

BRAÇO ROBÓTICO PARA REMOÇÃO DE OBJETOS ESTRANHOS EM CABOS DE ALTA TENSÃO

Túlio Castro de Souza, tulio.castro@ufu.br
Rogério Sales Gonçalves, rsgoncalves@ufu.br
Rafael Zimmermann Homma, rafaelzh@celesc.com.br
Daniel Edgardo Tio Sudbrack, danielets@celesc.com.br
Paulo Victor Trautmann, paulovt@celesc.com.br
Bruno Cordeiro Clasen, brunoce@celesc.com.br

¹School of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil

²School of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil

³CELESC, Jaraguá do Sul, Brazil

⁴CELESC, Jaraguá do Sul, Brazil

⁵CELESC, São Bento do Sul, Brazil

⁶CELESC, Florianópolis, Brazil

Resumo. O presente projeto refere-se ao desenvolvimento de um braço robótico acoplado a um drone, denominado drone-robô, para ser utilizado na remoção de objetos estranhos aos cabos de alta tensão ou cabo para-raios (não energizado). Os detritos presentes nos cabos de alta tensão ou cabo para-raios são oriundos de restos de pipas, tênis, plásticos diversos, balões e detritos diversos em casos de vendavais. Estes colocam em risco a integridade do sistema de distribuição podendo ocasionar interrupções de energia. Dessa forma, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um braço robótico com elemento terminal variável, que será acoplado a um drone e permitirá a remoção dos objetos estranhos. O drone será utilizado para posicionar o módulo robótico a partir da utilização de um rádio controle. Após, será realizada a remoção em função do tipo de detrito. Dois elementos terminais foram construídos: um para queima e outro para captura magnética, mas apenas o para queima performou bem nos experimentos. Este drone-robô visa a diminuição de riscos para os técnicos que realizam estas operações escalando as torres e locomovendo-se nos cabos ou mesmos suspensos em uma plataforma fixa a um helicóptero.

Palavras chave: Drone-robô. Braço robótico. Elemento terminal.

Abstract. This project refers to the development of a robotic arm coupled to a drone, called robot-drone, to be used in the removal of foreign objects from high voltage cables or ground cables (not energized). The debris present in high voltage cables or ground cables comes from the remains of kites, sneakers, different types of plastic, balloons, and various debris in cases of windstorms. These put the integrity of the distribution system at risk and may cause power outages. Thus, this project presents the development of a robotic arm with a variable end-effector, that will be coupled to a drone and will allow the removal of foreign objects. The drone will be used to position the robotic module using a radio control. Afterward, removal will be carried out depending on the type of debris. Two end-effectors were built: one for burning and the other for magnetic capture, but only the one for burning performed well in the experiments. This drone-robot aims to reduce risks for technicians who carry out these operations by climbing the towers and moving around on cables or even suspended from a platform fixed to a helicopter.

Keywords: Robot drone. Robotic arm. End-effector.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade da energia elétrica tem se tornado cada dia mais importante e presente na vida das pessoas, o que faz com que a demanda por esta cresça a todo momento. Devido a isso, são milhares de linhas de transmissão de energia elétrica existentes, que estão sendo, e que serão construídas para conseguir responder a essa demanda cada vez mais

crescente. Com tantos milhares de quilômetros de linhas de transmissão e com o passar dos anos, surge a necessidade de inspeção e manutenção de tais linhas e dos seus respectivos acessórios, necessários para o seu bom funcionamento.

O monitoramento e manutenção dos sistemas de distribuição de energia elétrica é uma das tarefas mais significativas das concessionárias de energia do país, visto que o conhecimento da estimativa do tempo de vida útil dos cabos e componentes pode prevenir o comprometimento da receita das concessionárias na ordem de milhões de reais. Os esforços gastos no monitoramento do status do sistema de distribuição são justificados pela redução da ocorrência de falhas devido à interrupção do fornecimento de energia elétrica, danos a equipamentos e custos de reparação (Henrique et al., 2005; Pinheiro, 2007).

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 imagens, 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) e a aplicação de robôs (Rubin, 2000; Gonçalves e Carvalho, 2013).

Atualmente, a resolução do problema da inspeção dos cabos de alta tensão está praticamente resolvido com a utilização de drones que portam câmeras de alta resolução e com grande capacidade de ampliação e, também, câmera de infravermelho. As pesquisas têm se concentrado no desenvolvimento de softwares para otimizar a análise dos dados adquiridos com o objetivo de realizar as manutenções necessárias (Bhola et al., 2018).

O problema da manutenção das linhas de alta tensão ainda é complexo. Dessa forma, este projeto apresenta uma nova arquitetura de drone-robô para ser aplicado na manutenção de elementos presentes no sistema de transmissão de energia elétrica.

A Fig. 1 mostra alguns objetos estranhos que são encontrados nas linhas de transmissão.

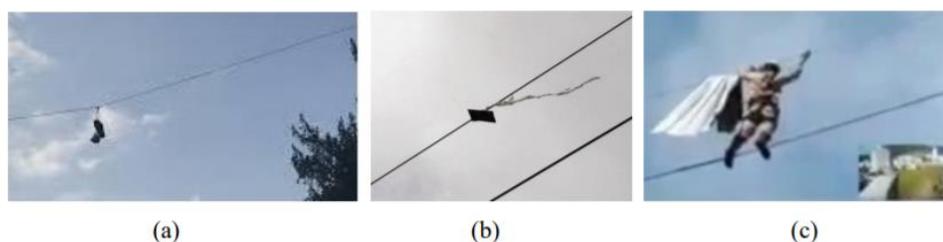


Figura 1. Objetos estranhos encontrados no sistema de transmissão. (a) Tênis; (b) pipa; (c) resto de telha metálica devido a vendavais.

Geralmente os métodos de manutenção utilizados para remoção de objetos estranhos das linhas de transmissão podem ser agrupados em quatro tipos:

a) Técnicos escalam a torre, com todos os materiais requisitados em norma e procedimentos internos, e após atingirem a região do cabo se locomovem ao longo deste para remoção do objeto. Este é o procedimento usual, Fig. 1(c);

b) Em um helicóptero, um operador, vestido com uma roupa isolante, fica suspenso em uma plataforma. Na medida em que o helicóptero se aproxima do condutor, o operador utiliza um bastão para equalizar o potencial da plataforma com o potencial da linha. O potencial estando equalizado, o operador coloca os equipamentos de segurança e os dispositivos necessários à manutenção/remoção pendurados no condutor. Em seguida, ele passa para o condutor, ficando sentado ou agachado sobre o condutor. O helicóptero se afasta e o operador realiza a manutenção se arrastando sobre o condutor e recolhendo ou derrubando os objetos estranhos. Dependendo-se do tipo de material e localização no cabo a remoção pode ser realizada diretamente na plataforma sem necessidade de locomover-se no cabo, Fig. 2(a);

c) Outra forma consiste em suspender o operador em uma plataforma com auxílio de um caminhão com plataforma elevatória articulada. A plataforma é eletricamente isolada do veículo para que não ocorra risco de curto-circuito. Para executar qualquer atividade no condutor, o operador equaliza o potencial da plataforma com o potencial da linha. Neste caso, o operador permanece sobre a plataforma enquanto realiza a manutenção/remoção e o veículo se movimenta na direção do condutor;

d) A remoção de objetos estranhos pode ser realizada também com o uso de robôs móveis que se movimentam ao longo dos cabos de alta tensão ou cabo-terra, Fig. 2(b).

e) Recentemente a manutenção/remoção dos objetos estranhos nos cabos de alta tensão também é realizada por drones/VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados). Estes possuem lança chamas para incinerar estes objetos estranhos presentes nas linhas de alta tensão, Fig. 2(c).

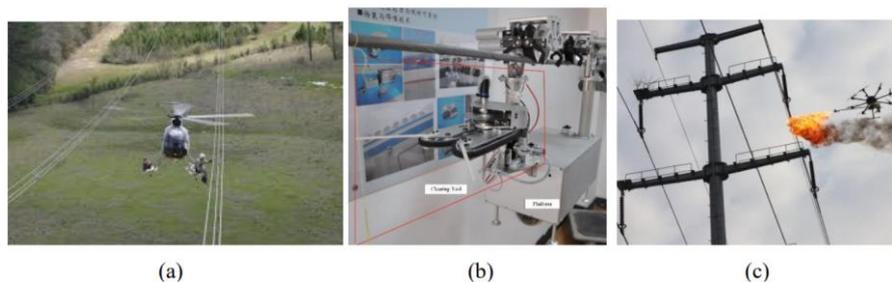


Figura 2. (a) Inspeção/Manutenção por helicóptero; (b) Robô para remoção de objetos estranhos; (c) Drone com lança-chamas (Cao et al., 2015)

Apesar dos equipamentos desenvolvidos para remoção de objetos estranhos nos cabos de alta tensão, ainda existem dificuldades para realizar estas tarefas independentemente de qual método seja utilizado. A utilização de técnicos de linha viva sempre envolve o risco de quedas e de choques elétricos.

A forma mais simples de executar estas operações de remoção de objetos estranhos é a partir da utilização de um drone com a adaptação de um lança-chamas. Já existem, no mercado, soluções prontas. O uso de drones com lança-chamas adaptados tem levado a discussões se esta seria a forma mais eficiente e correta de realizar as limpezas dos cabos de alta tensão. O uso destes levantam questões ambientais sobre a incineração do material que provoca fumaças que contaminam o ambiente e não permitem a reciclagem destes materiais, além da remoção em muitos casos não ser completa remanescendo detritos no cabo e a possibilidade de incêndios nas redondezas devido à grande quantidade de combustível utilizado no lança-chamas.

Os robôs para remoção de objetos estranhos, 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. Os principais problemas no desenvolvimento destes robôs envolvem a necessidade de colocá-lo no cabo e a dificuldade na transposição dos diferentes obstáculos existentes incluindo os diferentes tipos de torres (Gonçalves e Carvalho, 2015).

O uso de helicópteros possui os inconvenientes dos altos custos e riscos de acidentes diversos. O uso de plataformas acopladas em caminhões limita a altura de utilização.

Dessa forma, este projeto de pesquisa apresenta uma nova ideia de arquitetura de um braço robótico, acoplado a um drone, para ser aplicado na remoção de objetos estranhos nos cabos de alta tensão. Nas próximas seções, serão detalhados o modelo matemático e os resultados obtidos a partir desse modelo. Então, o projeto do módulo robótico será definido, seguindo-se do seu sistema de controle. Por fim, o protótipo construído será mostrado com a apresentação das devidas conclusões.

2. MODELO MATEMÁTICO

Os tubos acoplados ao drone devem ser capazes de rotacionar para alternarem de uma posição entre o trem de pouso, durante a decolagem, para uma posição que permita capturar o objeto, em voo. Nesse contexto, os motores utilizados devem possuir um torque suficiente para concluir essa tarefa. A Fig. 3 mostra as duas posições principais do módulo robótico.

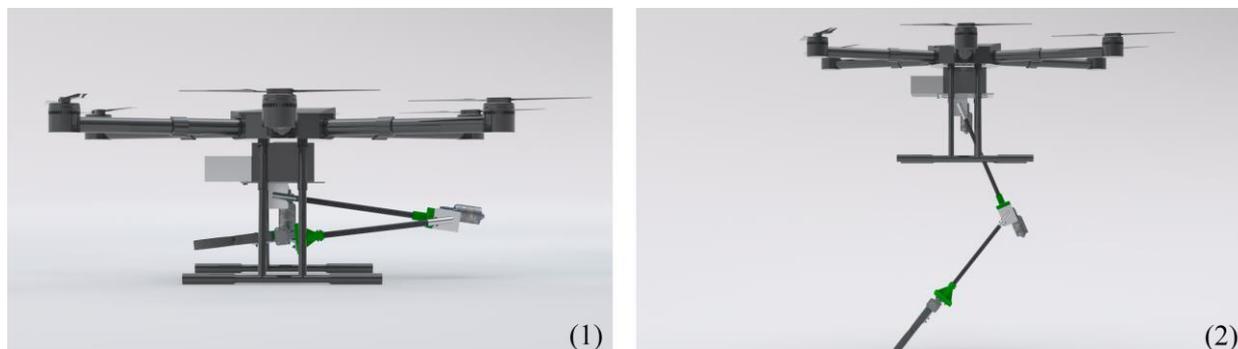


Figura 3. Posições principais do módulo robótico.

Nesse contexto, a realização da modelagem matemática do braço robótico teve como base o esquema da Fig. 4.

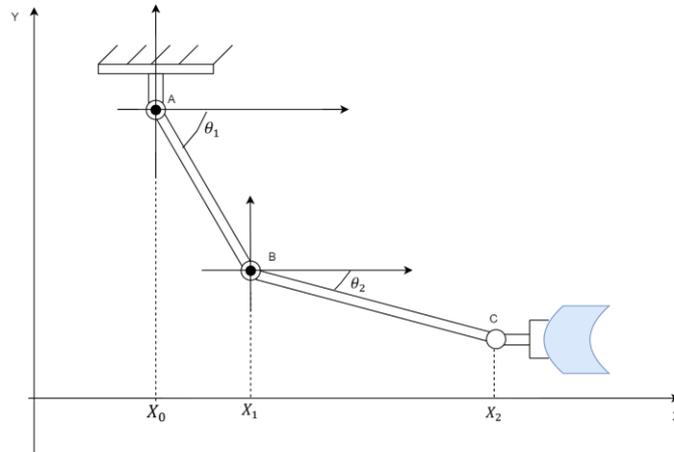


Figura 4. Esquema do braço robótico.

Fazendo o somatório dos momentos, definiu-se as expressões matemáticas que calculam o torque que os motores necessitam ter em cada uma das possíveis posições.
Somatório dos momentos em torno do ponto A (M_a):

$$\sum M_a = 0 \quad (1)$$

$$M_1 = W_{\text{Barra 1}} \cdot \frac{(X_0 + X_1)}{2} + (W_{\text{motor 2}} + W_{\text{conexão}}) \cdot (X_2 - X_0) + W_{\text{barra 2}} \cdot \left(\frac{X_1 + X_2}{2} - X_0 \right) + W_{\text{Garra}} \cdot (X_2 + L_3 - X_0) + W_{\text{objeto}} \cdot (X_2 + L_3 + L_4 - X_0) \quad (2)$$

onde, M_1 - Torque necessário para o motor 1; $W_{\text{Barra 1}}$ - Peso da barra 1; $W_{\text{motor 2}}$ - Peso do motor 2; $W_{\text{conexão}}$ - Peso da peça de conexão entre os tubos; $W_{\text{Barra 2}}$ - Peso da barra 2; W_{Garra} - Peso do elemento terminal; L_3 - Distância entre o centro de massa da garra e sua conexão com o tubo; W_{objeto} - Peso do objeto capturado; L_4 - Distância entre os centros de massa do objeto capturado e da garra.

Somatório dos momentos em torno do ponto B (M_b):

$$\sum M_b = 0 \quad (3)$$

$$M_2 = W_{\text{barra 2}} \cdot \left(\frac{X_1 + X_2}{2} - X_0 \right) + W_{\text{Garra}} \cdot (X_2 + L_3 - X_0) + W_{\text{objeto}} \cdot (X_2 + L_3 + L_4 - X_0) \quad (4)$$

onde, M_2 é o torque necessário para o motor 2.

Relacionando a Eq. (2) com a Eq. (4), encontra-se a Equação 5.

$$M_1 = M_2 + W_{\text{Barra 1}} \cdot \frac{(X_0 + X_1)}{2} + W_{\text{motor 1}} \cdot X_1 \quad (5)$$

Além disso, sabendo o comprimento L dos tubos, é possível definir as seguintes relações:

$$X_1 = X_0 + L \cdot \cos(\theta_1) \quad (6)$$

$$X_2 = X_1 + L \cdot \cos(\theta_2) \quad (7)$$

Com essas equações, conhecendo os ângulos θ_1 e θ_2 , é possível determinar qual o torque necessário que os motores exerçam para que o sistema fique em equilíbrio estático.

Por meio do modelo matemático, um algoritmo foi implementado para calcular o torque necessário em cada motor (que mantenha o braço robótico em equilíbrio estático), em função dos ângulos θ_1 e θ_2 .

Na situação mais crítica, mostrada na Fig. 5, ambos ângulos valem 0° .

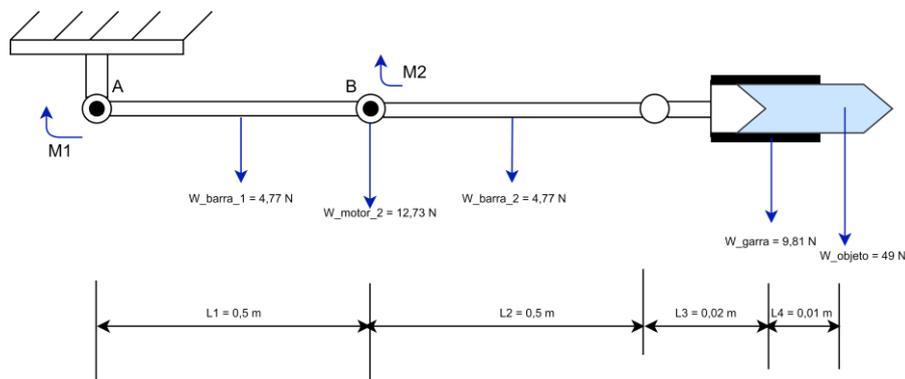


Figura 5. Diagrama de corpo livre do braço robótico na situação crítica.

Foi encontrado um torque necessário para o motor 1 de 71,66 Nm e um torque de 32,29 Nm para o motor 2. Esses valores são relativamente altos para as dimensões dos motores do projeto. No entanto, trata-se de uma situação crítica e que não possui nenhuma finalidade prática para o funcionamento da garra, tendo em vista o objetivo em que ela está sendo desenvolvida. A partir dos valores de torque encontrados, os motores foram selecionados.

Os motores escolhidos foram motores Bosch Cep F006wmo310. Além de serem motores relativamente baratos e de fácil acesso, possuem o torque necessário para a realização das tarefas. Cada um deles possui massa de 1298 g e foram utilizados dois para movimentação dos tubos.

3. PROJETO DO MÓDULO ROBÓTICO

Nesta seção, o projeto do módulo robótico desenvolvido para a remoção de objetos estranhos em cabos de alta tensão será detalhado. Basicamente, o braço robótico é composto por: base metálica de acoplamento ao drone, tubos (podem ser de fibra de carbono ou de alumínio), motores elétricos, uma peça de conexão entre os tubos e um elemento terminal intercambiável. A Fig. 6 mostra uma vista lateral do conjunto montado, com um dos elementos terminais desenvolvidos.

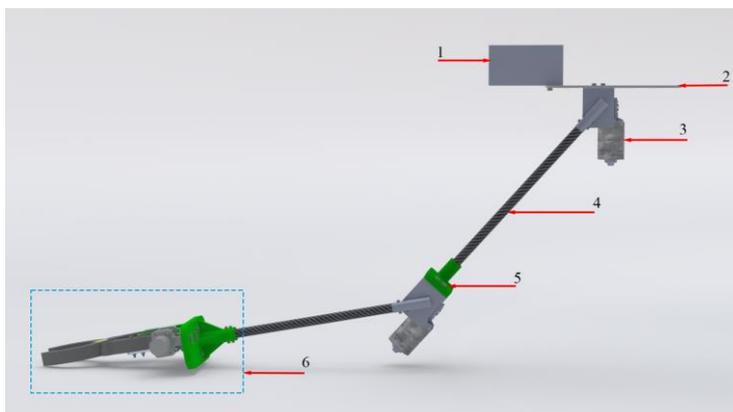


Figura 6. Vista lateral da montagem do módulo robótico; várias partes foram indicadas numericamente. (1) caixa metálica, (2) placa de fixação, (3) motor, (4) tubo, (5) peça de conexão entre os tubos, (6) elemento terminal.

Os motores são responsáveis por movimentarem os tubos apenas no plano da Fig. 6. No entanto, como todo o conjunto ficará acoplado ao drone, o conjunto é capaz de se movimentar no espaço tridimensional.

3.1 Elementos terminais

Foram construídos dois elementos terminais durante o projeto de pesquisa: um para a remoção de telhas e outro para a queima de objetos como pipas, balões e tênis.

3.1.1 Elemento terminal magnético

Um elemento terminal magnético foi desenvolvido em busca de capturar objetos ferromagnéticos, como as telhas trapezoidais de aço galvanizado. A sua geometria foi desenvolvida de uma maneira que garante que a garra se adapte ao formato do objeto que se deseja capturar. A Fig. 7 mostra uma modelo da garra.

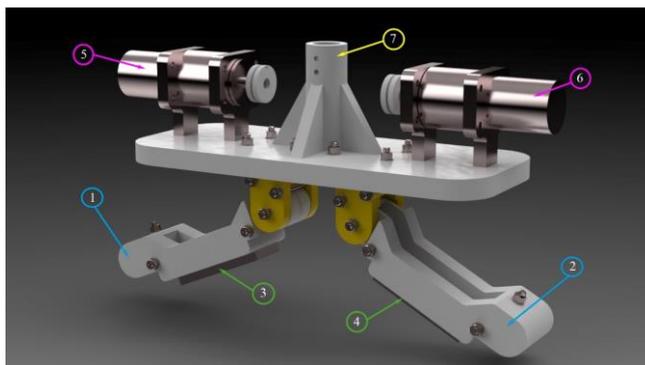


Figura 7. Modelo do elemento terminal magnético.

A garra é composta por dois dedos (1 e 2), cada um com um eletroímã (3 e 4). Além disso, existem dois motores (5 e 6), que garantem o funcionamento independente de cada um dos dedos. Tudo isso é acoplado em uma base impressa em PLA (7), que garante o acoplamento do elemento terminal com o tubo de fibra de carbono ou alumínio. Todo o conjunto da Fig. 7 tem massa de aproximadamente 1 kg.

Após construção, verificou-se que a garra apresentava o comportamento desejado, de se adaptar ao objeto capturado, sem a necessidade dos motores. Dessa forma, eles foram removidos na versão final, reduzindo a massa do conjunto.

3.1.2 Elemento terminal para queima

Outro elemento terminal foi desenvolvido com o objetivo de realizar a queima localizada/concentrada de objetos na rede elétrica, como pipas, balões e tênis. A Fig. 8 mostra uma modelo desse elemento terminal.

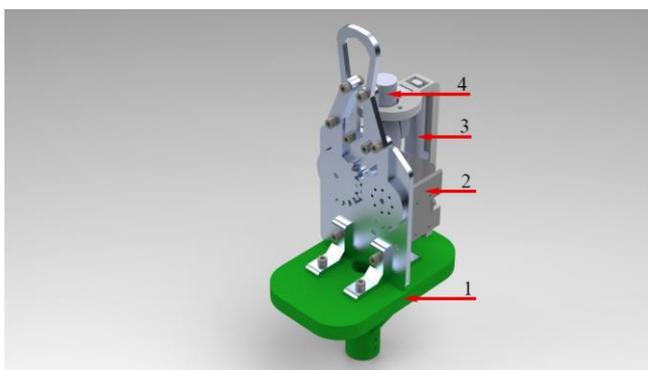


Figura 8. Modelo do elemento terminal para queima; várias partes foram indicadas numericamente. (1) base de fixação no tubo, (2) motor, (3) atuador linear, (4) isqueiro maçarico.

Essa garra é composta por cantoneiras, um motor, um atuador linear e peças fabricadas a partir de uma chapa de alumínio, em que a geometria foi cortada por jato d'água. Todos componentes são fixados de forma direta ou indireta na base impressa em PLA. Todo o conjunto da Fig. 8 tem massa de aproximadamente 1 kg.

Para realizar a queima, a garra deve ser aproximada do fio enquanto estiver aberta. Em seguida, o motor é responsável por fechá-la. Nesse contexto, a garra permanece livre para movimentar-se próxima ao fio. O atuador linear é

responsável por ativar o isqueiro maçarico e iniciar a queima. Por fim, a garra é aberta e o braço robótico pode ser colocado em posição para pouso do drone.

4. CONTROLE DO BRAÇO ROBÓTICO

O braço robótico desenvolvido é composto por eletroímãs e motores de diferentes tipos. Em operação, com o drone em voo, o controle do módulo robótico é realizado a distância, por uma comunicação via radiofrequência. Nesse contexto, para o controle do braço robótico, foi necessário a utilização de alguns componentes: microcomputador *Raspberry Pi 4* modelo B, placas *Monster Motor Shield*, placa U2D2, dois módulos de comunicação de rádio frequência LoRa e um smartphone. A Fig. 9 mostra um esquema simplificado da conexão entre os componentes do módulo robótico.

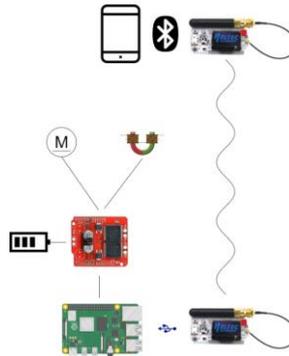


Figura 9. Esquema simplificado da conexão entre os componentes do módulo robótico.

O módulo de comunicação responsável por enviar comandos ficará no solo, junto ao operador, conectado a um smartphone por meio de uma conexão *bluetooth*. O módulo de comunicação responsável por receber os comandos ficará junto ao drone, conectado ao *Raspberry Pi 4* através de uma porta USB. Além disso, os módulos responsáveis pelo envio e recebimento dos comandos ficarão conectados entre si por meio de ondas de rádio, em uma frequência de 923 MHz.

5. PROTÓTIPO CONSTRUÍDO

Para a realização dos testes, um protótipo do braço robótico foi construído. No Laboratório de Automação e Robótica (LAR) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), foi montado uma bancada de testes para a implementação do controle do módulo robótico. A Fig. 10 mostra o protótipo construído em um dos testes.

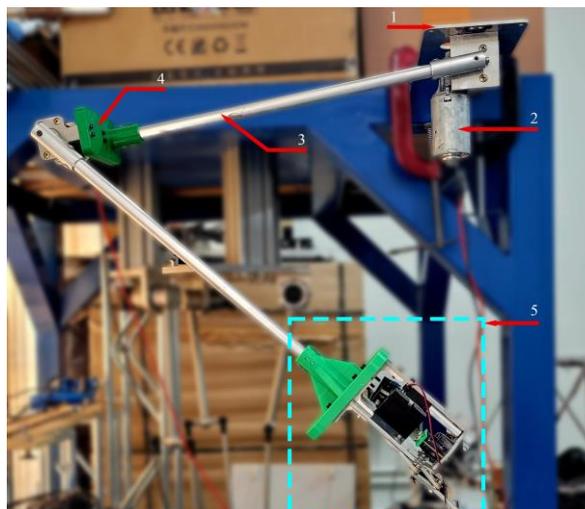


Figura 10. Teste do protótipo construído; várias partes foram indicadas numericamente. (1) placa de fixação, (2) motor, (3) tubo, (4) peça de conexão entre os tubos, (5) elemento terminal.

Toda a parte de controle foi implementada, funcionando adequadamente. Além disso, o elemento terminal para queima funcionou conforme o esperado. Por outro lado, o elemento terminal magnético não funcionou de maneira adequada. Ao capturar a telha metálica, embora haja interação magnética entre os objetos, não foi gerada força suficiente para a captura do objeto em função da espessura da chapa. Melhorias na garra magnética estão sendo realizadas para aplicação em trabalhos futuros.

6. CONCLUSÕES

A existência de objetos estranhos nos cabos de alta tensão pode levar a falhas no fornecimento de energia elétrica. Para remoção destes objetos estranhos, este projeto visou o desenvolvimento de um drone-robô.

A modelagem matemática do problema foi realizada, bem como o projeto 3D e simulações CAE. A fabricação do protótipo foi concluída e toda a parte de controle foi desenvolvida. Um smartphone conecta-se, via *bluetooth*, a um módulo de comunicação responsável por enviar comandos e outro módulo de comunicação, acoplado ao drone, é responsável por recebê-los. Dois elementos terminais foram desenvolvidos, um para queima e outro magnético, sendo que, apenas o para queima apresentou resultados satisfatórios nos experimentos.

Verifica-se, portanto, que o problema da pesquisa foi parcialmente resolvido. O módulo robótico construído, com as diferentes garras desenvolvidas, permitirá a remoção de diversos tipos de objetos dos cabos de alta tensão ou cabo para-raios. No entanto, propostas de novos elementos terminais devem ser realizadas para otimização do projeto.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC programa de P&D), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Universidade Federal de Uberlândia (UFU), CNPq (processo 303511/2021-4) e CAPES (Finance code 001) pelo suporte financeiro a este projeto.

8. REFERÊNCIAS

Bhola, R. et al. Detection of the Power Lines In Uav Remote Sensed Images Using Spectral-Spatial Methods. *Journal of Environmental Management*, V. 206, P. 1233–1242, 2018.

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.

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 (Impresso)*, 2015.

Gonçalves, R. S.; Carvalho, J. C. M., Review and Latest Trends in Mobile Robots Applied in Power Transmission Lines, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013.

Henrique, L.; Cavalcante, A.; Oliveira, G., 2005. “Tecnologia Garante Segurança na Manutenção de Linhas de Transmissão”. FIEC On-LINE.

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”, 19th Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 8p., Rio de Janeiro – RJ, 2007.

Rubin, L. “The Future of Power Line Inspection”. *Electrical World T&D*. 2000.

9. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.