

Drone eletricista para atividades de manutenção no sistema de distribuição de energia

Tema: Tecnologias Emergentes

Autores: Rogério Sales Gonçalves, Rafael Lins Nobre, Túlio Castro de Souza, Kenji Fabiano Ávila Okada

Co-Autores: Rafael Zimmermann Homma, Pedro Augusto Queiroz de Assis, Daniel Edgardo Tio Sudbrack, Aniel Silva de Moraes

Empresa: Celesc Distribuição S.A

Resumo

No Brasil existem milhares de linhas de transmissão que necessitam de manutenções periódicas, como a remoção de objetos estranhos. Devido a ação humana e a desastres naturais diferentes tipos de detritos acabam nos cabos de alta tensão ou cabo para-raios que vão desde restos de pipas, pares de tênis, plásticos diversos, balões e restos de telhas metálicas. Estes detritos colocam em risco a integridade do sistema energético podendo levar a interrupções de energia. Assim, este trabalho apresenta o desenvolvimento do drone-eletricista para remoção de objetos estranhos dos cabos. Este é formado por um braço robótico com dois graus de liberdade em que na sua extremidade diferentes tipos de elementos terminais podem ser acoplados em função do tipo de objeto estranho a ser removido. O drone é utilizado para posicionar o braço robótico para remoção do detrito sem a necessidade de escalagem dos técnicos nos postes/torres eliminando-se também a necessidade de locomoção destes ao longo dos cabos. Neste trabalho é apresentada a modelagem do braço robótico com o seu sistema de controle, visão, modelo CAD/CAE e testes experimentais. O drone eletricista em desenvolvimento visa ser uma nova ferramenta de apoio para os técnicos com o objetivo de diminuir os riscos de acidentes a estes.

1. Introdução

A humanidade é fortemente dependente do fornecimento de energia e para abastecê-la as concessionárias de energia são responsáveis pela construção e manutenção de milhares de quilômetros de linhas de transmissão. As concessionárias de energia precisam inspecionar e realizar a manutenção do sistema de energia, tarefa que exige tecnologia e mão de obra qualificada (Rubin, 2000; Gonçalves et al., 2013; Gonçalves et al., 2022).

A tarefa de inspeção é realizada por técnicos que visam verificar o funcionamento do sistema segundo normas específicas. Drones com diversos tipos de câmeras são utilizados largamente para a verificação dos ativos das companhias energéticas auxiliando nas inspeções com a utilização de softwares com inteligência artificial (Gonçalves et al., 2022). Já as tarefas de manutenção são majoritariamente realizadas por técnicos portando ferramentas convencionais. Estes técnicos trabalham em ambiente altamente perigoso com a necessidade de escalada de estruturas (torres/postes), locomoção ao longo dos cabos e podem sofrer com problemas de saúde devidos aos campos eletromagnéticos.

Entre os problemas de manutenção tem-se a necessidade de remoção de objetos estranhos do sistema de distribuição como restos de pipas, pares de tênis, balões, plásticos diversos e em casos extremos como em desastres naturais com ventos fortes pode ser necessária a remoção de telhas metálicas dos cabos. Estes objetos estranhos são denominados de detritos neste trabalho. A Figura 1 apresenta alguns exemplos de detritos encontrados nas linhas.

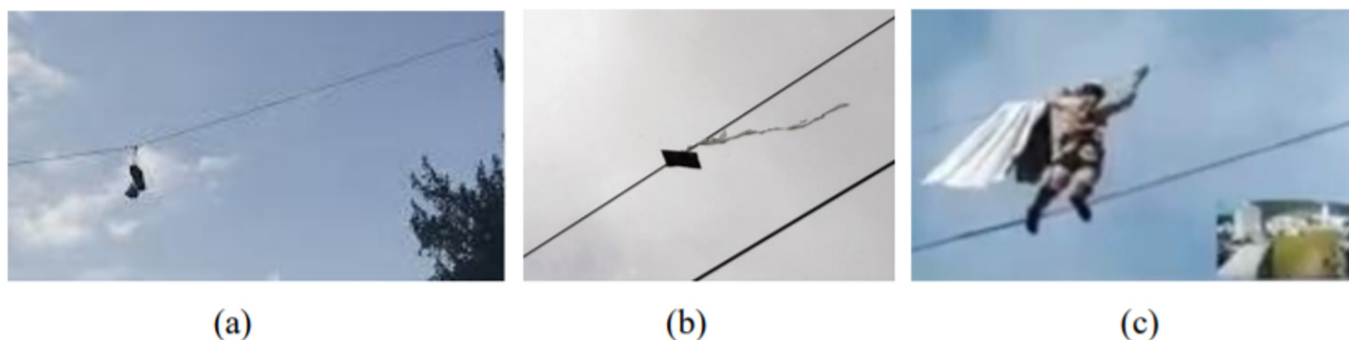


Figura 1. Objetos estranhos encontrados no sistema de transmissão. (a) Tênis; (b) pipa; (c) resto de telha metálica devido a vendavais.

A remoção dos detritos pode ser realizada de diferentes formas com técnicos locomovendo ao longo dos cabos manualmente ou com auxílio de carrinhos com rodas, com o uso de caminhão com plataforma elevatória articulada ou mesmo com o uso de helicópteros. Estas operações podem ser realizadas com as linhas desligadas ou energizadas exigindo pessoal técnico altamente qualificado para trabalhos em linha viva. Pesquisadores tem desenvolvido robôs móveis para realizar a remoção de detritos, mas estes possuem limitações para a transposição de diversos tipos de obstáculos que podem ser encontrados nas linhas como amortecedores de vibração, esferas, cadeias de isoladores etc. (Gonçalves et al. 2015). Atualmente a remoção de detritos nos cabos do sistema de distribuição está sendo realizada com o uso de drones que utilizam lança-chamas afixados na sua estrutura para a incineração destes. Os lança-chamas constituem um grande risco de acidentes e incêndios devido à alta quantidade de combustível lançada e utilizada (Gonçalves et al. 2024).

Destaca-se, que apesar dos equipamentos desenvolvidos para a remoção de objetos estranhos dos cabos do sistema de distribuição estes não atendem a demandas específicas para remoção de diferentes tipos de detritos, transposição de obstáculos e ausência da utilização diretamente de técnicos em contato com as linhas. O uso de helicópteros apresenta riscos de acidentes a altos custos e o uso de plataformas em caminhões tem a limitação da altura disponível e deslocamento.

Dessa forma, este trabalho apresenta uma nova solução com a utilização de um braço robótico acoplado a um drone para ser aplicado na manutenção de elementos presentes no sistema de transmissão de energia elétrica. Na sequência são detalhados o projeto do braço robótico, seu sistema de controle e testes experimentais com o protótipo construído, finalizando com as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

2. Desenvolvimento

O drone eletricista é formado por um Veículo Aéreo Não Tripulável (VANT) e um braço robótico. A Figura 2(a) representa o drone eletricista na sua configuração inicial para voo com o braço retraído e a Fig. 2(b) uma configuração genérica do braço robótico portando como elemento terminal uma motosserra.



(a)

(b)

Figura 2. (a) Configuração inicial do braço robótico; (b) Configuração genérica do braço.

O drone utilizado neste projeto possui configuração hexa e controladora aberta com capacidade de carga útil de 10 kg. O sistema de controle e de visão do drone foram desenvolvidos neste projeto e brevemente apresentados na seção 3 e 4. O braço robótico possui dois graus de liberdade com capacidade de rotacionar e alterar a posição do elemento terminal permitindo a interação com os objetos estranhos presentes no sistema de transmissão, enquanto o sistema de controle do drone mantém este pairando nivelado em relação ao braço robótico.

A Figura 3 detalha o projeto do braço robótico composto por: base metálica de acoplamento ao drone, segmentos (podem ser de fibra de carbono ou de alumínio), motores elétricos, encoders e elemento terminal intercambiável. A modelagem geométrica do braço robótico é apresentada em (Castro de Souza et al., 2023).

Os motores DC utilizados no braço robótico são do modelo F006WM0310, da Bosch. Esse motor de corrente contínua possui tensão nominal de 24 V, corrente nominal de 5 A, potência nominal de 46 W e um torque máximo de 48 Nm. A escolha deste motor foi realizada considerando-se um detrito a ser removido do cabo com no máximo 4 kg.

A tensão de alimentação de ambos os motores é de 24 V. Utiliza-se a ponte H modelo BTS7960B para manipular a tensão média fornecida ao motor a partir de um sinal PWM (*Pulse Width Modulation*) advindo de um microcontrolador. Além disso, utilizando-se a ponte H, pode-se controlar o sentido de giro dos motores ao mudar o sentido da corrente nos enrolamentos dos motores. A fim de possibilitar a verificação da posição angular dos motores, e consequentemente das hastes, foram acoplados encoders rotacionais aos eixos dos motores, de forma que tanto a posição angular, quanto a velocidade angular do motor pudesse ser determinada. O modelo de encoder utilizado é o E50S8-5000-3-1-24, o qual possui uma resolução de 5000 PPR (Pulsos Por Revolução).

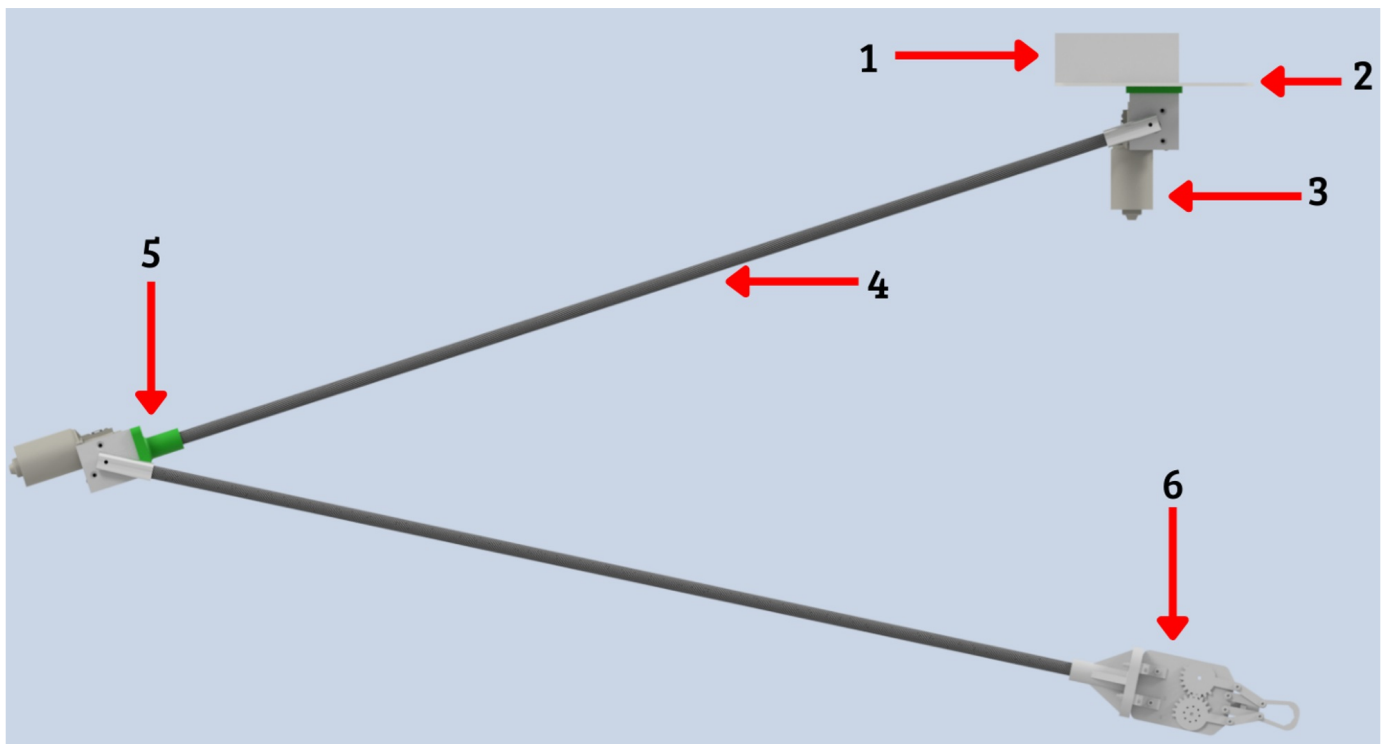


Figura 3. Vista isométrica do projeto do braço robótico; (1) caixa de controle, (2) placa de fixação, (3) motor DC, (4) segmento, (5) peça de conexão entre segmentos, (6) elemento terminal.

Elementos terminais

Diversos elementos terminais poderão ser utilizados no drone eletricista. Estes possuem funções análogas a vara de manobra em que no cabeçote podem ser fixados diferentes equipamentos destinados a funções específicas. Desta forma para cada tipo de detrito pode-se utilizar um elemento terminal mais apropriado para a remoção deste. Neste trabalho são apresentados um elemento terminal para queima concentrada e um elemento terminal para pega.

O elemento terminal para queima concentrada tem como objetivo a remoção de restos de pipas, pares de tênis e detritos pequenos diversos que possam ser incinerados em uma pequena região, Fig. 4(a). Este elemento terminal é composto por uma base de fixação, um servomotor, um atuador linear e peças diversas fabricadas em alumínio e impressas em PLA. A garra tem massa de aproximadamente 1 kg. Para realizar a queima, a garra deve ser aproximada do fio enquanto estiver aberta, Fig. 4(a). Em seguida, o servomotor é responsável por fechá-la, Fig. 4(b). Nesse contexto, a garra permanece livre para movimentar-se próxima ao fio. O atuador linear é responsável por ativar o maçarico e iniciar a queima do detrito de forma pontual e concentrada. Por fim, a garra é aberta e o braço robótico pode ser colocado em posição para pouso do drone.

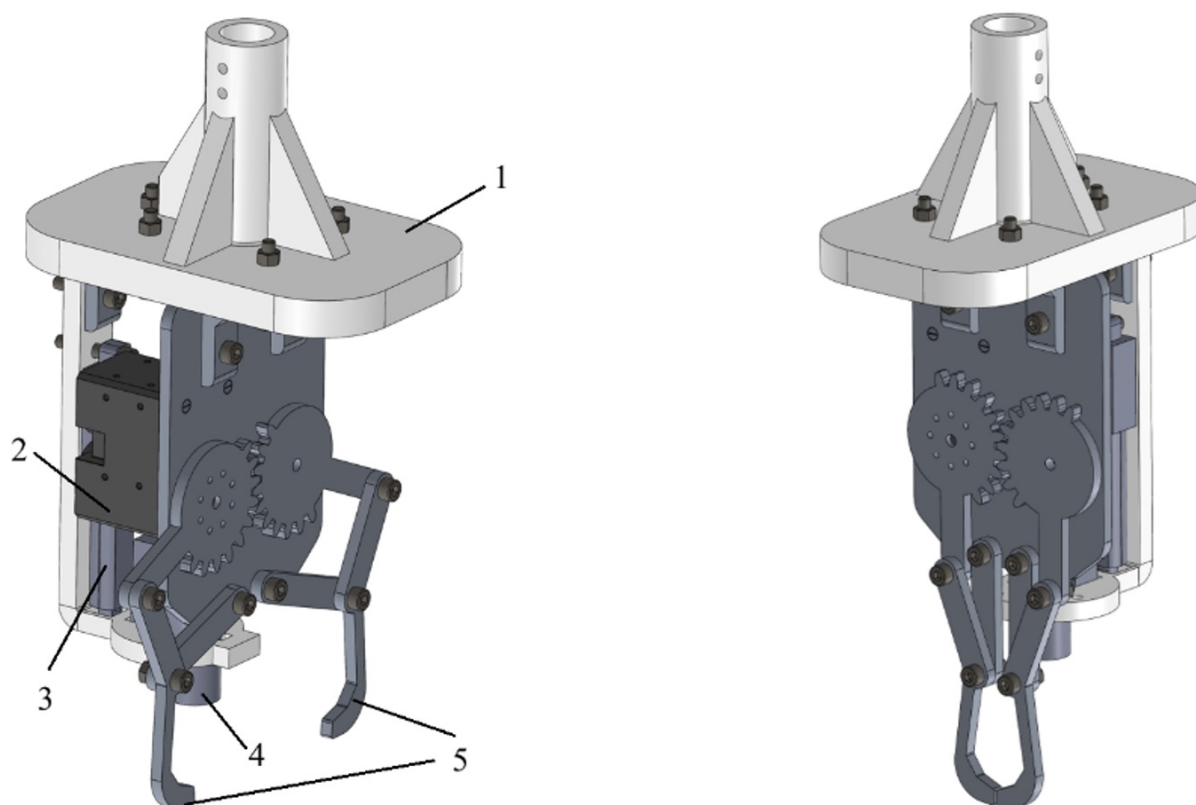


Figura 4. Projeto 3D em CAD do elemento terminal para queima. (1) base de fixação no segmento, (2) servomotor, (3) atuador linear, (4) maçarico, (5) garras.

O elemento terminal para remoção de detritos que possam ser presos/agarrados tem o formato de uma garra autotravante desenvolvida com somente um grau de liberdade (atuador), Figura 5. Esta garra foi pensada para a remoção de grandes pedaços de balões, restos de telhas metálicas etc., Fig. 1. Destaca-se que em casos de vendáveis pedaços de telhas podem atingir e ficarem alojados nos cabos, Fig. 1(c). Após a identificação do objeto a ser removido pelo braço robótico pelo sistema de visão, acoplado a técnicas de inteligência artificial, o sistema de controle do braço robótico atua para fornecer a orientação necessária para agarrar o objeto. A garra em formato de grampo fecha prendendo o objeto e o drone eletricista remove o objeto do cabo, posicionando-o bem próximo do solo. Na sequência a garra abre-se e o detrito é deixado em solo. Finalmente o braço robótico é recolhido e o drone pode pousar.

Destaca-se, que no caso de detritos maiores o drone eletricista pode posicionar o braço robótico para derubar o detrito do cabo, desde que a área de queda esteja isolada, utilizando-se como elemento terminal seu próprio segmento.

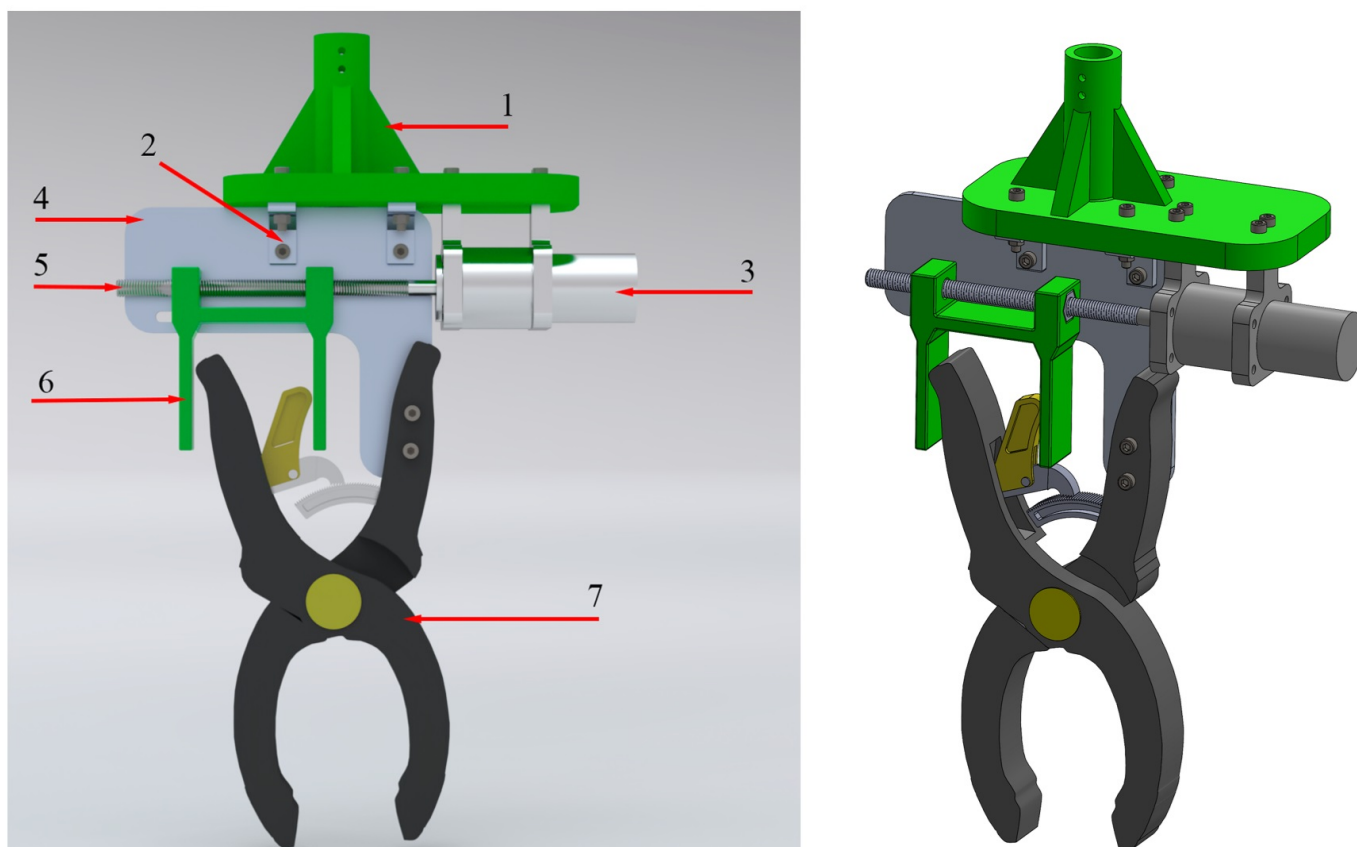


Figura 5. Elemento terminal com garra. (1) base de fixação no segmento, (2) cantoneiras, (3) motor, (4) base, (5) fuso auto travante, (6) mecanismo de fechamento da garra e abertura, (7) garra do tipo grampo.

Controle do Braço Robótico

O sistema de controle do braço robótico funciona considerando que o operador comanda incrementos de deslocamento para o braço em relação a uma condição inicial. Em seguida esses incrementos são transformados em uma posição de referência para o efetuador. Tal posição então passa por uma equação de cinemática inversa, gerando referências de ângulo para as juntas do braço. Por fim, controladores de malha fechada são implementados para atuar os motores localizados nas juntas, rotacionando-os até os ângulos de referência. Na sequência apresentam-se a cinemática inversa, o projeto dos controladores de posição angular para os motores e os resultados de simulação.

Cinemática inversa

O braço robótico possui dois graus de liberdade: os ângulos θ_1 e θ_2 da primeira e da segunda junta, respectivamente, os quais em conjunto permitem o posicionamento do elemento terminal em qualquer local que operador desejar dentro do espaço de trabalho do braço. Esses graus de liberdade encontram-se ilustrados na Figura 6.

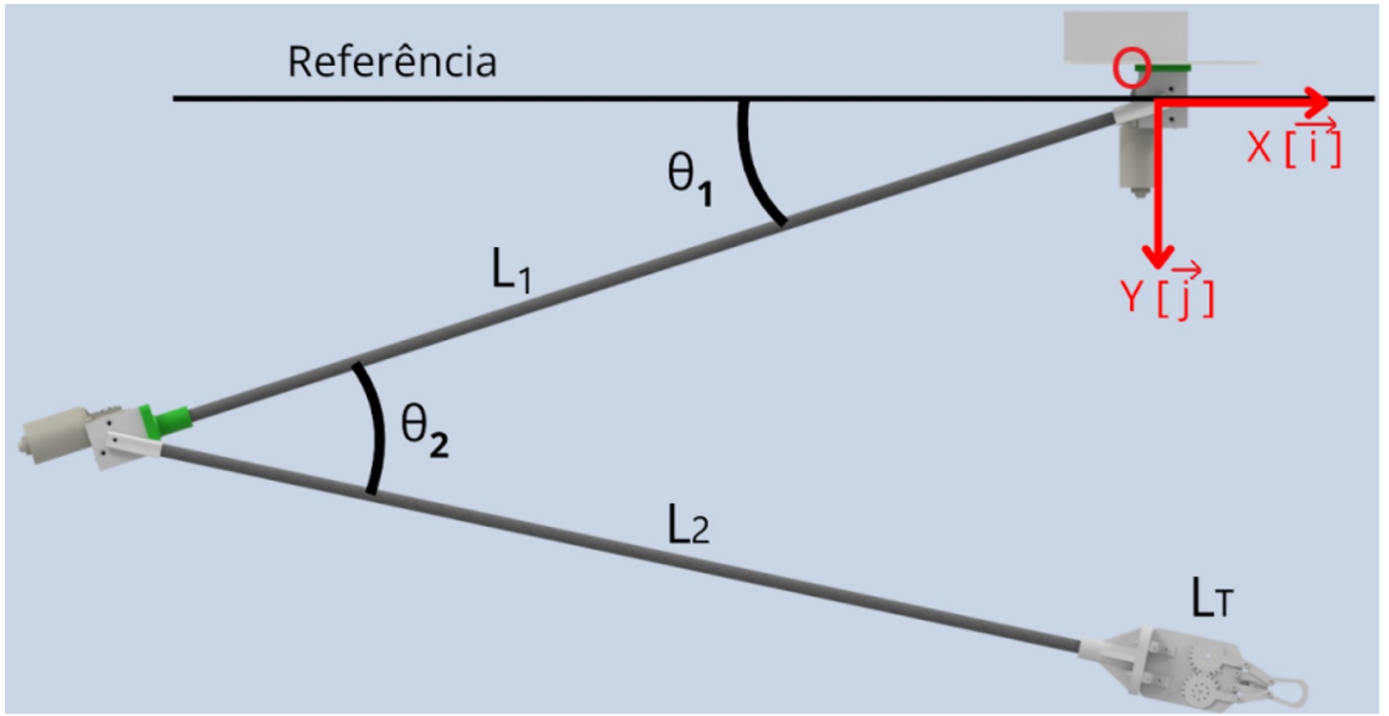


Figura 6: Graus de liberdade do braço robótico.

A partir dos ângulos θ_1 e θ_2 , a posição do elemento terminal com relação à origem do sistema de referência fixo O , em metros, pode ser calculada por meio da equação:

$$\vec{r}_T = [-L_1 \cdot \cos\theta_1 + (L_2 + L_T) \cdot \cos(\theta_2 - \theta_1)] \vec{i} + [L_1 \cdot \sin\theta_1 - (L_2 + L_T) \cdot \sin(\theta_2 - \theta_1)] \vec{j} \text{ [m]} \quad (3.1)$$

sendo L_1 , L_2 e L_T os comprimentos da primeira haste, da segunda haste e do elemento terminal, respectivamente. Com base na Eq. (3.1), a cinemática inversa pode ser calculada numericamente, sendo assim possível obter os ângulos das hastes a partir dos incrementos de posição definidos pelo operador.

Projeto dos controladores

Para garantir o rastreamento correto das posições angulares dos motores do braço robótico, foi utilizada a estratégia de controle em Malha Fechada (MF) para ambos os motores. No controle em malha fechada, informações da saída (provenientes de sensores) são utilizadas para determinar o sinal de entrada do processo. Para realização do projeto dos controladores primeiramente consideraram-se os seguintes requisitos de projeto: sobressinal de 2% e tempo de estabelecimento menor que 1,5s. Logo, os polos dominantes de MF devem ser (OGATA, 1994):

$$P_{MF} = -2,66 \pm j2,14 \quad (3.2)$$

O método escolhido para projetar os controladores para os motores de acordo com essa localização desejada para os polos de MF foi o LGR (Lugar Geométrico das Raízes) (OGATA, 1994).

Para realização do projeto, primeiramente identificou-se um modelo dinâmico na forma de uma função de transferência $G(s)$ representando a relação entre a entrada ciclo ativo de um sinal PWM gerado por um microcontrolador ESP32, que pode ser interpretado como a manipulação da tensão média aplicada aos terminais do motor e a saída, posição angular do motor. Em particular, tal identificação foi realizada com base no diagrama de Bode levantado experimentalmente e mostrado na Figura 7. Cabe salientar que, para construção desse diagrama de Bode, considerou-se como saída a velocidade angular.

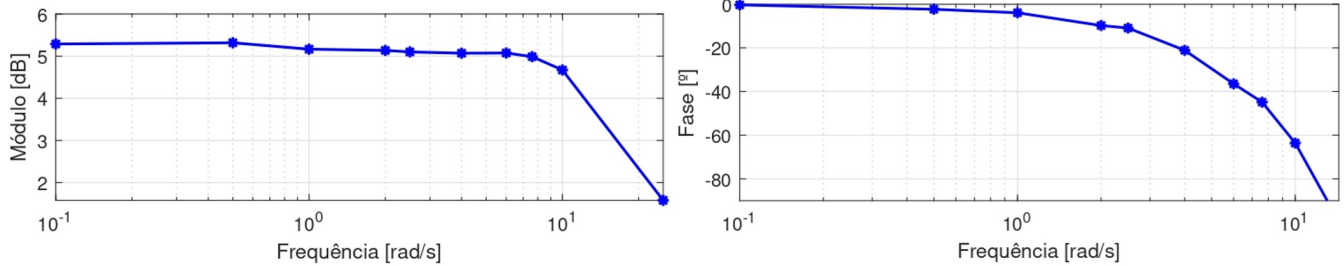


Figura 7: Diagrama de Bode do motor F006WM0310, para entrada PWM e saída em velocidade angular. A dinâmica entre a tensão média aplicada a um motor CC e sua velocidade angular se permite explicar por uma função de transferência $G(s)$ de primeira ordem. A análise dos pontos nos gráficos de módulo e de fase nos permite encontrar a $G(s)$, que ao ser integrada no domínio da frequência, resulta na $G(s)$ dos motores.

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{37,6}{s + 7,5}; G_{\theta}(s) = \frac{G(s)}{s} = \frac{37,6}{s(s + 7,5)} \quad (3.3)$$

Com a $G(s)$ definida, procedeu-se para o projeto do controlador de MF $C(s)$ utilizando o Lugar Geométrico das Raízes (LGR). Definiu-se um compensador com um zero (posicionado em -7,5 para cancelar o polo da planta) e um polo (em -5,33) de modo que o *root locus* passe nos pontos desejados. Então, um ganho de 0,313 foi escolhido para que os polos de MF fossem iguais aos apontados em (3.2). O *root locus* é mostrado na Figura 8.

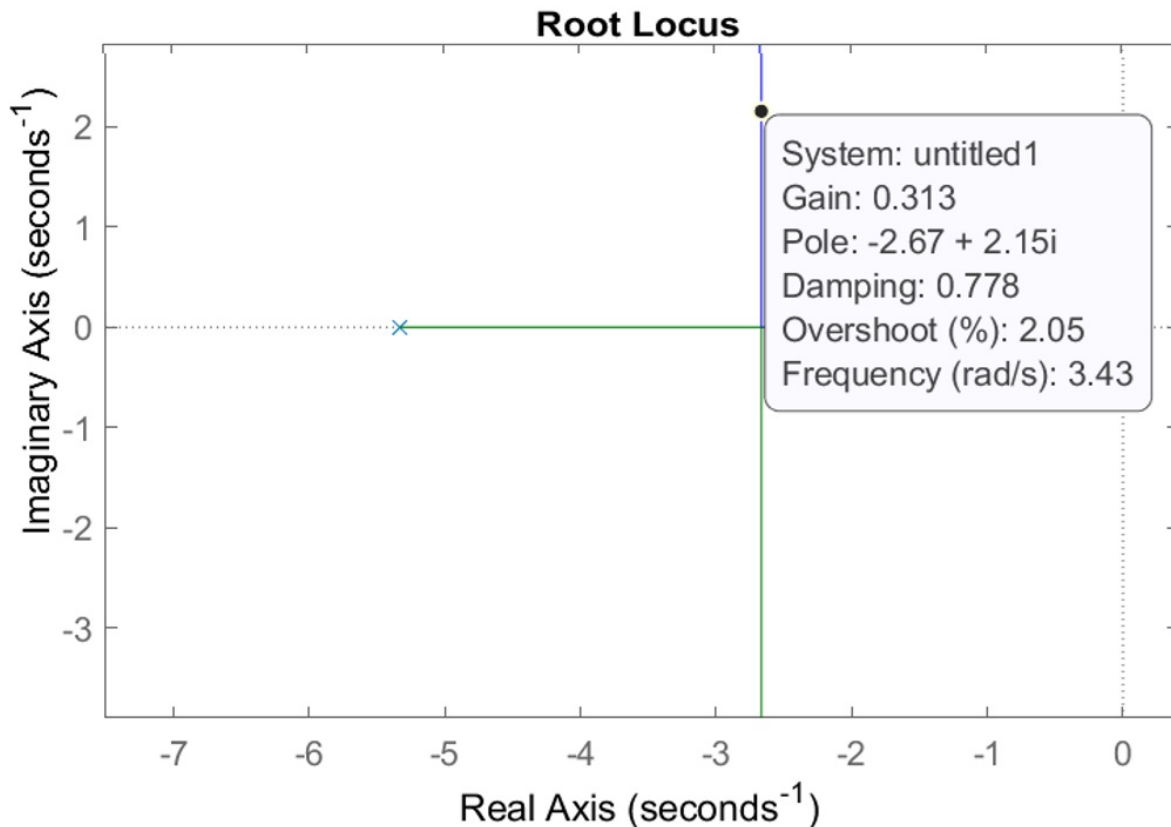


Figura 8: LGR para o projeto de $C(s)$.

Portanto, a função de transferência do controlador de posição angular para as juntas é dada pela Eq. (3.4):

$$C(s) = \frac{0,313 \cdot (s + 7,5)}{(s + 5,33)} \quad (3.4)$$

Resultados de controle em simulação

Para verificar o desempenho do compensador Eq. (3.4) no controle da planta Eq. (3.3) foram realizadas simulações numéricas. Tais simulações foram realizadas no *Simulink/MATLAB*. Para obter uma simulação mais representativa, foram implementados efeitos experimentais no modelo de simulação do motor. Foram inseridos a saturação na entrada do sistema entre 0 % e 100 % de ciclo ativo, uma zona morta de 5 % para o ciclo ativo, assim como há no sistema real, além de um ruído no sinal de saída, de forma a simular a leitura do sensor real e perturbações externas. Na simulação foi estabelecida uma referência do tipo degrau de 1,6 rad, com o resultado disposto na Figura 9.

Como pode ser observado, o controle em malha fechada atendeu aos requisitos do projeto ao convergir em direção à referência de maneira suave, com um máximo sobressinal inferior a 2 % e com um tempo de estabelecimento inferior a 1,5 s. Entretanto, também pode ser observado que o ângulo do motor não converge exatamente para a referência, devido ao efeito da zona morta simulada, causando uma pequena diferença entre a angulação final e a referência.

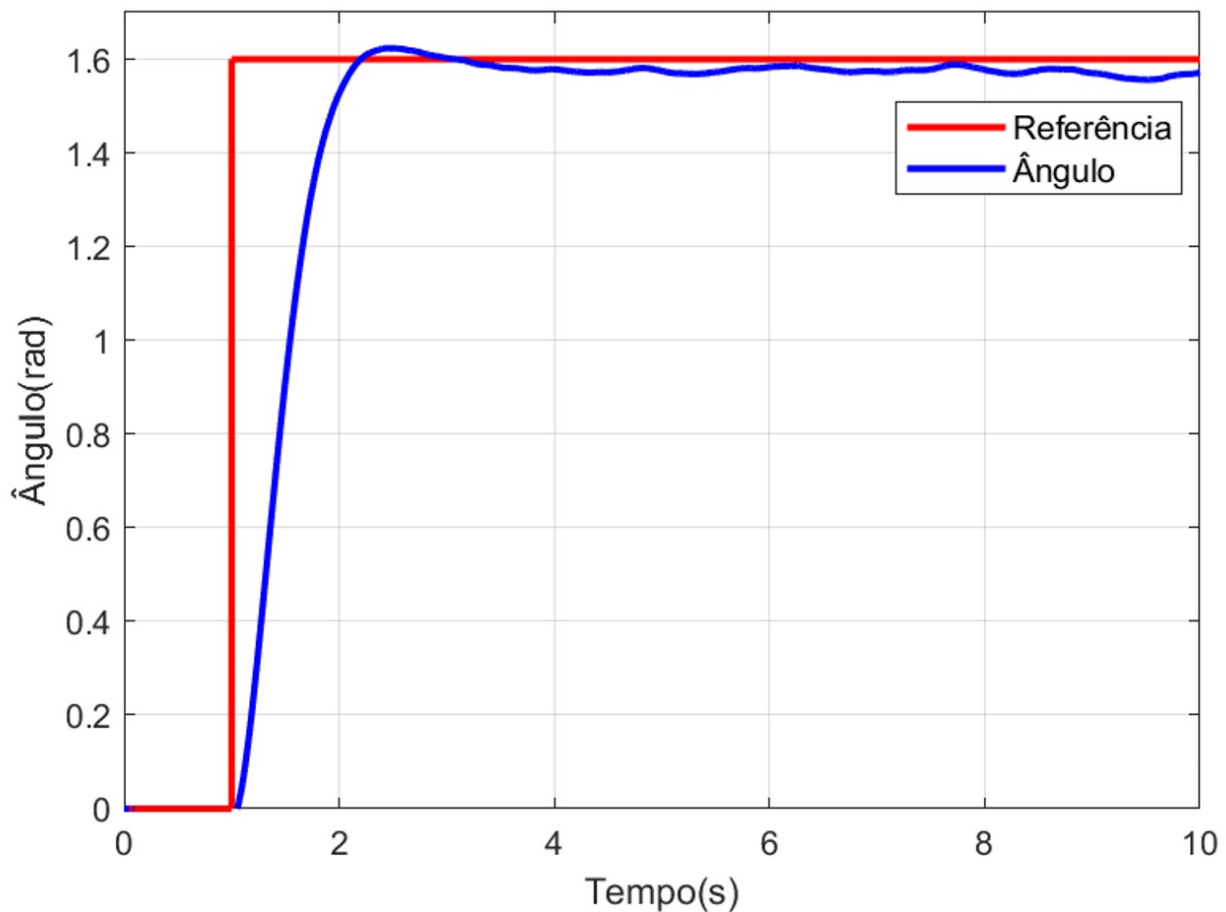


Figura 9: Resultado de simulação da malha fechada para controle de posição angular considerando um degrau de referência de 1,6 rad.

Considera-se que o compensador (3.4) apresentou resultado satisfatório e será empregado nos testes práticos do braço robótico.

Sistema de Visão/Controle do Drone Eletricista

O sistema de controle do drone eletricista é baseado na identificação do cabo em que o objeto vai ser removido. A detecção de cabos de linhas de transmissão de energia em imagens pode ocorrer utilizando algumas abordagens baseadas em inteligência artificial (IA) (Li et al., 2021) e/ou de processamento de imagens (Zhang et al., 2023). Apesar do uso extensivo da IA em problemas de diversas áreas, sua aplicação apresenta alguns desafios, como: a necessidade de grandes volumes de dados, o custo computacional e a vulnerabilidade a mudanças de ambientes que não foram consideradas no treinamento. Esses fatores aumentam a complexidade da solução, impactando no tempo de implementação, os requisitos de hardware e a confiabilidade da detecção em cenários reais (Chen et al., 2021).

Os cabos de linhas de transmissão de energia aparecem como linhas retas nas imagens obtidas de uma visão superior. Essa característica permite simplificar a solução utilizando processamento de imagens se comparada com os métodos de IA. Nesse contexto, o algoritmo de Canny é vantajoso por realizar a detecção de bordas com alta precisão e eficiência, sem depender de treinamento prévio. Ele combina algoritmos de suavização da imagem para eliminar interferências indesejadas, cálculo de gradiente para identificar mudanças de intensidade entre os pixels e a técnica de histerese para determinação da borda (Zhu et al., 2021).

A detecção de cabos ocorre em três etapas: pré-processamento das imagens RGB e de profundidade capturadas pela câmera Intel RealSense, aplicação do algoritmo de Canny e da Transformada de Hough (Seikh e Mollah, 2022) em ambas as imagens, e a superposição dos resultados para a identificação final do cabo. O uso da imagem de profundidade é fundamental devido à presença de várias linhas na transmissão de energia, permitindo isolar a linha de interesse em função da proximidade com a câmera.

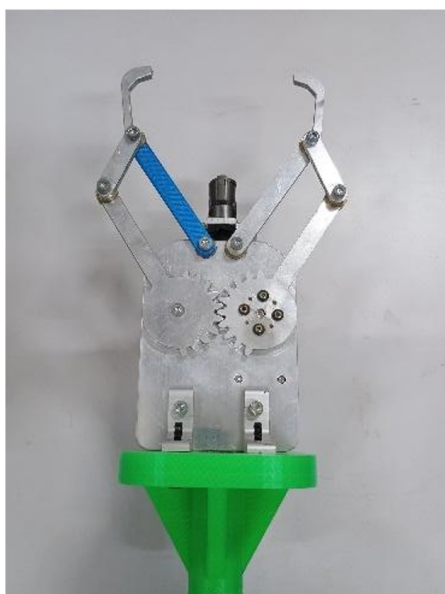
O pré-processamento consiste em converter ambas as imagens para a escala de cinza. Na imagem de profundidade, é aplicado um processo adicional de filtragem. Para prevenir que linhas abaixo da linha de interesse ou demais objetos possam ocasionar detecções indesejadas, foi definido um limiar. Nesse processo, todos os pixels cuja distância está fora do intervalo especificado são definidos como pretos e os demais como brancos, ou 0 e 255 na escala de cinza, respectivamente, garantindo a segmentação da área de interesse.

Após a determinação das linhas em cada uma dessas imagens pelo algoritmo de Canny e da Transformada de Hough, há o processo de correspondência dos resultados. Para minimizar os falsos positivos em cada imagem, são consideradas apenas as linhas que foram detectadas simultaneamente em ambas as imagens, ou seja, localizadas na mesma posição. A reta final que representa o cabo é então determinada calculando-se a média entre os coeficientes linear e angular das linhas selecionadas.

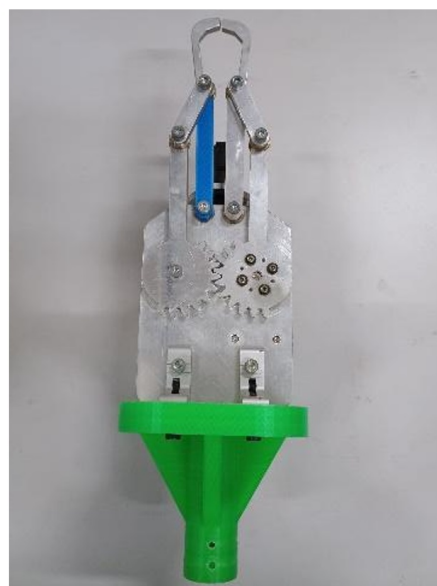
Com a identificação da linha que representa o cabo, o centro dessa linha na imagem é utilizado como referência para o deslocamento do drone. O controle automático é baseado na diferença de posição entre o pixel central da imagem e o pixel correspondente ao centro da linha do cabo. Quando esses pixels estão alinhados, isso indica que o drone está devidamente posicionado em relação ao cabo, permitindo que prossiga com o movimento de descida.

Testes Experimentais

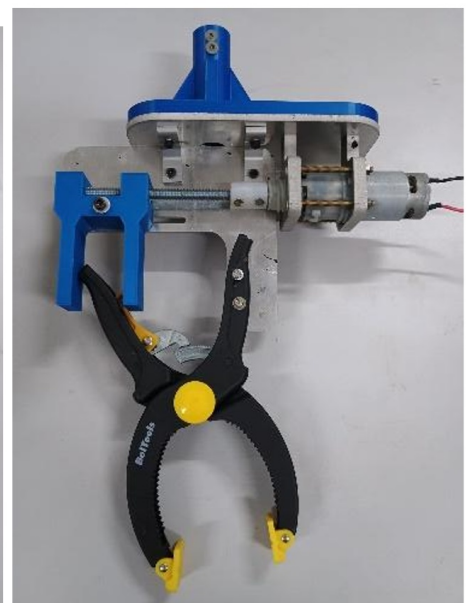
Para a realização dos testes, um protótipo do braço robótico foi construído no Laboratório de Automação e Robótica (LAR) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) junto com o desenvolvimento do drone para testes em campo em conjunto com a empresa do setor elétrico CELESC. A Figura 10 apresenta os protótipos das garras para queima e para pega/remoção de detritos.



(a)



(b)



(c)

Figura 10. (a) Elemento terminal para queima concentrada com garras aberta; (b) Elemento terminal para queima concentrada com as garras fechadas; (c) elemento terminal com garra.

A Figura 11 mostra um print do teste realizado para retirada de um pedaço de telha metálica do cabo com o drone eletricista desenvolvido neste projeto. Para esta remoção em função da geometria do objeto foi optado por utilizar o próprio segmento do braço robótico para derrubar a telha do cabo simulado.



Figura 11. Teste experimental com o drone eletricista para retirada de detrito simulado.

Os testes experimentais podem ser acessados no link: <https://drive.google.com/file/d/10rHmMw0P-gB2BMiMVYevHnCWe8Egq3k/view?usp=sharing>

3. Conclusão

A presença de objetos estranhos/detrimentos nos cabos do sistema de distribuição pode levar a falhas no fornecimento de energia elétrica. Para sanar as falhas e retornar o abastecimento de energia estes objetos devem ser removidos dos cabos, ou retirados para evitar a falha no fornecimento de energia. Para resolver este problema neste trabalho foi apresentado o drone eletricista, dotado de um braço robótico com diferentes tipos de elementos terminais para a remoção destes objetos estranhos. O drone eletricista realiza atividades de manutenções similares aos eletricistas que utilizam de varas de manobra com diferentes tipos de cabeçotes para cada atividade de manutenção.

O desenvolvimento do drone eletricista envolveu a concepção do modelo 3D de CAD e a simulação em CAE das operações de remoção, modelagem matemática do braço robótico com a implementação do seu sistema de controle e fabricação dos elementos terminais e do braço robótico. Foi realizada a programação

do sistema de controle do drone com a identificação do cabo por um sistema de visão para a correta remoção do detrito.

Neste trabalho o controle do braço robótico foi implementado funcionando adequadamente. Além disso, o elemento terminal para queima e para prender objetos funcionaram conforme o esperado, faltando a realização de mais testes experimentais práticos com estes acoplados ao drone. O sistema de controle do drone eletricista foi desenvolvido e validado em testes experimentais, faltando a validação em atividades reais de manutenções para retirada de detritos.

Com a operacionalização do drone eletricista espera-se diminuir os riscos aos técnicos que realizam estas atividades de manutenção com a eliminação da necessidade de escalagem das estruturas como postes e torres, e diminuindo a exposição dos técnicos aos campos eletromagnéticos. O uso deste equipamento também pode eliminar a necessidade da interrupção do fornecimento de energia com o drone eletricista tendo a capacidade de operar com as linhas energizadas.

Como propostas de trabalhos futuros tem-se a concepção de novos elementos terminais em função de detritos específicos e a realização de testes experimentais em campo junto a CELESC.

Agradecimentos

O trabalho foi apoiado e financiado pelas Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC programa de P&DI, processo n. 05697-1023/2023), e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, UFU e CNPQ (processo 303511/2021-4).

4. Referências bibliográficas

B. LI, C. CHEN, S. DONG, J. QIAO, "Transmission line detection in aerial images: An instance segmentation approach based on multitask neural networks", *Signal Processing: Image Communication*, 2021, pp. 116276, 96,

CASTRO DE SOUZA, TÚLIO ; SALES GONÇALVES, ROGÉRIO . BRAÇO ROBÓTICO PARA REMOÇÃO DE OBJETOS ESTRANHOS EM CABOS DE ALTA TENSÃO. In: CREEM 2023 XXIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, 2023. XXIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica.

G. ZHANG, G. ZHANG, Q. LU, Y. BO, X. ZHOU, "Application of Improved Canny Algorithm in Image Edge Detection of Transmission Lines," *2023 International Conference on Image Processing, Computer Vision and Machine Learning (ICICML)*, Chengdu, China, 2023, pp. 171-175, doi: 10.1109/ICICML60161.2023.10424911.

GONCALVES, 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. In: Maki K. Habib. (Org.). Handbook of Research on New Investigations in Artificial Life, AI, and Machine Learning. 1ed.: IGI Global, 2022, v. 1, p. 462-491.

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.

GONCALVES, R. S.; ROCIOLI, M. A. S. ; HOMMA, RAFAEL ; SUDBRACK, D. E. T. ; MERINI, A. ; MACHADO, M. L. G. . Robô móvel para limpeza de linhas de distribuição energizadas. In: Congresso de inovação na Distribuição de energia elétrica - CIDE 2024, 2024, São Paulo. Congresso de inovação na Distribuição de energia elétrica - CIDE 2024, 2024.

GONÇALVES, ROGÉRIO S.; SOUZA, FREDERICO C. ; SOUZA, CLAUDIO C. ; SUDBRACK, DANIEL E.T. ; TRAUTMANN, PAULO VICTOR ; CLASEN, BRUNO C. ; HOMMA, RAFAEL Z. . Semi-Autonomous Mobile Robot Coupled to a Drone for Debris Removal from High-Voltage Power Lines. ROBOTICS AND AUTONOMOUS SYSTEMS, v. 1, p. 104697, 2024.

L. CHEN, S. LI, Q. BAI, J. YANG, S. JIANG, Y. MIAO, "Review of Image Classification Algorithms Based on Convolutional Neural Networks". *Remote. Sens.* 2021, pp. 4712, 13, doi: <https://doi.org/10.3390/rs13224712>.

N. SEIKH, A. F. MOLLAH, "Power Line Detection from Aerial Vehicles using Hough Transform," - *2022 IEEE Calcutta Conference (CALCON)*, Kolkata, India, 2022, pp. 1-3, doi: 10.1109/CALCON56258.2022.10060117.

OGATA, K. Discrete-time Control Systems. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1994.

RUBIN, L. "The Future of Power Line Inspection". Eletrical Word T&D. 2000.

X. ZHU, M. TANG, K. ZHANG, Q. WANG, "Image detection method based on improved Canny algorithm," *2021 40th Chinese Control Conference (CCC)*, Shanghai, China, 2021, pp. 7033-7039, doi: 10.23919/CCC52363.2021.9549565.