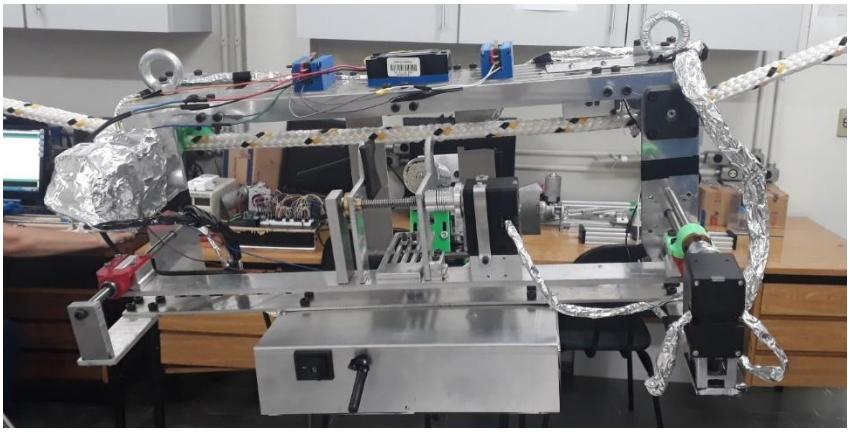
Portanto, conclui-se que o torque mínimo exigido do motor deve ser de 0,052 Nm. Para realizar a translação ao longo do eixo do parafuso de fixação, foi decidido utilizar um sistema composto por eixos e um motor adicional, o Dynamixel XM540-W270-T/R do fabricante Robotis (com torque máximo de 12,9 Nm).

5.4.2 Construção do módulo de instalação de amortecedores

O módulo para instalação de amortecedores foi fabricado e construído no LAR. A Figura 5.22 mostra o módulo devidamente montado.

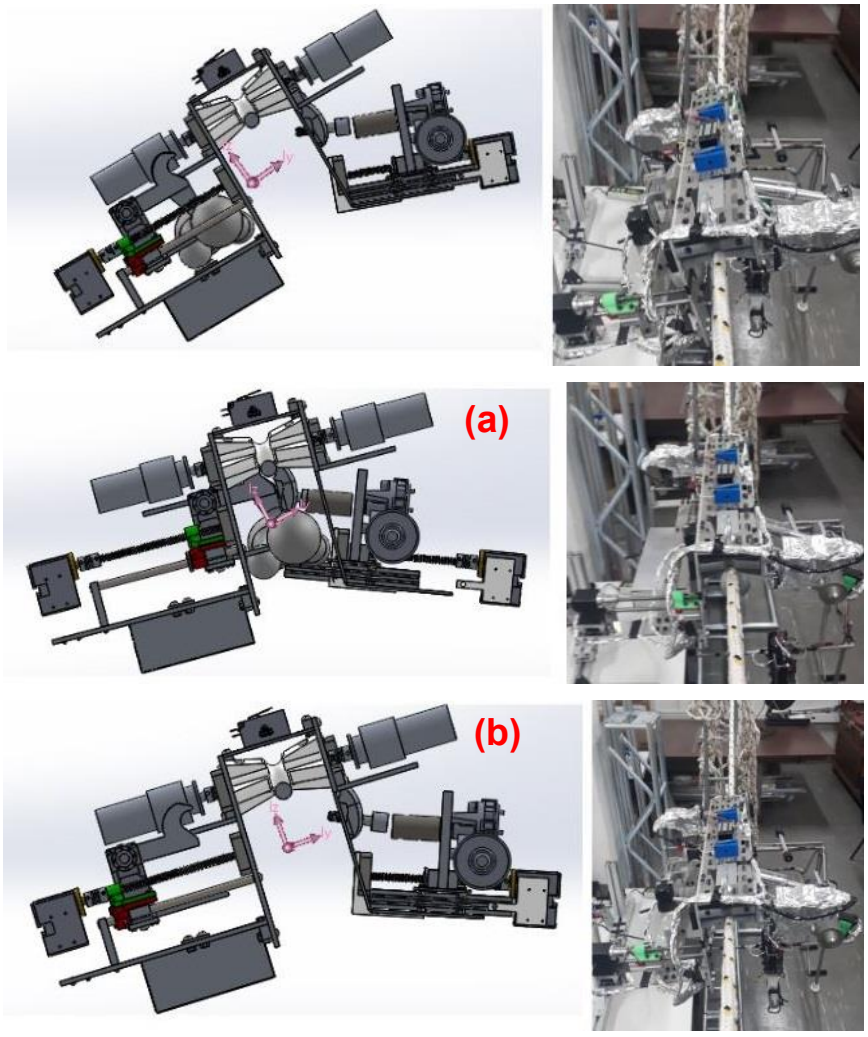
Comparou-se a simulação do posicionamento do centro de massa com as posições reais obtidas durante o processo de instalação do amortecedor em laboratório. As simulações foram bem-sucedidas em mostrar o equilíbrio do módulo nas diferentes situações a que ficará submetido, durante o processo de instalação ou desinstalação do amortecedor. A Figura 5.23 mostra a simulação em CAE com a respectiva posição do protótipo. Existem diferenças entre o posicionamento do centro de massa no modelo CAD e protótipo em função de simplificações feitas no projeto CAD.

Figura 5.22 – Estrutura final do módulo de instalação de amortecedores.



Fonte: Autor.

Figura 5.23 – Avaliação do equilíbrio do módulo de instalação de amortecedores, com posições obtidas na prática: (a) amortecedor recuado; (b) amortecedor e motoredutor avançados em direção ao cabo; (c) módulo sem amortecedor.

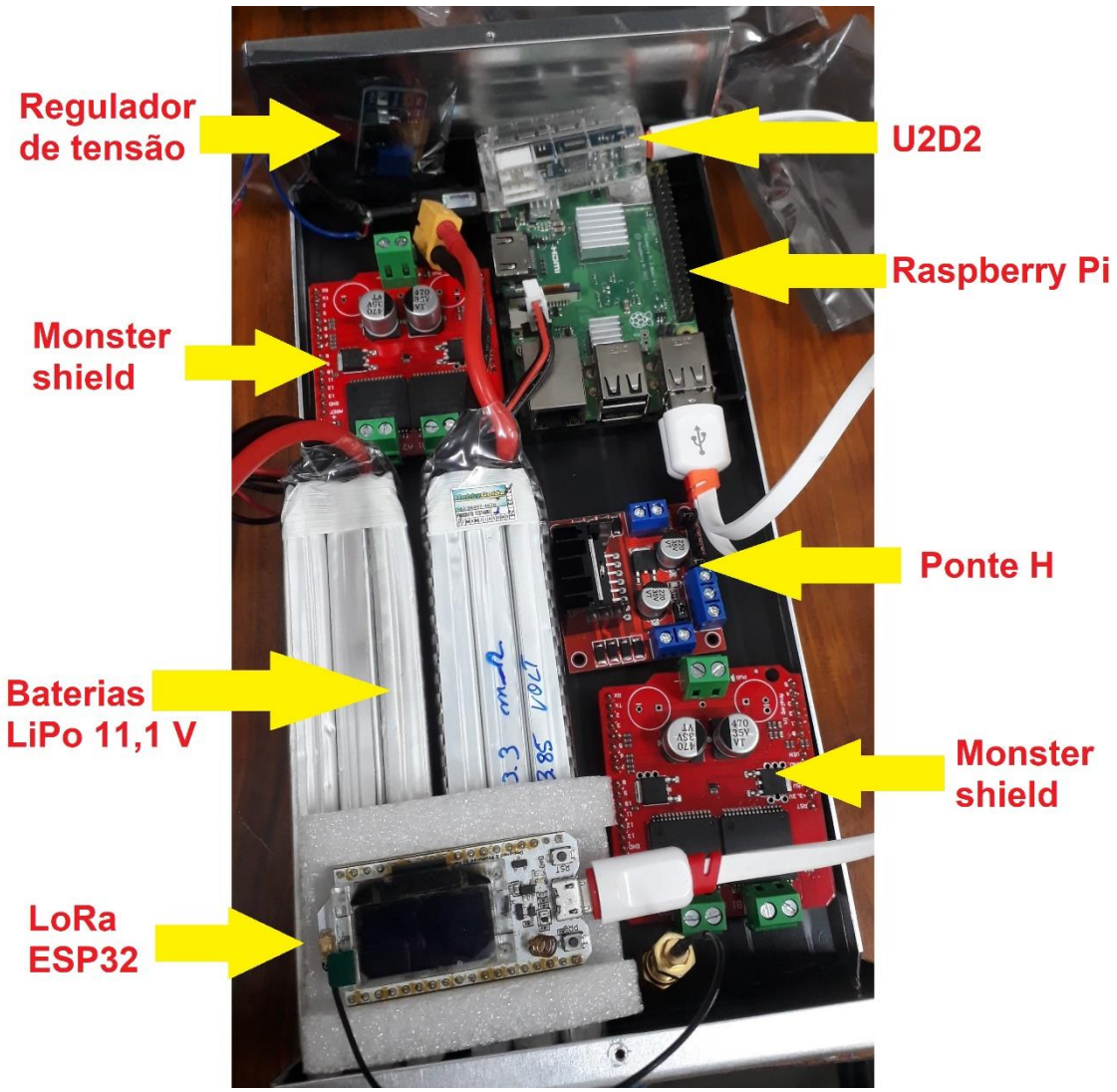


Fonte: Autor.

Em relação à blindagem, os motores de parafusadeira e os cabos elétricos foram blindados com duas camadas de fita de alumínio de 0,18 mm de espessura (totalizando 0,36 mm). Durante o recobrimento dos cabos, atentou-se para não deixar frestas presentes, o que poderia diminuir a eficácia da blindagem realizada.

Os componentes do sistema de controle foram acomodados na caixa de alumínio de espessura 0,7 mm, a ser fixada no módulo. Uma camada de isolação foi inserida entre os componentes e a base da caixa, para evitar contato indesejado dos componentes eletrônicos com a caixa de alumínio, o que poderia provocar curto-circuito (Fig. 5.24). Posteriormente, um circuito relé de dois canais foi inserido para controlar o acionamento da fechadura magnética.

Figura 5.24 – Componentes do sistema de controle ainda sem cabeamento acomodados na caixa de alumínio.



Fonte: Autor.

5.4.3 Resultados dos cálculos da blindagem eletromagnética

Os resultados da atenuação dos campos eletromagnéticos são separados nos seguintes tópicos:

- Campo elétrico na faixa de 30 a 3000 Hz;
- Campo magnético na faixa de 30 a 3000 Hz;
- Campo elétrico na faixa de 300 MHz a 6 GHz;
- Campo magnético na faixa de 300 MHz a 6 GHz.

Campo elétrico na faixa de 30 a 3000 Hz

Os cálculos de atenuação são válidos para a faixa de frequência de 30 Hz a 3000 Hz (com uma espessura de blindagem de t = 0,36 mm). Foi encontrada uma efetividade mínima de 277,565 dB em uma frequência de 3000 Hz utilizando a Equação (2.6). O fator de atenuação para essa faixa de frequência é determinado através da aplicação da Equação (2.12):

$$20 \log (E_0/E_f) = 277{,}565 \text{ dB} \tag{5.25}$$

$$E_f = 1{,}324 \cdot 10^{-14} \cdot E_0 \tag{5.26}$$

Considerando o valor de campo de referência ainda como de 190 V/cm (LIU et al., 2016), é possível determinar o campo elétrico atenuado que afeta o circuito interno da estrutura blindada utilizando a Eq. (5.26).

$$E_f = 1{,}324 \cdot 10^{-14} \cdot 190 \text{ V/cm} = 2{,}515 \text{ pV/cm} \tag{5.27}$$

Da mesma forma que nos módulos anteriores, é possível desprezar a insignificância de um campo elétrico da ordem de magnitude de pV/cm em relação à indução de tensões indesejadas em circuitos alimentados com 5 V a 11,1 V, o que é o caso atual. Considerando que a blindagem atende à efetividade mínima necessária para proteger contra a maior amplitude do campo elétrico atual, espera-se que seja ainda mais eficaz em reduzir campos elétricos de várias frequências dentro da faixa avaliada.

Campo magnético na faixa de 30 a 3000 Hz

Levando em consideração o campo magnético emitido na faixa de frequência de 30 a 3000 Hz, uma camada de 0,36 mm de espessura não é suficiente para oferecer uma proteção adequada contra os campos magnéticos, após aplicação da Eq. (2.10).

Adotou-se então uma estratégia experimental, como realizada anteriormente, para esta avaliação. Os resultados dos testes descritos na seção 4.3.6 são tomados como suficientes para mostrar que mesmo que a estrutura de alumínio não atenue o campo magnético nessa faixa de frequências, o circuito interno suporta o campo magnético de até 200 μT. Como de acordo com Stewart, Dale e Klein (1993) o campo magnético tipicamente gerado por uma linha de 138 kV é de 15 μT, considera-se o circuito como imune a tais emissões, do ponto de vista de interferências causadas.

Campo elétrico na faixa de 300 MHz a 6 GHz

Atentando ao critério da Eq. (2.1) para a faixa de 300 MHz a 6 GHz, na qual ocorrem as descargas parciais, tem-se (Eq. 5.28 e 5.29):

$$\frac{3 \cdot 10^8}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^8} = 0{,}1592 > 0{,}001 \tag{5.28}$$

$$\frac{3 \cdot 10^8}{2\pi \cdot 6 \cdot 10^9} = 0{,}0079 > 0{,}001 \tag{5.29}$$

Neste caso o campo ainda é considerado próximo, pois a distância é mínima entre cabos elétricos do módulo e a linha de alta tensão que se encontram praticamente em contato. Portanto, o cálculo da atenuação dos campos é realizado separadamente.

Para o campo elétrico, foi identificada uma efetividade mínima de 765,924 dB em uma frequência de 300 MHz utilizando a Eq. (2.6). O fator de atenuação para essa faixa de frequência é obtido por meio da aplicação da Eq. (5.12):

$$20 \log (E_0/E_f) = 765{,}924 \tag{5.30}$$

$$E_f = 5{,}056 \cdot 10^{-39} \cdot E_0 \tag{5.31}$$

Levando em consideração o valor do campo elétrico necessário para causar uma quebra parcial da rigidez dielétrica do ar, que é de 30 kV/cm (30000 V/cm) (NOR, RAMLI; 2007), o campo elétrico resultante após a atenuação é calculado utilizando a Eq. (5.31).

$$E_f = 5{,}056 \cdot 10^{-39} \cdot 30000 \text{ V/cm} = 1{,}517 \cdot 10^{-34} \text{ V/cm} \quad (5.32)$$

Assim como a atenuação anteriormente obtida, o campo elétrico atenuado aqui pode ser aproximado de zero, podendo ser negligenciado.

Campo magnético na faixa de 300 MHz a 6 GHz

No caso do campo magnético, foi identificada uma efetividade mínima de 57,475 dB em uma frequência de 300 MHz utilizando a Eq. (2.13). O fator de atenuação para essa faixa de frequência é obtido através da aplicação da Eq. (5.32).

$$20 \log (H_0/H_f) = 57{,}475 \quad (5.33)$$

$$H_f = 1{,}337 \cdot 10^{-3} \cdot H_0 \quad (5.34)$$

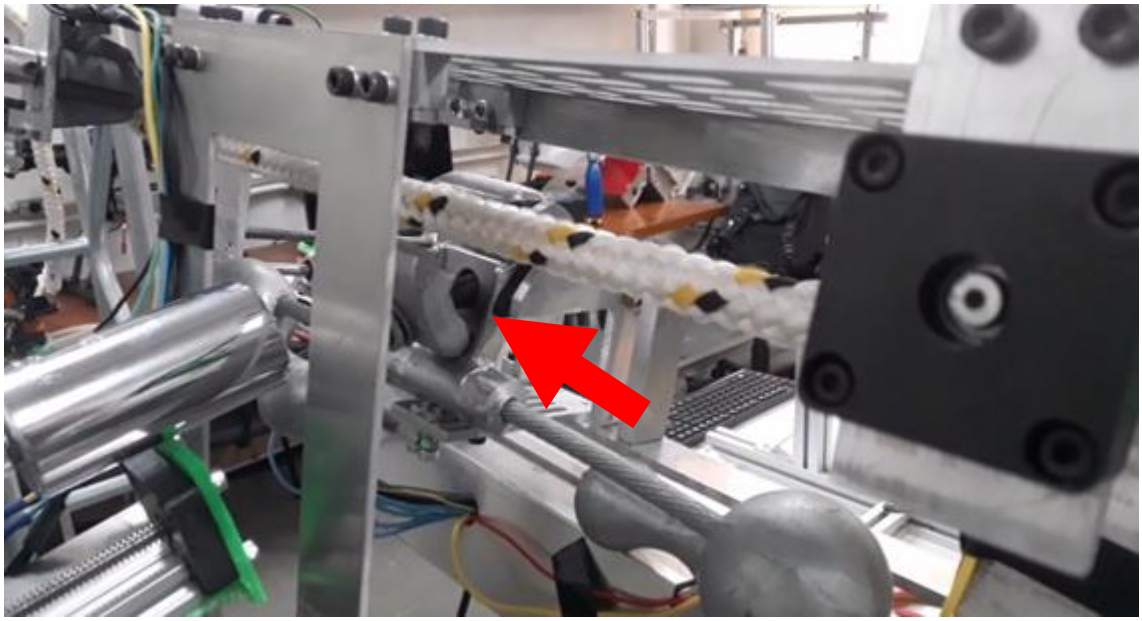
Não foram encontradas informações sobre a intensidade do campo magnético nas descargas parciais. Embora neste caso a atenuação encontrada seja menor (da ordem de milésimos) do que a encontrada para o campo elétrico, pode ser suficiente para blindar contra campos magnéticos nessa faixa de frequências. Caso necessário, de acordo com a recomendação de Ott (2009), para casos em que a atenuação do campo magnético não seja suficiente, pode-se aumentar essa efetividade inserindo algum material magnético na blindagem.

Com esses resultados, comprova-se a eficiência do projeto de blindagem eletromagnética do módulo de instalação de amortecedores, para todas as faixas de frequência de campos eletromagnéticos avaliadas.

5.4.4 Resultados dos testes de instalação e desinstalação do amortecedor em laboratório

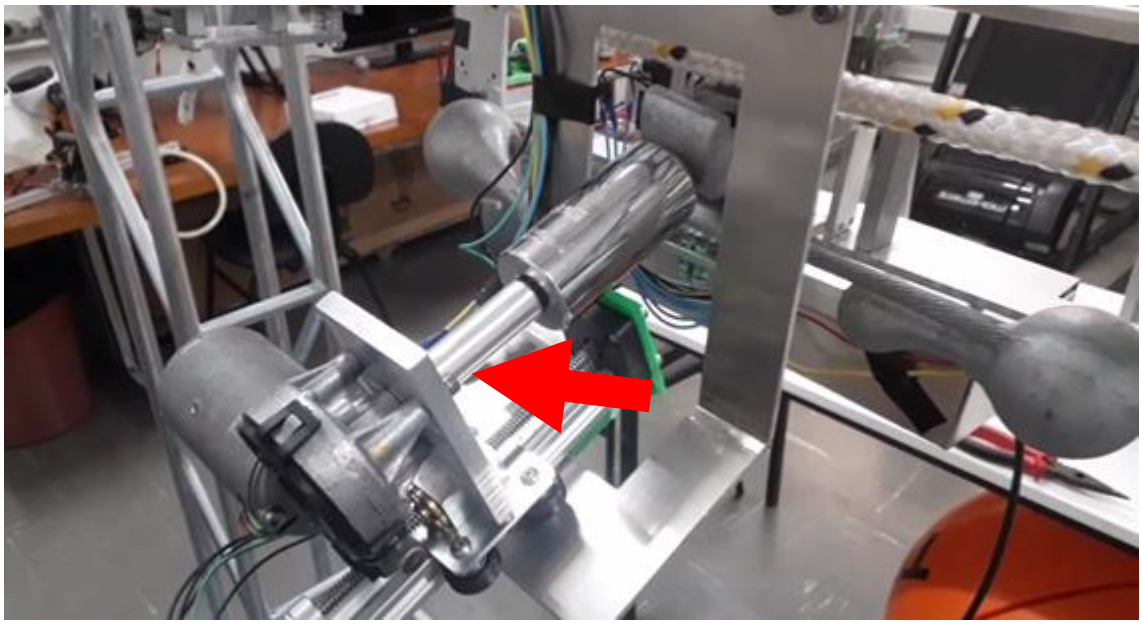
As Figuras de 5.25 a 5.29 mostram em detalhes a operação de instalação do amortecedor em linha simulada em laboratório. O tempo total gasto na operação de instalação foi de aproximadamente 6 minutos.

Figura 5.25 - Instalação do amortecedor em laboratório: etapa de deslocamento do amortecedor até a linha.



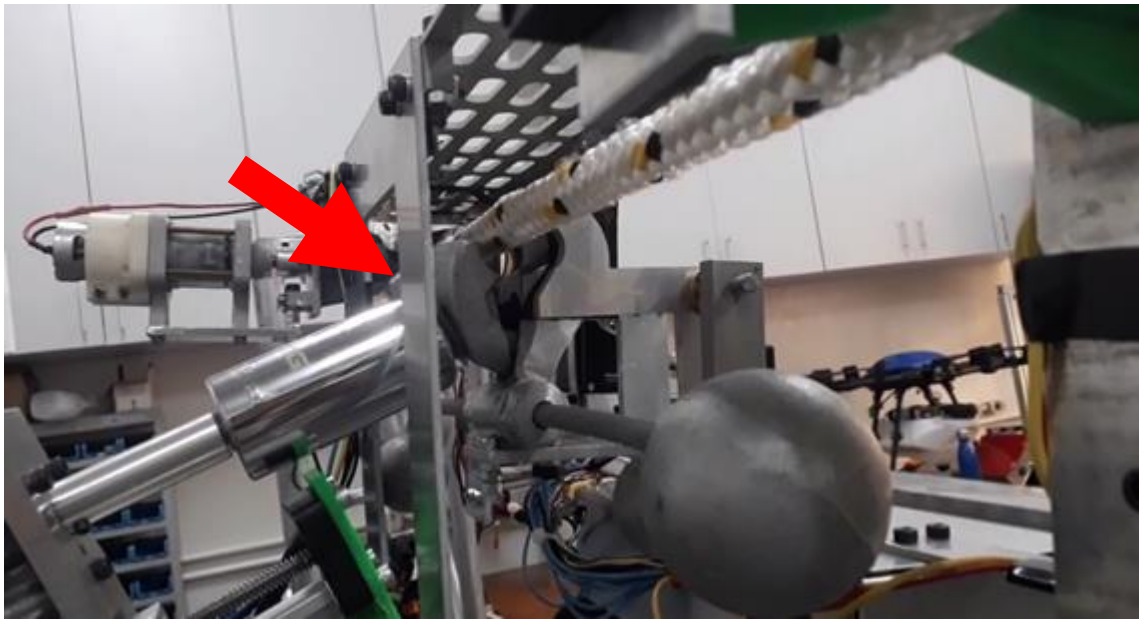
Fonte: Autor.

Figura 5.26 - Instalação do amortecedor em laboratório: etapa de translação do bocal para parafusamento.



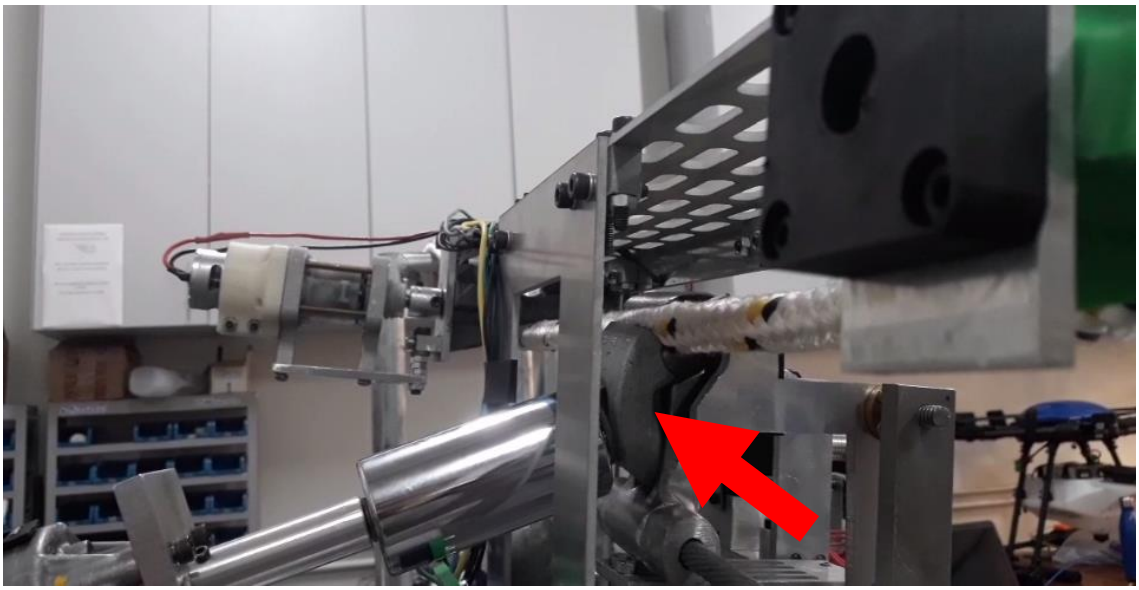
Fonte: Autor.

Figura 5.27 - Instalação do amortecedor em laboratório: etapa de aparafusamento do amortecedor.



Fonte: Autor.

Figura 5.28 - Instalação do amortecedor em laboratório: etapa de desprendimento das pinças do amortecedor.



Fonte: Autor.

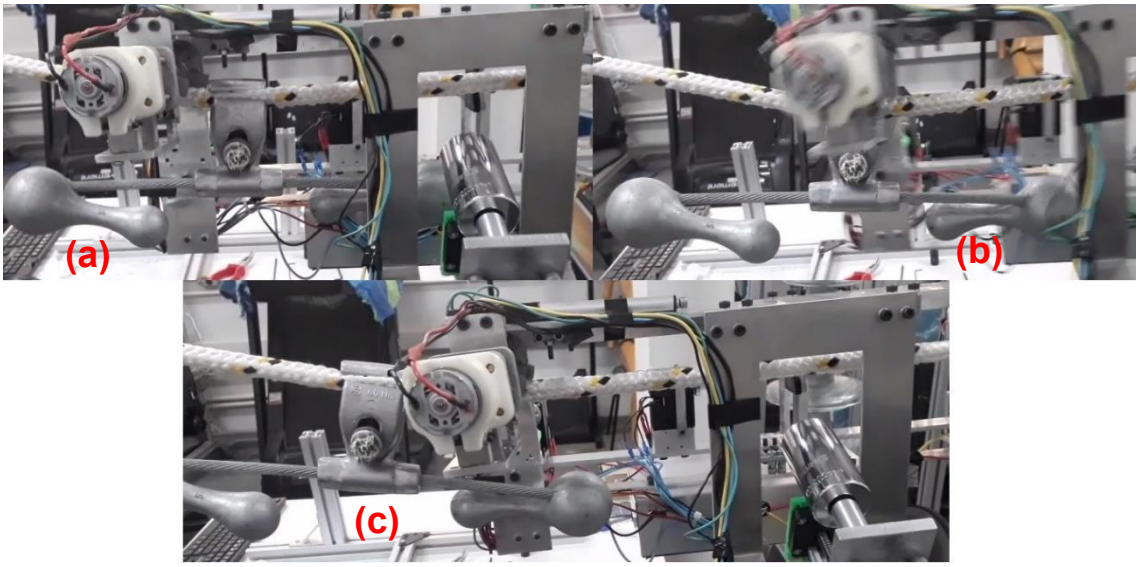
Figura 5.29 - Instalação do amortecedor em laboratório: fim da instalação e recuo das estruturas do módulo para a posição original.



Fonte: Autor.

Após a instalação, testou-se a transposição do amortecedor instalado pelo módulo. A Figura 5.30 mostra as etapas da transposição.

Figura 5.30 – Movimentação do módulo transpondo o amortecedor: (a) módulo antes da transposição. (b) movimento durante a transposição. (c) transposição concluída.



Fonte: Autor.

Para a desinstalação, o primeiro passo consistiu em alinhar o bocal de desaparafusamento com o parafuso do amortecedor que já estava instalado na linha. Para isso, foi necessário mover o módulo até que o alinhamento fosse possível, avançando ou recuando ao longo da linha. Uma câmera posicionada dentro da estrutura do módulo foi utilizada para monitorar esse processo (Fig. 5.31).

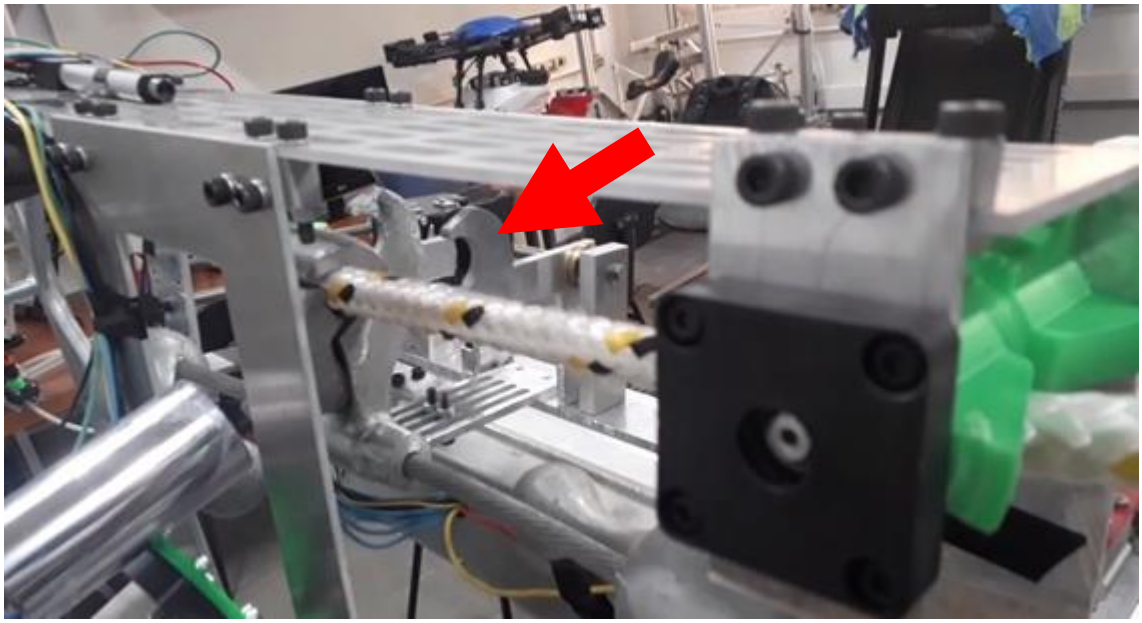
Figura 5.31 – Imagem da câmera interna ao módulo, usada para auxiliar no posicionamento do bocal para o processo de desinstalação.



Fonte: Autor.

Com este requisito atendido, foi possível a realização da desinstalação. Esta também durou cerca de 6 minutos para ser completada (Fig. 5.32 a 5.36).

Figura 5.32 - Desinstalação do amortecedor: etapa de translação da estrutura de pinças em direção ao amortecedor.



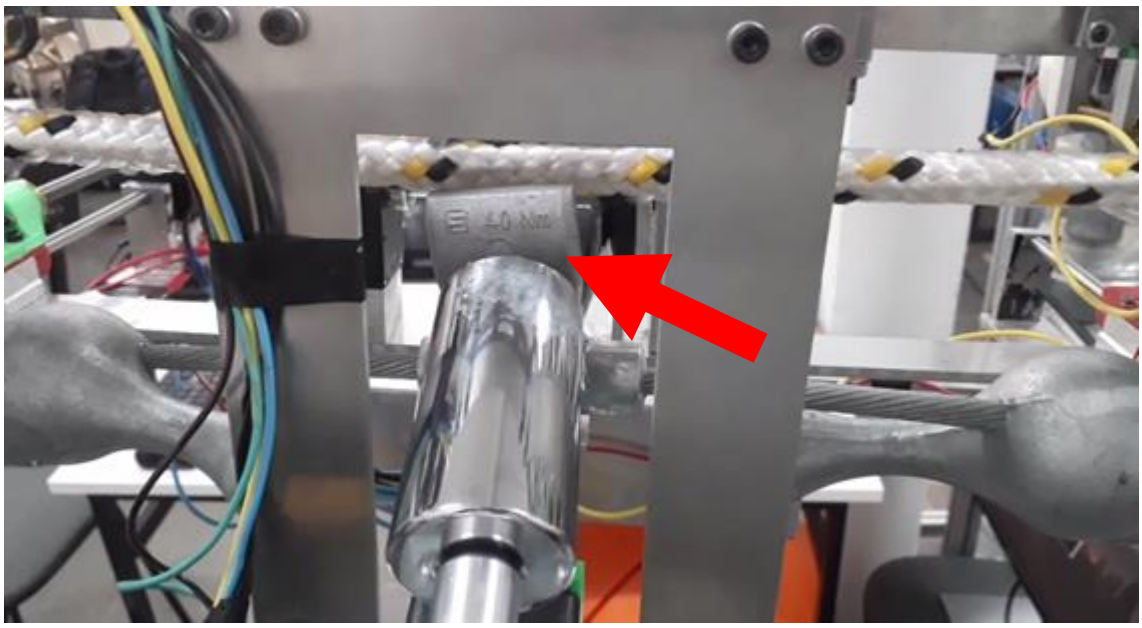
Fonte: Autor.

Figura 5.33 - Desinstalação do amortecedor: etapa de translação do bocal para desaparafusamento.



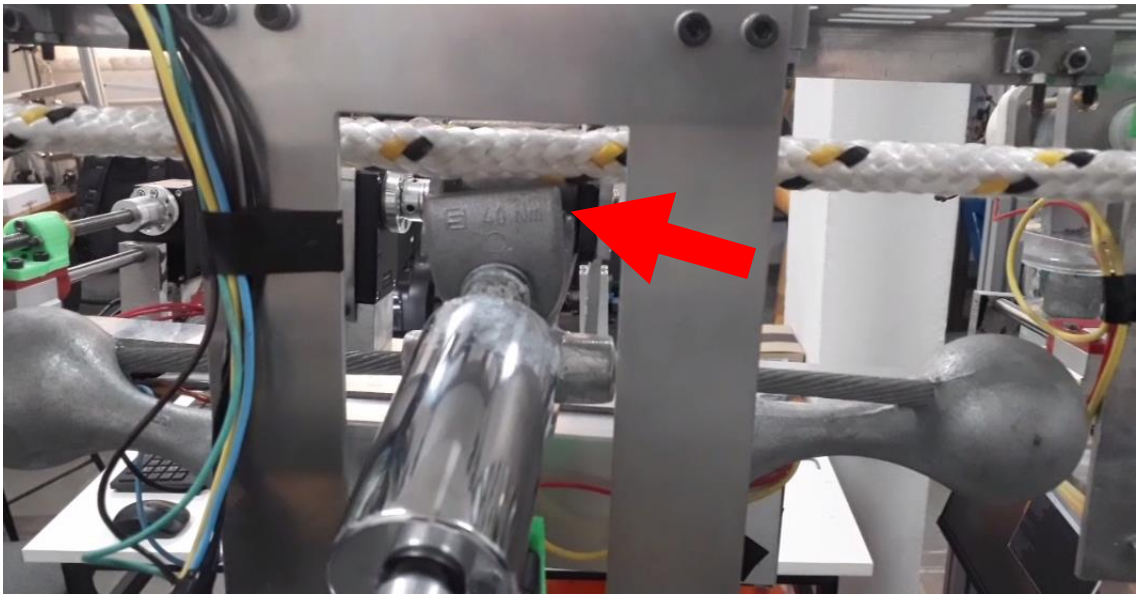
Fonte: Autor.

Figura 5.34 - Desinstalação do amortecedor: etapa de desaparafusamento do amortecedor.



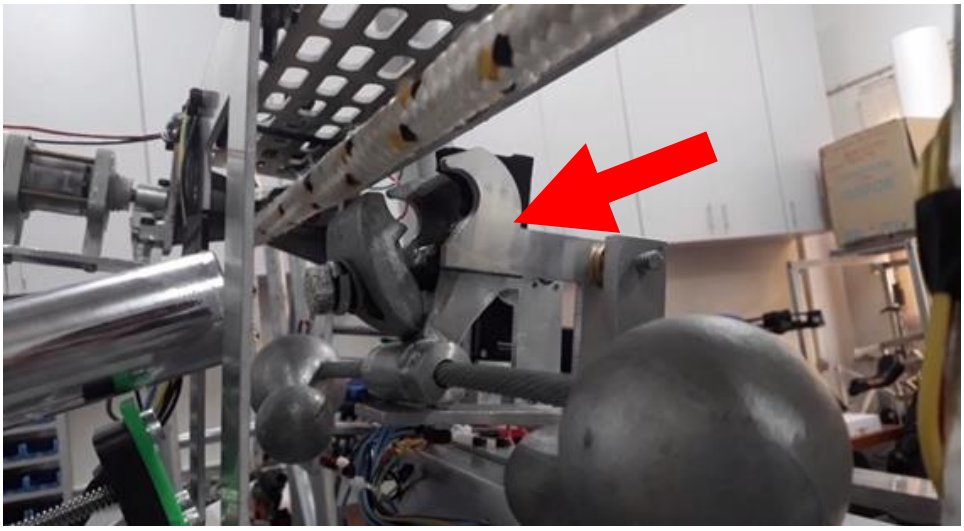
Fonte: Autor.

Figura 5.35 - Desinstalação do amortecedor: etapa de fixação do amortecedor pelas pinças.



Fonte: Autor.

Figura 5.36 - Desinstalação do amortecedor: etapa de transporte do amortecedor para o interior do módulo.



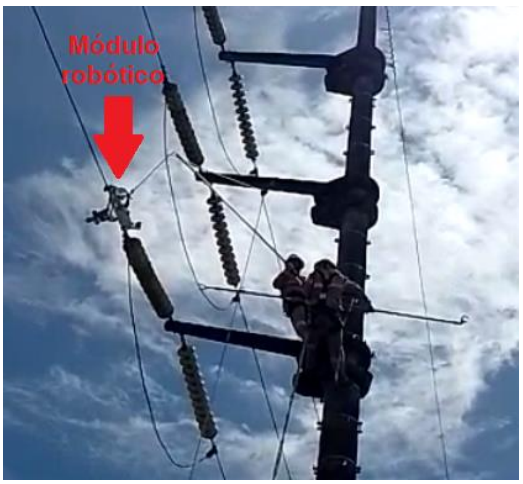
Fonte: Autor.

Os testes em laboratório mostraram a validade do mecanismo projetado tanto para instalação quanto desinstalação do amortecedor de forma autônoma pelo robô.

5.4.5 Testes de validação em campo com inserção e atuação do módulo de amortecedores em linha viva por vara de manobra.

Assim como o módulo de remoção de detritos, este módulo foi içado à linha de alta tensão por corda e posicionado sobre a linha com o auxílio de varas de manobra (Fig. 5.37).

Figura 5.37 – Inserção do módulo de instalação de amortecedores sobre uma linha de alta tensão energizada a 138 kV.



Fonte: Autor.

Figura 5.38 – Imagem da câmera interna do módulo de amortecedores com este sobre uma linha viva.



Fonte: Autor.

No *link* a seguir encontram-se vídeos dos testes experimentais: https://drive.google.com/drive/folders/14XKCayhedKdDnub_chu4GGTw0bgdQ6qE?usp=drive_link

A blindagem projetada foi suficiente para blindar o sistema elétrico e eletrônico do módulo, evitando danos decorrentes de descargas elétricas e interferências eletromagnéticas. Entretanto, a equalização de potencial não foi conseguida, inviabilizando a operação do módulo sobre a linha. Notou-se a necessidade de reforçar a ligação entre todos os pontos condutores da estrutura do módulo, para permitir a completa equalização de potencial do sistema com a linha quando estes entrarem em contato. Como a estrutura do módulo é complexa e irregular, maior é a dificuldade de realizar a equalização pretendida. Destaca-se também a necessidade da troca das rodas de ABS por de alumínio para a equalização possa acontecer em toda a estrutura do módulo.

Testes futuros contemplarão o transporte do módulo por drone sobre as linhas. Dificuldades como limitação de massa a ser transportada pelo drone e limitações de voo devido à disposição geométrica das linhas ainda se fazem presentes e serão temas de trabalhos futuros.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. Conclusões

Ao término deste trabalho, as seguintes conclusões gerais podem ser elencadas:

a) A utilização de drone-robôs em testes de campo realizados nas instalações de uma concessionária de energia elétrica e de forma simulada em laboratório evidenciou a possibilidade desses robôs em superar grande parte das limitações ainda existentes nas operações de manutenção. Como resultado, os drone-robôs desenvolvidos nesta tese destacam-se como soluções promissoras para o segmento de manutenção de linhas de alta tensão.

b) As blindagens eletromagnética e eletrostática projetadas para os drone-robôs foram bem-sucedidas quando da operação dos módulos em ambientes nos quais trafegaram tensões em torno de 141,22 kV e correntes em torno de 255,55 A. No caso do módulo para instalação de amortecedores, a geometria mais complexa do mesmo dificultou a realização da blindagem de forma totalmente efetiva, de modo que nenhum dos circuitos fosse danificado durante a movimentação do módulo sobre a linha energizada. Adaptações posteriores para melhor equalização de potencial e fortalecimento da blindagem deverão resolver os problemas encontrados.

c) O drone robô para limpeza de cadeias de isoladores foi validado, com a realização do teste de limpeza em uma cadeia de isoladores energizada em uma instalação elétrica real. Foi possível provar a validade de tal sistema, que conferiu principalmente segurança, ao dispensar o uso de mão de obra humana diretamente em contato com os isoladores. Outros ganhos com o processo são a rapidez da limpeza, permitindo aumento da eficiência

das operações. Melhoramentos ainda se fazem necessários, como automatização dos movimentos do drone e otimização dos sistemas de câmera e visão para tornar o produto completamente viável para emprego rotineiro.

d) O módulo de remoção de detritos, inserido em uma linha energizada com o auxílio de técnicos, foi validado realizando a operação de queima/remoção de um par de tênis. Inovações conseguidas com isto foram a dispensa do emprego de operadores de linha viva que se movimentam diretamente sobre as linhas, além da rapidez e eficiência do processo. Em testes de laboratório, a solução completa do drone-robô, envolvendo o transporte do módulo pelo drone, foi validada. Desenvolvimentos posteriores incluem a validação da operação de liberação e recolhimento do módulo, com o auxílio do drone, sobre linhas energizadas.

e) O módulo de instalação e desinstalação de amortecedores do tipo *stockbridge* mostrou-se uma solução viável nos testes realizados em laboratório. Desenvolvimentos posteriores incluem a otimização da blindagem eletromagnética e eletrostática, a diminuição da massa total e a validação da operação de liberação e recolhimento do módulo com o auxílio do drone, tanto em testes de laboratório quando em operações em linhas energizadas.

f) O sistema proposto de acoplamento dos módulos ao drone por sinais de fins de curso, quando do contato com estes em linhas energizadas, não atendeu às expectativas, uma vez que tal sistema permite induções de eletricidade não desejáveis por parte das linhas nos circuitos internos dos módulos robóticos, danificando-os. Para solução desta dificuldade, sistemas que isolem eletricamente o envio de sinais (sistemas a sinais óticos, por exemplo), ou sensores sem contato devem ser implementados para substituir o acionamento por fins de curso.

Em resumo, as contribuições tecnológicas obtidas ao final deste trabalho foram:

- Projeto, construção e validação do drone-robô para limpeza de cadeias de isoladores, com a execução do procedimento de limpeza de forma semiautomatizada, segundo as recomendações das normas técnicas usuais;
- Projeto, construção e teste em laboratório do drone-robô para remoção de detritos presentes nas linhas, sendo o módulo robótico posicionado sobre e retirado da linha com o auxílio de um drone. A validação da operação que realiza a queima automática de detrito em linha viva ocorreu com a inserção do módulo robótico na linha viva por operadores humanos.

- Projeto, construção e teste em laboratório de um módulo robótico para instalação ou desinstalação de amortecedores de vibração *stockbridge* das linhas, que realize as operações de forma automática. Não foi testada e nem validada a operação de inserção e remoção do módulo com o auxílio de um drone.

Já as contribuições científicas alcançadas foram:

- Desenvolvimento de procedimento embasado cientificamente de blindagem eletromagnética e eletrostática para todos os módulos robóticos que vierem a ser empregados em tarefas de manutenção de linhas de transmissão de até 138 kV.
- Validação das blindagens projetadas e construídas para as soluções de limpeza de cadeias de isoladores e remoção de detritos.

6.2. Trabalhos Futuros

Em vista do trabalho realizado, desenvolvimentos e melhorias futuros podem ser propostos. As sugestões foram divididas por drone-robô desenvolvido, e por fim foram propostos melhoramentos gerais.

Drone-robô para limpeza de cadeias de isoladores:

- Automatização dos movimentos do drone durante a operação de limpeza, visando a segurança do processo. Esses movimentos devem poder ser interrompidos pelo operador caso surja alguma ameaça à segurança do drone e de seres humanos. A decolagem e o voo do drone devem ser autônomos, dispensando os comandos do piloto.
- Registro das posições detectadas pela câmera de profundidade durante o processo de limpeza, para posterior avaliação da posição do drone em relação às cadeias durante o processo de limpeza.
- Limpeza completa dos isoladores, incluindo regiões não atingidas pelo jato frontal. Para tanto, movimentos circulares devem ser realizados pelo drone visando uma limpeza total dos poluentes presentes na superfície dos isoladores.
- Programar a gravação dos vídeos da câmera de profundidade pelo Raspberry Pi, para visualização posterior a cada operação de limpeza.
- Adaptação do projeto mecânico do módulo robótico para permitir diferentes inclinações da pistola para limpeza das cadeias de isoladores.

- Acoplamento do módulo ao drone a partir de mecanismos de fixação rápida.

Drone-robô para remoção de detritos:

- Substituição do maçarico utilizado atualmente por um modelo em que a capacidade de armazenamento de combustível seja ampliada. Nos testes realizados, foram necessárias recargas após uma quantidade reduzida de operações de queima. Essa melhoria teria como objetivo aumentar o intervalo de tempo necessário entre cada recarga, e permitir que durante uma única inserção do módulo sobre a linha, mais operações de queima possam sem efetuadas.
- Se necessário, efetuar reprojeto mecânico do módulo para remoção de detritos.
- Implementação de sistemas que isolem eletricamente o envio de sinais (sistemas a sinais óticos, por exemplo) para substituir o acionamento da fechadura magnética por fins de curso, para operações em linhas energizadas.
- Automatização do procedimento para deixar e buscar o módulo na linha de alta tensão, com implementação do voo autônomo do drone.

Drone-robô para instalação de amortecedores de vibração:

- Implementação de sistemas que isolem eletricamente o envio de sinais obtidos externamente para o interior do sistema eletrônico do módulo, substituindo chaves de fim de curso que possam entrar em contato direto com a linha de alta tensão.
- Projeto mecânico atualizado, que contemple a redução de massa, permitindo operações mais seguras quando ocorrer transporte do módulo por drone.
- Instalar fins de curso para conter as estruturas deslocadas por motores e impedir a ruptura de peças (principalmente das fabricadas por impressora 3D). Essa modificação também inclui inserir funções de segurança na instalação/desinstalação do amortecedor, permitindo que o processo possa ser interrompido caso surja alguma falha durante sua execução.
- Testes em laboratório e em campo de inserção e busca do módulo nas linhas, utilizando drone com maior capacidade de carga.
- Reforço das blindagens eletromagnética e eletrostática, para evitar danos aos componentes eletrônicos embarcados no módulo e permitir a equalização de potencial adequada com a linha energizada.

Melhoramentos gerais

- Automatização dos movimentos do drone, visando a segurança dos movimentos realizados para liberação e busca dos módulos. Esses movimentos devem poder ser interrompidos pelo operador caso surja alguma ameaça à segurança do drone e de seres humanos.
- Organização e padronização dos sistemas eletrônicos dos módulos por meio do projeto de placas específicas para serem diretamente implementadas em módulos a serem desenvolvidos no futuro.
- Desenvolver um sistema para integrar aviso sonoro e recepção da imagem do sistema de visão com o rádio controle do drone para facilitar a pilotagem dos drone-robôs.
- Atualização do sistema de recepção de imagens em terra, com substituição da tela HDMI utilizada por um celular ou outra tela mais compacta junto ao controle do drone. Este sistema deve conter uma proteção contra reflexos da luz solar, para que o piloto consiga se orientar melhor com o auxílio dessas imagens.
- Implementação de comandos de movimentação contínua nos robôs movidos por rodas. O sistema atual permite que se realizem movimentos discretos, ou seja, com tempos pré-determinados, após se pressionar um botão. Essa modificação permitiria movimentação contínua do módulo, enquanto o botão de comando se mantivesse pressionado pelo operador do robô.
- Utilização de drone com maior capacidade de carga. Tal melhoramento poderia permitir uma faixa maior de valores de massa a ser empregada no projeto dos módulos, permitindo várias melhorias nesses projetos. Muitas funções que os módulos deveriam desempenhar podem ser prejudicadas pela restrição da massa máxima que o drone pode carregar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRACOPEL. **Interrompendo o arco elétrico antes que ele destrua a sua instalação**, 2021. Disponível em: https://abracopel.org/blog/interrompendo-o-arco-eletrico-antes-que-ele-destrua-a-sua-instalacao/?doing_wp_cron=1694460530.2207520008087158203125. Acesso em 21 out. 2023.

ACENDE BRASIL. **Qualidade do fornecimento de energia elétrica: confiabilidade, conformidade e presteza**, 2014. Disponível em: https://acendebrasil.com.br/wp-content/uploads/2020/04/2014_WhitePaperAcendeBrasil_14_Qualidade_Fornecimento_Energia_Rev_0.pdf. Acesso em: 30 ago. 2023.

ADELANTADO, F.; VILAJOSANA, X.; TUSET-PEIRO, P.; MARTINEZ, B.; MELIA-SEGUI, J.; WATTEYNE, T. Understanding the limits of LoRaWAN. **IEEE Communications Magazine**, vol. 55, no. 9, p. 34-40, 2017. DOI: 10.1109/mcom.2017.1600613

AERONES. **Aerones wind turbine cleaning drone + interview**. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=mP5LZYpFggM. Acesso em 18 ago. 2023.

ALHASSAN, A. B.; ZHANG, X.; SHEN, H.; XU, H. Power transmission line inspection robots: A review, trends and challenges for future research. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Vol. 118, 105862, 2020. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.105862

ALKADHIM, S. A. S. **Communicating with Raspberry Pi via MAVLink**. SSRN Electronic Journal, 2019. DOI: 10.2139/ssrn.3318130

ALUMINIO ALURE. **Folha de alumínio para latonagem de 60 cm x 0,10 mm**. 2020. Disponível em: https://www.aluminioalure.com.br/ifjtkiz3f-folha-de-aluminio-para-latonagem-60cm-x-010mm-com-2-metros. Acesso em 10 ago. 2023.

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. **Drones - Registros e Certificados**, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/drones/registros-e-certificados-de-drones. Acesso em 01 set. 2023.

APRENDENDO ELÉTRICA. **Por que os fios das torres não ficam esticados?**, 2020. Disponível em: https://aprendendoeletrica.com/por-que-os-fios-das-torres-nao-ficam-esticados/. **Acesso em: 19 jan. 2024.**

ARDUPILOT. **Mission planner home**, 2023. Disponível em: https://ardupilot.org/planner/. Acesso em: 01 set. 2023

BABA, A. A new design of a flying robot, with advanced computer vision techniques to perform self-maintenance of smart grids. **Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences**, Volume 34, Issue 5, p. 2252-2261, 2022. DOI: 10.1016/j.ksuci.2020.07.009

BARNETT, S. B.; SWANSON, A. G.; LORIMER, T.; BROWN, M. **Electromagnetic interference mitigation in a high voltage inspection robot**. NÉMETH, B. (Ed.), Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering, ISH 2019, Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 598, Springer, Cham, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-31676-1_32

BHOLA, R.; KRISHNA, N. H.; RAMESH, K. N.; SENTHILNATH, J.; ANAND, G. Detection of the power lines in UAV remote sensed images using spectral-spatial methods. **Journal Of Environmental Management**, V. 206, p. 1233–1242, 2018. DOI: 10.1016/J.Jenvman.2017.09.036.

BUEHRINGER, J. M.; BERCHTOLD, M.; BUECHEL, C.; DOLD, M.; BUETIKOFER, M.; FEUERSTEIN, W.; FISCHER, C.; BERMES, R.; SIEGWART, M. Cable-Crawler – Robot for the Inspection of High-Voltage Power Lines that can Passively Roll over Mast Tops, **Industrial Robot: An International Journal**, Vol. 37, No. 3, p. 256-262, 2010. DOI: 10.1108/01439911011037659

BYUN, S. H., CHO, B. H., PARK, J. Y., LEE, J. K. **Implementation of control system for insulator cleaning robot**. SICE-ICASE International Joint Conference, p. 3044-3047, 2006. DOI: 10.1109/SICE.2006.314708

CAMPOS, M. F. M.; PEREIRA, G. A. S.; VALE, S. R. C.; BRACARENSE, A. Q.; PINHEIRO, G. A.; OLIVEIRA, M. P. A. Robot for installation and removal of aircraft warning spheres on

aerial power transmission lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 18, nº 4, 2003. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.817538

CAO, Y., WANG, H., CHANG, Y., ZHANG, L. **An entanglement-clearing robot for power transmission line with composite clearing tool**. The 5th Annual IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems, 2015. DOI: 10.1109/CYBER.2015.7288007

CARPENTERS EQUIPMENT. **Use of drones to clean power lines**, 2017. Disponível em: https://carpentersequip.com/use-of-drones-to-clean-power-lines/. Acesso em 19 jul. 2023.

CHANG, W.; YANG, G.; YU, J.; LIANG, Z.; CHENG, L.; ZHOU, C. **Development of a power line inspection robot with hybrid operation modes**. 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, p. 973-978, 2017. DOI: 10.1109/IROS.2017.8202263

CHEN, M.; TIAN, Y.; XING, S.; LI, Z.; LI, E.; LIANG, Z. GUO, R. Environment perception technologies for power transmission line inspection robots. **Journal of Sensors**, Vol. 2021, 2021. DOI: 10.1155/2021/5559231

CHEN, Y.; FANG, Z.; LIU, S.; WANG, Y. ZHONG, C.; CAI, C.; ZHANG, Y.; WEI, Y.; WANG, Z. **A soft-robotic gripper for ultra-high-voltage transmission line operations**. IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration: Connecting the Grids Towards a Low-Carbon High-Efficiency Energy System, EI2 2020, p. 788–793, 2020. DOI: 10.1109/EI250167.2020.9347270

CHENG, W.; YONGDONG, J.; JIANJUN, W.; JIANGSHEN, S.; YUCUN, W.; CHUNLAI, L.; YAO, L. **A kind of power transmission line cleaning plant**. CN205846575U, 2016.

COPEL. **Manutenção em linhas de distribuição em alta tensão com linha morta**, 2015. Disponível em: https://docplayer.com.br/111431340-Manutencao-em-linhas-de-distribuicao-em-alta-tensao-com-linha-morta-grupo-gestao-de-seguranca-e-saude-no-trabalhogsst.html. Acesso em: 18 mai. 2023.

CPNSP - Comissão Tripartite Permanente De Negociação Do Setor Elétrico No Estado De SP. **Curso básico de segurança em instalações e serviços em eletricidade - manual**

de treinamento, 2005. Disponível em: https://wiki.sj.ifsc.edu.br/images/0/04/NR10_Manual_Fundacentro.pdf

DISYADEJ, T.; PROMJAN, J.; POOCHINAPAN, K.; MOUKTONGLANG, T; GRZYBOWSKI, S.; MUNEESAWANG, P. **High voltage power line maintenance inspection by using smart robotics**. 2019 Ieee Power And Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference, p. 1-4, 2019.

DJI. **AGRAS MG-1 user manual**. V 1.2, 2016. Disponível em: https://dl.djicdn.com/downloads/mg-1/en/MG-1_User_Manual_en_v1.2.pdf Acesso em: 29 ago. 2023.

DRONENERDS. **DJI Wind 4 power line stringing solution**, 2023. Disponível em: https://www.dronenerds.com/products/drones/enterprise-drones/dji-wind/dji-wind-4-power-line-stringing-solution-wind4powerlinekit-dji.html. Acesso em: 01 set. 2023.

DRONES COMPANY. **Drone Pulverizador Arris E-610 - Tanque 10 Litros - Kit completo para vôo**, 2023. Disponível em: https://www.dronescompany.com.br/drone-pulverizador-arris-e-610-10-litros. Acesso em: 01 set. 2023.

DRONEU. **How to use drones for power-line inspections**, 2018. Disponível em: https://www.thedroneu.com/blog/how-to-use-drones-for-powerline-inspections/. Acesso em: 30 ago. 2023.

ERDELJ, M.; SAIF, O; NATALIZIO, E.; FANTONI, I. **UAVs that fly forever: uninterrupted structural inspection through automatic UAV replacement**. Ad Hoc Networks, V. 94, 2019. DOI: 10.1016/j.adhoc.2017.11.012

FAGUNDES, L. D. **Mapeamento de falhas em concessionária do setor elétrico: gestão do conhecimento auxiliando a gestão da manutenção**. Dissertação de mestrado, UNIFEI, 166 p, 2005. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/3761. Acesso em: 30 ago. 2023.

FANG, L. J.; WANG, H. G. **Research On The Motion System Of The Inspection Robot For 500kv Power Transmission Lines**. 1st International Conference On Applied Robotics For The Power Industry, CARPI 2010, n. 11, p. 1–4, 2010.

GLOBALDRONEUAV. **UAV elimination of high pressure line foreign body**, 2018. Disponível em: https://globaldroneuav.com/news/Uav-elimination-of-high-pressure-line-foreign-body.html. Acesso em: 19 jul. 2023.

GONÇALVES, R. S. **Robô móvel suspenso por fio com pernas de comprimentos variáveis**. Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 116 p, 2006.

GONÇALVES, R. S.; AGOSTINI, G. S.; BIANCHI, R. A. C.; HOMMA, R. Z.; SUDBRACK, D. E. T.; TRAUTMANN, P. V.; CLASEN, B. C. Inspection of power line insulators: state of the art, challenges, and open issues. **Handbook of Research on New Investigations in Artificial Life, AI, and Machine Learning**, 1st ed.; HABIB, M. K., Ed.; IGI Global: Hershey, PA, USA; Volume 1, p. 462–491, 2022 DOI: 10.4018/978-1-7998-8686-0.ch018

GONÇALVES, R. S.; CARVALHO, J. C. M. A mobile robot to be applied in high-voltage power lines. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 37, p. 349–359, 2014. DOI: 10.1007/s40430-014-0152-0

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**, 10, 408, 2013. DOI: 10.5772/56791

GONÇALVES, R. S.; SOUZA, C. C.; HOMMA, R. Z.; SUDBRACK, D. E. T.; TRAUTMANN, P. V.; CLASEN, B. C. Review: robots for inspection and maintenance of power transmission lines. **Mechanisms and Machine Science**, Vol. 23, p. 119-142, 2022

GONÇALVES, R. S.; SOUZA, F. C.; HOMMA, R. Z.; SUDBRACK, D. E. T.; TRAUTMANN, P. V.; CLASEN, B. C. Review: robots for inspection and maintenance of power transmission lines. **Mechanisms and Machine Science**, 1st ed.; CARBONE, G., LARIBI, M. A., Eds.; Robot Design; Springer: Cham, Switzerland; New York, NY, USA, Volume 123, 2022. DOI: 10.1007/978-3-031-11128-0_6

GONÇALVES, R. S.; SOUZA, F. C.; HOMMA, R. Z.; SUDBRACK, D. E. T.; TRAUTMANN, P. V.; CLASEN, B. C. **Mobile robot for debris removal from high voltage power lines**. 2022 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2022 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), 2022 Workshop on Robotics in Education (WRE), São Bernardo do Campo, 2022. Proceedings of the 2022 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2022 Brazilian

Symposium on Robotics (SBR), and 2022 Workshop on Robotics in Education (WRE), 2022. DOI: 10.1109/LARS/SBR/WRE56824.2022.9995816

GONGPING, W.; YINGSONG, L.; HUA, X.; YU, Y. **Robot for de-icing of power transmission lines**. CN101728803A, 2011.

GOVERNO DO BRASIL. **Cadastrar drone avançado e emitir certificado de aeronavegabilidade especial de RPA (CAER)**, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/pt-br/servicos/cadastrar-drone-avancado-e-emitir-certificado-de-aeronavegabilidade-especial-de-rpa-caer. Acesso em: 01 set. 2023.

GUAN, H.; SUN, X.; SU, Y.; HU, T.; WANG, H.; WANG, H.; PENG, C.; GUO, Q. UAV-lidar aids automatic inteligent powerline inspection. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Volume 130, 2021. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.106987

HADIPOUR, M.; ABEROMAND, N.; JAMEII, M. S. **A new approach for live line insulator washing with unmanned autonomous mobile helicopter (UAMH)**. Proceedings of the Smolensk, International Conference NESEFF, Moscow, Russia, 2016.

HADIPOUR, M.; SHIRAN M. A. Various pollutions of power line insulators. **Majlesi Journal of Electrical Engineering**, V. 6, No 1, Pp. 29–38, 2017.

HELTEC AUTOMATION. **WiFi LoRa 32 (V2)**, 2018. Disponível em: https://heltec.org/project/wifi-lora-32/. Acesso em: 29 ago. 2023.

HLALELE, T. S.; DU, S. Real time monitoring of high voltage transmission line conductor sag: the state-of-the-art. **International Journal of Engineering and Advanced Technology**, vol. 3, no. 1, Pp. 297-302, 2013.

HORN, H. E.; SCHEUNER, J.; PETERMANN, D. **Device and method for positioning flight warning balls on lines, in particular on the earth lines of high voltage power lines**. EP 2916404 B1, 2014.

HYDRO-QUEBÉC. **Unmanned Aerial Vehicle (UAV) landing on a 315 kV test bench**, 2016. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=RqmUvay3BwA. Acesso em: 01 set. 2023.

IEC, **IEC 61897 - Overhead lines - requirements and tests for aeolian vibration dampers**. 2020.

IEEE. **IEEE guide for maintenance methods on energized power-lines**. ANSI/IEEE Std 516 1987, 1988, 7–44, p.1-75, 2005. DOI: 10.1109/IEEESTD.2005.339594.

INMR. **Long lake crossing marker ball & insulator replacement (video)**, 2021. Disponível em: https://www.inmr.com/replacing-insulators-ageing-long-span-lake-crossing-video/. Acesso em: 30 ago. 2023.

INTEL. **Intel® RealSense™ depth camera D455**, 2023. Disponível em: https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d455/. Acesso em: 18 ago. 2023.

ISO, **ISO 2901. ISO metric trapezoidal screw threads - Basic and design profiles**. 2016.

JANS, D. **Apparatus for cleaning the insulators of live power lines by means of helicopters**. EP0479181A2, 1991.

JANS, D. **Device for installing marker balls on overhead cables, particularly live power cables**. US 5038465, 1991.

JIANG, B.; BAO, R.; JIA, J.; ZHONGSHIYU, L.; FU, M. **Robot for cleaning insulators**. RU2659252C1, 2015.

JIANG, W.; YAN, Y.; YU, L.; PENG, M.; LI, H.; CHEN, W. Research on dual-arm coordination motion control strategy for power cable mobile robot. **Transactions of the Institute of Measurement and Control**, Vol. 41, no. 11, p. 3235-3247, 2019. DOI: 10.1177/0142331218822717

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentals of machine component design**. New York: John Wiley, 2006.

KURTGIS, M. P. **Method for washing voltage transmission line insulators**, 1984. US4477289.

KV CABLE. **Power line insulator**, 2023. Disponível em: https://www.kvcable.com/cable-accessories/power-line-insulator/. Acesso em: 30 ago. 2023.

LCMHILINE. **Live Line Insulator Washing**, 2014. Disponível em: http://lcmhiline.com/livelineinsulator.php. Acesso em: 18 ago. 2023.

LEE, J.K.; PARK, J.Y.; CHO, B.H.; OH, K.Y. **Development of inspection tool for live-line insulator strings in 154kV power transmission lines**. 13th European Conference on Power Electronics and Applications, p. 1-8, 2009.

LI, L. **The UAV intelligent inspection of transmission lines**. Paris, France: Atlantis Press, 2015.

LI, Z.; MU, S.; LI, J.; WANG, W. LIU, Y. **Transmission line intelligent inspection central control and mass data processing system and application based on UAV**. IEEE, Pp. 1-5, 2016.

LIMA, E. J.; BOMFIM, M. H. S.; MOURÃO, M. A. M. POLIBOT – Power Lines Inspection Robot. **Industrial Robot: An International Journal**, v. 45, n. 1, p. 98-109, 2018. DOI: 10.1108/ir-08-2016-0217.

LIU, J.; TAN, Q.; ZHAO, Q.; GU, Y. **The research on electromagnetic compatibility of the autonomous inspection robot for power transmission line**. Proceedings of the 2016 International Forum on Energy, Environment and Sustainable Development (IFEESD 2016), Shenzhen, China, Pp. 1091–1094, 2016. DOI: 10.2991/ifeesd-16.2016.196

LOPEZ, R. L.; SANCHEZ, M. J. B.; JIMENEZ, M. P.; ARRUE, B. C.; OLLERO, A. autonomous UAV system for cleaning insulators in power line inspection and maintenance. **Sensors**, 21, 8488, 2021. DOI: 10.3390/s21248488

MAHOUIN, A.; GONÇALVES, R. S. Design of a robot applied to inspection of power transmission lines. **Applied Mechanics and Materials**, 590, p. 551–555, 2014. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.590.551

MALAVIARACHCHI, T.; PERERA, T.; PERERA, S.; RANAWEERA, P. Autonomous approach for high voltage transmission line inspection and fault detection. **International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology**, v. 17, n. 32, p. 1–9, 2016. DOI: 10.5013/IJSSST.a.17.32.14

MARCHI, M. E.; MERINO V. J. Z. **Dynamic analysis of stockbridge shock absorbers**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

MCNALLY, J. **Method for installing an object using an unmanned aerial vehicle**. US 9932110 B2, 2018.

MCNALLY, J. **Method for installing an object using an unmanned aerial vehicle**, US 9932110 B2, 2018.

MENG, F.; XU, B.; ZHANG, T.; MUTHU, B.; SIVAPARTHIPAN, C. B. RETRACTED ARTICLE: Application of AI in image recognition technology for power line inspection. **Energy Systems**, 2021. DOI: 10.1007/s12667-020-00414-8

MILLER, H.C. **Surface flashover of insulators**. IEEE Transactions On Electrical Insulation, v. 24, n. 5, p. 765-786, 1989. DOI: 10.1109/14.42158.

MILLER, R., ABBASI, F., MOHAMMADPOUR, F. Power line robotic device for overhead line inspection and maintenance. **Industrial robot: an international journal**, Vol. 44, Iss 1, p. 75-84, 2017. DOI: 10.1108/IR-06-2016-0165

MIRALLÈS, F., HAMELIN, P., LAMBERT, G., LAVOIE, S., POULIOT, N., MONTFROND, M. AND MONTAMBAULT, S. **LineDrone technology: landing an unmanned aerial vehicle on a power line**. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, p. 6545-6552, 2018. DOI: 10.1109/ICRA.2018.8461250

MME – Ministério de Minas e Energia. **Boletim mensal de monitoramento do sistema elétrico brasileiro**, Abril/2023, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2023/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico-abril-2023.pdf. Acesso em: 30 ago. 2023.

MONTAMBAULT, S.; POULIOT, N. **About the future of power line robotics**. 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry, Carpi 2010, p. 1–6, 2010. DOI: 10.1109/CARPI.2010.5624466

MONTAMBAULT, S.; POULIOT, N. Design and validation of a mobile robot for power line inspection and maintenance. **Springer Tracts in Advanced Robotics**, Vol. 42, p. 495-504, 2008. DOI: 10.1007/978-3-540-75404-6_47

MONTAMBAULT, S.; POULIOT, N. **The HQ LineROVer: contributing to innovation in transmission line maintenance**. IEEE 10th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, 2003. DOI: 10.1109/TDCLLM.2003.1196466

MOORE, J. **UAV fire-fighting system**. US 2013/0134254 A1, 2011.

NGUYEN, V. N.; JENSSEN, R.; ROVERSO, D. Intelligent monitoring and inspection of power line components powered by UAVs and deep learning. **IEEE Power And Energy Technology Systems Journal**, V. 6, N. 1, p. 11–21, 2019. DOI: 10.1109/JPETS.2018.2881429

NOR, N. M.; RAMLI, A. Electrical properties of dry soil under high impulse currents. **Journal of Electrostatics**, 65, p. 500–505, 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.elstat.2006.11.005

NURIEV, M. G.; GIZATULLIN, Z. M.; GIZATULLIN, R. M. Physical Modeling Of Electromagnetic Interferences In The Unmanned Aerial Vehicle In The Case Of High-Voltage Transmission Line Impact. **Russian Aeronautics**, v. 60, n. 2, p. 292–298, 2017.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Mapa do sistema de transmissão - horizonte 2027**, 2023. Disponível em: https://www.ons.org.br/_layouts/download.aspx?SourceUrl=https://www.ons.org.br/Mapas/Mapa%20do%20Sistema%20de%20Transmissao%20-%20Horizonte%202027.pdf. Acesso em: 30 ago. 2023.

OTT, H. **Electromagnetic compatibility engineering**, 3rd ed.; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, p. 238–301, 2009. DOI: 10.1002/9780470508510

PAGNANO, A.; HÖPF, M.; TETI, R. **A roadmap for automated power line inspection. maintenance and repair**. Procedia Cirp, V. 12, p. 234–239, 2013. DOI: 10.1016/J.Procir.2013.09.041.

PAKALA, W. E.; CHARTIER, V. L. Radio noise measurements on overhead power lines from 2.4 to 800 kV. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 3, p. 1155–1165, 1971. DOI: 10.1109/TPAS.1971.292880

PARK, J.; CHO, B.; BYUN, S.; LEE, J. Development of cleaning robot system for live-line suspension insulator strings. **International Journal of Control, Automation, and Systems**, 2009, p. 211–220, 2009. DOI: 10.5772/56791

PARK, J.; SONG, S.; CHO, B.; BYUN, S.; KIM, J. **Robot mechanism for cleaning and inspection of live-line insulators**. U.S. Patent 7,797,781, 2010.

PARK, Y.; JAE, J.; HAN, Y. **Airplane warning sphere installation robot and control method for the same**. KR 10-2017-0045975, 2015.

PELLERIN, L.; ALUMBAUGH, D. L.; REINEMANN, D. J.; THOMPSON, P. D. **Power line induced current in the earth determined by magnetotelluric techniques**. Applied Engineering in Agriculture, v. 20, n. 5, p. 703-706, 2004. DOI: 10.13031/2013.17450

PERMATA, D.; GURNING, M. C.; MARTIN, Y.; SITORUS, H. B. H.; MUDA, M. A.; SINAGA, H. H. Electromagnetic interference shielding in unmanned aerial vehicle against lightning strike. **Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)**, vol. 17, no. 2, p. 915-919, 2019. DOI: 10.12928/telkomnika.v17i2.9029

PHILLIPS. **Apparatus and method for inspections high voltage insulators**. U.S. Patent 8991273, 2012.

PINHEIRO, M. J. C., LINS, E. A. **Sistema robotizado para detecção de falhas em cabos de linhas de transmissão através de radiografia digital com instalação energizada**, 19º Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, RJ, 8 p., 2007. Disponível em: http://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/03/SISTEMA-ROBOTIZADO-PARA-DETECC%CC%A7A%CC%83O-DE-FALHAS-EM-CABOS-DE-LINHAS-DE-TRANSMISSA%CC%83O-ATRAVE%CC%81S-DE-RADIOGRAFIA-DIGITAL-COM-INSTALAC%CC%A7A%CC%83O-ENERGIZADA.pdf. Acesso em: 30 ago. 2023.

PINTO, M. O. **Energia elétrica: geração, transmissão e sistemas interligados**. LTC, Rio de Janeiro, 2014.

PJ HELICOPTERS. **Projects**. Disponível em: https://www.pjhelicopters.com/projects. Acesso em: 18 ago. 2023.

PLP. **UAV Installation Services - Bird Diverters**, 2020. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=PfkRt2W7NAk. Acesso em 01 set. 2023.

POULIOT, N.; RICHARD, P.-L.; MONTAMBAULT, S. LineScout technology opens the way to robotic inspection and maintenance of high-voltage power lines. **IEEE Power and Energy Technology Systems Journal**, Vol. 2, nº 1, 2015. DOI: 10.1109/JPETS.2015.2395388

PU, S.; XIE, L.; LI, M.; ZHAO, Y.; LIU, W.; WANG, L.; ZHAO, Y.; YANG, F.; QIU, D. **Real-time powerline corridor inspection by edge computing of UAV Lidar Data.** International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences - Isprs Archives, V. 42, N. 2/W13, p. 547–551, 2019.

PX4, **Pixhawk 2.1 Cube Black**. 2020. Disponível em: https://docs.px4.io/main/en/flight_controller/pixhawk-2.html; Acesso em: 04 ago. 2023

QUEIROZ, A. R. S.; SENGER, E. C. **A Natureza e os riscos do arco elétrico**. 5 p, 2012. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wpcontent/uploads/2012/03/Ed72_fasc_arco_eletrico_cap1.pdf. Acesso em 15 set. 2023.

RASPBERRY PI, **Raspberry Pi 3 Model B+**, 2020. Disponível em: https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/ Acesso: em 04 ago. 2023

RAYMOND, W. J. K.; ILLIAS, H. A.; BAKAR, A. H. A.; MOCKLIS, H. Partial discharge classifications: review of recente progress. **Measurement**, Vol. 68, p. 164-181, 2015. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.02.032

RCDRONE. **EFT E610P agriculture drone - 10L 10KG 15-35min 6-Axis sprayer drone**, 2023. Disponível em: https://rcdrone.top/products/eft-e610p-agriculture-drone. Acesso em: 01 set. 2023.

ROCHA, J.; SEQUEIRA, J. **The development of a robotic system for maintenance and inspection of power lines**. Proceedings of the 35th International Symposium on Robotics, ISR2004, Paris, Pp. 1-6, 2004. Disponível em: https://welcome.isr.tecnico.ulisboa.pt/wp-content/uploads/2015/05/1305_04-ISR2004-Inspection_Power_Lines.pdf. Acesso em 30 ago. 2023.

RUI, G.; YONGGANG, J.; FENG, Z.; LEI, C.; LIANG, Z.; JUAN, J. **Robot for automatically loading and unloading aviation marker balls**. CN 102975192 B, 2014.

SILANO, G.; BEDNAR, J.; NASCIMENTO, T.; CAPITAN, J.; SASKA, M.; OLLERO, A. **A multi-layer software architecture for aerial cognitive multi-robot systems in power line inspection tasks**. 2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Athenas, Grécia, 2021.

SIMAS, H.; BARASUOL, V.; KINSELER, R.; RAPOSO, E.; MARTINS, D.; PIERI, E. R.; DE NEGRI, V. J.; STEMMER, M.; CASTELAN, E. B. Kinematic conception of a hydraulic robot applied to power line insulators maintenance. **ABCM Symposium Series in Mechatronics**, V. 4, p. 739-748, 2010.

SIMIC, M.; BIL, C.; VOJISAVLJEVIC, V. **Design of a recharge station for UAVs using non-contact wireless power transfer**, Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, p. 1–11, 2016. DOI: 10.2514/6.2016-1525.

SIMIC, M.; BIL, C.; VOJISAVLJEVIC, V. **Investigation in wireless power transmission for UAV charging**. Procedia Computer Science, V. 60, n. 1, p. 1846–1855, 2015. DOI: 10.1016/j.procs.2015.08.295.

SKIVE AVIATION AIRBORNE ROBOTICS, **SKIVE Powerline Robot.** 2015. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=S3iCIUA5B0s. Acesso em: 18 ago. 2023.

SOUSA, R. O.; PONTES, R. S. T.; AGUIAR, V. P. B.; LUNA, A. M.; ANDRADE, C. T. C. **Technique of dry washing of the insulators of the electrical nets of distribution**. 11ª

Conferência Espanhola-Lusa de Engenharia Elétrica, 2009. Disponível em: http://www.aedie.org/webrevista/articulos/num1/163-sousa.pdf.

SOUZA, C. F.; SANTOS, E. R. **Robô instalação e remoção de esfera de sinalização aérea**. BR 102013013343-4 A2, 2015.

STEWART, J. R.; DALE, S. J.; KLEIN, K. W. Magnetic field reduction using high phase order lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 8, Pp. 628–636, 1993 DOI: 10.1109/61.216869

TAKAYA, K.; OHTA, H.; KROUMOV, V.; SHIBAYAMA, K.; NAKAMURA, M. **Development of UAV system for autonomous power line inspection**. 23rd International Conference On System Theory, Control And Computing, ICSTCC 2019 - Proceedings, p. 762–767, 2019. DOI: 10.1109/ICSTCC.2019.8885596

TENG, G. E.; ZHOU, M.; LI, C. R.; WU, H. H.; LI, W.; MENG, F. R.; ZHOU, C. C.; MA, L. **Mini-UAV Lidar for power line inspection**. International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, V. 42, N. 2w7, Pp. 297–300, 2017. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W7-297-2017

TENGFEI, S.; RONGHAI, L.; XIN, Z.; ZHANGQIN, W.; XINLIANG, G.; YINGCHUN, Y.; HONGWEI, X. **Electrified insulator cleaning method based on unmanned aerial vehicle**. CN105170523A, 2015.

THOMAZINI, D.; GELFUSO, M. V. **Dispositivo para limpeza e inspeção de cabos e isoladores da rede elétrica à distância**. BR 102014020138-6 A2, 2016.

THROWFLAME. **TF-19 WASP flamethrower drone attachment**, 2023. Disponível em: https://throwflame.com/products/flamethrower-drone-kit/. Acesso em: 19 jul. 2023.

TIAN, F.; WANG, Y.; ZHU, L. **Power line recognition and tracking method for UAVs inspection**. IEEE, p. 2136–2141, 2015. Disponível em: http://ieeexplore.ieee.org/document/7279641/. Acesso em 01 ago. 2023.

UNGUREANU, M.; RUSU, A. C.-T.; BARAN, I. Field components of the electromagnetic environment related to the presence of the overhead transmission lines. **WSEAS Transactions on Environment and Development**, Vol. 3, p 149–164, 2007.

VASCONCELOS, F. M. Geração, **Transmissão e distribuição de energia elétrica**. Educacional S. A., Londrina, 224 p, 2017. ISBN: 978-85-522-0179-3

VASQUEZ-ARNEZ, R. L.; JARDINI, M. G. M.; MASUDA, M.; CARITA, L. A.; JARDINI, J. A. **Preventive inspection of line insulators through corona emission: a case study**. Proceedings of the IEEE PES T&D 2010, New Orleans, LA, USA, p. 1–6, 2010. DOI: 10.1109/TDC.2010.5484226

VISSER, T. C.; GOUWS, R. **Transmission line monitoring system for a power line inspection robot**. South Africa, 2013.

WANG, L., WANG, H. **A survey on insulator inspection robots for power transmission lines**. 4th International Conference on Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), 2016. DOI: 10.1109/CARPI.2016.7745639.

WANG, L.; WANG, H.; SONG, Y.; PAN, X. Development of a bio-inspired live-line cleaning robot for suspension insulator strings. **International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology**, 17, 24, p. 1–24, 2016. DOI: 10.5013/IJSSST.a.17.48.24

WEATHERSPARK. **Clima e condições meteorológicas médias em Florianópolis no ano todo**, 2023. Disponível em: https://pt.weatherspark.com/y/30020/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Florian%C3%B3polis-Brasil-durante-o-ano. Acesso em 29 ago. 2023.

WORLD CHANNEL. **Extreme Jobs - High Voltage Power Line Inspection.** Vídeo. disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=9YmFHAFYwmY. Acesso em 28 ago. 2023.

WORX. **Limpador de alta pressão portátil à bateria 20 V MAX lithium-ion bivolt**. 2023. Disponível em: https://ferramentasworx.com.br/index.php/wg629e-9/. Acesso em: 04 ago. 2023

WU, G.; XIAO, H.; XIAO, X.; HUANG, Z.; LI, Y. **Transmission line inspection robot and deicing robot: Key technologies, prototypes and applications**. 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry, CARPI 2010, p. 1–6, 2010. DOI: 10.1109/CARPI.2010.5624452

YAN, Y.; JIANG, W.; ZOU, D.; QUAN, W.; LI, H. J.; LEI, Y.; ZHOU, Z. F. Research on mechanism configuration and coordinated control for power distribution network live working robot. **Industrial Robot**, Vol. 47, n. 3, p. 453–462, 2020. DOI: 10.1108/IR-02-2020-0036

YING, P.; HONGWEI, L.; CHINA, X.; LI, G.; YONG, L.; JIANGLU, H. **Power line deicing robot**. CN206820434U, 2017.

YONGGANG, J.; LIANG, Z.; RUI, G.; LEI, C.; JUAN, J.; FENG, Z. **Automatic handling device for aviation mark balls**. CN 203045255 U, 2013.

ZHANG, F.; CAO, L.; GUO, R.; ZHANG, L.; JIA, J.; JIA Y.; CHI, X. **Extended applications of LineROVer technology**. 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), 2013.

ZHENHUA, Y. **High-voltage transmission line aviation warning ball and installation method thereof**. CN 103489284 B, 2015.

ZHOU, G.; YUAN. J; YEN, I. BASTANI, F. **Robust real-time UAV based power line detection and tracking**. IEEE, Pp. 744–748, 2016. Disponível em: http://ieeexplore.ieee.org/document/7532456/. Acesso em: 21 ago. 2023

ZHU, X.; LI, X.; YAN, F. Design and implementation for integrated UAV multi-spectral inspection system. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 133, n. 1. p. 012006, 2018. Disponível em: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/133/1/012006

APÊNDICE A

AUTOMATIZAÇÃO DO DRONE PARA REALIZAÇÃO DE MOVIMENTOS AUTOMÁTICOS VIA CONTROLADORA PIXHAWK

A.1 Estabelecimento do controle de atitude automático

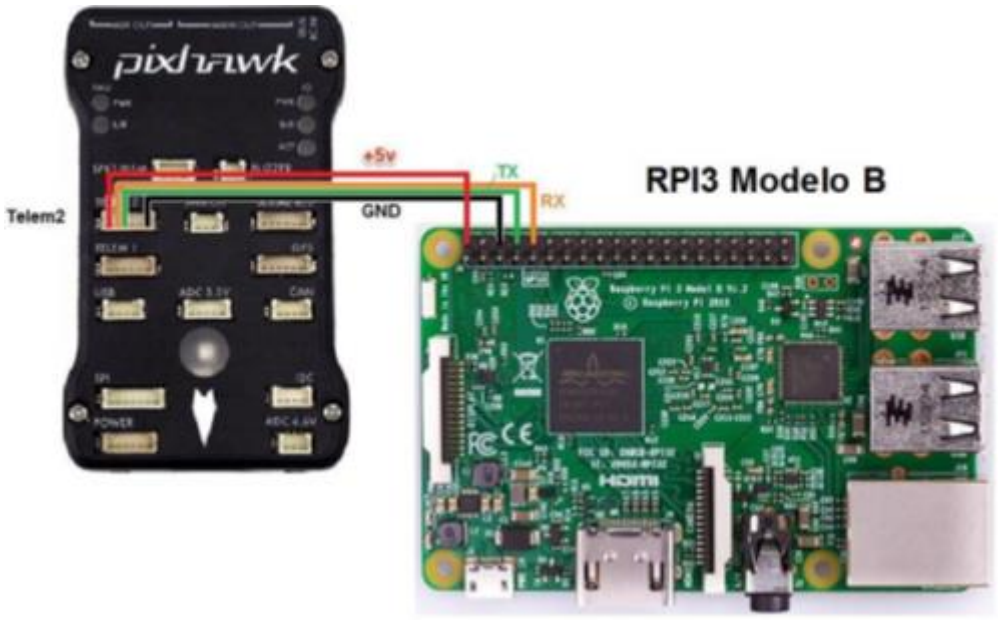
No início deste projeto, após a montagem e testes iniciais do funcionamento do hexacóptero EFT E610, e estabelecimento do controle de atitude manual, foi verificada a possibilidade da implementação do controle de atitude automático do drone. Este controle se deu pela automatização de determinadas atividades a serem desempenhadas pelo drone, uma vez que muitas das mesmas dificilmente seriam executadas adequadamente de forma manual via rádio controle. As três operações que foram propostas para automatização foram: a de pouso do drone próximo às linhas de transmissão para liberar ou buscar módulos robóticos nas linhas (descrita no Apêndice B); manutenção de distância constante do drone em relação a cadeias de isoladores e operação automática de limpeza de isoladores.

Para realizar a automatização, foi necessário o emprego de um dispositivo acessório para enviar comandos por comunicação serial para o controlador de voo Pixhawk. A plataforma Raspberry Pi foi selecionada nesta tese, uma vez que ela apresenta a possibilidade de realizar tal comunicação, automatizando assim as operações desempenhadas pelo controlador de voo.

A comunicação serial com o Raspberry Pi pode ser efetuada por meio de conectores presentes no barramento de entrada e saída deste sistema (GPIO). A comunicação serial pode ser realizada com um cabo que contempla somente as funções básicas desta forma de comunicação, que são alimentação, terra, via de emissão (Tx) e de recepção (Rx) de dados. A conexão com a Pixhawk por sua vez se dá pela entrada de telemetria (TELEM) deste controlador. A Figura A.1 mostra um esquema da conexão do Raspberry Pi com o

controlador Pixhawk 1. A comunicação com o controlador Pixhawk 2 Cube ocorre de maneira similar.

Figura A.1 – Conexão serial entre Pixhawk 1 e Raspberry Pi 3B+.



Fonte: ALKADHIM, S. A. S. **Communicating with Raspberry Pi via MAVLink**. SSRN Electronic Journal, 2019. DOI: 10.2139/ssrn.3318130

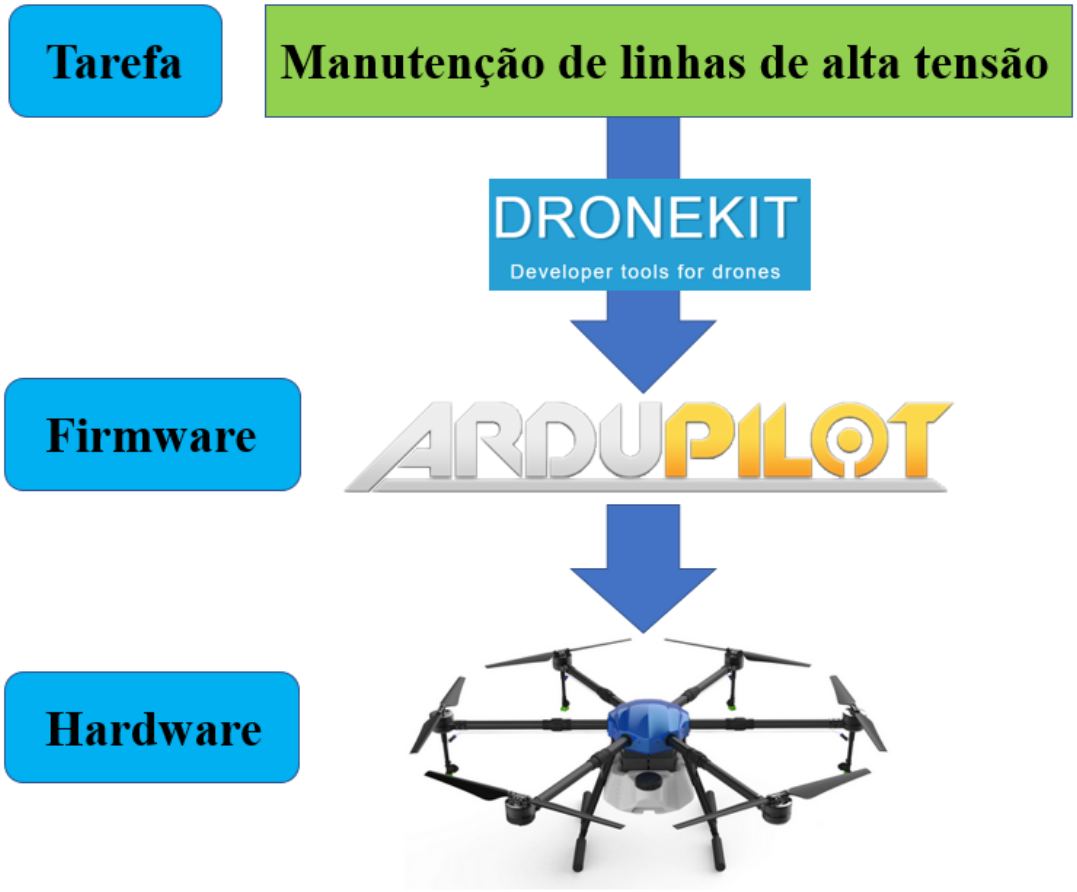
A comunicação via telemetria com o *firmware* Ardupilot se dá por meio de um protocolo de comunicação denominado MAVLink (*Micro Air Vehicle Link*). Este protocolo apresenta várias mensagens que podem ser enviadas e recebidas pelo controlador de voo visando realizar alterações automáticas no funcionamento do drone. O rádio controle opera em contato com o controlador por este mesmo protocolo. Uma das vantagens deste protocolo é a possibilidade de envio de mensagens por linha de código por um componente externo, permitindo assim a automatização de diversas operações de comando do drone.

O sistema operacional utilizado no Raspberry Pi foi o Raspbian. A programação dos algoritmos foi efetuada em linguagem Python, uma vez que as bibliotecas e aplicações disponíveis para automatização pelo Ardupilot foram desenvolvidas nesta linguagem. A biblioteca que possibilita a comunicação serial é a MAVProxy. Dentre estas ainda, é de grande relevância a Dronekit.

A Dronekit é uma biblioteca da linguagem de programação Python que atua como uma API de alto nível que permite a implementação de comunicação via protocolo MAVLink

com maior facilidade. A Dronekit permite então a automatização completa das operações de voo de um drone, que utilize um controlador com o *firmware* Ardupilot. Dentre suas funções, pode-se destacar a possibilidade de alteração de modos de voo, movimentação automática da aeronave, desempenho de missões pré-programas, envio de mensagens de sensores ao controlador de forma completamente automatizada. A Figura A.2 mostra a hierarquia de níveis de projeto da operação de drones, em que a API Dronekit se situa como ponte para comunicação entre protocolo MAVLink e *firmware* Ardupilot.

Figura A.2 – Níveis de projeto da aplicação proposta, do mais alto ao mais baixo.



Fonte: Autor.

A.2 Construção e operação de um drone de pequeno porte auxiliar para teste

Visando garantir a integridade do drone dedicado aos testes finais e posterior utilização em campo, foi proposta a construção e utilização de um drone auxiliar de escala menor para realização dos testes de automatização. Este procedimento se justifica pelo fato do controlador Pixhawk 2 Cube utilizado no drone EFT E610 funcionar com o mesmo firmware que opera a controladora Pixhawk 1, que é a utilizada no drone de menor escala.

Portanto, os testes de automatização no drone auxiliar são suficientes para determinar se a estratégia de automatização funciona com a Pixhawk 2, e evitar inconvenientes à segurança tanto do drone quanto do operador durante o processo de desenvolvimento da estratégia.

O modelo escolhido para construção e implementação dos testes iniciais de automatização foi o drone modelo F450 da DJI. Este drone é um quadricóptero que pode ser montado com peças disponíveis no mercado. A Figura A.3 mostra o drone construído. Os componentes utilizados na construção deste drone foram:

- Controlador de voo Pixhawk 1;
- Estrutura (*Frame*) modelo F450;
- Motores sem escovas (*brushless*) padrão DJI 920 kv, sendo 2 de rosca de giro no sentido horário (CW) e 2 no sentido anti-horário (CCW), do fabricante Ready to Sky;
- 4 circuitos ESC (*Electronic Speed Controlers*), um dedicado a cada motor;
- GPS modelo NEO-M8N, compatível com o controlador Pixhawk 1;
- Rádio controle Flysky Fsi6;
- Receptor de rádio controle em 2,4 GHz modelo Flysky FsiA6B;
- Baterias LiPo 3S de 11,1 V e 5200 mAh do fabricante Tattu;
- Módulo de potência para conexão de baterias LiPo;
- 4 Hélices de nylon de 10 polegadas de comprimento;
- Trem de pouso em plástico;
- Apito (*Buzzer*) para indicação de operação do drone;
- Raspberry Pi 3 B+ acoplado à parte inferior do frame;
- Câmera para Raspberry Pi modelo Pi Camera;
- Sensor ultrassônico modelo JSN-SR04T a prova de água para detecção de distância, e circuito condicionador de sinal próprio.

No controlador Pixhawk 1 foi instalado o *firmware* Ardupilot e foi realizada a configuração deste. O rádio controle FlySky Fsi6 foi programado para contemplar diversas funções determinantes para o processo de automatização. As alavancas do rádio são programáveis, de modo que o usuário pode definir quais modos de voo serão acionados pelo movimento dessas chaves. Uma das chaves foi dedicada para acionamento do programa da automatização do drone (canal 7, conforme Fig. A.7). A Figura A.3 mostra o rádio controle citado.

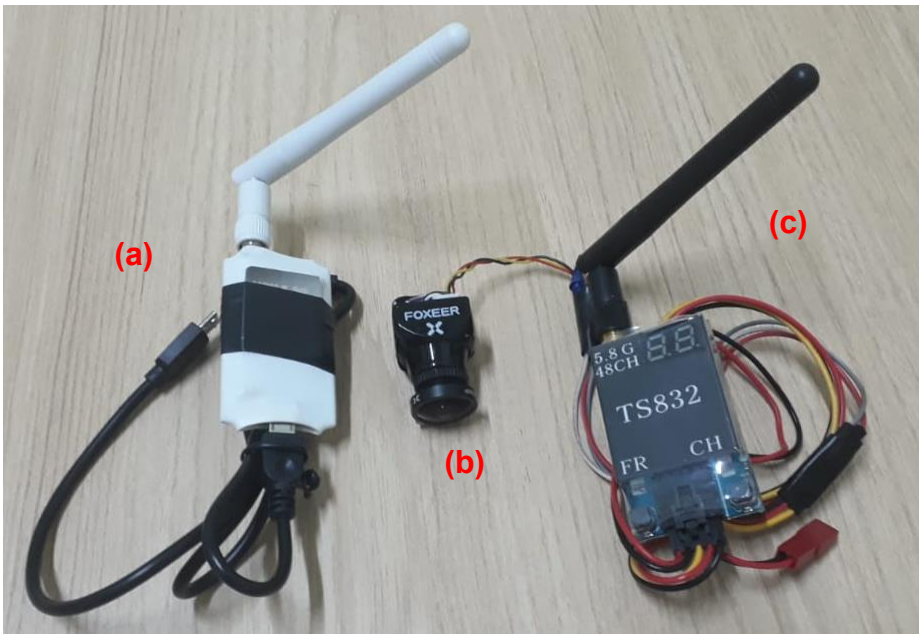
Figura A.3 – (a) Drone modelo F450 construído e (b) rádio controle Flysky Fsi6.



Fonte: Autor.

A câmera utilizada na região frontal do drone foi a Foxeer Arrow Mini, que possui alimentação de 5 V. Um sistema transmissor/receptor de rádio frequência foi utilizado para transmissão da imagem da câmera, que opera na frequência de 5,8 GHz. O receptor foi conectado a um celular smartphone, via cabo USB. A Figura A.4 mostra os componentes do sistema de visão e a Fig. A.5 mostra imagens captadas no celular com o aplicativo "*USB camera*".

Figura A.4 – Sistema de visão: (a) receptor com cabo USB, (b) câmera Foxeer Arrow Mini, (c) transmissor 5,8 GHz.



Fonte: Autor.

Figura A.5 – Imagens da câmera Foxeer captadas pelo aplicativo “USB Camera”, durante um voo livre realizado com o drone F450.

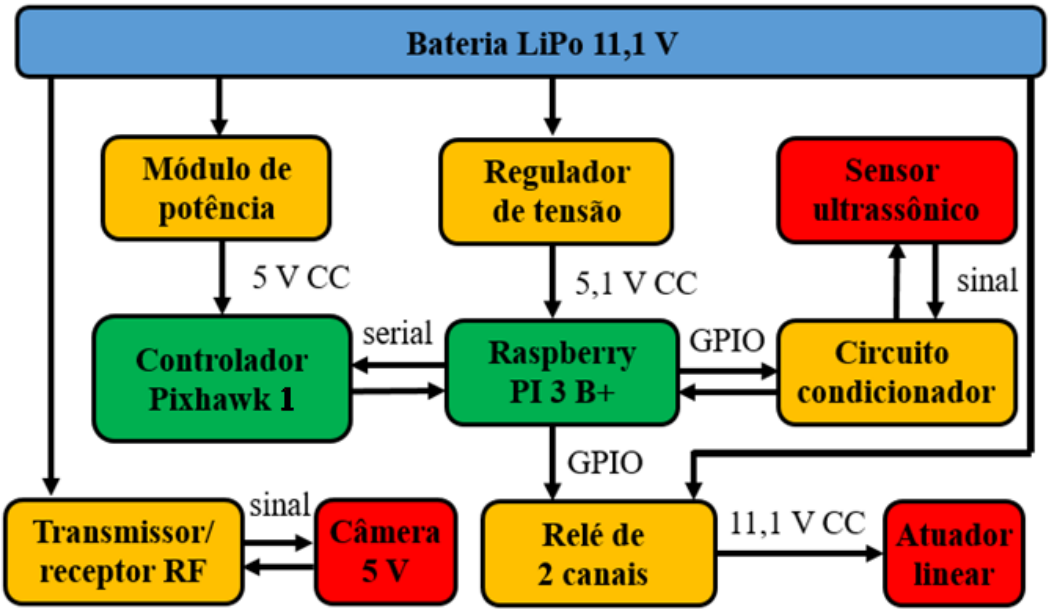


Fonte: Autor.

A.3 Automatização dos movimentos do drone

O sistema eletrônico para movimentação automatizada do drone, com o intuito de simular o funcionamento do módulo robótico de limpeza de cadeias de isoladores, incluiu o controlador de voo Pixhawk 1 em comunicação com um Raspberry Pi 3 B+. Esta conexão permitiu a automatização dos movimentos do drone. O Raspberry Pi controla um atuador linear com o intuito de simular o acionamento da lavadora. Um sensor ultrassônico de distância foi utilizado para detecção da distância do drone à cadeia de isoladores. A Figura A.6 apresenta o esquema do sistema eletrônico abordado.

Figura A.6 – Esquema do sistema eletrônico do drone.



Fonte: Autor.

Para simulação da limpeza de isoladores automatizada, foi proposta uma rotina de movimentos automáticos que envolvem tanto operações de subida e descida do drone, enquanto lava os isoladores, quanto movimentos circulares em torno da cadeia, para alterar o posicionamento dos jatos de água emitidos. Este movimento circular é desempenhado quando o drone se encontra no modo de voo “Circle”, e pretende contemplar superfícies dos isoladores que uma lavagem somente frontal não poderia atingir. O fluxograma do algoritmo que contempla a rotina de limpeza está mostrado na Fig. A.7.

Após a proposição da rotina de movimentos automáticos a serem desempenhados pelo drone e a implementação e programação do sistema eletrônico do drone F450, foram realizados testes preliminares. As funções automáticas foram testadas separadamente, visando paulatinamente verificar o seu funcionamento na prática. Inicialmente foram realizados testes sem giro das hélices, visando somente verificar a resposta do controlador ao envio das mensagens pelo Raspberry Pi. As etapas seguidas foram:

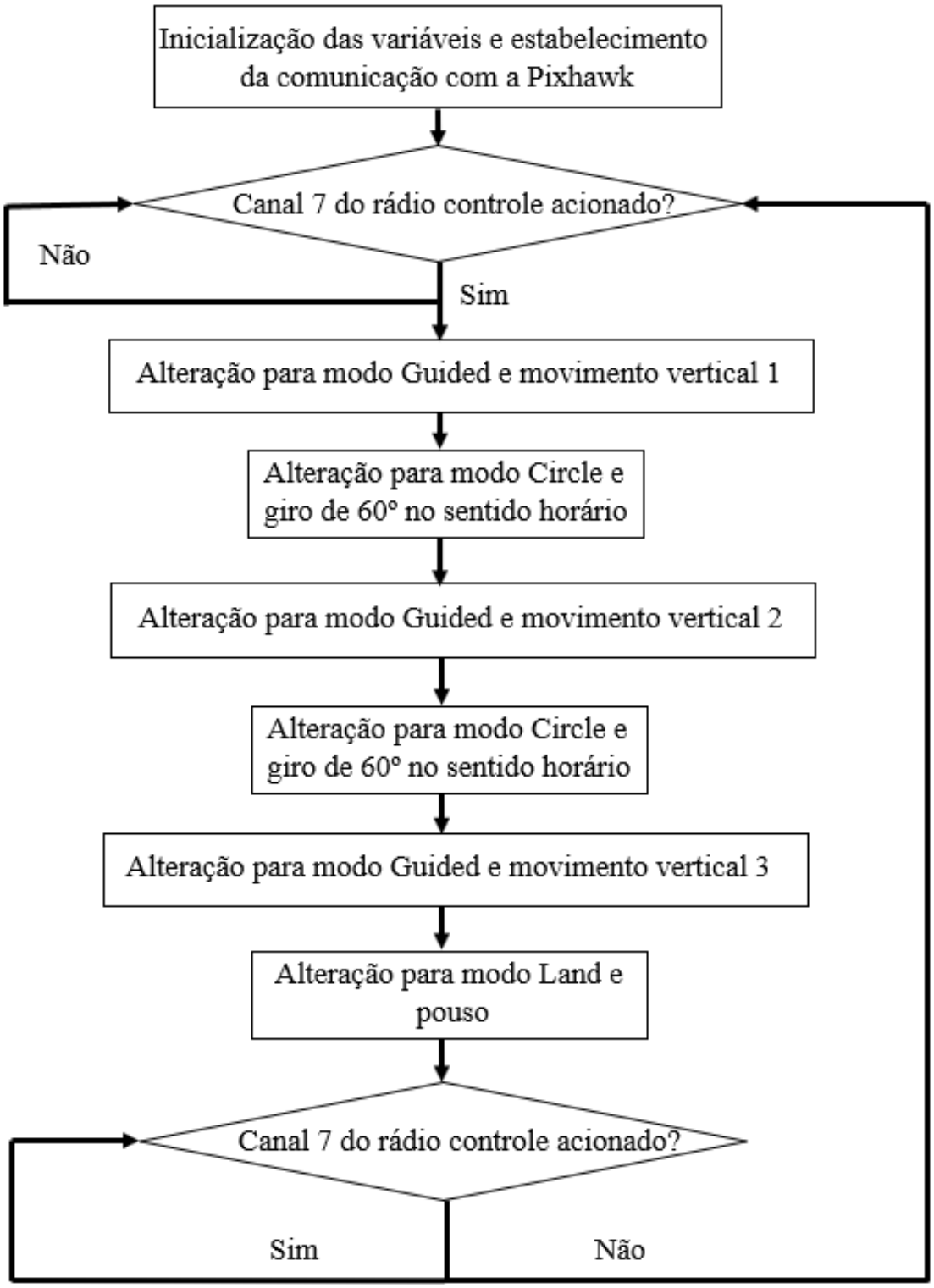
- Movimentação vertical no modo *Guided*;
- Movimentação automática no modo *Circle*;
- Movimentação conjunta nos modos *Guided* e *Circle*.

Após os testes preliminares, foram testados em campo com o drone F450 os movimentos automáticos programados. Para simular as cadeias de isoladores foram utilizados cilindros de isopor de 50 cm de altura e 25 cm de diâmetro. Foram empilhados três cilindros para alcançar a altura aproximada da cadeia de referência. O motivo para tal simulação foi facilitar a montagem e transporte, pelo fato de o isopor apresentar menor massa que as cadeias. Além disso, caso o drone colidisse com o isopor, não seriam causados danos à aeronave. A Figura A.8 mostra os cilindros utilizados, bem como a cadeia simulada formada.

Cada um dos três movimentos verticais (1 ,2 e 3) descritos no fluxograma da Figura A.7 contemplaram as seguintes etapas:

a) Movimento descendente, com velocidade constante de 0,3 m/s e distância vertical a percorrer de 0,6 m
b) Movimento ascendente, com velocidade constante de 0,3 m/s e distância vertical a percorrer de 0,6 m;

Figura A.7 – Fluxograma do algoritmo de automatização da limpeza da cadeia de isoladores.



Fonte: Autor.

Figura A.8 – (a) Cilindros de isopor utilizados. (b) Cadeia simulada formada com três cilindros empilhados.



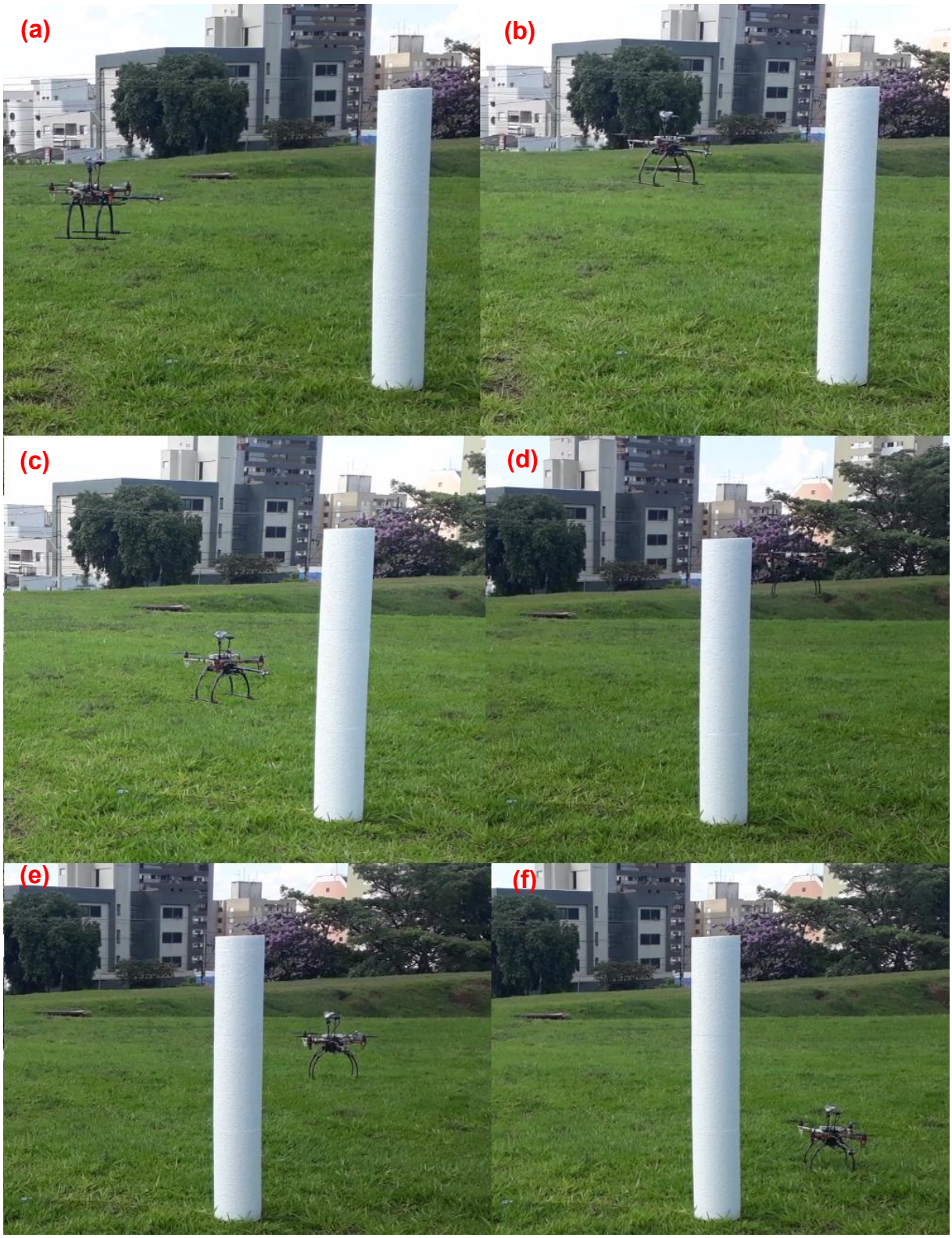
Fonte: Autor.

A.4 Testes de automatização com o drone F450

Conforme proposto anteriormente, a automatização do drone F450 foi testada. O drone foi decolado e aproximado da cadeia manualmente, situado a aproximadamente 1 metro da cadeia simulada. A chave do rádio controle para iniciar o procedimento de automatização foi então acionada. A Figura A.9 mostra as etapas programadas em execução.

Percebeu-se que na etapa de limpeza vertical 3 o drone não se manteve alinhado à cadeia, de forma que com o emprego de uma lavadora, o jato de água não atingiria o alvo. Isso se deu porque a controladora Pixhawk 1 não apresenta alta exatidão em seus controles de voo. Além disso, um ajuste mais refinado dos parâmetros de controle PID do drone pode ser necessário.

Figura A.9 – Execução da rotina de simulação da limpeza das cadeias pelo drone F450 - (a) etapa de limpeza vertical 1, (b) etapa 1 de giro em torno da cadeia em 60°, (c) etapa de limpeza vertical 2, (d) etapa 2 de giro em torno da cadeia em 60°, (e) etapa de limpeza vertical 3, (f) etapa de pouso.



Fonte: Autor.

A.5 Construção de drone F550 para testes das funções de automatização testadas

Visando a melhoria da estabilidade nas operações automáticas desempenhadas pelo drone F450 e validação do processo com segurança, um drone hexacóptero F550 foi construído. Este drone é considerado a evolução do modelo F450, principalmente no quesito estabilidade, por apresentar funcionamento com seis motores. Testes de voo simples foram realizados, porém sem resultados superiores aos alcançados com o drone F450.

Percebeu-se a dificuldade de se encontrar estabilidade de voo, principalmente no modo *Loiter*. Possíveis causas incluem o projeto mecânico deficiente, em que o equilíbrio das massas e momentos não tenha sido realizado de forma a estabilizar o drone durante o voo, e a incapacidade da controladora Pixhawk 1 em manter estabilidade suficiente para que operações como a de limpeza de cadeias de isoladores possam ser levadas a efeito. Portanto, optou-se por não migrar os desenvolvimentos implementados para o drone EFT E610, já que nos protótipos as funções de automatização não foram satisfatoriamente implementadas.

Por fim, decidiu-se por realizar a movimentação dos drone-robôs construídos nessa tese diretamente pelo rádio controle do drone, sem envolvimento de operações de automação do voo, mas com automações em outros subsistemas das soluções.

A.6 Conclusões

Dificuldades foram encontradas na estabilização dos movimentos dos drones de teste, principalmente quando o drone estava no modo *Loiter*.

Os testes relatados ainda não contemplaram a função de manutenção de distância fixa da cadeia, que não foi completamente desenvolvida. Deve-se ainda desenvolver um programa que, com base nas funções da biblioteca *Dronekit*, ou com outro controlador de voo, permita ao drone se posicionar automaticamente distante da cadeia, baseado na leitura contínua da distância.

Outra demanda para implementação nos programas de automatização diz respeito às rotinas de segurança, uma vez que o drone EFT E610 é de grande porte, e caso seja perdido seu controle, pode oferecer riscos à sua própria integridade ou de pessoas e objetos que venha a atingir.

Trabalhos futuros devem promover melhorias nesse quesito, com o intuito de permitir uma automatização do voo do drone com movimentos estáveis, confiabilidade e segurança tanto para a integridade do equipamento quanto dos operadores humanos envolvidos na tarefa.

APÊNDICE B

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE VISÃO PARA POUSO DO DRONE E TRANSPORTE DOS MÓDULOS ÀS LINHAS DE ALTA TENSÃO

Diferentemente do drone-robô para limpeza de cadeias de isoladores descrito no Capítulo 3, os drone-robôs para remoção de detritos e instalação de amortecedores *stockbridge* trabalham com o seu desacoplamento do drone que os transporta. Estes módulos trabalham de forma autônoma sobre a linha, se movimentando para efetuar as tarefas para as quais foram projetados. Ao término das operações, o drone é levado à linha para recolher o módulo e trazê-lo de volta ao solo.

Para orientar o piloto do drone na realização das operações, um sistema de visão foi proposto tanto para detecção da linha de alta tensão em que a liberação do módulo será realizada quanto para identificação e recolhimento do módulo já presente na linha.

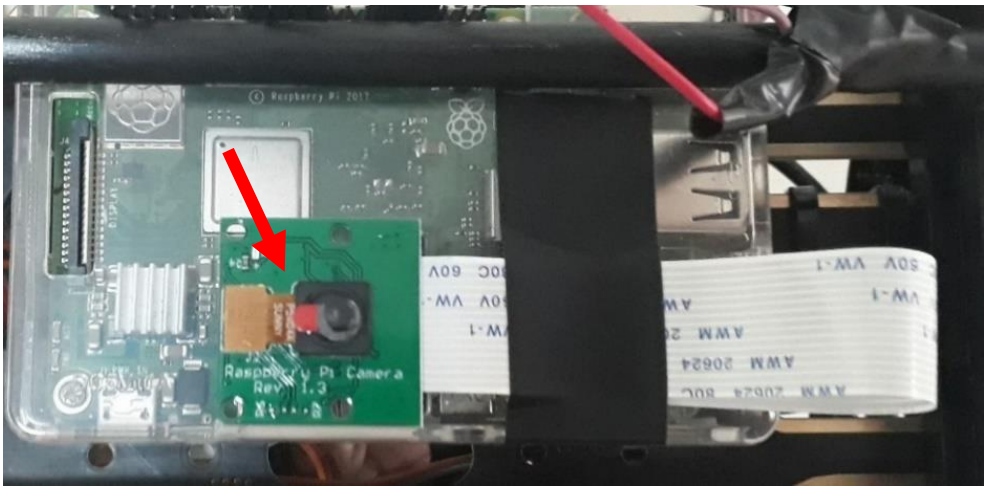
B.1 Implementação de função de detecção da linha de alta tensão e pouso automatizado

Para que o pouso dos drone-robôs nas linhas de alta tensão se faça de maneira eficaz e segura, foi proposta a utilização de uma câmera acoplada ao drone e posterior processamento de imagens. Este sistema reconhece a linha abaixo do drone, com base nas imagens da câmera, e auxilia o operador do drone a realizar o pouso na linha. Em seguida, a fechadura magnética de acoplamento é desativada, e o módulo transportado é deixado sobre a linha. O drone então poderá retornar à base de onde iniciou o seu voo.

O drone F450 (introduzido no apêndice A) foi utilizado como auxiliar para implementação e teste deste sistema. O sistema eletrônico implementado para detecção da linha e pouso automático é semelhante ao já descrito no Apêndice A, com a diferença de que a câmera utilizada foi a Pi Camera, própria para o Raspberry Pi. Esta câmera apresenta

uma resolução máxima de 1920x1080 pixels. A Figura B.1 mostra a câmera acoplada ao Raspberry Pi. A câmera foi posicionada de modo que a linha detectada fosse paralela à direção frontal do drone, permitindo assim seu pouso com orientação correta.

Figura B.1 – Câmera Pi Camera (em destaque), posicionada em paralelo à direção frontal do drone.



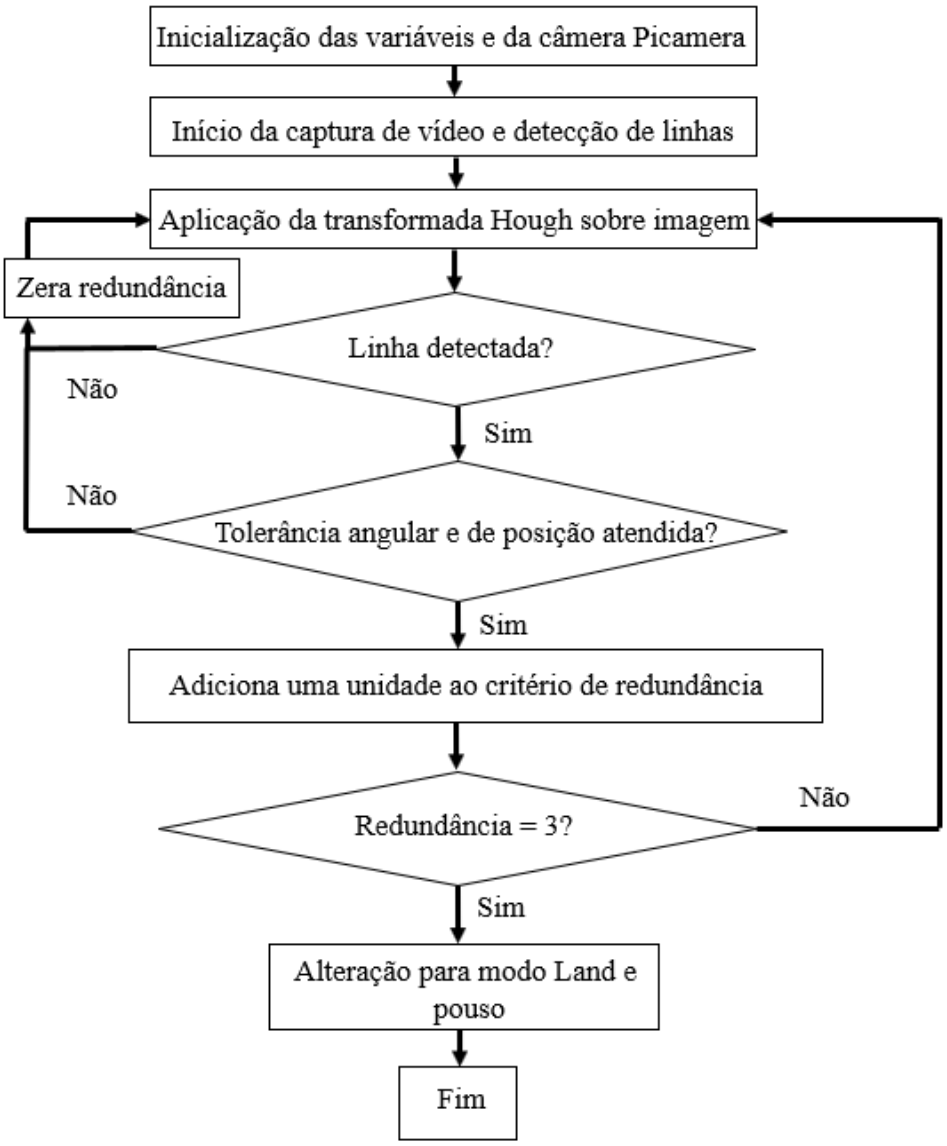
Fonte: Autor.

A biblioteca de programação *OpenCV*, em linguagem Python, foi utilizada para implementar funções pré-programadas de processamento de imagens. Dentre elas, foi usada a Transformada Hough. Esta transformada matemática, utilizada no contexto de processamento digital de imagens, é capaz de detectar linhas retas em uma imagem qualquer. Um algoritmo detector de bordas Canny foi utilizado para pré-processamento da imagem captada. A primeira versão da função de detecção de linhas incluía o envio de comandos automáticos ao controlador do drone para pouso automático, após detecção da linha com sucesso. Esses comandos foram programados por meio da biblioteca *Dronekit*, introduzida no Apêndice A. O fluxograma do algoritmo para detecção de linha e pouso, que foi implementado para testes com o drone F450, é apresentado na Fig. B.2.

Os critérios de tolerância adotados no algoritmo para confirmar se o drone estava posicionado adequadamente para pouso foram: se a linha detectada apresentava inclinação máxima de 3° em relação à linha reta vertical central da imagem, e se a distância máxima da coordenada horizontal da linha detectada variava de no máximo 15% da posição horizontal da linha vertical central. Para ilustrar visualmente estes critérios, pode-se dizer que a linha detectada deveria estar completamente situada no interior do retângulo sombreado ilustrado na Fig. B.3, tanto em posição como inclinação. A linha detectada nesta imagem é ilustrada em vermelho.

Por meio de transmissão sem fio (*wifi*), a imagem capturada pela câmera em tempo real era transmitida a um computador. Além disso, o estado da detecção de linha era informado a cada tentativa, de forma que o operador pudesse ter uma referência de como posicionar melhor o drone visando o pouso automático. Os avisos enviados eram “linha não detectada”, “corrigir posição” ou “corrigir inclinação”. Utilizou-se uma redundância de 3 vezes, isto é, a linha deve ser detectada pelo menos 3 vezes seguidas pelo algoritmo para que o pouso fosse realizado. Isso foi implementado para evitar qualquer pouso precipitado, uma vez que o algoritmo poderia detectar uma linha fortuitamente, sem que esta se configurasse como a linha de interesse.

Figura B.2 – Fluxograma do algoritmo de detecção de linha e pouso proposto.



Fonte: Autor.

Figura B.3 – Limites de tolerância para detecção da linha pelo algoritmo proposto, delimitados pela linha preta central e pelo retângulo sombreado.



Fonte: Autor.

B.2 Testes do programa de detecção de linhas e pouso automático com drone F450

Após a implementação do sistema detecção da linha para posterior pouso, foram efetuados testes para verificar a eficácia da função implementada. Uma linha foi posicionada próxima ao chão, para permitir o pouso do drone F450 sem instabilidade. O objetivo dos testes foi fazer com que o drone pousasse automaticamente sobre a linha, com esta se situando dentro da região do trem de pouso, após posicionamento da aeronave sobrevoando a linha. A Figura B.4 mostra etapas de um teste bem-sucedido de pouso.

As imagens captadas pela Pi Camera, durante os testes, foram transmitidas via *wifi* para um computador, e foram registradas. Quando a linha era detectada pelo algoritmo, foi desenhada uma linha vermelha sobre a linha detectada, para indicação de sua detecção. A Figura B.5 mostra imagens captadas pela câmera, durante um teste.

Ao final dos testes, percebeu-se que o drone foi capaz de realizar o pouso de forma eficaz, com a estratégia adotada. Todavia, alguns problemas foram detectados para solução nas implementações posteriores.

O primeiro dos problemas encontrados foi a baixa eficiência no processamento de imagens pelo Raspberry Pi. Isto fez com que o algoritmo apresentasse lentidão na sua execução, e consequentemente, atraso na detecção da linha. Para minimizar o processamento gasto pelo Raspberry durante a execução do código, a imagem teve de ser transmitida numa resolução de 400 x 400 pixels, que é baixa tanto para detecção da linha quanto para visualização pelo operador. O problema foi solucionado pelo uso do

"*downsampling*", isto é, diminuição na frequência de processamento de imagens durante a captação das imagens pela câmera. Foi introduzido um "*downsampling*" de 1 para 5, ou seja, a cada 5 quadros (*frames*) consecutivos do vídeo, 1 deles era processado no sentido de verificar a posição da linha. Isto fez com que o processamento do programa pelo Raspberry Pi fosse otimizado, sem prejudicar a função de detecção de linhas.

O segundo problema encontrado diz respeito à possível indisponibilidade de transmissão do sinal de internet *wifi* em campo. Este tipo de transmissão foi substituído por comunicação sem fio por radiofrequência, permitindo operação a uma distância maior da linha de alta tensão.

Figura B.4 – Teste de pouso automático sobre uma linha: (a) decolagem manual, (b) posicionamento manual, (c) detecção da linha, e (d) pouso automático.



Fonte: Autor.

Figura B.5 – Imagens da Pi Camera durante um teste de pouso automático: (a) imagem durante um momento de correção da posição do drone, (b) imagem captada no momento em que o drone realiza o pouso.



Fonte: Autor.

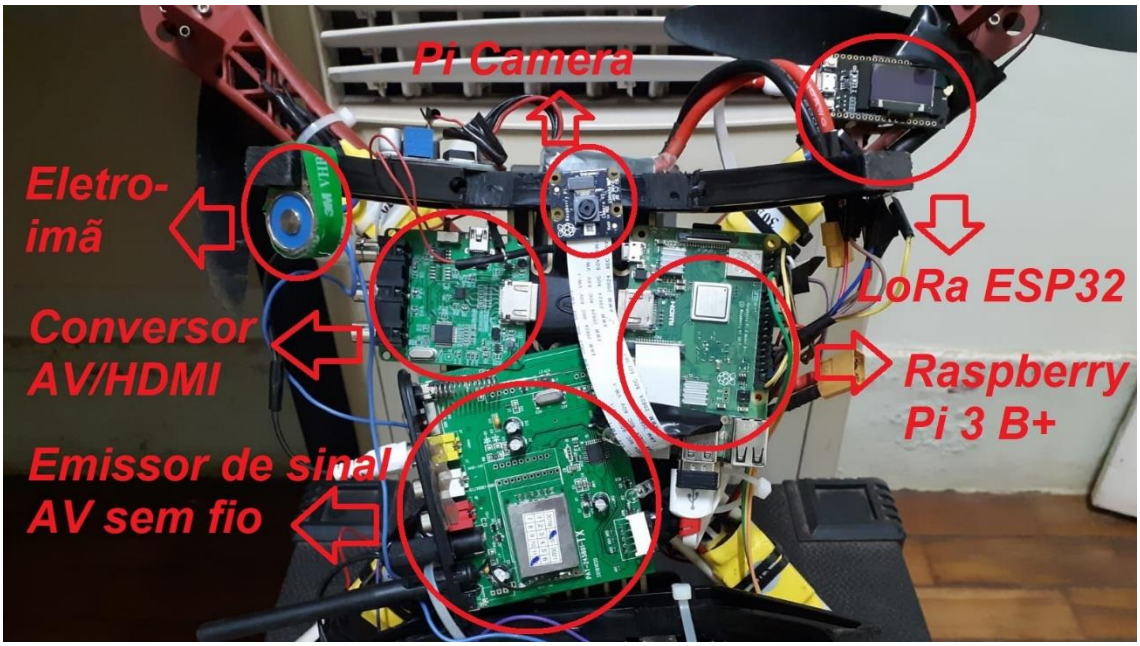
B.3 Testes do programa de detecção de linhas e pouso automático com drone F450 simulando acoplamento do módulo robótico

Após a concretização do primeiro teste, um novo teste foi proposto, agora com a simulação do acoplamento do módulo robótico ao drone e com a transmissão das imagens por um sistema sem fio. Um eletroímã e uma pequena chapa metálica foram usados para simular a liberação do módulo pelo drone, a ser realizada na prática por fechadura magnética. O algoritmo implementado foi o mesmo mostrado na Fig. B.2, com a adição de uma operação de desligamento do eletroímã após a descida do drone sobre a linha detectada. Um par de placas LoRa ESP 32 foi adicionado ao sistema para permitir a ligação e desligamento do eletroímã. A Figura B.6 mostra o novo sistema implementado no drone F450. As placas de circuito eletrônico foram fixadas na estrutura inferior do drone F450.

Para receber o sinal HDMI da imagem da Pi Camera atrelada à placa Raspberry Pi, foi adquirido um sistema de transmissão de sinal AV sem fio, com emissor e receptor, que permitiu a projeção desta imagem em uma tela de televisão no solo (Fig. B.7). O sinal HDMI de saída do Raspberry Pi foi convertido para AV, tanto na transmissão quanto na recepção, para que a conexão fosse possível.

Durante os testes, um filtro plástico foi sobreposto à lente da Pi Camera para permitir que a luminosidade não fosse tão intensa e não prejudicasse o processamento das imagens capturadas. Para simular a detecção da linha, uma corda foi posicionada no chão.

Figura B.6 – Componentes do sistema de visão embarcados no drone F450.



Fonte: Autor.

Figura B.7 – Teste de transmissão sem fio das imagens da Pi Camera, durante um voo do drone.



Fonte: Autor.

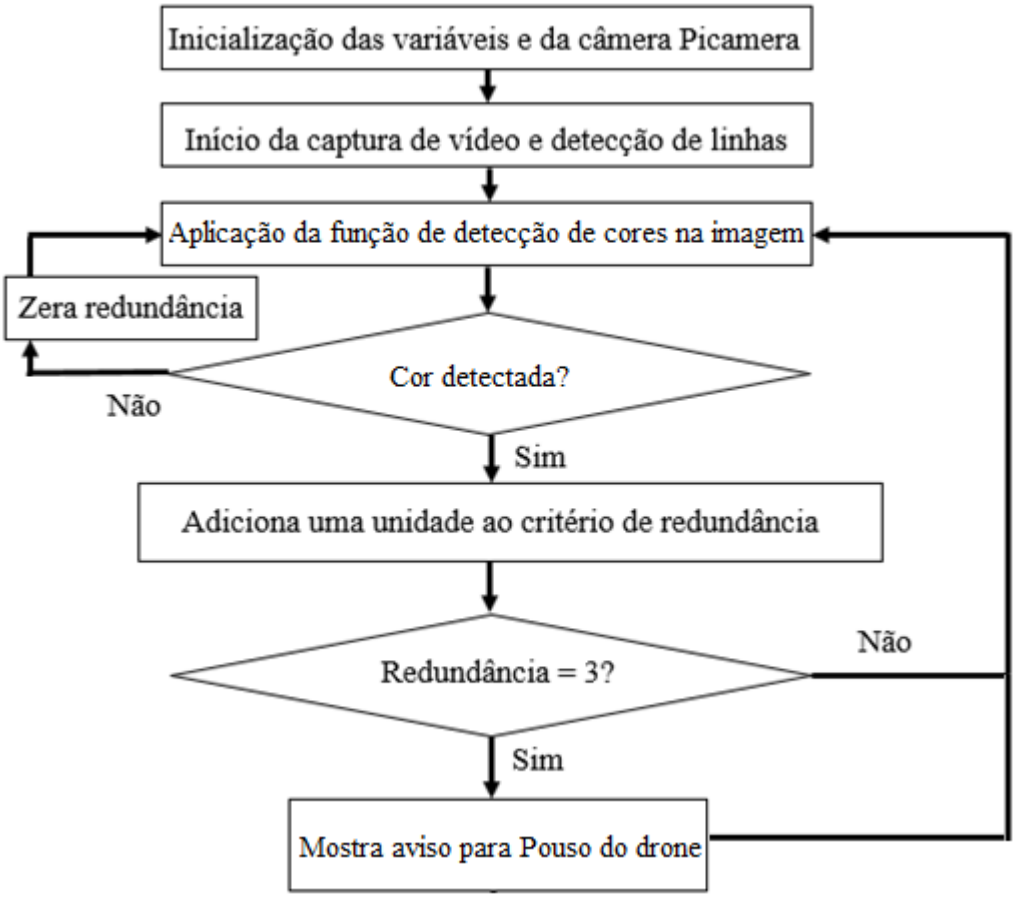
Os testes mostraram resultados positivos, em que o roteiro de tarefas descrito pelo algoritmo da Figura B.2 foi executado. Entretanto, por limitações nas funções de automatização do drone, apontadas no apêndice A, decidiu-se que o programa do sistema

de visão somente iria auxiliar o piloto na realização de voos totalmente controlados por rádio controle, sem a automatização dos movimentos do drone.

B.4 Implementação de função de detecção de cores para recolhimento do módulo

O algoritmo desenvolvido para a detecção de cores e recolhimento do módulo previamente posicionado sobre a linha é semelhante ao algoritmo exposto na Fig. B.2, com a diferença de que a função da biblioteca *OpenCV* utilizada é referente à detecção de cores. A imagem em padrão BGR (*Blue*, *Green*, *Red*) obtida pela Pi Camera é transformada em padrão HSV (*Hue, Saturation, Value*) e uma cor específica (configurada por uma faixa de parâmetros HSV) é estabelecida para ser detectada na imagem obtida pela câmera. O programa mostra sobre a imagem da câmera um retângulo de dimensão pré-estabelecida. Caso a cor de interesse fosse detectada simultaneamente em seus quatro vértices, a cor é considerada detectada e o drone estaria apto a fazer a busca do módulo. A Figura B.8 mostra o fluxograma do algoritmo mencionado.

Figura B.8 - Fluxograma do algoritmo para detecção de cores.



Fonte: Autor.

Assim como no modo de detecção de linhas, o critério de redundância avalia se a cor de interesse foi detectada repetidamente. Se sim, a mensagem de “POUSO” surge na tela, indicando que o pouso pode ser realizado pelo operador.

B.5 Programa contemplando união das funções de detecção de linha e de cores

Foi elaborado um programa unindo os dois modos de operação já descritos: detecção da linha para posterior pouso e recolhimento do módulo já presente na linha. Para a função de deixar o módulo sobre a linha, inicialmente o módulo deve ser acoplado ao drone pelo acionamento da fechadura magnética, e a partir de então ser pilotado para sobrevoar a linha. Então, o operador pode, com o auxílio do sistema de visão, posicionar o drone sobre a linha e aguardar o programa avisar que o pouso pode ser realizado com segurança. O módulo é deixado sobre a linha e pode então iniciar seu funcionamento autônomo ou controlado, e o drone ser retornado à estação no solo.

O segundo modo de operação, que é o modo de recolhimento, funcionará quando o drone estiver sobrevoando a linha, e quando o algoritmo para reconhecimento de cores detectar devidamente a imagem do módulo pintado com a cor pretendida, um aviso para pouso é emitido na tela. O drone pode então realizar o pouso de encontro ao módulo, a fechadura magnética ser acionada e o conjunto drone-robô pode então ser manualmente retornado ao solo.

A versão final do programa de detecção de linhas apresenta a imagem da câmera, com avisos no canto superior esquerdo. Duas barras verticais delimitam a região de tolerância da detecção da linha. Caso a linha seja detectada, o programa desenha uma linha vermelha sobre a linha inicial, destacando ao usuário a posição desta (Figura B.9).

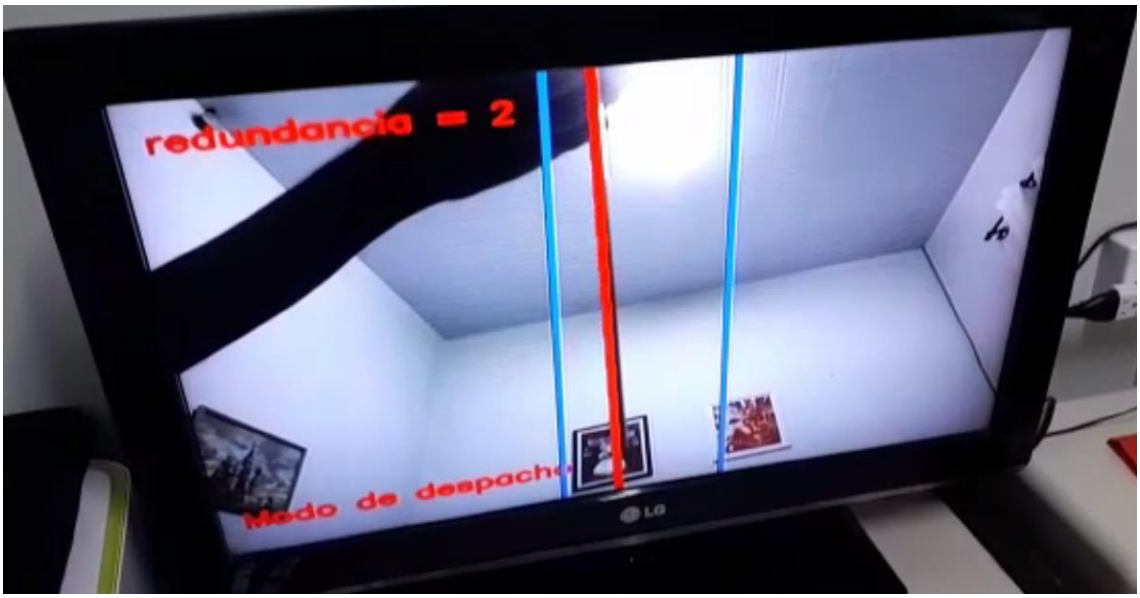
Caso a linha esteja fora dos limites da região das barras verticais, o usuário é avisado de que é preciso “corrigir a posição”, se o ângulo da linha ultrapassar a tolerância angular, é avisado de que deve “corrigir ângulo”. Setas são mostradas na tela indicando em que sentido o operador deve movimentar o drone para corrigir a posição. Se a linha não for detectada, é mostrado o aviso de “linha não detectada”.

Quando a linha é detectada em posição e ângulo adequados, passa-se a contar a redundância. Caso a redundância seja maior que 5, ou seja, a linha seja detectada 5 vezes seguidas na posição de interesse, é mostrado ao operador um aviso que cobre toda a tela dizendo “POUSO”.

O outro modo de funcionamento do programa é o de detecção de cores, descrito na seção anterior. A Figura B.10 mostra uma simulação de detecção das cores realizada com

uma folha de papel vermelho. Ao fim dessa etapa, partiu-se para a implementação do sistema de visão a nível de *hardware*, acoplando-o ao drone EFT E610.

Figura B.9 – Teste do sistema de reconhecimento de linha.



Fonte: Autor.

Figura B.10 – Simulação da função de detecção de cores com uma folha de papel vermelha.



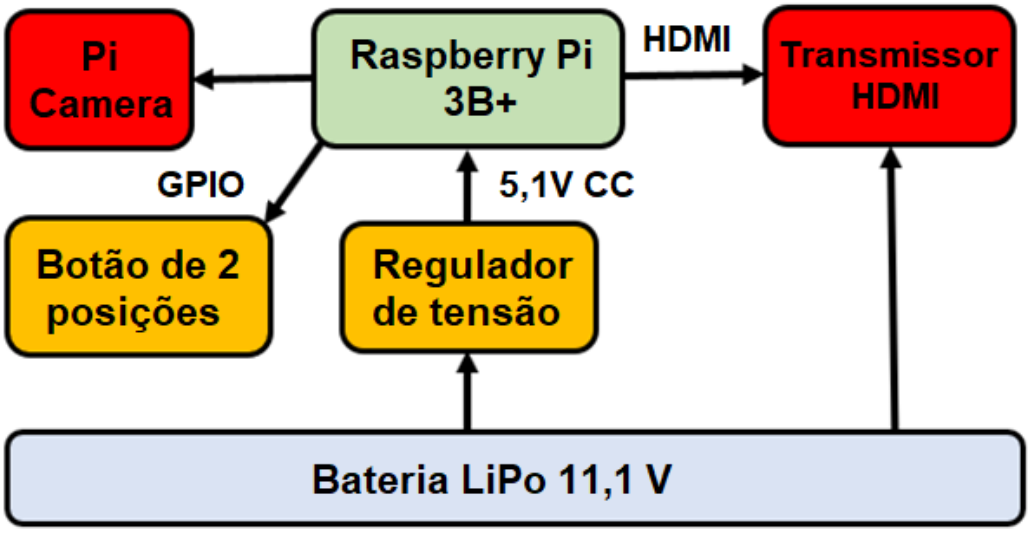
Fonte: Autor.

B.6 Sistema eletrônico do sistema de visão acoplado ao drone EFT E610

O sistema eletrônico de visão foi adaptado para a aplicação em conjunto com o drone EFT E610 (Fig. B.11). Apresenta uma bateria LiPo 11,1 V, um regulador de tensão, um

Raspberry Pi, e uma Pi Camera. Esta possui conexão própria para o barramento de câmera do Raspberry Pi. Um conjunto transmissor/receptor de sinal HDMI foi usado para transmitir a imagem da Pi Camera a uma tela externa. Esse sistema possui alcance de até 200 m na transmissão da imagem.

Figura B.11 - Esquema eletrônico do sistema de visão final.



Fonte: Autor.

O sistema descrito foi inserido em uma caixa de alumínio de espessura 0,7 mm (Fig. 4.3.4). Foi aplicado isolamento elétrico às paredes internas da caixa. Um botão foi instalado fora da caixa para permitir ao usuário selecionar entre os dois modos de operação do sistema, que são o modo de detecção de linha e modo de detecção de cores. A caixa foi furada na tampa para permitir a passagem das antenas do transmissor HDMI, o botão de seleção de modo de operação e a chave liga/desliga. A fixação da caixa se deu em uma viga de alumínio anexada ao trem de pouso do drone EFT E610.

O módulo de remoção de detritos teve sua tampa superior pintada de vermelho para permitir a identificação da cor pelo algoritmo (Fig. 4.26). Uma faixa de valores de cores no padrão HSV foi delimitada no programa para permitir a detecção da cor utilizada na pintura do módulo de remoção de detritos.

As imagens foram recebidas em uma tela de 7 polegadas (Fig. B.12), com adaptação para fonte a bateria, permitindo que o programa fosse projetado na tela sem a necessidade de se levar uma extensão de energia elétrica. Esta configuração foi implementada visando permitir a obtenção das imagens nos testes em campo, onde o acesso a fontes de energia elétrica é restrito.

Figura B.12 – Utilização de um monitor de 7 polegadas para recepção da imagem proveniente do sistema de visão, com alimentação a bateria.



Fonte: Autor.

B.7 Testes de liberação e busca do módulo sobre linha simulada com auxílio de imagens do sistema de visão

Testes realizados em laboratório, em que o módulo de remoção de detritos foi liberado sobre uma linha simulada, e posteriormente recolhido, com o auxílio do sistema de visão desenvolvido, foram descritos no Capítulo 4, na seção 4.4.6. A versão do algoritmo para detecção de cores foi ligeiramente modificada para estes testes, quando antes quatro pontos de um retângulo eram usados para detecção de cores. Nesta versão, dois pontos na tela, dispostos em uma mesma linha horizontal, foram selecionados para que quando a cor de interesse fosse detectada ao passar por esses dois pontos, o programa acusasse a detecção do objeto de interesse e ativasse o critério de redundância. Essa mudança foi realizada para contemplar a geometria do módulo de remoção de detritos, cuja presença é mais bem detectada quando pontos coloridos equidistantes do centro do módulo (onde se situa a fechadura magnética) são mapeados. Imagens obtidas pelo sistema de visão, nos testes tanto de liberação quanto de busca do módulo de remoção de detritos, são mostradas nas Fig. 4.36 e 4.38.

B.8 Conclusões

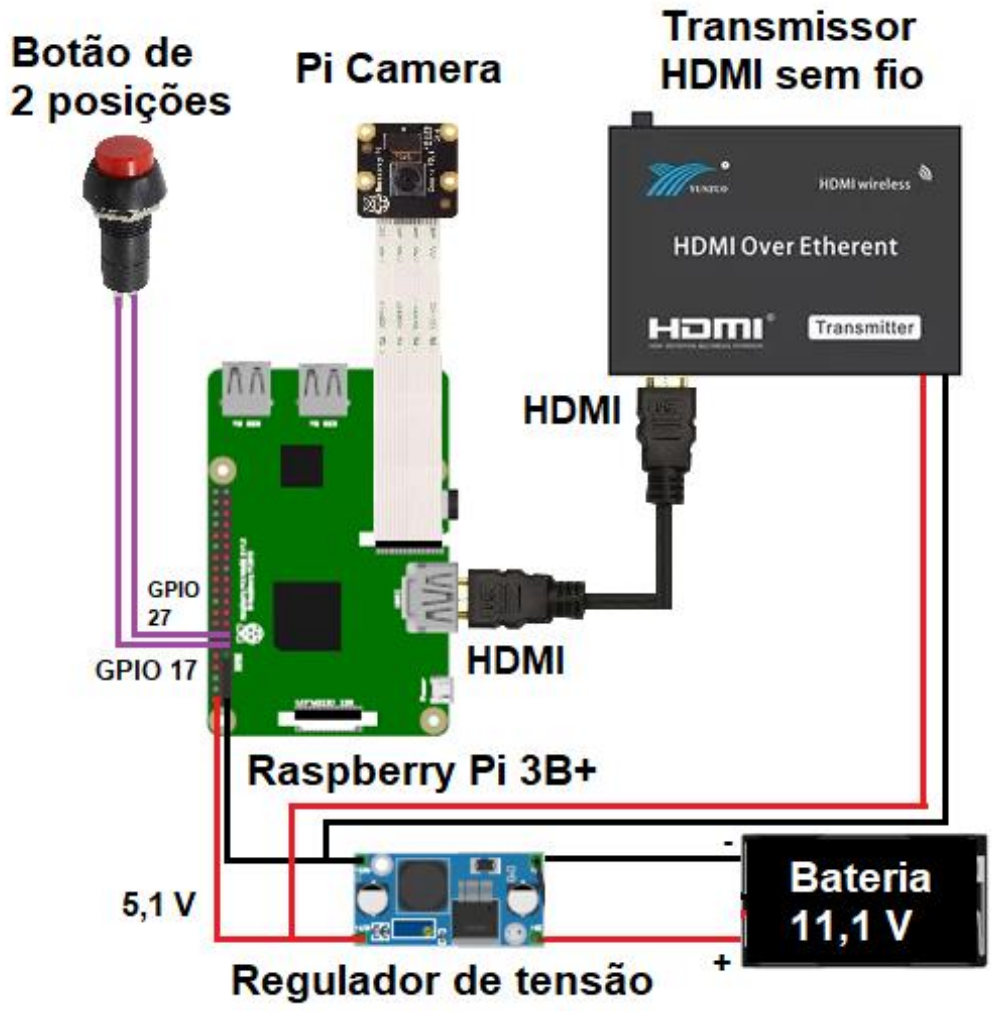
Ao fim deste trabalho, conclui-se que contribuições foram dadas em relação ao desenvolvimento de um sistema de visão que permita melhor funcionamento dos drone-robôs. O uso de processamento de imagens pode contribuir muito para que o emprego dos drone robôs se torne mais eficiente e seguro como um todo.

Melhorias futuras devem ser efetuadas, incluindo tanto a melhoria dos sistemas de recepção de imagem para o piloto quanto a união do sistema de visão desenvolvido com um novo sistema de automatização dos movimentos do drone, mais confiável, flexível e que garanta mais estabilidade ao drone durante seu voo.

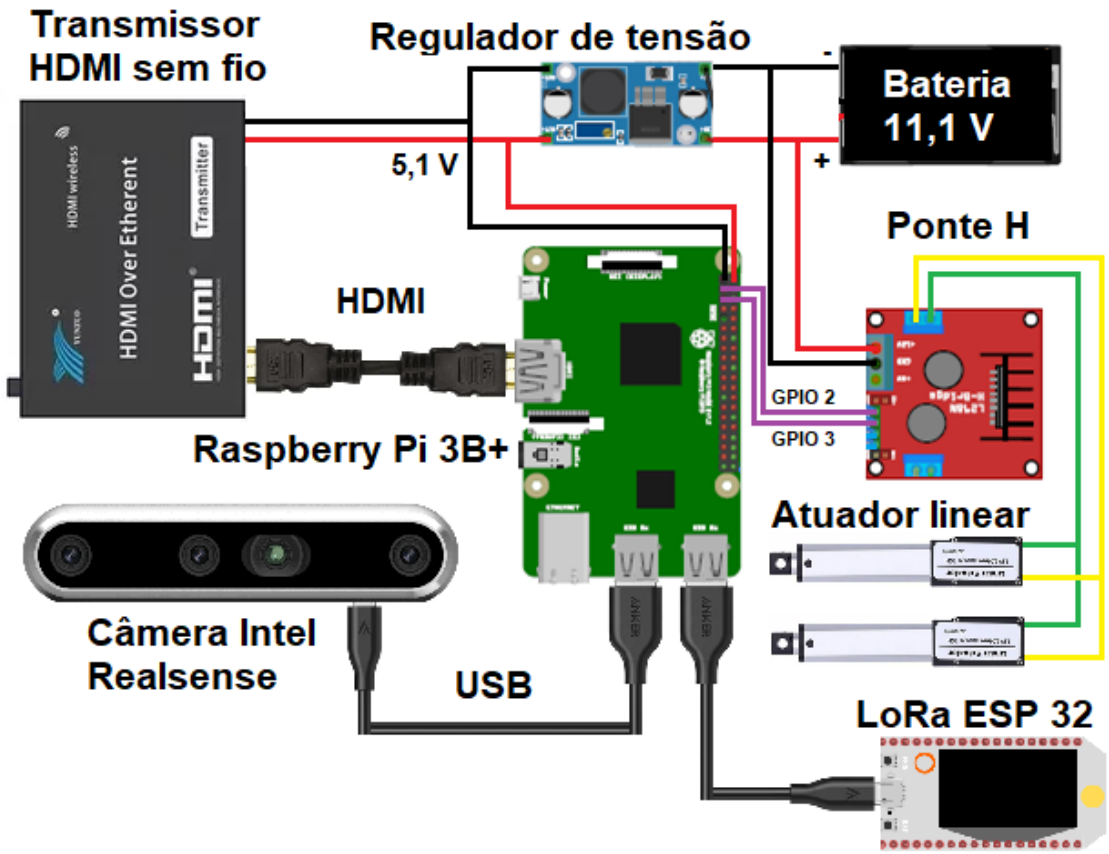
APÊNDICE C

ESQUEMAS ELÉTRICOS DOS MÓDULOS ROBÓTICOS

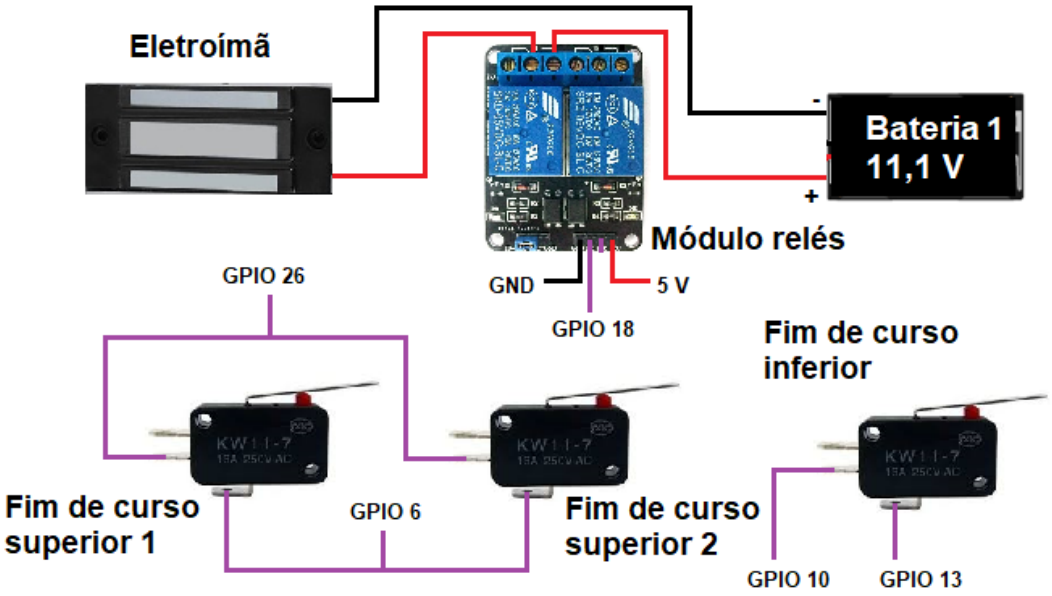
C.1 – Esquema elétrico do sistema de visão.

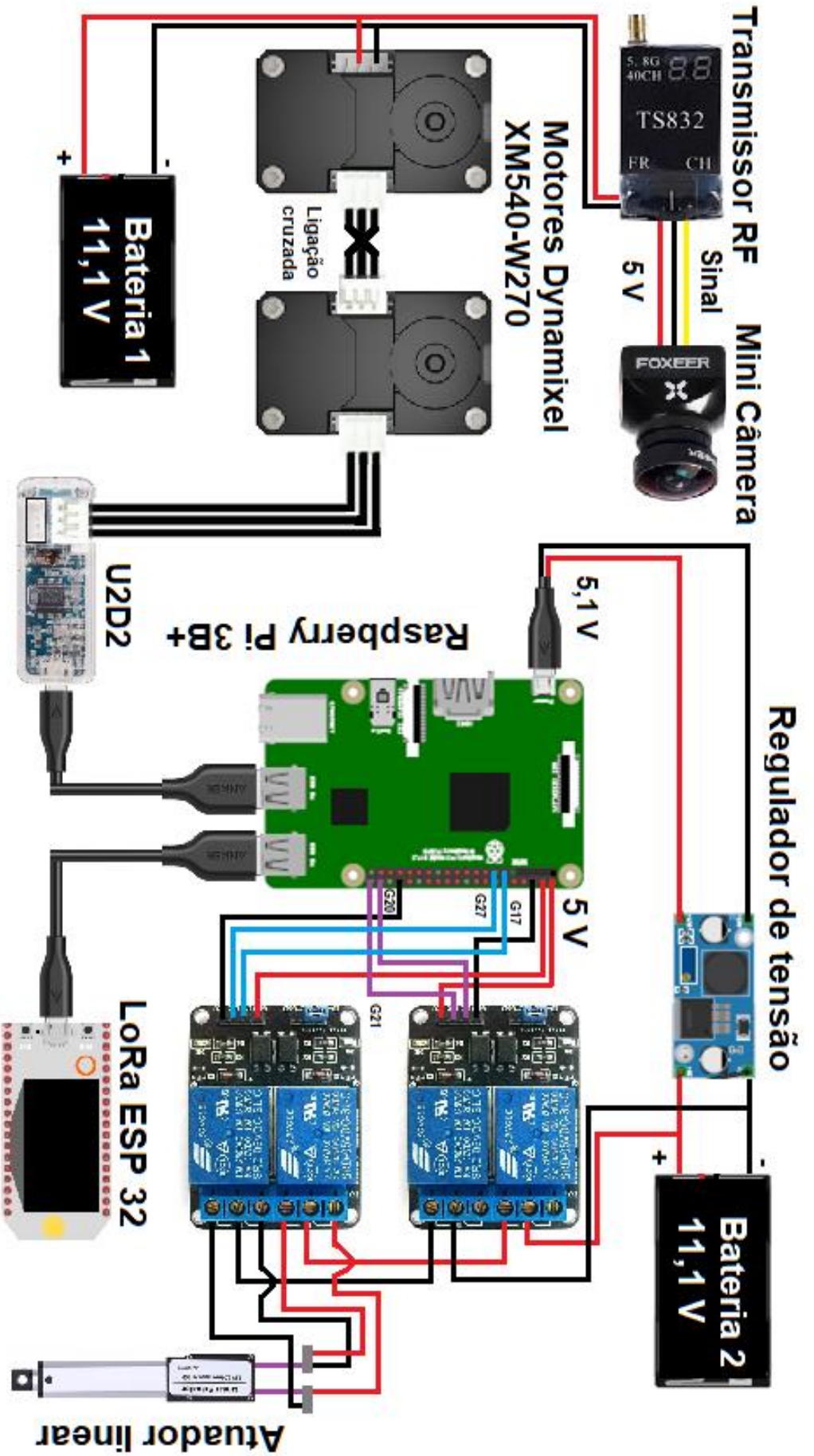


C.2 – Esquema elétrico do módulo de limpeza de isoladores.

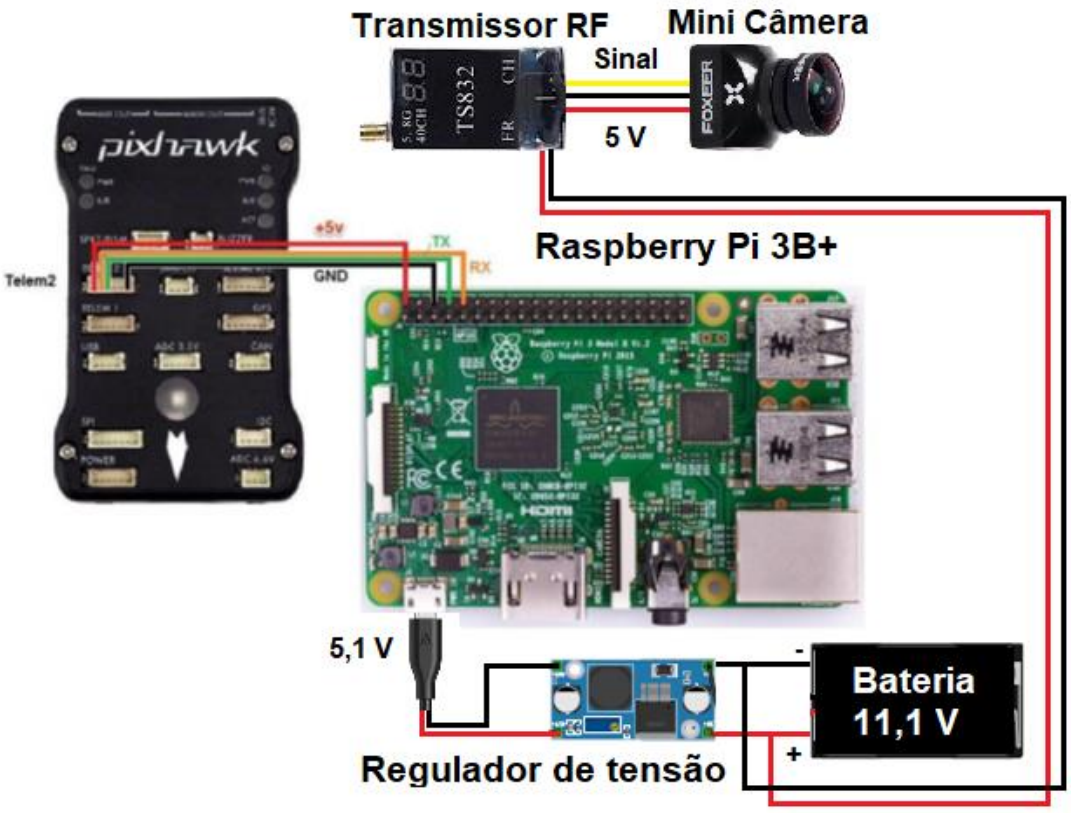


C.3 – Esquemas elétricos do módulo de remoção de detritos.

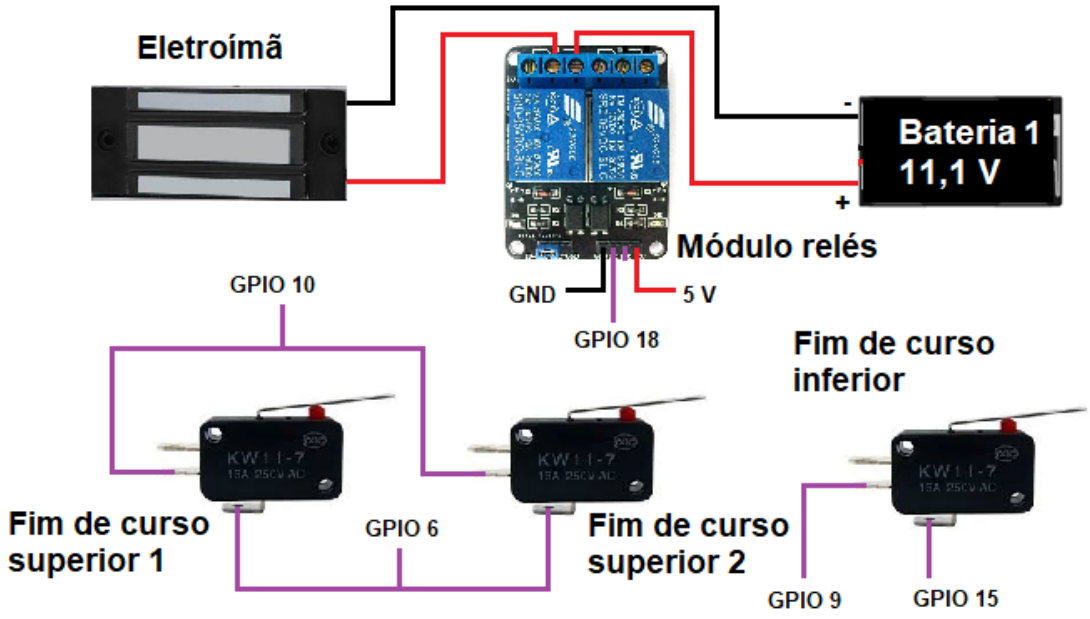


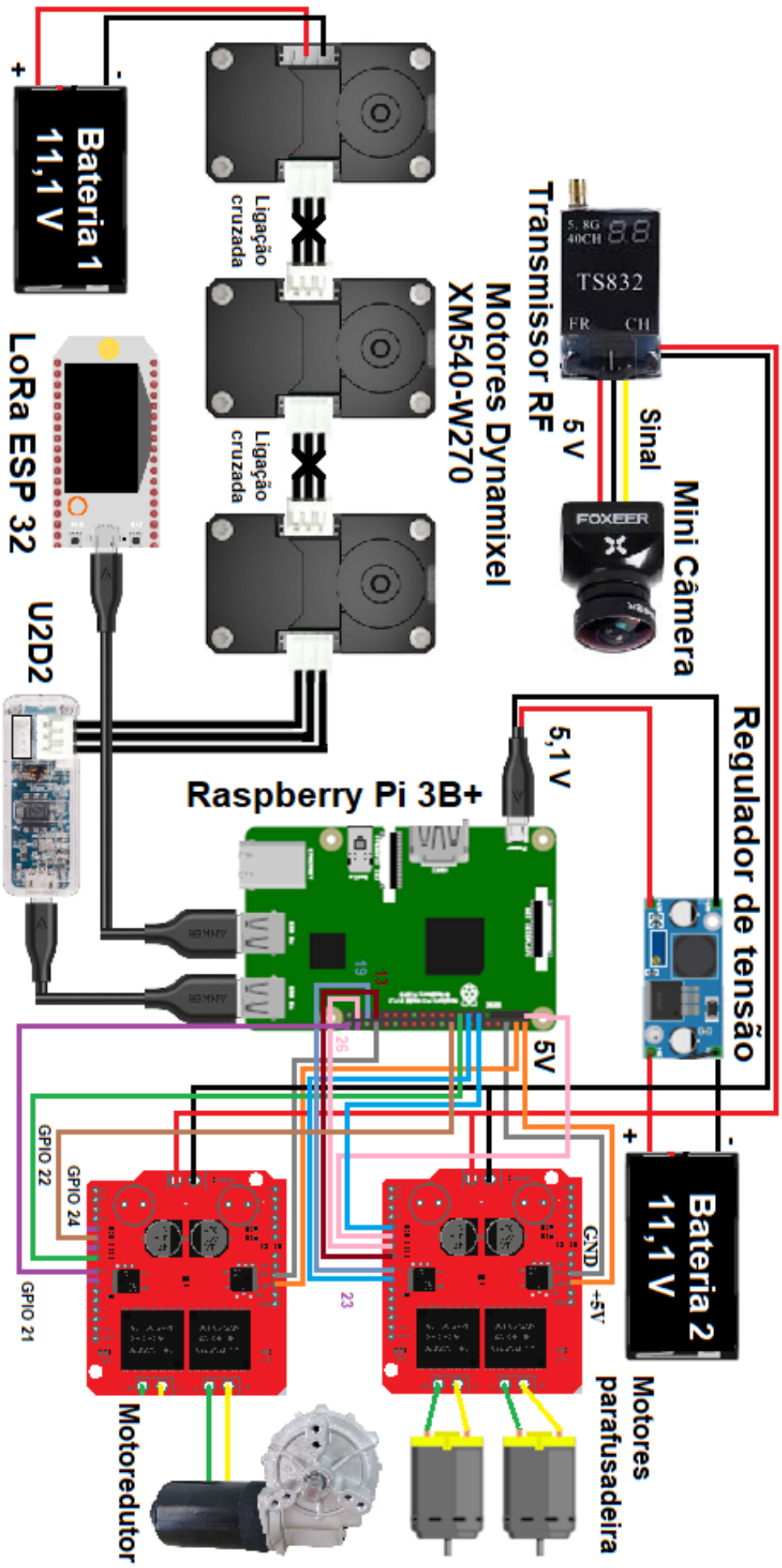

Transmissor RF
Mini Câmera
Sinal
5 V
Motores Dynamixel
XM540-W270
Ligação cruzada
Bateria 1
11,1 V
U2D2
Raspberry Pi 3B+
5,1 V
5 V
Regulador de tensão
LoRa ESP 32
Bateria 2
11,1 V
Atuador linear

C.4 – Esquema elétrico da automatização do drone F450 (comunicação Raspberry Pi com controladora Pixhawk).



C.5 – Esquemas elétricos do módulo de instalação de amortecedores *stockbridge*.




Bateria 1
11,1 V
+
-
Ligação cruzada
Ligação cruzada
Motores Dynamixel
XM540-W270
Transmissor RF
5 V
Sinal
Mini Câmera
Regulador de tensão
LoRa ESP 32
U2D2
Raspberry Pi 3B+
5,1 V
5V
GPIO 22
GPIO 24
GPIO 21
GND
+5V
Bateria 2
11,1 V
Motoredutor
Motores parafusadeira

APÊNDICE D

PROGRAMAS DESENVOLVIDOS PARA AUTOMATIZAÇÃO DOS MÓDULOS ROBÓTICOS

D.1 - PROGRAMAS DESENVOLVIDOS EM LINGUAGEM PYTHON PARA EXECUÇÃO PELO RASPBERRY PI 3B+

D.1.1) MÓDULO DE LAVAGEM DE CADEIAS DE ISOLADORES

Programa 1: recebe mensagens via LoRa para ligação da lavadora

```
#********************IMPORTACAO BIBLIOTECAS*****************

import os
import serial
import RPi.GPIO as GPIO
import time

#********************VERIFICACAO DA PORTA PARA A LORA**********************

if os.name == 'nt':
   import msvcrt

   def getch():
      return msvcrt.getch().decode()

else:
   import sys
   import tty
   import termios
   fd = sys.stdin.fileno()
```

```
    lora_receiver = serial.Serial('/dev/ttyUSB0', 115200)

    a = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    a.truncate(0)

#********************DEFINE PORTAS GPIOS**********************

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setwarnings(False)

######################ROTINA CORRECAO COMANDOS LORA#######################

a = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")

arq = a.read()

print(arq)

if arq == "":

    a = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    a.write("0")

    a = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    a.write("0")

    a = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = a.read()

    if arq == "0":
        a = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        a.truncate(0)
        print("sucesso")


#********************WHILE PRINCIPAL**********************************

while True:

#********************LEITURA LORA E FUNCAO CASE***********************

    recebe = lora_receiver.readline()
    a = str(recebe.decode("utf8"))
    a = int(a)
```

```
    if(a == 1):
        print("Sobe desce 1 BOLA")

            #ENVIO SINAL LORA

        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

        f.write("0")
        f.truncate(0)

        time.sleep(0.05)

        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("1")

        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
        arq = f.read()

        print("feito")

        if arq != "1":
            f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
            f.write("1")
            print("reescrito")

#       f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
#       f.write("1")
        #print("SINAL DA LORA RECEBIDO")

    if(a == 2):
        print("Diagonal XIS")
        #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        #f.write("2")

            #ENVIO SINAL LORA

        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

        f.write("0")
        f.truncate(0)

        time.sleep(0.05)

        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
```

```
    f.write("2")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "2":
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("2")
        print("reescrito")

if(a == 3):
    print("TRIANG")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("3")

            #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("0")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("3")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "3":
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("3")
        print("reescrito")

if(a == 4):
    print("QUAD")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("4")

            #ENVIO SINAL LORA
```

```
    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("0")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("4")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "4":
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("4")
        print("reescrito")

if(a == 5):
    print("Esquerda")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("5")

            #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("0")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("5")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "5":
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
```

```
        f.write("5")
        print("reescrito")

if(a == 6):
    print("Direita")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("6")

            #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("0")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("6")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "6":
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("6")
        print("reescrito")

if(a == 7):
    print("Cima")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("7")

            #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("0")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
```

```
    f.write("7")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "7":
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("7")
        print("reescrito")

if(a == 8):
    print("Baixo")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("8")

            #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("0")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("8")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "8":
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("8")
        print("reescrito")

if(a == 9):
    print("Baixo")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("9")

            #ENVIO SINAL LORA
```

```
    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("0")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("9")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "9":
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("9")
        print("reescrito")

if(a == 0):
    print("Baixo")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("0")

            #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("0")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("0")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "0":
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
```

```
        f.write("0")
        print("reescrito")
```

Programa 2: envia mensagens para a LoRa emitir aviso sonoro

```
#********************IMPORTACAO BIBLIOTECAS*****************************

import os
import serial
import RPi.GPIO as GPIO
import time

#********************VERIFICACAO DA PORTA PARA A LORA********************

if os.name == 'nt':
   import msvcrt

   def getch():
      return msvcrt.getch().decode()

else:
   import sys
   import tty
   import termios
   fd = sys.stdin.fileno()

   lora_receiver = serial.Serial('/dev/ttyUSB0', 115200)
   print("inicia programa")

#********************DEFINE PORTAS GPIOS*************************

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setwarnings(False)

LED = 16
flag = 0

GPIO.setup(LED,GPIO.OUT)
GPIO.output(LED,GPIO.HIGH)

#********************WHILE PRINCIPAL*******************************

while True:
```

```
#********************ESCRITA NA LORA*****************

   f = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","r")
   bipe = f.read()

   if bipe == "1": #APITO CONSTANTE
      lora_receiver.write(str.encode("c"+"/r/n"))
   if bipe == "3": #APITO INTERMITENTE (envia A)
      lora_receiver.write(str.encode("a"+"/r/n"))
   if bipe == "2": #SILENCIO (envia B)
      lora_receiver.write(str.encode("b"+"/r/n"))
```

Programa 3: interpreta mensagens recebidas por LoRa para acionar lavadora

```
#******************BIBLIOTECAS*********************************

import os
import RPi.GPIO as GPIO
import time

#*****************ATIVACAO GPIO*************************************

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setwarnings(False)

BUZZER = 25
LED = 7
#IMA = 17
ATUADOR1 = 2
ATUADOR2 = 3

flag = 0

GPIO.setup(BUZZER,GPIO.OUT)
GPIO.output(BUZZER,GPIO.LOW)

GPIO.setup(ATUADOR1,GPIO.OUT)
GPIO.output(ATUADOR1,GPIO.LOW)

GPIO.setup(ATUADOR2,GPIO.OUT)
GPIO.output(ATUADOR2,GPIO.LOW)

GPIO.setup(LED,GPIO.OUT)
```

```
GPIO.output(LED,GPIO.HIGH)

#GPIO.setup(IMA,GPIO.OUT)
#GPIO.output(IMA,GPIO.HIGH)

#f=open ("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
#f.truncate(0)

#*****************WHILE PRINCIPAL*************************************

print("aguardando sinal")

while True:

   f=open ("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
   content = f.read()

#************************LIGA LAVADORA*****************************

   if content == "1":
      print("Liga lavadora")

      #GPIO.output(BUZZER,GPIO.HIGH)
      #time.sleep(0.1)
      #GPIO.output(BUZZER,GPIO.LOW)

      #avanco do atuador - liga lavadora
                           GPIO.output(ATUADOR1,GPIO.HIGH)
                           GPIO.output(ATUADOR2,GPIO.LOW)
      time.sleep(0.8)
                           GPIO.output(ATUADOR1,GPIO.LOW)
                           GPIO.output(ATUADOR2,GPIO.LOW)

      f=open ("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
      f.truncate(0)

      print("Finalizado, aguardando novo sinal")

      flag = 1

#************************DESLIGA LAVADORA*********************

   if content == "2":
      print("Desliga lavadora")
```

```
    #GPIO.output(BUZZER,GPIO.HIGH)
    #time.sleep(0.1)
    #GPIO.output(BUZZER,GPIO.LOW)

    #recuo do atuador - desliga lavadora
                        GPIO.output(ATUADOR1,GPIO.LOW)
                        GPIO.output(ATUADOR2,GPIO.HIGH)
    #time.sleep(3)

    #f=open ("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.truncate(0)

    print("Finalizado, aguardando novo sinal")

    flag = 0
```

Programa 4: executa o algoritmo da câmera de profundidade, exibindo a imagem da câmera e processando a informação da distância

```
#**************************LEITURA DISTANCIA*************

import pyrealsense2.pyrealsense2 as rs
import numpy as np
import cv2

#*******************DECLARACAO BIBLIOTECAS************************
import time
import RPi.GPIO as GPIO
import serial
import os
import math

#*******************DECLARACAO VARIAVEIS*****************************

#time.sleep(5)

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setwarnings(False)

TRIG = 6
ECHO = 5
#TRIG = 24
#ECHO = 23
```

```
BUZZER = 25
LED = 26
maxTime = 0.04

memo = 2000

#Aciona LED

GPIO.setup(LED,GPIO.OUT)
GPIO.output(LED,GPIO.HIGH)

GPIO.setup(TRIG,GPIO.OUT)
GPIO.setup(ECHO,GPIO.IN)

des = 0
med = 0
i = 0

# Configure depth and color streams
pipeline = rs.pipeline()
config = rs.config()

# Get device product line for setting a supporting resolution
pipeline_wrapper = rs.pipeline_wrapper(pipeline)
pipeline_profile = config.resolve(pipeline_wrapper)
device = pipeline_profile.get_device()
device_product_line = str(device.get_info(rs.camera_info.product_line))

found_rgb = False
for s in device.sensors:
    if s.get_info(rs.camera_info.name) == 'RGB Camera':
        found_rgb = True
        break
if not found_rgb:
    print("The demo requires Depth camera with Color sensor")
    exit(0)

config.enable_stream(rs.stream.depth, 640, 480, rs.format.z16, 30)

if device_product_line == 'L500':
    config.enable_stream(rs.stream.color, 960, 540, rs.format.bgr8, 30)
else:
    config.enable_stream(rs.stream.color, 640, 480, rs.format.bgr8, 30)

# Start streaming
```

```
pipeline.start(config)

try:
   while True:

      # Wait for a coherent pair of frames: depth and color
      frames = pipeline.wait_for_frames()
      depth_frame = frames.get_depth_frame()
      color_frame = frames.get_color_frame()
      if not depth_frame or not color_frame:
         continue

      # Convert images to numpy arrays
      depth_image = np.asanyarray(depth_frame.get_data())
      color_image = np.asanyarray(color_frame.get_data())

      # Apply colormap on depth image (image must be converted to 8-bit per pixel first)
      depth_colormap = cv2.applyColorMap(cv2.convertScaleAbs(depth_image, alpha=0.03),
cv2.COLORMAP_JET)

      depth_colormap_dim = depth_colormap.shape
      color_colormap_dim = color_image.shape

      # If depth and color resolutions are different, resize color image to match depth image for
display
      if depth_colormap_dim != color_colormap_dim:
         resized_color_image = cv2.resize(color_image, dsize=(depth_colormap_dim[1],
depth_colormap_dim[0]), interpolation=cv2.INTER_AREA)
         images = np.hstack((resized_color_image, depth_colormap))
      else:
         images = np.hstack((color_image, depth_colormap))

      # Window name in which image is displayed
      window_name = 'Image'

      # Center coordinates
      center_coordinates = (320, 240)

      # Radius of circle
      radius = 2

      # Blue color in BGR
      color = (255, 0, 255)

      # Line thickness of 2 px
      thickness = 5
```

```
    # Using cv2.circle() method
    # Draw a circle with blue line borders of thickness of 2 px
    depth_colormap = cv2.circle(depth_colormap, center_coordinates, radius, color, thickness)
    depth_colormap = cv2.circle(depth_colormap, (320, 210), radius, color, thickness)
    depth_colormap = cv2.circle(depth_colormap, (320, 270), radius, color, thickness)
    depth_colormap = cv2.circle(depth_colormap, (350, 240), radius, color, thickness)
    depth_colormap = cv2.circle(depth_colormap, (290, 240), radius, color, thickness)

    dist1 = depth_image[240][320]

    dist2 = depth_image[210][320]

    dist3 = depth_image[270][320]

    dist4 = depth_image[240][350]

    dist5 = depth_image[240][290]

    if dist1 == 0:
       dist1 = 5000
    if dist2 == 0:
       dist2 = 5000
    if dist3 == 0:
       dist3 = 5000
    if dist4 == 0:
       dist4 = 5000
    if dist5 == 0:
       dist5 = 5000


#SELECIONA MENOR VALOR LIDO

    if dist1 < dist2 and dist1 < dist3 and dist1 < dist4 and dist1 < dist5:
       dist = dist1

    else:
       if dist2 < dist3 and dist2 < dist1 and dist2 < dist4 and dist2 < dist5:
          dist = dist2

       else:
          if dist3 < dist1 and dist3 < dist2 and dist3 < dist4 and dist3 < dist5:
             dist = dist3

          else:
```

```
        if dist4 < dist1 and dist4 < dist2 and dist4 < dist3 and dist4 < dist5:
            dist = dist4

        else:
            dist = dist5


#profundidade do ponto central
#print(dist1)
#print(dist2)
#print(dist3)
#print(dist4)
#print(dist5)
#print ("final:")
print(dist)
#print ("#####")

a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")

if dist != 0:
    memo = dist

if dist == 0:
    if memo >= 200:
        dist = 5000
    if memo < 200:
        dist = 156

if dist <= 1590:

    a.write("1")

elif dist > 2090:

    a.write("2")

elif dist < 2090 and dist > 1590:

    a.write("3")

#print("Distance:",dist,"mm")

# Show images
#cv2.namedWindow('RealSense', cv2.WINDOW_AUTOSIZE)
cv2.namedWindow('RealSense', cv2.WND_PROP_FULLSCREEN)
```

```
        cv2.setWindowProperty('RealSense', cv2.WND_PROP_FULLSCREEN,
cv2.WINDOW_FULLSCREEN)
        #cv2.imshow('RealSense', images)
        cv2.imshow('RealSense', depth_colormap)
        cv2.waitKey(1)

finally:

    # Stop streaming
    pipeline.stop()
```

D.1.2) MÓDULO DE REMOÇÃO DE DETRITOS

Programa 1: recebe mensagens via LoRa para execução de tarefas pelo módulo

```
#********************IMPORTACAO BIBLIOTECAS**********************************

import os
import serial
import RPi.GPIO as GPIO
import time

#********************VERIFICACAO DA PORTA PARA A LORA*************************

if os.name == 'nt':
    import msvcrt

    def getch():
        return msvcrt.getch().decode()

else:
    import sys
    import tty
    import termios
    fd = sys.stdin.fileno()

    porta = ""

    time.sleep(9)

while porta == "":

    f = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","r")
```

```
   porta = f.read()

   lora_receiver = serial.Serial(porta, 115200)

print('porta recebida')
print(porta)

#********************DEFINE PORTAS GPIOS*************************

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setwarnings(False)

###############ROTINA CORRECAO COMANDOS LORA###############

a = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")

arq = a.read()

print(arq)

if arq == "":

   a = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
   a.write("0")

   a = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
   a.write("0")

   a = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
   arq = a.read()

   if arq == "0":
      a = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
      a.truncate(0)
      print("sucesso")


#********************WHILE PRINCIPAL************************

while True:

#********************LEITURA LORA E FUNCAO CASE****************

   recebe = lora_receiver.readline()
   a = str(recebe.decode("utf8"))
```

```
    a = int(a)

    if(a == 1):
        print("Sobe desce 1 BOLA")

            #ENVIO SINAL LORA

        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

        f.write("0")
        f.truncate(0)

        time.sleep(0.05)

        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("1")

        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
        arq = f.read()

        print("feito")

        if arq != "1":
            f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
            f.write("1")
            print("reescrito")

#       f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
#       f.write("1")
        #print("SINAL DA LORA RECEBIDO")

    if(a == 2):
        print("Diagonal XIS")
        #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        #f.write("2")

            #ENVIO SINAL LORA

        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

        f.write("0")
        f.truncate(0)

        time.sleep(0.05)
```

```
    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("2")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "2":
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("2")
        print("reescrito")

if(a == 3):
    print("TRIANG")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("3")

          #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("0")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("3")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "3":
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("3")
        print("reescrito")

if(a == 4):
    print("QUAD")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("4")
```

```
        #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("0")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("4")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "4":
       f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
       f.write("4")
       print("reescrito")

if(a == 5):
    print("Esquerda")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("5")

        #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("0")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("5")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "5":
```

```
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("5")
        print("reescrito")

if(a == 6):
    print("Direita")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("6")

            #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("0")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("6")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "6":
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("6")
        print("reescrito")

if(a == 7):
    print("Cima")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("7")

            #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("0")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)
```

```
    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("7")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "7":
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("7")
        print("reescrito")

if(a == 8):
    print("Baixo")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("8")

          #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("0")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("8")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "8":
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("8")
        print("reescrito")

if(a == 9):
    print("Baixo")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("9")
```

```
        #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("0")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("9")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "9":
       f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
       f.write("9")
       print("reescrito")

if(a == 0):
    print("Baixo")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("0")

        #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("0")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("0")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "0":
```

```
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("0")
        print("reescrito")
```

Programa 2: envia mensagens para a LoRa emitir aviso sonoro

```
#********************IMPORTACAO BIBLIOTECAS***********************

import os
import serial
import RPi.GPIO as GPIO
import time

#********************VERIFICACAO DA PORTA PARA A LORA************

if os.name == 'nt':
   import msvcrt

   def getch():
      return msvcrt.getch().decode()

else:
   import sys
   import tty
   import termios
   fd = sys.stdin.fileno()

   porta = ""

   time.sleep(8)

while porta == "":

   f = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","r")
   porta = f.read()

   lora_receiver = serial.Serial(porta, 115200)

print('porta recebida')
print(porta)

#********************WHILE PRINCIPAL***********************

while True:
```

```
#********************ESCRITA NA LORA******************

   f = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","r")
   bipe = f.read()

   if bipe == "a":
      lora_receiver.write(str.encode("a"+"/r/n"))
      time.sleep(0.05)

      print('mensagem enviada 2')

      f = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")
      f.truncate(0)

   if bipe == "b":
      lora_receiver.write(str.encode("b"+"/r/n"))
      time.sleep(0.05)
      print('mensagem enviada 3')

      f = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")
      f.truncate(0)
```

Programa 3: controla acionamento do eletroímã por sinais advindos de fins de curso

```
import RPi.GPIO as GPIO
import time

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setwarnings(False)

#canal 20 e 21 - rele de alimentacao
#canal 17 e 27 - rele de chaveamento

print("inicio")

# Set up the GPIO channels
GPIO.setup(16,GPIO.OUT)
GPIO.setup(23,GPIO.OUT)
GPIO.setup(18,GPIO.OUT)
GPIO.setup(25,GPIO.OUT)
GPIO.setup(5,GPIO.OUT)
GPIO.setup(6,GPIO.OUT)
GPIO.setup(13,GPIO.OUT)
```

```
GPIO.setup(12,GPIO.OUT)

#GPIO.setup(15,GPIO.IN,GPIO.PUD_DOWN)
#GPIO.setup(19,GPIO.IN,GPIO.PUD_DOWN)
GPIO.setup(26,GPIO.IN,GPIO.PUD_UP)
GPIO.setup(10,GPIO.IN,GPIO.PUD_UP)

GPIO.output(23,GPIO.LOW)
GPIO.output(18,GPIO.HIGH)
GPIO.output(25,GPIO.LOW)
#GPIO.output(5,GPIO.HIGH)
#GPIO.output(6,GPIO.HIGH)

GPIO.output(5,GPIO.HIGH)
GPIO.output(6,GPIO.LOW)
GPIO.output(13,GPIO.LOW)

#FIM DE CURSO 1: NIVEL LOGICO em 6 e INPUT EM 19 (26)
#FIM DE CURSO 2: NIVEL LOGICO em 5 e INPUT EM 15
#FIM DE CURSO 3 (DE BAIXO): NIVEL LOGICO em 13 e INPUT EM 10 (16)
GPIO.output(12,GPIO.HIGH)

flag = 0
flag2 = 0

print("aguardando fim de curso")

time.sleep(10)

#BUZZER

GPIO.output(16,GPIO.HIGH)
time.sleep(0.3)
GPIO.output(16,GPIO.LOW)


a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","r")

arq = a.read()

print(arq)

if arq == "":
```

```
    a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")
    a.write("0")

    a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")
    a.write("0")

    a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","r")
    arq = a.read()

    if arq == "0":
        a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")
        a.truncate(0)
        print("sucesso")

    i = 0
    maisa = 0
    menosa = 0
    maisb = 0
    menosb = 0

    flag2 = 0

while True:

    i = i+1

    #print(GPIO.input(16))
    #print("mais",maisb)
    #print("menos",menosb)

    if GPIO.input(26) == 1: maisa = maisa + 1
    if GPIO.input(26) == 0: menosa = menosa + 1

    if GPIO.input(10) == 1: maisb = maisb + 1
    if GPIO.input(10) == 0: menosb = menosb + 1

    #if flag == 0 and ((GPIO.input(15) == 1 or GPIO.input(19) == 1)):
    #if flag == 0 and GPIO.input(19) == 1:
    #if flag == 0 and GPIO.input(19) == 0:
    if i == 25 and flag == 0 and menosa > maisa:

        print("acionamento")
        GPIO.output(18,GPIO.LOW)
        GPIO.output(23,GPIO.LOW)
```

```
        flag = 1

        #ENVIO SINAL LORA

        a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")

        a.write("0")
        a.truncate(0)

        time.sleep(0.05)

        a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")
        a.write("a")

        a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","r")
        arq = a.read()

        if arq != "a":
            a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")
            a.write("a")
            print("reescrito")

        time.sleep(7)

    #if (GPIO.input(10) == 1 and flag == 1 and (GPIO.input(22) == 1 or GPIO.input(26) ==
1)):
    #if (i == 10 and GPIO.input(16) == 0 and flag == 1):
    if (i == 25 and menosb > maisb and flag == 1 and flag2 == 0):

        print("esse e o valor", GPIO.input(16))
        #time.sleep(5)

        print("desacionamento")

        flag = 0
        flag2 = 1

        GPIO.output(18,GPIO.HIGH)
        GPIO.output(23,GPIO.HIGH)

        a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")

        a.write("0")
        a.truncate(0)
```

```
    time.sleep(0.05)

    a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")
    a.write("b")

    a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","r")
    arq = a.read()

    if arq != "b":
       a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")
       a.write("b")
       print("reescrito")

    time.sleep(5)


  if i == 25:
    i = 0
    maisa = 0
    maisb = 0
    menosa = 0
    menosb = 0
```

Programa 4: interpreta mensagens recebidas por LoRa para movimentação do módulo ou acionamento do maçarico

```
#!/usr/bin/env python
# -*- coding: utf-8 -*-

import serial
from dynamixel_sdk import *
import os
import RPi.GPIO as GPIO
from time import *
import time

sleep(5)


GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setwarnings(False)

GPIO.setup(18,GPIO.OUT)
```

```
GPIO.setup(23,GPIO.OUT)

GPIO.setup(20,GPIO.OUT)
GPIO.setup(21,GPIO.OUT)
GPIO.setup(17,GPIO.OUT)
GPIO.setup(27,GPIO.OUT)
GPIO.setup(16,GPIO.OUT)

GPIO.output(18,GPIO.HIGH)
GPIO.output(23,GPIO.HIGH)

GPIO.output(20,GPIO.HIGH)
GPIO.output(21,GPIO.HIGH)
GPIO.output(17,GPIO.HIGH)
GPIO.output(27,GPIO.HIGH)
GPIO.output(16,GPIO.LOW)

if os.name == 'nt':
   import msvcrt

   def getch():
      return msvcrt.getch().decode()
else:
   import sys
   import tty
   import termios
   fd = sys.stdin.fileno()


# TODO ORGANIZAR COM TRY AND ECEPT HERE
DEVICENAME = '/dev/ttyUSB0'
DEVICENAME_2 = '/dev/ttyUSB1'
lora_receiver2 = serial.Serial('/dev/ttyUSB1', 115200)
lora_receiver = serial.Serial('/dev/ttyUSB0', 115200)

# Control table address
TORQUE_ENABLE_T = 64
OPERATION_MODE = 11
GOAL_VELOCITY = 104
VELOCITY_LIMIT = 44
ADDR_PRO_GOAL_POSITION = 116
ADDR_PRO_PRESENT_POSITION = 132

# CONFIGURATION DYNAMIXEL
PROTOCOL_VERSION = 2.0
```

```
BAUDRATE = 57600

DXL_ID_1 = 1  # trao
DXL_ID_2 = 2  # marico

# CONFIGURATION ENABLES
TORQUE_ENABLE = 1
TORQUE_DISABLE = 0
VELOCITY_CONTROL = 1
POSITION_CONTROL = 3

# CRITERIOS DE SEGURANÇA
MAX_VEL = 1000
MIN_POS = 0
MAX_POS = 4000

#VELOCIDADE MOTOR

velo = 250

packetHandler = PacketHandler(PROTOCOL_VERSION)

flag = 0

#########INICIALIZADOR ARQUIVO TEXTO######

a = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","r")

arq = a.read()

print(arq)

if arq == "":

   a = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","w+")
   a.write("0")

   a = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","w+")
   a.write("0")

   a = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","r")
   arq = a.read()

   if arq == "0":
      a = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","w+")
```

```
        a.truncate(0)
        print("sucesso")

def port_conf(DXL_ID):

    portHandler = PortHandler(DEVICENAME)
    lora_receiver = serial.Serial('/dev/ttyUSB1', 115200)

    if portHandler.openPort():
        print("Succeeded to open the port")

        #ENVIO SINAL LORA

        f = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","w+")

        f.write("0")
        f.truncate(0)

        time.sleep(0.05)

        f = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","w+")
        f.write("/dev/ttyUSB1")

        f = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","r")
        arq = f.read()

        if arq != "/dev/ttyUSB1":
            f = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","w+")
            f.write("/dev/ttyUSB1")
            print("reescrito")

    else:
        print("Failed to open the port")
        print("Press any key to terminate...")
        getch()
        quit()

    if portHandler.setBaudRate(BAUDRATE):
        print("Succeeded to change the baudrate")
    else:
        print("Failed to change the baudrate")
        print("Press any key to terminate...")
        getch()
        quit()
```

```
dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write1ByteTxRx(
   portHandler, DXL_ID, TORQUE_ENABLE_T, TORQUE_DISABLE)

if dxl_comm_result != COMM_SUCCESS:
   lora_receiver = serial.Serial('/dev/ttyUSB0', 115200)
   portHandler.closePort()
   print("saindo!")
   # exit(1)
   portHandler = PortHandler(DEVICENAME_2)

   if portHandler.openPort():
      print("Succeeded to open the port")

      #ENVIO SINAL LORA

      f = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","w+")

      f.write("0")
      f.truncate(0)

      time.sleep(0.05)

      f = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","w+")
      f.write("/dev/ttyUSB0")

      f = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","r")
      arq = f.read()

      if arq != "/dev/ttyUSB0":
         f = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","w+")
         f.write("/dev/ttyUSB0")
         print("reescrito")

   else:
      print("Failed to open the port")
      print("Press any key to terminate...")
      getch()
      quit()

   if portHandler.setBaudRate(BAUDRATE):
      print("Succeeded to change the baudrate")
   else:
      print("Failed to change the baudrate")
      print("Press any key to terminate...")
      getch()
```

```
        quit()

    #dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write1ByteTxRx(
    #    portHandler, DXL_ID_1, TORQUE_ENABLE_T, TORQUE_DISABLE)

    dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write1ByteTxRx(
        portHandler, DXL_ID, TORQUE_ENABLE_T, TORQUE_DISABLE)


    if dxl_comm_result != COMM_SUCCESS:
        print("não trocou!")

  return portHandler, lora_receiver


# def INITIAL_CONIFG():

#     if portHandler.openPort():
#         print("Succeeded to open the port")
#     else:
#         print("Failed to open the port")
#         print("Press any key to terminate...")
#         getch()
#         quit()

#     if portHandler.setBaudRate(BAUDRATE):
#         print("Succeeded to change the baudrate")
#     else:
#         print("Failed to change the baudrate")
#         print("Press any key to terminate...")
#         getch()
#         quit()
#     a = Disable_Torque(DXL_ID_1)
#     print('disabel torque == {a}')
#     if a == 1:
#         if portHandler.closePort():
#             print("close port")
#             Wrong_connection()


def Set_Operation_Mode_Velocity(DXL_ID):

  # Changing Operation Mode to velocity mode
  dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write2ByteTxRx(
      portHandler, DXL_ID, OPERATION_MODE, VELOCITY_CONTROL)
```

```
    if dxl_comm_result != COMM_SUCCESS:
        print("%s" % packetHandler.getTxRxResult(dxl_comm_result))
    elif dxl_error != 0:
        print("%s" % packetHandler.getRxPacketError(dxl_error))
    else:
        print('Velocity mode -> id={DXL_ID}')

    # Changing the velocity limit to close to maximum
    dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write4ByteTxRx(
        portHandler, DXL_ID, VELOCITY_LIMIT, MAX_VEL)

    # Enable torque
    #dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write1ByteTxRx(
    #    portHandler, DXL_ID, TORQUE_ENABLE_T, TORQUE_ENABLE)

    # Enable torque
    dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write1ByteTxRx(
        portHandler, DXL_ID, TORQUE_ENABLE_T, TORQUE_ENABLE)
    if dxl_comm_result != COMM_SUCCESS:
        print("%s" % packetHandler.getTxRxResult(dxl_comm_result))
    else:
        print('torque ligado')

def Set_Operation_Mode_Position(DXL_ID):

    # Changing Operation Mode to velocity mode
    dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write2ByteTxRx(
        portHandler, DXL_ID, OPERATION_MODE, POSITION_CONTROL)

    if dxl_comm_result != COMM_SUCCESS:
        print("%s" % packetHandler.getTxRxResult(dxl_comm_result))
    elif dxl_error != 0:
        print("%s" % packetHandler.getRxPacketError(dxl_error))
    else:
        print('Position mode -> id={DXL_ID}')

    # Enable torque
    dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write1ByteTxRx(
        portHandler, DXL_ID, TORQUE_ENABLE_T, TORQUE_ENABLE)
    if dxl_comm_result != COMM_SUCCESS:
        print("%s" % packetHandler.getTxRxResult(dxl_comm_result))
    else:
        print('torque ligado')
```

```
def Write_velocity(DXL_ID, vel):

    dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write4ByteTxRx(
        portHandler, DXL_ID, GOAL_VELOCITY, vel)
    if dxl_comm_result != COMM_SUCCESS:
        print("%s" % packetHandler.getTxRxResult(dxl_comm_result))
    elif dxl_error != 0:
        print("%s" % packetHandler.getRxPacketError(dxl_error))


def Write_position(DXL_ID, pos):

    dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write4ByteTxRx(
        portHandler, DXL_ID, ADDR_PRO_GOAL_POSITION, pos)

    if dxl_comm_result != COMM_SUCCESS:
        print("%s" % packetHandler.getTxRxResult(dxl_comm_result))
    elif dxl_error != 0:
        print("%s" % packetHandler.getRxPacketError(dxl_error))


def Disable_Torque(DXL_ID):

    # Disable Dynamixel Torque -- in case pre-enable
    dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write1ByteTxRx(
        portHandler, DXL_ID, TORQUE_ENABLE_T, TORQUE_DISABLE)

    if dxl_comm_result != COMM_SUCCESS:
        print("1-%s" % packetHandler.getTxRxResult(dxl_comm_result))
        # closeport()
        return 1
    elif dxl_error != 0:
        print("2-%s" % packetHandler.getRxPacketError(dxl_error))
    else:
        print('Torque has been successfully turn off! , ID_{DXL_ID}')

if __name__ == "__main__":

    portHandler, lora_receiver = port_conf(DXL_ID_1)
    portHandler, lora_receiver = port_conf(DXL_ID_2)

    #Set_Operation_Mode_Position(DXL_ID_1)
    #Write_position(DXL_ID_1, MIN_POS)
    #sleep(3)
```

```
    #Write_position(DXL_ID_1, MAX_POS)
    #sleep(3)
    Set_Operation_Mode_Velocity(DXL_ID_1)
    Set_Operation_Mode_Velocity(DXL_ID_2)

    # for i in range(0, 100):
    #     recebe = lora_receiver.readline()
    #     print('{recebe.decode("utf8")}')
    #     time.sleep(0.2)

    #Disable_Torque(DXL_ID_1)

    GPIO.output(16,GPIO.HIGH)
    sleep(0.6)
    GPIO.output(16,GPIO.LOW)
    print("aguardando pacote")

    GPIO.setup(20,GPIO.OUT)
    GPIO.setup(21,GPIO.OUT)
    GPIO.setup(17,GPIO.OUT)
    GPIO.setup(27,GPIO.OUT)
    #flag = 0

    #while True:

                            #recebe = lora_receiver.readline()
    #    print(recebe)
    #    a = str(recebe.decode("utf8"))
    #    a = int(a)
                            #if(a==6): break

    #GPIO.output(16,GPIO.HIGH)
    #sleep(0.3)
    #GPIO.output(16,GPIO.LOW)

####################WHILE PRINCIPAL#########################

    while True:

        #recebe = lora_receiver.readline()
        #a = str(recebe.decode("utf8"))
        #a = int(a)

        #print(a)
```

```
flag = 1

file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
a = file.read()
#a = int(a)

#if ((flag==0) and (a==0 or a==1 or a==2 or a==3 or a==4 or a==5 or a==6 or a==7 or a==8 or a==9)):
#    flag = 1
#    print("Passou")


if(a == "1" and flag == 1):
        print("avanco motor")

        #GPIO.output(16,GPIO.HIGH)
        #sleep(0.6)
        #GPIO.output(16,GPIO.LOW)

        #sleep(0.1)
        #Write_position(DXL_ID_1, MIN_POS)
        Write_velocity(DXL_ID_1, velo)
        Write_velocity(DXL_ID_2, velo)

        sleep(3)

        Write_velocity(DXL_ID_1, 0)
        Write_velocity(DXL_ID_2, 0)

        file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        file.truncate(0)

if(a == "2" and flag == 1):
        print("recuo motor")
        #sleep(0.1)
        #Write_position(DXL_ID_1, MAX_POS)
        Write_velocity(DXL_ID_1, -1*velo)
        Write_velocity(DXL_ID_2, -1*velo)

        sleep(3)

        Write_velocity(DXL_ID_1, 0)
        Write_velocity(DXL_ID_2, 0)

        file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        file.truncate(0)
```

```
if(a == "3" and flag == 1):
        print("atuador ligado")
        GPIO.output(20,GPIO.LOW)
        GPIO.output(21,GPIO.LOW)

        sleep(0.05)

        GPIO.output(17,GPIO.LOW)
        GPIO.output(27,GPIO.LOW)

        #primeiro avanco
        sleep(0.45)

        #sleep(0.25)

        GPIO.output(17,GPIO.HIGH)
        GPIO.output(27,GPIO.HIGH)

        #primeiro retorno
        sleep(0.35)
        #sleep(0.25)

        GPIO.output(17,GPIO.LOW)
        GPIO.output(27,GPIO.LOW)

        #segundo recuo
        sleep(2.5)
        #sleep(0.45)
        #sleep(0.30)

        GPIO.output(17,GPIO.HIGH)
        GPIO.output(27,GPIO.HIGH)

        #segundo retorno
        sleep(0.15)
        #sleep(0.15)

        GPIO.output(20,GPIO.HIGH)
        GPIO.output(21,GPIO.HIGH)

        file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        file.truncate(0)

if(a == "4" and flag == 1):
```

```
        print("avanco fino motor")
        Write_velocity(DXL_ID_1, velo)
        Write_velocity(DXL_ID_2, -velo)

        sleep(1)

        Write_velocity(DXL_ID_1, 0)
        Write_velocity(DXL_ID_2, 0)

        file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        file.truncate(0)

if(a == "5" and flag == 1):
        print("recuo fino motor")
        Write_velocity(DXL_ID_1, -1*velo)
        Write_velocity(DXL_ID_2, -1*velo)

        sleep(1)

        Write_velocity(DXL_ID_1, 0)
        Write_velocity(DXL_ID_2, 0)

        file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        file.truncate(0)

if(a == "6" and flag == 1):
        print("avanca atuador")

        GPIO.output(20,GPIO.LOW)
        GPIO.output(21,GPIO.LOW)

        sleep(0.05)

        GPIO.output(17,GPIO.HIGH)
        GPIO.output(27,GPIO.HIGH)

        sleep(0.05)

        GPIO.output(20,GPIO.HIGH)
        GPIO.output(21,GPIO.HIGH)

        file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        file.truncate(0)

if(a == "7" and flag == 1):
```

```
            print("recua atuador")

            GPIO.output(20,GPIO.LOW)
            GPIO.output(21,GPIO.LOW)

            sleep(0.05)

            GPIO.output(17,GPIO.LOW)
            GPIO.output(27,GPIO.LOW)

            sleep(0.05)

            GPIO.output(20,GPIO.HIGH)
            GPIO.output(21,GPIO.HIGH)

            file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
            file.truncate(0)

        if(a == "8" and flag == 1):
            print("desaciona ima")
            GPIO.output(18,GPIO.HIGH)
            GPIO.output(23,GPIO.HIGH)

            file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
            file.truncate(0)

    Disable_Torque(DXL_ID_1)
    # Close port
    portHandler.closePort()
    print("Succeeded to close the port")
```

D.1.3) MÓDULO DE INSTALAÇÃO DE AMORTECEDORES STOCKBRIDGE

Programa 1: recebe mensagens via LoRa para execução de tarefas pelo módulo

```
#********************IMPORTACAO BIBLIOTECAS**********************

import os
import serial
import RPi.GPIO as GPIO
import time

#********************VERIFICACAO DA PORTA PARA A LORA**************
```

```
if os.name == 'nt':
   import msvcrt

   def getch():
      return msvcrt.getch().decode()

else:
   import sys
   import tty
   import termios
   fd = sys.stdin.fileno()

   porta = ""

   time.sleep(9)

while porta == "":

   f = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","r")
   porta = f.read()

   lora_receiver = serial.Serial(porta, 115200)

print('porta recebida')
print(porta)

#********************DEFINE PORTAS GPIOS********************

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setwarnings(False)

###################ROTINA CORRECAO COMANDOS LORA#################

a = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")

arq = a.read()

print(arq)

if arq == "":

   a = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
   a.write("x")
```

```
   a = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
   a.write("x")

   a = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
   arq = a.read()

   if arq == "0":
      a = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
      a.truncate(0)
      print("sucesso")


#********************WHILE PRINCIPAL****************

while True:

#********************LEITURA LORA E FUNCAO CASE*******************

   recebe = lora_receiver.readline()
   a = str(recebe.decode("utf8"))
   a = int(a)

   if(a == 1):
      print("Sobe desce 1 BOLA")

            #ENVIO SINAL LORA

      f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

      f.write("x")
      f.truncate(0)

      time.sleep(0.05)

      f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
      f.write("1")

      f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
      arq = f.read()

      print("feito")

      if arq != "1":
         f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
         f.write("1")
```

```
            print("reescrito")

#       f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
#       f.write("1")
        #print("SINAL DA LORA RECEBIDO")

    if(a == 2):
        print("Diagonal XIS")
        #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        #f.write("2")

                #ENVIO SINAL LORA

        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

        f.write("x")
        f.truncate(0)

        time.sleep(0.05)

        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("2")

        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
        arq = f.read()

        print("feito")

        if arq != "2":
            f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
            f.write("2")
            print("reescrito")

    if(a == 3):
        print("TRIANG")
        #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        #f.write("3")

                #ENVIO SINAL LORA

        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

        f.write("x")
        f.truncate(0)
```

```
    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("3")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "3":
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("3")
        print("reescrito")

if(a == 4):
    print("QUAD")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("4")

            #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("x")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("4")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "4":
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("4")
        print("reescrito")

if(a == 5):
    print("Esquerda")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
```

```
    #f.write("5")

        #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("x")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("5")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "5":
       f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
       f.write("5")
       print("reescrito")

if(a == 6):
    print("Direita")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("6")

        #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("x")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("6")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")
```

```
    if arq != "6":
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("6")
        print("reescrito")

if(a == 7):
    print("Cima")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("7")

            #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("x")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("7")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "7":
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("7")
        print("reescrito")

if(a == 8):
    print("Baixo")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("8")

            #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("x")
    f.truncate(0)
```

```
    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("8")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "8":
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("8")
        print("reescrito")

if(a == 9):
    print("Baixo")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    #f.write("9")

            #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("x")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("9")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "9":
        f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        f.write("9")
        print("reescrito")

if(a == 0):
    print("Baixo")
    #f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
```

```
    #f.write("0")

        #ENVIO SINAL LORA

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")

    f.write("x")
    f.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    f.write("0")

    f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    arq = f.read()

    print("feito")

    if arq != "0":
       f = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
       f.write("0")
       print("reescrito")
```

Programa 2: envia mensagens para a LoRa emitir aviso sonoro

```
#********************IMPORTACAO BIBLIOTECAS**********************

import os
import serial
import RPi.GPIO as GPIO
import time

#********************VERIFICACAO DA PORTA PARA A LORA****************

if os.name == 'nt':
   import msvcrt

   def getch():
      return msvcrt.getch().decode()

else:
   import sys
   import tty
```

```
   import termios
   fd = sys.stdin.fileno()

   porta = ""

   time.sleep(8)

while porta == "":

   f = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","r")
   porta = f.read()

   lora_receiver = serial.Serial(porta, 115200)

print('porta recebida')
print(porta)

#********************WHILE PRINCIPAL*******************************

while True:

#********************ESCRITA NA LORA******************

   f = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","r")
   bipe = f.read()

   if bipe == "a":
      lora_receiver.write(str.encode("a"+"/r/n"))
      time.sleep(0.05)

      print('mensagem enviada 2')

      f = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")
      f.truncate(0)

   if bipe == "b":
      lora_receiver.write(str.encode("b"+"/r/n"))
      time.sleep(0.05)
      print('mensagem enviada 3')

      f = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")
      f.truncate(0)
```

Programa 3: controla acionamento do eletroímã por sinais advindos de fins de curso

```
import RPi.GPIO as GPIO
import time

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setwarnings(False)

# GPIOs 9-10-18-15

print("inicio...aguardar delay")

# Set up the GPIO channels
GPIO.setup(15,GPIO.OUT)
GPIO.setup(18,GPIO.OUT)

# NIVEL LOGICO PARA ACIONAR FIM DE CURSO
GPIO.setup(9,GPIO.OUT)
GPIO.setup(6,GPIO.OUT)
GPIO.setup(25,GPIO.OUT)
GPIO.setup(8,GPIO.OUT)

GPIO.setup(5,GPIO.IN,GPIO.PUD_UP)
GPIO.setup(10,GPIO.IN,GPIO.PUD_UP)

#HIGH PORQUE RELE ACIONA POR NIVEL LOGICO BAIXO

GPIO.output(15,GPIO.HIGH)
GPIO.output(18,GPIO.HIGH)

#LOW PORQUE RESISTORES INTERNOS SAO PULL UP

GPIO.output(9,GPIO.LOW)
GPIO.output(6,GPIO.LOW)
GPIO.output(25,GPIO.LOW)
GPIO.output(8,GPIO.HIGH) #PWM CANAL 1 MONSTERSHIELD - PINO
4

flag = 0
flag2 = 0

print("aguardando fim de curso")

time.sleep(10)

a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","r")
```

```
arq = a.read()

print(arq)

if arq == "":

   a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")
   a.write("0")

   a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")
   a.write("0")

   a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","r")
   arq = a.read()

   if arq == "0":
      a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")
      a.truncate(0)
      print("sucesso")

i = 0
maisa = 0
menosa = 0
maisb = 0
menosb = 0

flag2 = 0

while True:

   i = i+1

   if GPIO.input(10) == 1: maisa = maisa + 1
   if GPIO.input(10) == 0: menosa = menosa + 1

   if GPIO.input(5) == 1: maisb = maisb + 1
   if GPIO.input(5) == 0: menosb = menosb + 1

   #print(GPIO.input(10))

   if i == 10 and flag == 0 and menosa > maisa:

      print("acionamento")
      GPIO.output(18,GPIO.LOW)
```

```
    GPIO.output(15,GPIO.LOW)

    flag = 1

    #ENVIO SINAL LORA

    a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")

    a.write("0")
    a.truncate(0)

    time.sleep(0.05)

    a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")
    a.write("a")

    a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","r")
    arq = a.read()

    if arq != "a":
       a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")
       a.write("a")
       print("reescrito")

    time.sleep(7)

if (i == 25 and menosb > maisb and flag == 1 and flag2 == 0):

    #print("esse e o valor", GPIO.input(16))
    #time.sleep(5)

    print("desacionamento")

    flag = 0
    flag2 = 1

    GPIO.output(18,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(15,GPIO.HIGH)

    a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")

    a.write("0")
    a.truncate(0)

    time.sleep(0.05)
```

```
    a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")
    a.write("b")

    a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","r")
    arq = a.read()

    if arq != "b":
       a = open("/home/pi/Desktop/bipe.txt","w+")
       a.write("b")
       print("reescrito")

    time.sleep(5)


  if i == 25:
     i = 0
     maisa = 0
     maisb = 0
     menosa = 0
     menosb = 0
```

Programa 4: interpreta mensagens recebidas por LoRa para movimentação do módulo ou instalação do amortecedor

```
#!/usr/bin/env python
# -*- coding: utf-8 -*-

import serial
from dynamixel_sdk import *
import os
import RPi.GPIO as GPIO
from time import *
import time

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setwarnings(False)

#******************GPIO 2-3-13-17-19-22-23-24-25-26-27

GPIO.setup(2,GPIO.OUT)
GPIO.output(2,GPIO.LOW)
```

```
GPIO.setup(3,GPIO.OUT)
GPIO.output(3,GPIO.LOW)

GPIO.setup(21,GPIO.OUT)
GPIO.setup(13,GPIO.OUT)
GPIO.setup(17,GPIO.OUT)
GPIO.setup(19,GPIO.OUT)
GPIO.setup(26,GPIO.OUT)
GPIO.setup(27,GPIO.OUT)
GPIO.setup(23,GPIO.OUT)
GPIO.setup(24,GPIO.OUT)
GPIO.setup(25,GPIO.OUT)
GPIO.setup(22,GPIO.OUT)

GPIO.output(21,GPIO.LOW)
GPIO.output(13,GPIO.LOW)
GPIO.output(17,GPIO.LOW)
GPIO.output(19,GPIO.LOW)
GPIO.output(26,GPIO.HIGH) #enable
GPIO.output(27,GPIO.LOW)
GPIO.output(23,GPIO.LOW)
GPIO.output(24,GPIO.LOW)
GPIO.output(25,GPIO.LOW)
GPIO.output(22,GPIO.LOW)

if os.name == 'nt':
    import msvcrt

    def getch():
        return msvcrt.getch().decode()
else:
    import sys
    import tty
    import termios
    fd = sys.stdin.fileno()


# TODO ORGANIZAR COM TRY AND ECEPT HERE
DEVICENAME = '/dev/ttyUSB0'
DEVICENAME_2 = '/dev/ttyUSB1'
lora_receiver2 = serial.Serial('/dev/ttyUSB1', 115200)
lora_receiver = serial.Serial('/dev/ttyUSB0', 115200)

# Control table address
TORQUE_ENABLE_T = 64
```

```
OPERATION_MODE = 11
GOAL_VELOCITY = 104
VELOCITY_LIMIT = 44
ADDR_PRO_GOAL_POSITION = 116
ADDR_PRO_PRESENT_POSITION = 132

# CONFIGURATION DYNAMIXEL
PROTOCOL_VERSION = 2.0
BAUDRATE = 57600

DXL_ID_1 = 1  # tracao
DXL_ID_2 = 2  # marico
DXL_ID_3 = 3

# CONFIGURATION ENABLES
TORQUE_ENABLE = 1
TORQUE_DISABLE = 0
VELOCITY_CONTROL = 1
POSITION_CONTROL = 3

# CRITERIOS DE SEGURANÇA
MAX_VEL = 1000
MIN_POS = 0
MAX_POS = 4000

#VELOCIDADE MOTOR

velo = 1000

packetHandler = PacketHandler(PROTOCOL_VERSION)

flag = 0

##########INICIALIZADOR ARQUIVO TEXTO######

a = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","r")

arq = a.read()

print(arq)

if arq == "":

   a = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","w+")
   a.write("0")
```

```
    a = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","w+")
    a.write("0")

    a = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","r")
    arq = a.read()

    if arq == "0":
        a = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","w+")
        a.truncate(0)
        print("sucesso")

def port_conf(DXL_ID):

    portHandler = PortHandler(DEVICENAME)
    lora_receiver = serial.Serial('/dev/ttyUSB1', 115200)

    if portHandler.openPort():
        print("Succeeded to open the port")

        #ENVIO SINAL LORA

        f = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","w+")

        f.write("0")
        f.truncate(0)

        time.sleep(0.05)

        f = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","w+")
        f.write("/dev/ttyUSB1")

        f = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","r")
        arq = f.read()

        if arq != "/dev/ttyUSB1":
            f = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","w+")
            f.write("/dev/ttyUSB1")
            print("reescrito")

    else:
        print("Failed to open the port")
        print("Press any key to terminate...")
        getch()
        quit()
```

```
if portHandler.setBaudRate(BAUDRATE):
   print("Succeeded to change the baudrate")
else:
   print("Failed to change the baudrate")
   print("Press any key to terminate...")
   getch()
   quit()

dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write1ByteTxRx(
   portHandler, DXL_ID, TORQUE_ENABLE_T, TORQUE_DISABLE)

if dxl_comm_result != COMM_SUCCESS:
   lora_receiver = serial.Serial('/dev/ttyUSB0', 115200)
   portHandler.closePort()
   print("saindo!")
   # exit(1)
   portHandler = PortHandler(DEVICENAME_2)

   if portHandler.openPort():
      print("Succeeded to open the port")

      #ENVIO SINAL LORA

      f = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","w+")

      f.write("0")
      f.truncate(0)

      time.sleep(0.05)

      f = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","w+")
      f.write("/dev/ttyUSB0")

      f = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","r")
      arq = f.read()

      if arq != "/dev/ttyUSB0":
         f = open("/home/pi/Desktop/porta.txt","w+")
         f.write("/dev/ttyUSB0")
         print("reescrito")

   else:
      print("Failed to open the port")
      print("Press any key to terminate...")
```

```
        getch()
        quit()

    if portHandler.setBaudRate(BAUDRATE):
        print("Succeeded to change the baudrate")
    else:
        print("Failed to change the baudrate")
        print("Press any key to terminate...")
        getch()
        quit()

    dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write1ByteTxRx(
        portHandler, DXL_ID_1, TORQUE_ENABLE_T,
TORQUE_DISABLE)

    if dxl_comm_result != COMM_SUCCESS:
        print("não trocou!")

  return portHandler, lora_receiver


# def INITIAL_CONIFG():

#     if portHandler.openPort():
#         print("Succeeded to open the port")
#     else:
#         print("Failed to open the port")
#         print("Press any key to terminate...")
#         getch()
#         quit()

#     if portHandler.setBaudRate(BAUDRATE):
#         print("Succeeded to change the baudrate")
#     else:
#         print("Failed to change the baudrate")
#         print("Press any key to terminate...")
#         getch()
#         quit()
#     a = Disable_Torque(DXL_ID_1)
#     print('disabel torque == {a}')
#     if a == 1:
#         if portHandler.closePort():
#             print("close port")
#             Wrong_connection()
```

```
def Set_Operation_Mode_Velocity(DXL_ID):

    # Changing Operation Mode to velocity mode
    dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write2ByteTxRx(
        portHandler, DXL_ID, OPERATION_MODE, VELOCITY_CONTROL)

    if dxl_comm_result != COMM_SUCCESS:
        print("%s" % packetHandler.getTxRxResult(dxl_comm_result))
    elif dxl_error != 0:
        print("%s" % packetHandler.getRxPacketError(dxl_error))
    else:
        print('Velocity mode -> id={DXL_ID}')

    # Changing the velocity limit to close to maximum
    dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write4ByteTxRx(
        portHandler, DXL_ID, VELOCITY_LIMIT, MAX_VEL)

    # Enable torque
    #dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write1ByteTxRx(
    #    portHandler, DXL_ID, TORQUE_ENABLE_T, TORQUE_ENABLE)

    # Enable torque
    dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write1ByteTxRx(
        portHandler, DXL_ID, TORQUE_ENABLE_T, TORQUE_ENABLE)
    if dxl_comm_result != COMM_SUCCESS:
        print("%s" % packetHandler.getTxRxResult(dxl_comm_result))
    else:
        print('torque ligado')

def Set_Operation_Mode_Position(DXL_ID):

    # Changing Operation Mode to velocity mode
    dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write2ByteTxRx(
        portHandler, DXL_ID, OPERATION_MODE, POSITION_CONTROL)

    if dxl_comm_result != COMM_SUCCESS:
        print("%s" % packetHandler.getTxRxResult(dxl_comm_result))
    elif dxl_error != 0:
        print("%s" % packetHandler.getRxPacketError(dxl_error))
    else:
        print('Position mode -> id={DXL_ID}')

    # Enable torque
    dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write1ByteTxRx(
```

```
        portHandler, DXL_ID, TORQUE_ENABLE_T, TORQUE_ENABLE)
    if dxl_comm_result != COMM_SUCCESS:
        print("%s" % packetHandler.getTxRxResult(dxl_comm_result))
    else:
        print('torque ligado')


def Write_velocity(DXL_ID, vel):

    dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write4ByteTxRx(
        portHandler, DXL_ID, GOAL_VELOCITY, vel)
    if dxl_comm_result != COMM_SUCCESS:
        print("%s" % packetHandler.getTxRxResult(dxl_comm_result))
    elif dxl_error != 0:
        print("%s" % packetHandler.getRxPacketError(dxl_error))


def Write_position(DXL_ID, pos):

    dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write4ByteTxRx(
        portHandler, DXL_ID, ADDR_PRO_GOAL_POSITION, pos)

    if dxl_comm_result != COMM_SUCCESS:
        print("%s" % packetHandler.getTxRxResult(dxl_comm_result))
    elif dxl_error != 0:
        print("%s" % packetHandler.getRxPacketError(dxl_error))


def Disable_Torque(DXL_ID):

    # Disable Dynamixel Torque -- in case pre-enable
    dxl_comm_result, dxl_error = packetHandler.write1ByteTxRx(
        portHandler, DXL_ID, TORQUE_ENABLE_T, TORQUE_DISABLE)

    if dxl_comm_result != COMM_SUCCESS:
        print("1-%s" % packetHandler.getTxRxResult(dxl_comm_result))
        # closeport()
        return 1
    elif dxl_error != 0:
        print("2-%s" % packetHandler.getRxPacketError(dxl_error))
    else:
        print('Torque has been successfully turn off! , ID_{DXL_ID}')

if __name__ == "__main__":
```

```
    portHandler, lora_receiver = port_conf(DXL_ID_1)
    portHandler, lora_receiver = port_conf(DXL_ID_2)
    portHandler, lora_receiver = port_conf(DXL_ID_3)
    #Set_Operation_Mode_Position(DXL_ID_1)
    #Write_position(DXL_ID_1, MIN_POS)
    #sleep(3)
    #Write_position(DXL_ID_1, MAX_POS)
    #sleep(3)
    Set_Operation_Mode_Velocity(DXL_ID_1)
    Set_Operation_Mode_Velocity(DXL_ID_2)
    Set_Operation_Mode_Velocity(DXL_ID_3)

    # for i in range(0, 100):
    #     recebe = lora_receiver.readline()
    #     print('{recebe.decode("utf8")}')
    #     time.sleep(0.2)

    #Disable_Torque(DXL_ID_1)

    #GPIO.output(16,GPIO.HIGH)
    #sleep(0.6)
    #GPIO.output(16,GPIO.LOW)
    print("aguardando pacote")

    #GPIO.setup(20,GPIO.OUT)
    #GPIO.setup(21,GPIO.OUT)
    #GPIO.setup(17,GPIO.OUT)
    #GPIO.setup(27,GPIO.OUT)
    #flag = 0

#    while True:

#                        recebe = lora_receiver.readline()
#      print(recebe)
#      a = str(recebe.decode("utf8"))
#      a = int(a)
#                        if(a==6): break

#   GPIO.output(16,GPIO.HIGH)
#   sleep(0.3)
#   GPIO.output(16,GPIO.LOW)

#*********ROTINA MONSTER SHIELD MOTOR 1*******
#GPIO 26 - 19 - 13 - 6 - 17 - 27
```

```
print("rotina monster shield")

#ativa pwm motoredutor 1 - pino 5
#GPIO.output(17,GPIO.HIGH)

#ativa pwm motor 1 - pino 6 - GPIO 19
#GPIO.output(26,GPIO.HIGH)

#ativa pwm motor 2 - pino 5 - GPIO 19
#GPIO.output(25,GPIO.HIGH)

#ativa giro horario motoredutor - pino 7
#GPIO.output(22,GPIO.HIGH)
#GPIO.output(27,GPIO.LOW)

#ativa giro horario motor 1
#GPIO.output(13,GPIO.HIGH)
#GPIO.output(19,GPIO.LOW)

#ativa giro horario motor 2
#GPIO.output(24,GPIO.HIGH)
#GPIO.output(23,GPIO.LOW)

#sleep(1)

#desativa giro horario motoredutor - pino 7
#GPIO.output(22,GPIO.LOW)
#GPIO.output(27,GPIO.LOW)

#desativa giro horario motor 1
#GPIO.output(13,GPIO.LOW)
#GPIO.output(19,GPIO.LOW)

#desativa giro horario motor 2
#GPIO.output(24,GPIO.LOW)
#GPIO.output(23,GPIO.LOW)

#desativa pwm motoredutor
#GPIO.output(17,GPIO.LOW)

#desativa pwm motor 1
#GPIO.output(26,GPIO.LOW)

#desativa pwm motor 2
#GPIO.output(25,GPIO.LOW)
```

```
while True:

    #print("inicio while true")
    #if (flag == 0): recebe = lora_receiver.readline()
    #flag = 1
    #recebe = lora_receiver.readline()
    #print(recebe)
    #a = str(recebe.decode("utf8"))
    #a = int(a)
    #print(a)
    #sleep(0.1)

    flag = 1
    #flag2 = 0

    file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","r")
    a = file.read()

    if(a == "1" and flag == 1):
       print("avanco motor")

       #ativa pwm motor 1 - pino 6 - GPIO 19
       GPIO.output(26,GPIO.HIGH)

       #ativa pwm motor 2 - pino 5 - GPIO 19
       GPIO.output(17,GPIO.HIGH)

       #ativa giro horario motor 1
       GPIO.output(19,GPIO.LOW)
       GPIO.output(13,GPIO.HIGH)

       #ativa giro horario motor 2
       GPIO.output(22,GPIO.LOW)
       GPIO.output(27,GPIO.HIGH)

       sleep(1)

       #desativa giro horario motor 1
       GPIO.output(19,GPIO.LOW)
       GPIO.output(13,GPIO.LOW)

       #desativa giro horario motor 2
       GPIO.output(22,GPIO.LOW)
       GPIO.output(27,GPIO.LOW)
```

```
    #desativa pwm motor 1
    GPIO.output(26,GPIO.LOW)

    #desativa pwm motor 2
    GPIO.output(17,GPIO.LOW)

    #TESTE MOTORREDUTOR

    #GPIO.output(24,GPIO.LOW)
    #GPIO.output(21,GPIO.HIGH)

    #sleep(2)

    #GPIO.output(24,GPIO.LOW)
    #GPIO.output(21,GPIO.LOW)

    file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    file.truncate(0)

if(a == "2" and flag == 1):
    print("recuo motor")

    #ativa pwm motor 1 - pino 6 - GPIO 19
    GPIO.output(26,GPIO.HIGH)

    #ativa pwm motor 2 - pino 5 - GPIO 19
    GPIO.output(17,GPIO.HIGH)

    #ativa giro horario motor 1
    GPIO.output(19,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(13,GPIO.LOW)

    #ativa giro horario motor 2
    GPIO.output(22,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(27,GPIO.LOW)

    sleep(1)

    #desativa giro horario motor 1
    GPIO.output(19,GPIO.LOW)
    GPIO.output(13,GPIO.LOW)

    #desativa giro horario motor 2
    GPIO.output(22,GPIO.LOW)
```

```
    GPIO.output(27,GPIO.LOW)

    #desativa pwm motor 1
    GPIO.output(26,GPIO.LOW)

    #desativa pwm motor 2
    GPIO.output(17,GPIO.LOW)

    file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    file.truncate(0)

if(a == "3" and flag == 1):
    print("instalacao amortecedor")

    print("avanco amortecedor")
    sleep(0.1)
    Write_velocity(DXL_ID_3, -1*velo)
    sleep(87)
    Write_velocity(DXL_ID_3, 0)

    print("avanco motoredutor")
    sleep(0.1)
    Write_velocity(DXL_ID_1, -1*velo)
    #sleep(74)
    sleep(30)
    Write_velocity(DXL_ID_1, 0)


    print("giro motoredutor")
    #ativa pwm motor 2 - pino 5 - GPIO 19
    #GPIO.output(21,GPIO.HIGH)

    #ativa giro horario motor 2
    GPIO.output(24,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(21,GPIO.LOW)

    sleep(37)

    #ativa giro antihorario motor 2
    GPIO.output(24,GPIO.LOW)
    GPIO.output(21,GPIO.HIGH)

    sleep(0.2)

    #desativa giro motor 2
```

```
    GPIO.output(24,GPIO.LOW)
    GPIO.output(21,GPIO.LOW)

    #desativa pwm motor 2 - pino 5 - GPIO 19
    #GPIO.output(21,GPIO.LOW)

    print("recuo motoredutor")
    sleep(0.1)
    Write_velocity(DXL_ID_1, velo)
    sleep(30)
    Write_velocity(DXL_ID_1, 0)

    print("recua pincas")
    sleep(0.1)
    Write_velocity(DXL_ID_2, -1*velo)
    sleep(4.5)
    Write_velocity(DXL_ID_2, 0)

    print("recuo amortecedor")
    sleep(0.1)
    Write_velocity(DXL_ID_3, velo)
    sleep(85)
    Write_velocity(DXL_ID_3, 0)

    file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    file.truncate(0)

if(a == "4" and flag == 1):
    print("desinstalacao amortecedor")

    print("avanco amortecedor")
    sleep(0.1)
    Write_velocity(DXL_ID_3, -1*velo)
    sleep(87)
    Write_velocity(DXL_ID_3, 0)

    print("avanco motoredutor")
    sleep(0.1)
    Write_velocity(DXL_ID_1, -1*velo)
    #sleep(74)
    sleep(30)
    Write_velocity(DXL_ID_1, 0)


    print("giro motoredutor")
```

```
    #ativa pwm motor 2 - pino 5 - GPIO 19
    #GPIO.output(21,GPIO.HIGH)

    #ativa giro ANTIhorario motor 2
    GPIO.output(24,GPIO.LOW)
    GPIO.output(21,GPIO.HIGH)

    sleep(37)

    #desativa giro motor 2
    GPIO.output(24,GPIO.LOW)
    GPIO.output(21,GPIO.LOW)

    #desativa pwm motor 2 - pino 5 - GPIO 19
    #GPIO.output(21,GPIO.LOW)

    print("avanca pincas")
    sleep(0.1)
    Write_velocity(DXL_ID_2, velo)
    sleep(4.5)
    Write_velocity(DXL_ID_2, 0)

    print("recuo motoredutor")
    sleep(0.1)
    Write_velocity(DXL_ID_1, velo)
    sleep(30)
    Write_velocity(DXL_ID_1, 0)

    print("recuo amortecedor")
    sleep(0.1)
    Write_velocity(DXL_ID_3, velo)
    sleep(85)
    Write_velocity(DXL_ID_3, 0)

    file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    file.truncate(0)

if(a == "5" and flag == 1):
    print("avanco motoredutor")
    sleep(0.1)
    Write_velocity(DXL_ID_1, -1*velo)
    sleep(5)
    Write_velocity(DXL_ID_1, 0)

    file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
```

```
    file.truncate(0)

if(a == "6" and flag == 1):
    print("avanco pincas")
    sleep(0.1)
    Write_velocity(DXL_ID_2, velo)
    sleep(0.4)
    Write_velocity(DXL_ID_2, 0)

    file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    file.truncate(0)

if(a == "7" and flag == 1):
    print("avanco amortecedor")
    sleep(0.1)
    Write_velocity(DXL_ID_3, -1*velo)
    sleep(5)
    Write_velocity(DXL_ID_3, 0)

    file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    file.truncate(0)

if(a == "8" and flag == 1):
    print("recua pincas")
    sleep(0.1)
    Write_velocity(DXL_ID_2, -1*velo)
    sleep(3.4)
    Write_velocity(DXL_ID_2, 0)

    file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    file.truncate(0)

if(a == "9" and flag == 1):
    print("recuo motoredutor")
    sleep(0.1)
    Write_velocity(DXL_ID_1, velo)
    sleep(5)
    Write_velocity(DXL_ID_1, 0)

    file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
    file.truncate(0)

if(a == "0" and flag == 1):
    print("recuo amortecedor")
    sleep(0.1)
```

```
        Write_velocity(DXL_ID_3, velo)
        sleep(5)
        Write_velocity(DXL_ID_3, 0)

        file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        file.truncate(0)

    #if(a == "0"):
        #flag2 = 1

        #file = open("/home/pi/Desktop/lora.txt","w+")
        #file.truncate(0)
```

D.1.4) PROGRAMA DA AUTOMATIZAÇÃO DOS MOVIMENTOS DO DRONE PELA BIBLIOTECA DRONEKIT

```
from dronekit import connect, Command, VehicleMode, LocationGlobalRelative
from pymavlink import mavutil
import time
import RPi.GPIO as GPIO
import serial
import os

# SUBROTINA PARA ALTERACAO DA VELOCIDADE EM X Y E Z NO MODO GUIDED

def send_ned_velocity(velocity_x, velocity_y, velocity_z, duration):
    """
    Move vehicle in direction based on specified velocity vectors.
    """
    msg = vehicle.message_factory.set_position_target_local_ned_encode(
        0,      # time_boot_ms (not used)
        0, 0,    # target system, target component
        mavutil.mavlink.MAV_FRAME_LOCAL_NED, # frame
        0b0000111111000111, # type_mask (only speeds enabled)
        0, 0, 0, # x, y, z positions (not used)
        velocity_x, velocity_y, velocity_z, # x, y, z velocity in m/s
        0, 0, 0, # x, y, z acceleration (not supported yet, ignored in GCS_Mavlink)
        0, 0)    # yaw, yaw_rate (not supported yet, ignored in GCS_Mavlink)

    # send command to vehicle on 1 Hz cycle
    for x in range(0,duration):
        vehicle.send_mavlink(msg)
        time.sleep(1)
```

```
import argparse
parser = argparse.ArgumentParser()
parser.add_argument('--connect', default='127.0.0.1:14550')
args = parser.parse_args()

# Connect to the Vehicle
print 'Connecting to vehicle on: %s' % args.connect
vehicle = connect(args.connect, baud=921600, wait_ready=False)

#SETA MODO INICIAL PARA LOITER

#vehicle.mode = VehicleMode("LOITER")

check = 0
soma = 0
i = 0
dist_trigger = 200 #variavel que sai do while, dispara modo GUIDED e diz que drone esta a 1 metro de distancia

#Alteracao dos parametros no Mission Planner via comando em MAVLink

"

QUINTO CAMPO:
MAV_PARAM_TYPE: tipo de
numero que o parametro
recebe



1
MAV_PARAM_TYPE_UINT8
8-bit unsigned integer

2 MAV_PARAM_TYPE_INT8
8-bit signed integer

3
MAV_PARAM_TYPE_UINT16
16-bit unsigned integer

4
MAV_PARAM_TYPE_INT16
16-bit signed integer

5
MAV_PARAM_TYPE_UINT32
```

```
32-bit unsigned integer

6
MAV_PARAM_TYPE_INT32
32-bit signed integer

7
MAV_PARAM_TYPE_UINT64
64-bit unsigned integer

8
MAV_PARAM_TYPE_INT64
64-bit signed integer

9
MAV_PARAM_TYPE_REAL32
32-bit floating-point

10
MAV_PARAM_TYPE_REAL64
64-bit floating-point

"

#Distancia em metros para se manter do obstaculo

dist = 1

PRX_TYPE = 'PRX_TYPE'
AVOID_ENABLE = 'AVOID_ENABLE'
AVOID_MARGIN = 'AVOID_MARGIN'
AVOID_BEHAVE = 'AVOID_BEHAVE'
RNGFND1_TYPE = 'RNGFND1_TYPE'
CIRCLE_RATE = 'CIRCLE_RATE'

mesg = vehicle.message_factory.param_set_encode(
    1,     # the MAVLink system id of the vehicle (normally 1)
    1,     # normally 1
    AVOID_ENABLE,    # the human readable 16 character parameter name
    7,   # the new value for the parameter expressed as a float
    1,     # the MAV_PARAM_TYPE for the parameter.
    )

vehicle.send_mavlink(mesg)

mesg = vehicle.message_factory.param_set_encode(
    1,     # the MAVLink system id of the vehicle (normally 1)
    1,     # normally 1
```

```
    AVOID_MARGIN,    # the human readable 16 character parameter name
    dist,   # the new value for the parameter expressed as a float
    1,     # the MAV_PARAM_TYPE for the parameter.
    )

vehicle.send_mavlink(mesg)

mesg = vehicle.message_factory.param_set_encode(
    1,     # the MAVLink system id of the vehicle (normally 1)
    1,     # normally 1
    AVOID_BEHAVE,    # the human readable 16 character parameter name
    1,   # the new value for the parameter expressed as a float
    1,     # the MAV_PARAM_TYPE for the parameter.
    )

vehicle.send_mavlink(mesg)

prx = vehicle.message_factory.param_set_encode(
    1,     # the MAVLink system id of the vehicle (normally 1)
    1,     # normally 1
    PRX_TYPE,    # the human readable 16 character parameter name
    2,   # the new value for the parameter expressed as a float
    1,     # the MAV_PARAM_TYPE for the parameter.
    )

rng = vehicle.message_factory.param_set_encode(
    1,     # the MAVLink system id of the vehicle (normally 1)
    1,     # normally 1
    RNGFND1_TYPE,    # the human readable 16 character parameter name
    10,   # the new value for the parameter expressed as a float
    1,     # the MAV_PARAM_TYPE for the parameter.
    )

#CRIA E ENVIA MENSAGENS PARA DESLIGAR PARAMETROS PROBLEMATICOS DE DISTANCIA

prxoff = vehicle.message_factory.param_set_encode(
    1,     # the MAVLink system id of the vehicle (normally 1)
    1,     # normally 1
    PRX_TYPE,    # the human readable 16 character parameter name
    0,   # the new value for the parameter expressed as a float
    1,     # the MAV_PARAM_TYPE for the parameter.
    )

vehicle.send_mavlink(prxoff)
```

```
rngoff = vehicle.message_factory.param_set_encode(
    1,     # the MAVLink system id of the vehicle (normally 1)
    1,     # normally 1
    RNGFND1_TYPE,    # the human readable 16 character parameter name
    0,   # the new value for the parameter expressed as a float
    1,     # the MAV_PARAM_TYPE for the parameter.
    )

vehicle.send_mavlink(rngoff)

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setwarnings(False)

#Inicia variavel global com valor maior que o limite para nao apitar no comeco

varglob = 300

TRIG = 23
ECHO = 24
BUZZER = 25
LED = 12
maxTime = 0.04

#Aciona LED

GPIO.setup(LED,GPIO.OUT)
GPIO.output(LED,GPIO.HIGH)

#Aciona Buzzer

GPIO.setup(BUZZER,GPIO.OUT)
GPIO.output(BUZZER,GPIO.HIGH)
time.sleep(0.2)
GPIO.output(BUZZER,GPIO.LOW)

flagmotor = 1

#Observador direto da distancia vindo do controlador

#@vehicle.on_message('DISTANCE_SENSOR')
#def listener(self, name, message):
#    global varglob
#    print '%s' % message.current_distance
#    #print(type(message.current_distance))
#    if message.current_distance < 500:
```

```
#       varglob = '%s' % message.current_distance

while True:

      while vehicle.channels['7']!=2000:

                                    if vehicle.armed == False and flagmotor == 1:

                                          vehicle.send_mavlink(prxoff)
                                          vehicle.send_mavlink(rngoff)
                                          flagmotor = 0
                                          print("Evasao de obstaculo desativada")
                                          #if GPIO.output(BUZZER,GPIO.HIGH):
                                                                #GPIO.output(BUZZER,GPIO.LOW)

                                    if vehicle.armed == True and flagmotor == 0:

                                          vehicle.send_mavlink(prx)
                                          vehicle.send_mavlink(rng)
                                          flagmotor = 1

                                    if flagmotor == 1:

                                          print("Evasao de obstaculo ativada")

                                    if flagmotor == 0:

                                          print("Evasao de obstaculo desativada")

                                    GPIO.setup(TRIG,GPIO.OUT)
                                    GPIO.setup(ECHO,GPIO.IN)

                                    GPIO.output(TRIG,False)
                                    #print("Waiting For Sensor To Settle")
                                    time.sleep(0.01)

                                    GPIO.output(TRIG,True)

                                    time.sleep(0.00001)

                                    GPIO.output(TRIG,False)

                                    pulse_start = time.time()
                                    timeout = pulse_start + maxTime
                                    while GPIO.input(ECHO) == 0 and pulse_start < timeout:
```

```
                pulse_start = time.time()

        pulse_end = time.time()
        timeout = pulse_end + maxTime
        while GPIO.input(ECHO) == 1 and pulse_end < timeout:
                pulse_end = time.time()

        pulse_duration = pulse_end - pulse_start
        distance = pulse_duration * 17000
        distance = round(distance, 2)

        if distance <0:

                distance = 0

        if distance >400:

                distance = 400

        #print("Distance:",distance,"cm")

#Msg mavlink para evasao distancia

        msg = vehicle.message_factory.distance_sensor_encode(
        0,      # time system boot, not used
        1,      # min distance cm
        500,    # max distance cm
        distance,   # current dist, int cm
        1,      # type sensor (ultrasound)
        1,      # on board id, not used
        0, # orientation: 0...7
        0,      # covariance, not used
        )

        #print("\nMessage Created")

        vehicle.send_mavlink(msg)

        #print("\nMessage sent")

        time.sleep(0.005)

        #vehicle.add_attribute_listener('distance_sensor', listener)

        distmav = int(varglob)
```

```
                    if distance < (dist*100):

                            GPIO.output(BUZZER,GPIO.HIGH)
                            #pass

                    if distance >= (dist*100):

                            GPIO.output(BUZZER,GPIO.LOW)

                    #print("Distance:",distance,"cm _ Pix Dist:",distmav,"cm")
                    print("Distance:",distance," cm")

# Sai do segundo While

GPIO.output(BUZZER,GPIO.LOW)
GPIO.output(BUZZER,GPIO.HIGH)
time.sleep(0.5)
GPIO.output(BUZZER,GPIO.LOW)

#DESLIGA RANGEFINDER PRA EVITAR ERRO BAD PROXIMITY

vehicle.send_mavlink(prxoff)

#DESLIGA RANGEFINDER PRA EVITAR ERRO PROBLEMA NO LIDAR

vehicle.send_mavlink(rngoff)

# Muda voo para GUIDED para alterar velocidade

print("Changing flight mode to Guided")
if vehicle.channels['7']==2000: vehicle.mode = VehicleMode("GUIDED")

# Seta velocidade para baixo de 0.1 m/sdurante 5 segundos

velocity_x = 0
velocity_y = 0
velocity_z = 0.3
duration = 2

print("Movimento para baixo iniciado")

if vehicle.channels['7']==2000: send_ned_velocity(velocity_x, velocity_y, velocity_z, duration)

if vehicle.channels['7']==2000: vehicle.mode = VehicleMode("LOITER")
```

```
if vehicle.channels['7']==2000: time.sleep(2)

if vehicle.channels['7']==2000: vehicle.mode = VehicleMode("GUIDED")

velocity_z = -0.4
duration = 2

# Seta velocidade para cima de 0.1 m/s durante 5 segundos

print("Movimento para cima iniciado")

if vehicle.channels['7']==2000: send_ned_velocity(velocity_x, velocity_y, velocity_z, duration)

if vehicle.channels['7']==2000: vehicle.mode = VehicleMode("LOITER")

if vehicle.channels['7']==2000: time.sleep(2)

cir = vehicle.message_factory.param_set_encode(
      1,     # the MAVLink system id of the vehicle (normally 1)
      1,     # normally 1
      CIRCLE_RATE,    # the human readable 16 character parameter name
      15,   # the new value for the parameter expressed as a float
      9,     # the MAV_PARAM_TYPE for the parameter.
      )

if vehicle.channels['7']==2000: vehicle.send_mavlink(cir)

# Muda voo para CIRCLE

print("Changing flight mode to Circle")
if vehicle.channels['7']==2000: vehicle.mode = VehicleMode("CIRCLE")
if vehicle.channels['7']==2000: time.sleep(4)

if vehicle.channels['7']==2000: vehicle.mode = VehicleMode("LOITER")

if vehicle.channels['7']==2000: time.sleep(2)

if vehicle.channels['7']==2000: vehicle.mode = VehicleMode("GUIDED")

velocity_z = 0.3
duration = 2

print("Movimento para baixo 2 iniciado")
```

```
if vehicle.channels['7']==2000: send_ned_velocity(velocity_x, velocity_y, velocity_z, duration)

if vehicle.channels['7']==2000: vehicle.mode = VehicleMode("LOITER")

if vehicle.channels['7']==2000: time.sleep(2)

if vehicle.channels['7']==2000: vehicle.mode = VehicleMode("GUIDED")

velocity_z = -0.4
duration = 2

# Seta velocidade para cima de 0.1 m/s durante 5 segundos

print("Movimento para cima 2 iniciado")

if vehicle.channels['7']==2000: send_ned_velocity(velocity_x, velocity_y, velocity_z, duration)

if vehicle.channels['7']==2000: vehicle.mode = VehicleMode("LOITER")

if vehicle.channels['7']==2000: time.sleep(2)

cir = vehicle.message_factory.param_set_encode(
      1,     # the MAVLink system id of the vehicle (normally 1)
      1,     # normally 1
      CIRCLE_RATE,    # the human readable 16 character parameter name
      -15,   # the new value for the parameter expressed as a float
      9,     # the MAV_PARAM_TYPE for the parameter.
      )

if vehicle.channels['7']==2000: vehicle.send_mavlink(cir)

# Muda voo para CIRCLE

print("Changing flight mode to Circle")
if vehicle.channels['7']==2000: vehicle.mode = VehicleMode("CIRCLE")
if vehicle.channels['7']==2000: time.sleep(8)

if vehicle.channels['7']==2000: vehicle.mode = VehicleMode("LOITER")

if vehicle.channels['7']==2000: time.sleep(2)

if vehicle.channels['7']==2000: vehicle.mode = VehicleMode("GUIDED")

velocity_z = 0.3
duration = 2
```

```
print("Movimento para baixo 3 iniciado")

if vehicle.channels['7']==2000: send_ned_velocity(velocity_x, velocity_y, velocity_z, duration)

if vehicle.channels['7']==2000: vehicle.mode = VehicleMode("LOITER")

if vehicle.channels['7']==2000: time.sleep(2)

if vehicle.channels['7']==2000: vehicle.mode = VehicleMode("GUIDED")

velocity_z = -0.4
duration = 2

# Seta velocidade para cima de 0.1 m/s durante 5 segundos

print("Movimento para cima 3 iniciado")

if vehicle.channels['7']==2000: send_ned_velocity(velocity_x, velocity_y, velocity_z, duration)

if vehicle.channels['7']==2000: vehicle.mode = VehicleMode("LOITER")

if vehicle.channels['7']==2000: time.sleep(2)

#Modo de pouso LAND

print("Changing flight mode to Land")
vehicle.mode = VehicleMode("LAND")

# Disarm the vehicle
vehicle.armed = False

time.sleep(1)

if vehicle.armed == False:

   print("Changing flight mode to Loiter")
   vehicle.mode = VehicleMode("LOITER")

# NAO DEVE FECHAR VEICULO
#vehicle.close()

# Apaga LED

#GPIO.output(LED,GPIO.LOW)
```

```
print("\nCompleted")

check = 0

while vehicle.channels['7']==2000:
    if check == 0:
        print("Desligar chave do radio")
        check = 1
    #print(vehicle.channels['7'])
    time.sleep(0.2)
```

D.1.5) PROGRAMA DO SISTEMA DE VISÃO ACOPLADO AO DRONE EFT E610

```
#********************IMPORTACAO BIBLIOTECAS**************************

#import serial
import os
import RPi.GPIO as GPIO
import cv2
import numpy as np
import time

#********************DEFINE PORTAS GPIOS**********************

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setwarnings(False)

BUZZER = 25
LED = 12
IMA = 17
FIM_CURSO = 27
POUSO = 23

BOLA = 5
XIS = 6
TRIANG = 13
QUAD = 19

ESQ = 12
DIR = 16
CIMA = 20
BAIXO = 21
```

```
#SETA IMA E FIM DE CURSO
GPIO.setup(IMA,GPIO.OUT)
GPIO.output(IMA,GPIO.HIGH)
GPIO.setup(FIM_CURSO,GPIO.IN,GPIO.PUD_DOWN)
#GPIO.setup(POUSO,GPIO.IN)

#ACIONA LED

GPIO.setup(LED,GPIO.OUT)
GPIO.output(LED,GPIO.HIGH)

#ACIONA BUZZER

#GPIO.setup(BUZZER,GPIO.OUT)
#GPIO.output(BUZZER,GPIO.HIGH)
#time.sleep(0.1)
#GPIO.output(BUZZER,GPIO.LOW)

#********************PARAMETROS PARA ESCRITA NA TELA********************

font = cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX
org = (25, 50)
org1 = (25, 50)
org2 = (25, 160)
org3 = (25, 270)
org4 = (25, 380)
org5 = (25, 440)
fontScale = 0.8
color = (0, 0, 255)
thickness = 2

#********************VARIAVEIS CAMERA RASP********************

x = 640
y = 480
#Limites de deteccao
xa = int(0.40*x)
xb = int(0.60*x)

x1 = 0
x2 = 0
y1 = 0
y2 = 0
```

```
xi1 = 0
xi2 = 0
yi1 = 0
yi2 = 0


x3 = 0
x4 = 0

m = 1
redun = 0
stop = 0
cont = 0
detect = 0
pouso = 0
corr = 0

lines = None

#********************INICIA CAPTURA VIDEO**********************

frameSize = (x, y)

#out = cv2.VideoWriter('/home/Jetson/Desktop/filme_pouso.mp4',cv2.VideoWriter_fourcc('m','p','4','v'),
30.0, frameSize)

#LE IMAGEM EXTERNA

#img = cv2.imread('/home/pi/Desktop/powerline1.jpg')

cap = cv2.VideoCapture(0)

cap.set(3, x)
cap.set(4, y)

if not cap.isOpened():
   print("Cannot open camera")
   exit()

#********************WHILE PRINCIPAL*************************

case = 0

while True:

   if cont == 6: cont = 0
```

```
# CAPTURA FRAME POR FRAME CAMERA
   ret, img = cap.read()
   # if frame is read correctly ret is True
   if not ret:
      print("Can't receive frame (stream end?). Exiting ...")
      break

   comp = img

#**********CASE = 2 - LIBERACAO MODULO**********************

   case = GPIO.input(FIM_CURSO)

   if case == 0:
      #print("Modo de liberacao")

#**********ALGORITMO RECONHECIMENTO LINHA*********************

      if cont == 5:
         gray = cv2.cvtColor(img,cv2.COLOR_BGR2GRAY)
         edges = cv2.Canny(gray,50,150,apertureSize = 3)
      #edges = cv2.Canny(gray,50,150)
      #minLineLength = 200
         maxLineGap = 20
         lines = cv2.HoughLinesP(edges,1,np.pi/180,100,200,maxLineGap)
      #lines = cv2.HoughLines(edges,1,np.pi/180,200)

      #print(lines)

         if lines is None: maxLineGap = 0
         #print("Gap maximo: ",maxLineGap)
         #maxLineGap = maxLineGap - 20
         #lines = cv2.HoughLinesP(edges,1,np.pi/180,100,minLineLength,maxLineGap)
         #if maxLineGap <= 0: break

      #q = 0
      #print(maxLineGap)

         if maxLineGap > 0:
            #for line in lines:
            #q = q + 1
            #for x1,y1,x2,y2 in line:
               for x1,y1,x2,y2 in lines[0]: pass
               #x1,y1,x2,y2 in lines[0]
```

```
            #cv2.line(img,(x1,y1),(x2,y2),(0,0,255),1)

            #print(q,' linhas detectadas')

#CALCULA PONTOS DAS EXTREMIDADES COM EQUACAO RETA
#CRITERIO SE XS E YS SAO DIFERENTES PARA CALCULAR EQ RETA

            if x1 != x2 and y1 != y2:

               xi1 = x1
               yi1 = y1
               xi2 = x2
               yi2 = y2

               x1 = 1.0*x1
               y1 = 1.0*y1
               x2 = 1.0*x2
               y2 = 1.0*y2

               m = 1.0*((y1-y2)/(x1-x2))

               x3 = (-y1/m)+x1
               x4 = (((y-1)-y1)/m)+x1

            else:

               x3 = x1
               x4 = x1
               m = 100

            x3 = int(x3)
            x4 = int(x4)

#COMPARACAO DENTRO DA TOLERANCIA DA INCLINACAO DE 3 GRAUS


            detect = -2
            if pouso == 1 and corr == 1:
               detect = -2
               redun = 0
               pouso = 0
               corr = 0

            if abs(m) >= 3 and (x3 >= xa) and (x3 <= xb) and (x4 >= xa) and (x4 <= xb):
               redun = redun + 1
```

```
                #print('redundancia numero ',redun)
                red = str(redun)
                #cv2.putText(temp, 'redundancia = ' + red, org, font, fontScale, color, thickness,
cv2.LINE_AA)
                detect = 1 #flag para dizer que imagem foi detectada
            else: detect = -1

            if (redun >= 4 and redun <=8):

                #print('linha detectada - pousando')
                detect = 3
                #flag para indicar que ja entrou em pouso uma vez
                pouso = 1

            if abs(m) < 3 and ((x3+x4)/2) >= xa and ((x3+x4)/2) <= xb:
                print('corrigir angulo ou posicao')
                corr = 1
                detect = 0
                #redun = 0

        else:
            detect = 2
            #redun = 0
        #print("linha nao detectada")
        #cv2.putText(img, 'Linha nao detectada', org, font, fontScale, color, thickness,
cv2.LINE_AA)


    #out.write(img)

    #VALOR DE Y CALCULADO NA PERPENDICULAR DA RETA
    xmed = (x3+x4)/2
    parc = (x-1)-xmed
    yp = ((y/2)-(1.0/m)*parc)
    yp = int(yp)

    #ORIENTACAO DA SETA

    if xmed >= (x/2):
        #xinic = x-1
        xinic = 0
        yp = (y-1)-yp

    else:
        xinic = x-1
        #yp = (y-1)-yp
```

```
        if detect == 2:
            cv2.putText(img, 'Linha nao detectada', org, font, fontScale, color, thickness, cv2.LINE_AA)
            redun = 0
        if detect == 1:
            cv2.putText(img, 'redundancia = ' + red, org, font, fontScale, color, thickness, cv2.LINE_AA)
            cv2.line(img,(x3,0),(x4,(y-1)),(0,0,255),5)
        if detect == 0:
            cv2.putText(img, 'Corrigir angulo', org, font, fontScale, color, thickness, cv2.LINE_AA)
            cv2.arrowedLine(img, (xinic,yp),(xmed,(y/2)), (0,0,255), 11)
            redun = 0
        if detect == -1:
            cv2.putText(img, 'Corrigir posicao', org, font, fontScale, color, thickness, cv2.LINE_AA)
            cv2.arrowedLine(img, (xinic,yp),(xmed,(y/2)), (0,0,255), 11)
            redun = 0

        if detect == 3:
            cv2.putText(img, 'POUSO' , (10,280), font, 6, color, 20, cv2.LINE_AA)

        cv2.line(img,(xa,0),(xa,y),(255,0,0),3)
        cv2.line(img,(xb,0),(xb,y),(255,0,0),3)
        cv2.line(img,(xa,0),(xb,0),(255,0,0),5)
        cv2.line(img,(xa,y),(xb,y),(255,0,0),5)


#**********CASE = 3 - BUSCA MODULO************

    elif case == 1:
        #print("Modo de busca")

        # Converts images from BGR to HSV
        hsv = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2HSV)

        lower_blue = np.array([0,50,20],np.uint8)
        upper_blue = np.array([180,150,255],np.uint8)
        # Here we are defining range of bluecolor in HSV
        # This creates a mask of blue coloured
        # objects found in the frame.
        mask = cv2.inRange(hsv, lower_blue, upper_blue)

        if mask[int(y*0.2)-1,int(0.4*x)-1] == 255 and mask[int(y*0.2)-1,int(0.6*x)-1] == 255:
            detect = 1 #flag para dizer que imagem foi detectada

            if redun <= 8:
                redun = redun + 1
```

```
            print('redundancia numero ',redun)
            red = str(redun)
            cv2.putText(img, 'redundancia = ' + red, org, font, fontScale, color, thickness,
cv2.LINE_AA)
            cv2.putText(mask, 'POUSO' , (10,280), font, 6, color, 20, cv2.LINE_AA)

         if redun > 8:
            print('modulo detectado - pousando')
            if cont != 0:
               cv2.putText(img, 'POUSO' , (10,280), font, 6, color, 20, cv2.LINE_AA)

      else: detect = -1

      if detect == -1:
         cv2.putText(img, 'Corrigir posicao', org, font, fontScale, color, thickness, cv2.LINE_AA)
         redun = 0

#**********EXIBICAO DA IMAGEM DA CAMERA EM TELA CHEIA***********

   cv2.namedWindow("Imagem", cv2.WND_PROP_FULLSCREEN)
   cv2.setWindowProperty("Imagem",cv2.WND_PROP_FULLSCREEN,cv2.WINDOW_FULLSCREEN)
   if case == 1: cv2.line(img,(int(0.4*x),int(y*0.2)),(int(0.6*x),int(y*0.2)),(255,0,0),3)
   if case == 1: cv2.circle(img,(int(0.4*x),int(y*0.2)),5,(0,0,255),3)
   if case == 1: cv2.circle(img,(int(0.6*x),int(y*0.2)),5,(0,0,255),3)

   if case == 1: cv2.putText(img, 'Modo recolhimento', org5, font, fontScale, color, thickness,
cv2.LINE_AA)
   if case == 0: cv2.putText(img, 'Modo despacho', org5, font, fontScale, color, thickness,
cv2.LINE_AA)

   cv2.imshow("Imagem", img)
   cv2.waitKey(10)
   if stop == 1: break

   cont = cont + 1
```

D.2 - PROGRAMAS DESENVOLVIDOS EM LINGUAGEM C PARA EXECUÇÃO NAS PLACAS LORA EMBARCARDA NO MÓDULO E AO NÍVEL DO SOLO

D.2.1) PROGRAMA DA LORA EMBARCARDA NO MÓDULO, UTILIZADO PARA COMANDO DE TODOS OS MÓDULOS DESENVOLVIDOS NESTA TESE

```
#include "heltec.h"
```

```
#include "images.h"


#define BAND 915E6 //you can set band here directly,e.g. 868E6,915E6

String rssi = "RSSI --";
String packSize = "--";
String packet;
String packet_old;
String pacote;

int pos; // Posição Servo
char num;
int flagsinal = 0; //avalia prioridade de recepcao do sinal da terra sobre a transmissao do sinal do sensor para a terra

void LoRaData()
{
  Heltec.display->clear();
  Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
  Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
  //Heltec.display->drawString(0 , 18 , "Pct="+ packSize + "b");
  //Heltec.display->drawStringMaxWidth(0, 32, 128, packet);
  Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
  Heltec.display->display();
}

void cbk(int packetSize)
{
  packet = "";
  packSize = String(packetSize, DEC);
  //for (int i = 0; i < packetSize; i++)
  //{
  //  packet += (char)LoRa.read();
  //}
  //packet = (char)LoRa.read();
  rssi = "RSSI " + String(LoRa.packetRssi(), DEC);
  LoRaData();
}

void setup()
{

  Serial.begin(115200);
```

```
  Heltec.begin(true /*DisplayEnable Enable*/, true /*Heltec.Heltec.Heltec.LoRa Disable*/,
true /*Serial Enable*/, true /*PABOOST Enable*/, BAND /*long BAND*/);

  Heltec.display->init();
  Heltec.display->flipScreenVertically();
  Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_16);
  //logo();
  //delay(1500);
  // Heltec.display->clear();

  Heltec.display->drawString(0, 0, "Tudo OK!");
  Heltec.display->drawString(0, 18, "Esperando Dados");
  Heltec.display->display();
  delay(5);
  LoRa.receive();
}

void loop()
{
  //*****************************************
  //*****************************************
  //ROTINA DE RECEPCAO DO SINAL DA LORA DA TERRA
  //*****************************************
  //*****************************************

  int packetSize = LoRa.parsePacket();
  if (packetSize){cbk(packetSize);}

  packet = (char)LoRa.read();//LE MENSAGEM VINDA DA LORA DA TERRA

  //Serial.print(packet);
  //Serial.println(" "); // em s

     //Heltec.display->clear();
 // Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
  //Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
  //Heltec.display->drawStringMaxWidth(0, 32, 128, packet);
 // Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
 // Heltec.display->display();
  //    delay (10);

  if (packet == "1")
  {
     Serial.println("1");
     //delay(50);
```

```
   //delay(5);

   Heltec.display->clear();
Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
Heltec.display->drawStringMaxWidth(0, 32, 128, "V1");
Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
Heltec.display->display();
   delay (10);
  }

if (packet == "2")
{
   Serial.println("2");
   //delay(50);
   //delay(5);

   Heltec.display->clear();
Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
Heltec.display->drawStringMaxWidth(0, 32, 128, "V2");
Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
Heltec.display->display();
   delay (10);
  }

if (packet == "3")
{
   Serial.println("3");
   //Serial.println(" "); // em s
   //delay(5);

   Heltec.display->clear();
Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
Heltec.display->drawStringMaxWidth(0, 32, 128, "V3");
Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
Heltec.display->display();
   delay (10);

  }

if (packet == "4")
{
   Serial.println("4");
```

```
   //Serial.println(" "); // em s
   //delay(5);

   Heltec.display->clear();
Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
Heltec.display->drawStringMaxWidth(0, 32, 128, "V4");
Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
Heltec.display->display();
   delay (10);
  }

if (packet == "5")
{
   Serial.println("5");
   //Serial.println(" "); // em s
   //delay(5);

   Heltec.display->clear();
Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
Heltec.display->drawStringMaxWidth(0, 32, 128, "V5");
Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
Heltec.display->display();
   delay (10);
  }

if (packet == "6")
{
   Serial.println("6");
   //Serial.println(" "); // em s
   //delay(5);

   Heltec.display->clear();
Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
Heltec.display->drawStringMaxWidth(0, 32, 128, "V6");
Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
Heltec.display->display();
   delay (10);
  }

if (packet == "7")
{
   Serial.println("7");
```

```
   //Serial.println(" "); // em s
   //delay(5);

   Heltec.display->clear();
Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
Heltec.display->drawStringMaxWidth(0, 32, 128, "V7");
Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
Heltec.display->display();
   delay (10);
  }

if (packet == "8")
{
   Serial.println("8");
   //Serial.println(" "); // em s
   //delay(5);

   Heltec.display->clear();
Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
Heltec.display->drawStringMaxWidth(0, 32, 128, "V8");
Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
Heltec.display->display();
   delay (10);
  }

if (packet == "9")
{
   Serial.println("9");
   //Serial.println(" "); // em s
   //delay(5);

   Heltec.display->clear();
Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
Heltec.display->drawStringMaxWidth(0, 32, 128, "V9");
Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
Heltec.display->display();
   delay (10);
  }

if (packet == "0")
{
   Serial.println("0");
```

```
    //Serial.println(" "); // em s
    //delay(5);

    Heltec.display->clear();
 Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
 Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
 Heltec.display->drawStringMaxWidth(0, 32, 128, "V10");
 Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
 Heltec.display->display();
    delay (10);
  }

 //Heltec.display->clear();
 //Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
 //Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
 //Heltec.display->drawStringMaxWidth(0, 32, 128, "RECEBIDO");
 //Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
 //Heltec.display->display();
/*
 Heltec.display->clear();
 Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
 Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
 //Heltec.display->drawStringMaxWidth(0, 32, 128, "RETORNO");
 Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
 Heltec.display->display();
*/
//  delay(500);


 //****************************************
 //****************************************
 //ROTINA DE ENVIO DO SINAL PARA LORA DA TERRA
 //****************************************
 //****************************************

 packet = (char)Serial.read(); //LE MENSAGEM VINDA DO RASPBERRY

 //Serial.print(packet);
 //Serial.println(" "); // em s

    //Heltec.display->clear();
// Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
 //Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
 //Heltec.display->drawStringMaxWidth(0, 32, 128, packet);
// Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
```

```
 // Heltec.display->display();
  //    delay (10);

  if (packet == "a" and packet != packet_old)
  {

//ENVIO DO PACOTE PRA OUTRA LORA
    LoRa.beginPacket();
    LoRa.setTxPower(14, RF_PACONFIG_PASELECT_PABOOST);
    //LoRa.print("Pacote: ");
    num = 'a';
    LoRa.print(num);
    LoRa.endPacket();

    Heltec.display->clear();
    Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
    Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);

    Heltec.display->drawString(20, 0, "DIST");
    Heltec.display->drawString(40, 26, "RUIM");
    Heltec.display->display();

    packet_old = packet;
    }

  if (packet == "b" and packet != packet_old)
  {
//ENVIO DO PACOTE PRA OUTRA LORA
    LoRa.beginPacket();
    LoRa.setTxPower(14, RF_PACONFIG_PASELECT_PABOOST);
    //LoRa.print("Pacote: ");
    num = 'b';
    LoRa.print(num);
    LoRa.endPacket();

    Heltec.display->clear();
    Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
    Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);

    Heltec.display->drawString(20, 0, "DIST");
    Heltec.display->drawString(40, 26, "MEDIA");
    Heltec.display->display();

    packet_old = packet;
```

```
   }

 if (packet == "c" and packet != packet_old)
 {
//ENVIO DO PACOTE PRA OUTRA LORA

   LoRa.beginPacket();
   LoRa.setTxPower(14, RF_PACONFIG_PASELECT_PABOOST);
   //LoRa.print("Pacote: ");
   num = 'c';
   LoRa.print(num);
   LoRa.endPacket();

   Heltec.display->clear();
   Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
   Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);

   Heltec.display->drawString(20, 0, "DIST");
   Heltec.display->drawString(40, 26, "BOA");
   Heltec.display->display();

   packet_old = packet;

   }


 // flagsinal = 0;
}
```

D.2.2) PROGRAMA DA LORA OPERADA EM SOLO, UTILIZADO PARA COMANDO DE TODOS OS MÓDULOS DESENVOLVIDOS NESTA TESE

```
#include "heltec.h"
#include "images.h"
#include "BluetoothSerial.h"

char buf;
int a;

BluetoothSerial SerialBT;

#define BAND 915E6 //you can set band here directly,e.g. 868E6,915E6
```

```
unsigned int num = 0;
String rssi = "RSSI --";
String packSize = "--";
String packet;

int pos; // Posição Servo
int i=0;
int flag=0;

void LoRaData()
{
  Heltec.display->clear();
  Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
  Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
  //Heltec.display->drawString(0 , 18 , "Pct="+ packSize + "b");
  //Heltec.display->drawStringMaxWidth(0, 32, 128, packet);
  Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
  Heltec.display->display();
}

void cbk(int packetSize)
{
  packet = "";
  packSize = String(packetSize, DEC);
  //for (int i = 0; i < packetSize; i++)
  //{
  //  packet += (char)LoRa.read();
  //}
  //packet = (char)LoRa.read();
  rssi = "RSSI " + String(LoRa.packetRssi(), DEC);
  LoRaData();
}

void setup()
{

  pinMode(25, OUTPUT);
  digitalWrite(25, LOW);
  //pinMode(LED, OUTPUT);

  Serial.begin(115200);
  SerialBT.begin("LoRa_BT");

  Heltec.begin(true /*DisplayEnable Enable*/, true /*Heltec.Heltec.Heltec.LoRa Disable*/,
true /*Serial Enable*/, true /*PABOOST Enable*/, BAND /*long BAND*/);
```

```
 Heltec.display->init();
 Heltec.display->flipScreenVertically();
 Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_16);
 //logo();
 //delay(1500);
 // Heltec.display->clear();

 Heltec.display->drawString(0, 0, "Tudo OK!");
 Heltec.display->drawString(0, 18, "Esperando Dados");
 Heltec.display->display();
 delay(5);
 LoRa.receive();
}

void loop()
{

 //ROTINA DE RECEPCAO DO SINAL BLUETOOTH DO CELULAR

 a = SerialBT.read();

 if (a == '1')
 {
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.setTxPower(14, RF_PACONFIG_PASELECT_PABOOST);
  //LoRa.print("Pacote: ");
  num = 1;
  LoRa.print(num);
  LoRa.endPacket();

  Heltec.display->clear();
  Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
  Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);

  Heltec.display->drawString(20, 0, "SERVO");
  Heltec.display->drawString(40, 26, "HIGH");
  Heltec.display->display();
 }

 if (a == '2')
 {
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.setTxPower(14, RF_PACONFIG_PASELECT_PABOOST);
  //LoRa.print("Pacote: ");
```

```
  num = 2;
  LoRa.print(num);
  LoRa.endPacket();

  Heltec.display->clear();
  Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
  Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);

  Heltec.display->drawString(20, 0, "SERVO");
  Heltec.display->drawString(40, 26, "LOW");
  Heltec.display->display();
}

if (a == '3')
{
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.setTxPower(14, RF_PACONFIG_PASELECT_PABOOST);
  //LoRa.print("Pacote: ");
  num = 3;
  LoRa.print(num);
  LoRa.endPacket();

  Heltec.display->clear();
  Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
  Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);

  Heltec.display->drawString(13, 0, "ATUADOR");
  Heltec.display->drawString(29, 26, "LIGADO");
  Heltec.display->display();

}

if (a == '4')
{
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.setTxPower(14, RF_PACONFIG_PASELECT_PABOOST);
  //LoRa.print("Pacote: ");
  num = 4;
  LoRa.print(num);
  LoRa.endPacket();

  Heltec.display->clear();
  Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
  Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
```

```
  Heltec.display->drawString(20, 0, "AVANCO");
  Heltec.display->drawString(40, 26, "RAPIDO");
  Heltec.display->display();
}

if (a == '5')
{
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.setTxPower(14, RF_PACONFIG_PASELECT_PABOOST);
  //LoRa.print("Pacote: ");
  num = 5;
  LoRa.print(num);
  LoRa.endPacket();

  Heltec.display->clear();
  Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
  Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);

  Heltec.display->drawString(20, 0, "RECUO");
  Heltec.display->drawString(40, 26, "RAPIDO");
  Heltec.display->display();
}

  if (a == '6')
{
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.setTxPower(14, RF_PACONFIG_PASELECT_PABOOST);
  //LoRa.print("Pacote: ");
  num = 6;
  LoRa.print(num);
  LoRa.endPacket();

  Heltec.display->clear();
  Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
  Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);

  Heltec.display->drawString(20, 0, "RECUO");
  Heltec.display->drawString(40, 26, "RAPIDO");
  Heltec.display->display();
}

  if (a == '7')
{
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.setTxPower(14, RF_PACONFIG_PASELECT_PABOOST);
```

```
  //LoRa.print("Pacote: ");
  num = 7;
  LoRa.print(num);
  LoRa.endPacket();

  Heltec.display->clear();
  Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
  Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);

  Heltec.display->drawString(20, 0, "RECUO");
  Heltec.display->drawString(40, 26, "RAPIDO");
  Heltec.display->display();
}

  if (a == '8')
{
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.setTxPower(14, RF_PACONFIG_PASELECT_PABOOST);
  //LoRa.print("Pacote: ");
  num = 8;
  LoRa.print(num);
  LoRa.endPacket();

  Heltec.display->clear();
  Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
  Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);

  Heltec.display->drawString(20, 0, "RECUO");
  Heltec.display->drawString(40, 26, "RAPIDO");
  Heltec.display->display();
}

  if (a == '9')
{
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.setTxPower(14, RF_PACONFIG_PASELECT_PABOOST);
  //LoRa.print("Pacote: ");
  num = 9;
  LoRa.print(num);
  LoRa.endPacket();

  Heltec.display->clear();
  Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
  Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
```

```
  Heltec.display->drawString(20, 0, "RECUO");
  Heltec.display->drawString(40, 26, "RAPIDO");
  Heltec.display->display();
}

  if (a == '0')
{
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.setTxPower(14, RF_PACONFIG_PASELECT_PABOOST);
  //LoRa.print("Pacote: ");
  num = 0;
  LoRa.print(num);
  LoRa.endPacket();

  Heltec.display->clear();
  Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
  Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);

  Heltec.display->drawString(20, 0, "RECUO");
  Heltec.display->drawString(40, 26, "RAPIDO");
  Heltec.display->display();
}

//ROTINA DE RECEPCAO DO SINAL VINDO DO DRONE

i=i+1;
delay(5);
if (i>10){
  i = 0;
}

int packetSize = LoRa.parsePacket();
if (packetSize){cbk(packetSize);}
//delay(20);

packet = (char)LoRa.read();

if (packet == "c") //BIPE CONTINUO
{
   flag = 0;
   //Serial.println("1");
   //Serial.println(" "); // em s
   //delay(5);

   digitalWrite(25, HIGH);
```

```
   Heltec.display->clear();
Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
Heltec.display->drawStringMaxWidth(0, 32, 128, "AVANÇO");
Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
Heltec.display->display();
   delay (10);
  }

if (packet == "b") //DISTANCIA OTIMA
{
   flag = 0;
   //Serial.println("3");
   //Serial.println(" "); // em s
   //delay(5);

   digitalWrite(25, LOW);

   Heltec.display->clear();
Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
Heltec.display->drawStringMaxWidth(0, 32, 128, "ATUADOR");
Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
Heltec.display->display();
   //delay (10);
  }

if (packet == "a" or flag == 1) //BIPE INTERMITENTE
{
   flag = 1;
   //Serial.println("2");
   //Serial.println(" "); // em s
   //delay(5);

   if (i<5) {
     digitalWrite(25, HIGH);
   }

   if (i>=5) {
     digitalWrite(25, LOW);
   }

   Heltec.display->clear();
Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
```

```
  Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
  Heltec.display->drawStringMaxWidth(0, 32, 128, "RECUO");
  Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
  Heltec.display->display();
     //delay (10);
   }

  //if (packet != "1" and packet != "2" and packet != "3") //VAZIO
  //{
  //    flag = 0;
  //    //Serial.println("3");
  //   //Serial.println(" "); // em s
  //    //delay(5);

  //    Heltec.display->clear();
  //Heltec.display->setTextAlignment(TEXT_ALIGN_LEFT);
  //Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_24);
  //Heltec.display->drawStringMaxWidth(0, 32, 128, "RECEBE VAZIO");
  //Heltec.display->drawString(0, 0, rssi);
  //Heltec.display->display();
     //delay (10);
  //  }

  //flagsinal = 0;

}
```