

Sistema robótico autônomo baseado no Robomaster S1 para detecção de falhas em pás eólicas

Autonomous robotic system based on the Robomaster S1 for fault detection in wind turbine blades

Alan Huss da Silva Lopes¹

Ana Clara Medeiros dos Santos²

Jhonatas Anthony Dantas Araújo³

João Emanuel Cândido Gonçalves da Silva⁴

Mateus Arnaud Santos de Sousa Goldbarg⁵

Diego Vinicius Cirilo do Nascimento⁶

Luciano Alexandre de Farias Silva⁷

Andouglas Gonçalves da Silva Júnior⁸

Resumo

A inspeção de pás eólicas é uma etapa crítica para garantir a confiabilidade, a eficiência e a segurança dos sistemas de geração de energia eólica, uma vez que essas estruturas estão continuamente expostas a condições ambientais severas e sujeitas a diferentes modos de falha estrutural. Os métodos tradicionais de inspeção apresentam limitações significativas, especialmente no que se refere à inspeção interna das pás, devido a altos custos operacionais, riscos à segurança e baixa frequência de monitoramento. Nesse contexto, este trabalho propõe a adaptação da plataforma robótica DJI RoboMaster S1 para desenvolvimento de funções autônomas na inspeção não destrutiva do interior de pás eólicas. A metodologia adotada envolveu o estudo detalhado da arquitetura mecânica, eletrônica e computacional da plataforma, a aplicação de técnicas de engenharia reversa para superar limitações do

¹ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em FPGA, na modalidade a distância. e-mail: alan20250048627@alu.uern.br

² Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em FPGA, na modalidade a distância. e-mail: clara.medeiros.127@ufrn.edu.br

³ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em FPGA, na modalidade a distância. e-mail: jhonatasanthony6@gmail.com

⁴ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em FPGA, na modalidade a distância. e-mail: emmanuel.candido@academico.ifrn.edu.br

⁵ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em FPGA, na modalidade a distância. e-mail: mateus.goldbarg@dca.ufrn.br

⁶ Docente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em FPGA, na modalidade a distância. e-mail: diego.cirilo@ifrn.edu.br

⁷ Docente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em FPGA, na modalidade a distância. e-mail: luciano.silva@ifrn.edu.br

⁸ Docente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em FPGA, na modalidade a distância. e-mail: andouglas.silva@ifrn.edu.br

ecossistema fechado do fabricante e o desenvolvimento de um sistema de controle externo persistente baseado no protocolo SBUS. Adicionalmente, foram projetados e integrados sistemas de sensoriamento ultrassônico e captura visual, com suporte mecânico desenvolvido por prototipagem aditiva. Os resultados obtidos até o momento demonstram a viabilidade técnica da plataforma para operações controladas em ambientes confinados, validando a estabilidade mecânica, a comunicação persistente e a integração inicial dos sensores. Embora o sistema ainda se encontre em estágio de protótipo funcional, sem navegação totalmente autônoma, os resultados indicam que a proposta constitui uma base promissora para o desenvolvimento de soluções robóticas de baixo custo voltadas à inspeção interna de pás eólicas, alinhadas aos princípios da Indústria 4.0 e da manutenção preditiva.

Palavras-chave: energia eólica. inspeção não destrutiva. robótica móvel. pás eólicas. Indústria 4.0.

Abstract

Wind turbine blade inspection is a critical step in ensuring the reliability, efficiency, and safety of wind power generation systems, since these structures are continuously exposed to harsh environmental conditions and subject to different modes of structural failure. Traditional inspection methods present significant limitations, especially regarding the internal inspection of blades, due to high operational costs, safety risks, and low monitoring frequency. In this context, this study proposes the adaptation of the DJI RoboMaster S1 robotic platform for the development of autonomous functions aimed at the non-destructive inspection of the interior of wind turbine blades. The adopted methodology involved a detailed study of the platform's mechanical, electronic, and computational architecture, the application of reverse engineering techniques to overcome limitations imposed by the manufacturer's closed ecosystem, and the development of a persistent external control system based on the SBUS protocol. Additionally, ultrasonic sensing and visual capture systems were designed and integrated, supported by a mechanical structure developed through additive prototyping. The results obtained so far demonstrate the technical feasibility of the platform for controlled operations in confined environments, validating the mechanical stability, persistent communication, and initial sensor integration. Although the system is still at the functional prototype stage, without fully autonomous navigation, the results indicate that the proposal constitutes a promising basis for the development of low-cost robotic solutions aimed at the internal inspection of wind turbine blades, aligned with the principles of Industry 4.0 and predictive maintenance.

Keywords: wind energy; non-destructive inspection; mobile robotics; wind turbine blades; Industry 4.0.

1 INTRODUÇÃO

A energia eólica destaca-se como uma das principais fontes de energia renovável, apresentando elevada eficiência e baixo impacto ambiental (GWEC, 2023; IRENA, 2022). Com a expansão dos parques eólicos, as pás das turbinas assumem um papel crítico na confiabilidade e no desempenho do sistema (BURTON et al., 2011; HAU, 2013), uma vez que estão continuamente expostas a condições ambientais severas, como variações térmicas, radiação ultravioleta, impactos de partículas, umidade, erosão e descargas atmosféricas. Nesse contexto, as pás eólicas desempenham papel fundamental, por serem responsáveis pela conversão direta da energia cinética do vento em energia mecânica.

Durante sua vida útil, as pás eólicas são expostas a variações térmicas, umidade, impactos de partículas, erosão e descargas atmosféricas, fatores que contribuem para o surgimento de defeitos estruturais (SØRENSEN et al., 2004; NIJSSEN, 2007). Por serem majoritariamente fabricadas a partir de materiais compósitos e processos de manufatura ainda pouco automatizados, as pás estão suscetíveis a falhas oriundas da fabricação, transporte, instalação e operação. Entre os defeitos mais recorrentes, destacam-se trincas, delaminações, falhas de adesão, erosão do bordo de ataque e danos internos, os quais podem comprometer a eficiência aerodinâmica, reduzir a vida útil da pá e elevar significativamente os custos de operação e manutenção (TAVNER, 2012; CARROLL; MCDONALD; MCMILLAN, 2016).

A detecção precoce desses defeitos é fundamental para evitar falhas críticas e permitir o planejamento eficiente da manutenção. Nesse contexto, os métodos de ensaio não destrutivo (END) tornam-se indispensáveis para a inspeção superficial e subsuperficial das pás eólicas (CIANG; LEE; BANG, 2008; BANGERT et al., 2018). No entanto, os métodos tradicionais de inspeção, baseados em inspeção visual manual com acesso por cordas, plataformas ou drones, apresentam limitações relevantes, como altos custos operacionais, longos tempos de execução, necessidade de paralisação das turbinas e riscos à segurança dos operadores. Essas limitações são ainda mais acentuadas quando se considera a inspeção do interior das pás, que permanece um desafio técnico significativo.

Nesse contexto, a utilização de sistemas de inspeção baseados na captura de imagens e vídeos de alta resolução tem se mostrado uma abordagem promissora para a identificação de defeitos estruturais em pás eólicas. A inspeção em vídeo possibilita o registro contínuo das superfícies internas e externas das pás, permitindo que os dados visuais sejam posteriormente processados, armazenados e analisados por softwares especializados em detecção e classificação de falhas. Essa estratégia favorece a rastreabilidade das inspeções, a comparação

temporal do estado estrutural das pás e a aplicação de técnicas de visão computacional e aprendizado de máquina, ampliando a precisão do diagnóstico e reduzindo a dependência exclusiva da avaliação humana.

Diante desse cenário, cresce a demanda por soluções automatizadas e inteligentes que viabilizem inspeções mais frequentes, seguras e economicamente viáveis, especialmente em ambientes confinados e de difícil acesso. Nesse sentido, as tecnologias associadas à Indústria 4.0, como robótica móvel, sensores inteligentes, visão computacional e sistemas ciberfísicos, oferecem uma base sólida para o desenvolvimento de sistemas avançados de inspeção e manutenção preditiva em aerogeradores.

Inserido nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento e a adaptação de um robô móvel autônomo, baseado na plataforma RoboMaster S1, explorando seu potencial como plataforma robótica de inspeção não destrutiva, visando demonstrar a viabilidade do uso de soluções de baixo custo e alta flexibilidade para a modernização dos processos de inspeção, com redução de riscos operacionais, custos de manutenção e aumento da confiabilidade dos sistemas de geração de energia eólica (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016; MONOSTORI, 2014).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Pás eólicas: estrutura e modos de falha

As pás eólicas são componentes estruturais fundamentais dos aerogeradores, responsáveis pela conversão da energia cinética do vento em energia mecânica. Essas estruturas são fabricadas predominantemente com materiais compósitos, como fibras de vidro e resinas poliméricas, devido à elevada resistência mecânica e ao baixo peso específico. Entretanto, tais materiais estão sujeitos a processos de degradação ao longo da vida útil da pá.

Segundo Tavner (2012), *“as pás de turbinas eólicas operam sob condições ambientais severas, sendo continuamente expostas a cargas de fadiga, umidade, erosão e variações térmicas”*. Essas condições favorecem o surgimento de defeitos estruturais, como trincas, delaminações, falhas de adesão e danos internos, que podem comprometer a eficiência aerodinâmica e a segurança operacional.

Ciang, Lee e Bang (2008) afirmam que *“falhas estruturais em pás eólicas, quando não detectadas precocemente, podem evoluir para falhas catastróficas, resultando em elevados custos de manutenção e indisponibilidade do sistema”*. Dessa forma, a inspeção

periódica dessas estruturas torna-se indispensável para garantir a confiabilidade dos aerogeradores.

Diante da complexidade estrutural das pás eólicas e da diversidade de modos de falha possíveis, torna-se essencial a adoção de técnicas adequadas para a avaliação de sua integridade, o que conduz ao uso de métodos de ensaio não destrutivo.

2.2 Ensaios não destrutivos aplicados à inspeção de pás eólicas

Os ensaios não destrutivos (END) são técnicas utilizadas para avaliar a integridade estrutural de componentes sem causar danos permanentes. No contexto das pás eólicas, os métodos mais empregados incluem inspeção visual, ultrassom, termografia infravermelha e emissão acústica.

De acordo com Maldague (2001), *“a termografia infravermelha permite a detecção de defeitos subsuperficiais por meio da análise de contrastes térmicos”*, sendo amplamente utilizada na inspeção de materiais compósitos. No entanto, a aplicação dessas técnicas de forma manual apresenta limitações significativas relacionadas ao acesso às estruturas, à necessidade de paralisação das turbinas e aos riscos à segurança dos operadores.

Heo e Na (2025) destacam que *“os métodos tradicionais de inspeção de pás eólicas são, em geral, demorados, onerosos e fortemente dependentes da experiência humana”*, o que evidencia a necessidade de soluções automatizadas capazes de aumentar a eficiência e a repetibilidade do processo de inspeção.

Essas limitações impulsionam o desenvolvimento de abordagens que reduzam a exposição humana a ambientes perigosos e ampliem a frequência e a padronização das inspeções, cenário no qual a robótica móvel se apresenta como uma alternativa promissora.

2.3 Robótica móvel aplicada à inspeção industrial

A robótica móvel tem se consolidado como uma alternativa eficiente para a inspeção de estruturas complexas e de difícil acesso. Robôs móveis permitem a redução da exposição humana a ambientes perigosos, além de possibilitar inspeções mais frequentes e padronizadas (BALZA et al., 2025).

Segundo Siegart, Nourbakhsh e Scaramuzza (2011), *“robôs móveis são cada vez mais utilizados em tarefas de inspeção industrial devido à sua capacidade de navegar de forma autônoma e coletar dados em ambientes inacessíveis ou inseguros para seres humanos”*. No caso das pás eólicas, a robótica móvel possibilita a inspeção do interior da estrutura, região que permanece pouco explorada por métodos convencionais.

Dudek e Jenkin (2010) ressaltam que *“a integração de sensores e sistemas de controle permite que robôs móveis executem tarefas de inspeção com maior precisão e consistência do que abordagens manuais”*, reforçando o potencial dessas tecnologias para aplicações industriais.

Para que essas plataformas operem de forma eficiente no interior das pás eólicas, é necessário enfrentar desafios relacionados à navegação e ao sensoriamento em ambientes confinados.

2.4 Navegação autônoma e sensoriamento em ambientes confinados

A navegação autônoma em ambientes confinados apresenta desafios específicos, como espaços reduzidos, geometrias irregulares e ausência de referências externas. Para superar essas limitações, é fundamental o uso de sensores embarcados capazes de fornecer informações sobre proximidade, alinhamento e limites do percurso.

Sensores de distância, como ultrassônicos e infravermelhos, são amplamente utilizados em robôs móveis devido à sua simplicidade e baixo custo. Segundo Siegwart et al. (2011), *“o sensoriamento adequado é essencial para garantir a navegação segura e estável de robôs móveis em ambientes restritos”*. A combinação entre sensoriamento e controle possibilita o deslocamento autônomo e a manutenção da trajetória em espaços confinados, como o interior de pás eólicas.

Além do sensoriamento para navegação, a capacidade de coletar informações sobre o estado estrutural das pás é fundamental, o que torna a inspeção visual um elemento central nos sistemas robóticos de inspeção.

2.5 Indústria 4.0 e manutenção preditiva

O conceito de Indústria 4.0 envolve a integração de sistemas ciberfísicos, automação avançada e coleta inteligente de dados, promovendo mudanças significativas nos processos industriais. No setor energético, essas tecnologias possibilitam a adoção de estratégias de manutenção preditiva, baseadas no monitoramento contínuo das condições operacionais.

Lee, Bagheri e Kao (2015) afirmam que *“a manutenção preditiva, viabilizada por sistemas ciberfísicos, reduz custos operacionais e aumenta a confiabilidade dos sistemas industriais”*. A utilização de robôs móveis como plataformas de inspeção está alinhada a esse conceito, pois permite a coleta sistemática de dados e a identificação precoce de falhas estruturais.

Nesse contexto, a inspeção visual baseada em dados digitais assume papel estratégico, especialmente quando integrada a sistemas inteligentes de análise e tomada de decisão.

2.6 Inspeção visual baseada em imagens e vídeos

A inspeção visual é uma das técnicas mais empregadas para a identificação de defeitos estruturais em pás eólicas, sendo tradicionalmente realizada por operadores humanos por meio de inspeções diretas ou com auxílio de equipamentos de acesso. Essa abordagem permite a detecção de falhas superficiais, como trincas, delaminações visíveis e erosão, desempenhando papel relevante nos processos de avaliação da integridade estrutural das pás.

Com o avanço das tecnologias de captura de imagens e vídeos de alta resolução, a inspeção visual tem evoluído para sistemas capazes de registrar de forma contínua e detalhada as superfícies internas e externas das pás. Segundo Heo e Na (2025), a utilização de dispositivos de captura visual embarcados amplia a cobertura da inspeção e reduz a dependência de procedimentos manuais, contribuindo para maior segurança operacional e eficiência do processo.

A utilização de imagens e vídeos como fonte de dados possibilita que as informações visuais coletadas sejam armazenadas, processadas e analisadas por softwares especializados em detecção e classificação de falhas estruturais. Du et al. (2020) destacam que a aplicação de técnicas de visão computacional e aprendizado de máquina sobre dados visuais permite a identificação automática de defeitos recorrentes, além de favorecer a rastreabilidade das inspeções e a comparação temporal do estado estrutural das pás, reduzindo a subjetividade inerente à avaliação exclusivamente humana.

Quando integrada a plataformas robóticas móveis, a inspeção visual baseada em imagens e vídeos torna-se ainda mais eficiente, especialmente em ambientes confinados e de difícil acesso, como o interior das pás eólicas. Essa integração possibilita a coleta sistemática e padronizada de dados, com maior consistência e repetibilidade dos resultados, estando alinhada aos princípios da Indústria 4.0 e às estratégias de manutenção preditiva baseadas em sistemas ciberfísicos e análise inteligente de dados (LEE; BAGHERI; KAO, 2015; MONOSTORI, 2014).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada de forma incremental, com estudo teórico e análise técnica da plataforma robótica, além do desenvolvimento

experimental. O objetivo principal foi compreender as limitações do sistema escolhido e propor adaptações que permitissem sua operação autônoma no contexto de inspeção de pás eólicas.

3.1 Montagem e Estudos iniciais

Inicialmente, foi realizado um estudo detalhado da plataforma robótica DJI RoboMaster S1, com o objetivo de compreender sua arquitetura mecânica, eletrônica e computacional, bem como suas limitações e potencialidades para aplicações em inspeção não destrutiva. Essa etapa incluiu a análise dos sistemas de locomoção, dos atuadores disponíveis, da capacidade de processamento embarcada e das interfaces de comunicação nativas da plataforma.

Paralelamente, foi conduzida uma avaliação técnica da viabilidade de acoplamento de componentes físicos externos ao robô, considerando aspectos como espaço físico disponível, capacidade de carga, consumo energético e impacto na estabilidade e mobilidade do sistema. Essa análise foi fundamental para garantir que a integração de sensores adicionais não comprometesse o desempenho operacional do robô, especialmente em ambientes confinados e de geometria restrita, como o interior de pás eólicas.

A escolha da plataforma DJI RoboMaster S1 deveu-se principalmente à sua agilidade, dimensões compactas e arquitetura modular, características que favorecem o deslocamento em seções estreitas e de difícil acesso. Além disso, o sistema de tração omnidirecional do robô permite manobras precisas, o que é essencial para operações de inspeção em espaços confinados. Outro fator relevante foi a disponibilidade de uma estrutura mecânica robusta, capaz de suportar adaptações sem comprometer a integridade do equipamento.

Entretanto, a plataforma apresenta uma arquitetura de software fechada, típica do ecossistema DJI, o que impõe restrições ao controle de baixo nível e à persistência dos algoritmos embarcados. Para contornar essa limitação, foram empregadas técnicas de engenharia reversa, possibilitando o estabelecimento de comunicação bidirecional entre o robô e sistemas externos de controle, bem como a implementação de um mecanismo de controle persistente. Dessa forma, superou-se a limitação nativa do sistema, na qual os scripts baseados em blocos eram perdidos após o desligamento do hardware, permitindo maior autonomia e flexibilidade operacional.

Após a análise inicial, procedeu-se à montagem e à configuração do robô, considerando tanto os componentes originais da plataforma quanto os elementos adicionais utilizados no projeto. Nessa fase, foram realizados testes básicos de funcionamento,

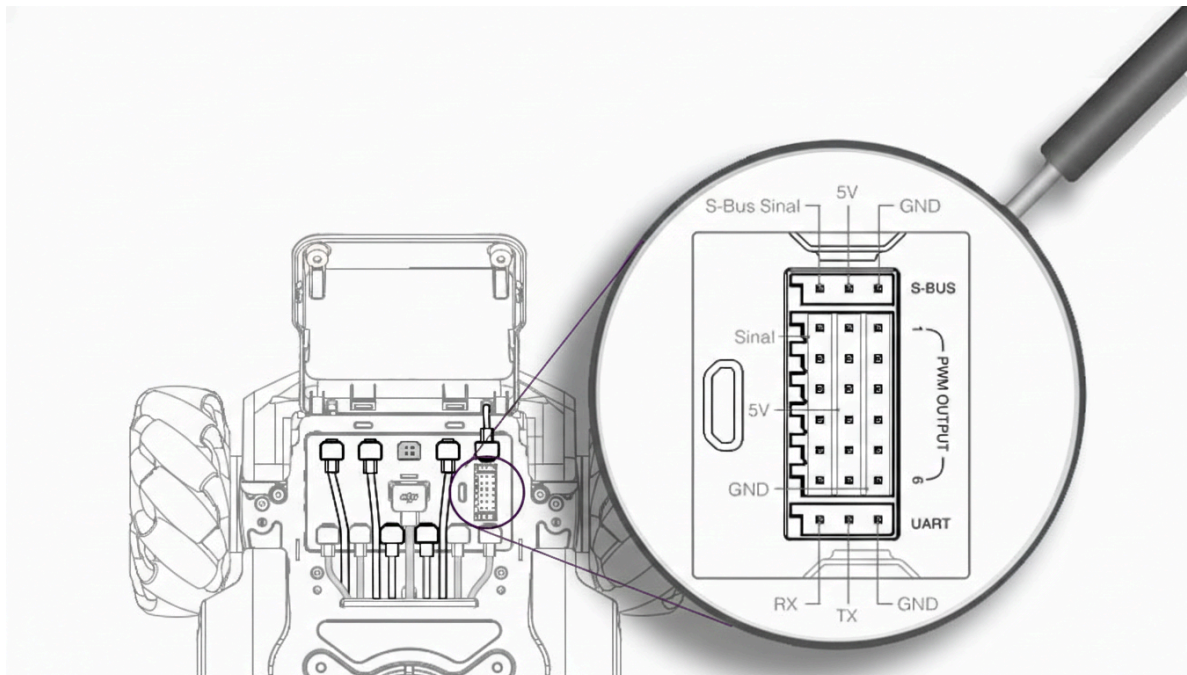
calibração dos sistemas de movimento e verificação da estabilidade do robô em diferentes ambientes, verificando margens de erro, cálculos de movimento e validação dos protocolos de comunicação oferecidos pelo dispositivo.

3.2 Desenvolvimento da Comunicação e Controle

Após a montagem, foi conduzido um estudo aprofundado da documentação técnica disponibilizada pelo fabricante, bem como de materiais desenvolvidos pela comunidade de usuários, fóruns e vídeos. Essa análise permitiu identificar as limitações impostas pela versão do RoboMaster S1 que dificulta, especialmente, o acesso de baixo nível do hardware e aos protocolos de comunicação proprietários.

Com base nas limitações identificadas, realizou-se um estudo específico dos sistemas de comunicação utilizados pelo robô, com foco nos barramentos *Controller Area Network* (CAN), *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART) e *Serial Bus* (SBUS). Essa etapa envolveu a compreensão do fluxo de dados entre os módulos internos do robô, bem como a análise da viabilidade de interceptação e utilização desses sinais para controle externo. O estudo desses protocolos foi essencial para permitir a integração de microcontroladores externos, ampliar as capacidades de controle do sistema e definir os principais métodos de controle externo.

Figura 1: Vista aproximada da plataforma robótica, evidenciando os pontos de conexão para os módulos de controle

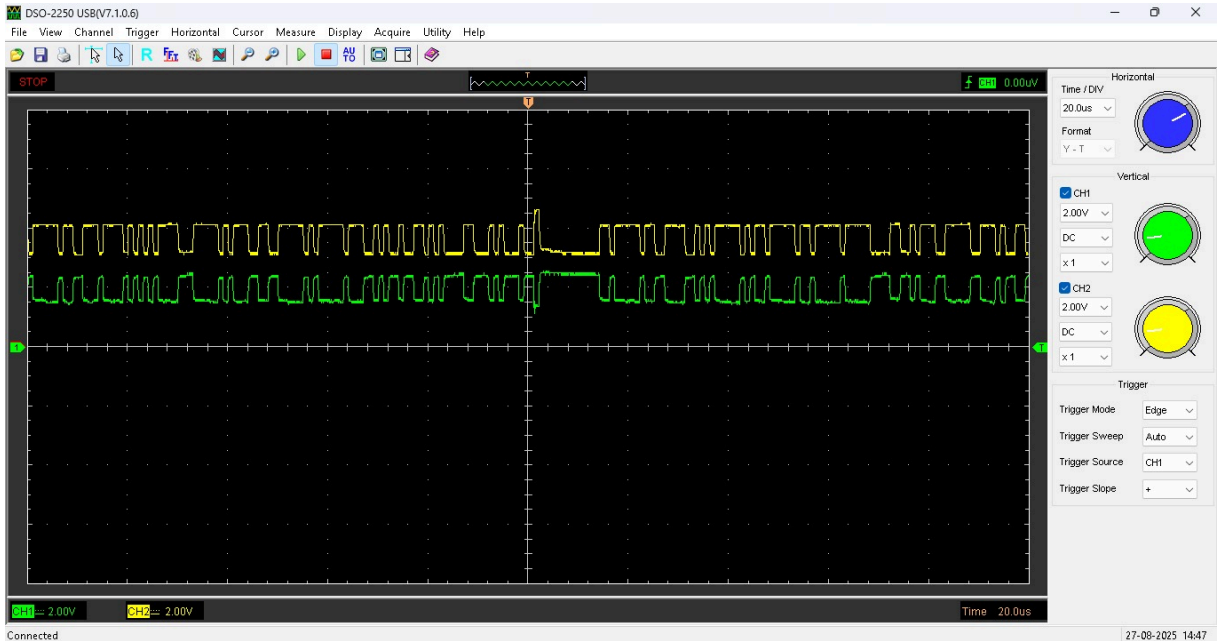


Fonte: DJI (2020)

A definição do método de controle seguiu uma análise comparativa dos protocolos disponíveis na interface física do robô:

- UART: Descartado após testes iniciais devido à ausência de alimentação lógica estável durante a execução de scripts nativos.
- CAN: Embora a camada física tenha sido validada via osciloscópio (sinais diferenciais característicos, como apresentado na Figura 2), a decodificação dos frames de comando via aplicativo apresentou inconsistências na identificação das propriedades da rede.
- SBUS: Protocolo selecionado após demonstrar recepção coerente e estável dos comandos.


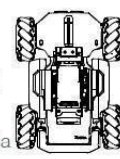
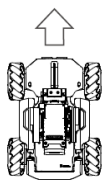
Figura 2: Pacote de dados de CANH e CANL capturado durante a movimentação do RoboMaster S1.

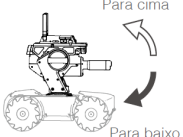
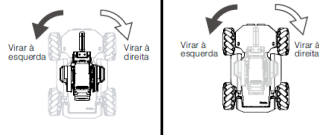


Fonte: autores (2026)

O uso do SBUS permitiu a implementação de comandos persistentes, viabilizando trajetórias autônomas baseadas em tempo e ação. O desenvolvimento do firmware foi realizado na Arduino IDE, versão 1.8.2 e no VS Code, ferramentas escolhidas pela robustez na gestão de bibliotecas para microcontroladores.

Tabela 1: Mapeamento de Funções e Canais da Porta S-Bus para Controle do Robô

Canais de controle da porta S-Bus	Modo Chassi Principal	Modo Livre	Canais de Controle		
			Canal de controle	Compensação	Estado
Canal 1	Movimenta o chassi lateralmente	Movimenta o chassi lateralmente		 <p>Esquerda Direita</p>	
Canal 2	Movimenta o chassi para frente e para trás	Movimenta o chassi para frente e para trás			 <p>Para a frente</p> <p>Para trás</p>

Canal 3	Controlar o <i>pitch</i> (inclinação) do gimbal	/		
Canal 4	Controlar o <i>yaw</i> (guinada) do gimbal	Controlar o <i>yaw</i> (guinada) do chassi		
Canal 5	Controlar a velocidade de movimento do chassi, com duas opções de velocidade		-100	Rápida
			100	Lenta
Canal 6	Alternar o modo do chassi, com duas opções: Modo Chassi Principal Modo Livre		-100	Modo Chassi Principal
			100	Modo Livre
Canal 7	Controlar a inicialização (armar) do chassi, com dois estados: O chassi está pronto (armado) quando produz torque de saída. O chassi desliga (desarma) quando não produz torque de saída.		100	Preparar (Armar)
			-100	Iniciar (Desarmar)

Fonte: DJI (2020)

3.3 Prototipagem Mecânica

A necessidade de organizar os componentes eletrônicos (microcontrolador e sensores) levou ao desenvolvimento de um sistema de suporte modular em 3D utilizando filamento PLA. O projeto original foi dividido em:

1. Base: Fixada diretamente à carcaça do robô.
2. Case de Controle: Compartimento para o microcontrolador com orifícios de conexão.
3. Suportes Periféricos: Módulos laterais para os sensores de ultrassom.

A modelagem foi realizada no Tinkercad, adotando um sistema de encaixes tipo "gaveta" para facilitar substituições. Após testes iterativos, o design foi otimizado: a caixa foi ampliada para acomodar a haste da câmera Insta360 X4, enquanto a quantidade de sensores

foi reduzida para quatro (três na caixa e um frontal), otimizando o tempo de impressão e o consumo de material no fatiador Ultimaker Cura.

3.4 Integração e Automação de Captura

Para a inspeção visual, utilizou-se a câmera Insta360 X4. A escolha baseou-se na capacidade de processamento com IA, campo de visão 360° e alta resolução.

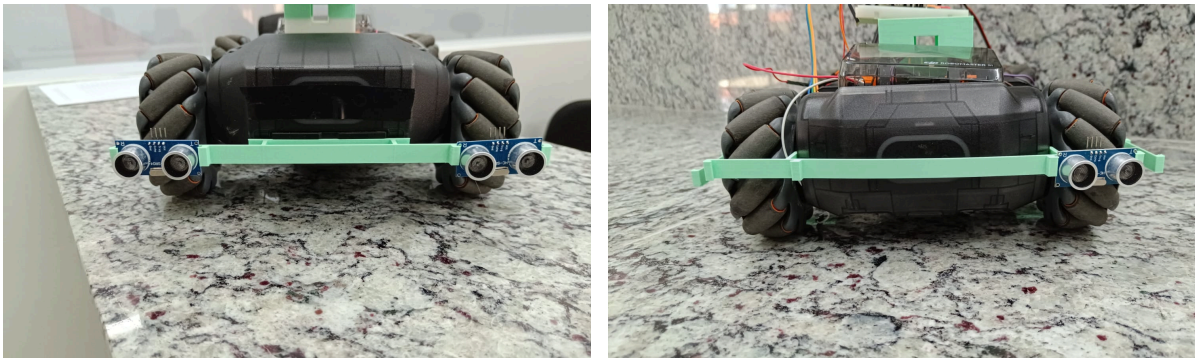
Para contornar o alto consumo de bateria em modo vídeo, desenvolveu-se um sistema de controle via ESP32 utilizando Bluetooth Low Energy (BLE). O firmware foi baseado no projeto de código aberto de *pchwalek* (GitHub), adaptado para a versão X4. O sistema simula um controle remoto GPS, disparando fotos estáticas a cada 5 segundos. Esta abordagem não apenas preservou a autonomia da bateria, como permitiu a georreferenciação das imagens através de um sensor GPS conectado ao ESP32, vinculando as coordenadas espaciais diretamente aos metadados das fotos.

3.5 Sistema de Sensoriamento

O sistema de sensoriamento do robô foi baseado no uso de sensores de distância ultrassônicos do modelo HC-SR04, escolhidos por sua simplicidade, baixo custo e facilidade de integração com microcontroladores. Esses sensores foram empregados com o objetivo de detectar a proximidade das paredes internas da pá e auxiliar no alinhamento do robô durante o deslocamento.

Na configuração inicial do sistema, foram utilizados oito sensores ultrassônicos distribuídos ao redor do robô, posicionados na região frontal, traseira e nas laterais, com a finalidade de permitir a detecção de obstáculos em múltiplas direções, como mostra a Figura 3. Entretanto, durante os testes experimentais e a análise da geometria interna das pás eólicas, observou-se que a estrutura interna é composta predominantemente por seções longitudinais contínuas, sem ramificações ou obstáculos frontais relevantes ao longo do percurso.

Figura 3: Visão frontal e traseira do RoboMaster S1 com 8 sensores ultrassônicos.

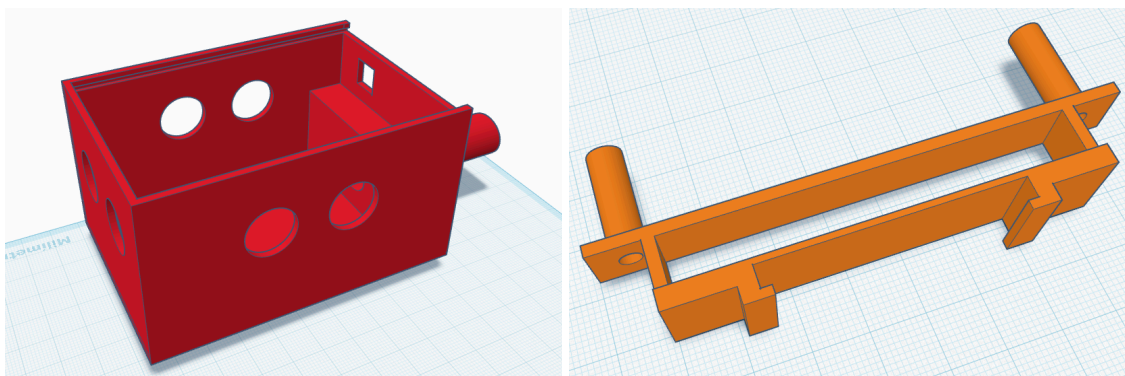


Fonte: autores (2026)

Diante dessa constatação, os sensores posicionados nas regiões frontal e traseira mostraram-se pouco relevantes, reduzindo assim para 4 sensores. Assim, a arquitetura de sensoriamento foi simplificada, mantendo-se apenas os sensores laterais, frente e trás para identificar as extremidades do percurso, os quais passaram a ser utilizados para a centralização do robô no interior da pá.

O novo modelo sugerido contempla simultaneamente todos os componentes utilizados no projeto dentro da Case de Controle. O design integra uma haste específica para o posicionamento e a remoção da câmera Insta360. O suporte frontal, também reestruturado, acomoda um único sensor ultrassônico. Tais modificações resultaram em uma economia significativa, tanto no tempo de impressão quanto no volume de filamento PLA utilizado, como apresentado na Figura 4.

Figura 4: Modelos 3D da Case de Controle e do Suporte Frontal após serem modificados.



Fonte: autores (2026)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados alcançados até o momento atual do projeto estão principalmente relacionados à validação parcial da plataforma robótica, dos métodos de controle externo e da viabilidade mecânica e eletrônica das adaptações sugeridas. É importante destacar que o robô ainda está em estágio de protótipo funcional, sem a implementação do modo automático completo, da integração total dos sensores de distância ou da sincronização entre locomoção, sensoramento e captura de imagens.

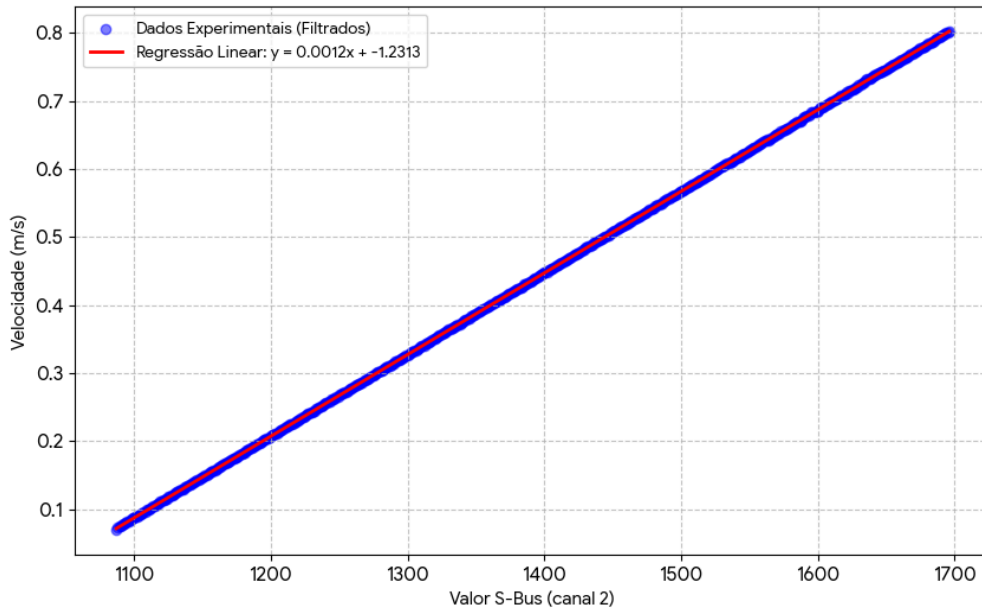
Os primeiros testes mostraram que a plataforma RoboMaster S1 pode realizar movimentos controlados de maneira estável no modo manual. A estabilidade mecânica permaneceu dentro de limites aceitáveis, sem afetar significativamente a mobilidade ou o centro de massa do robô.

Em relação ao sistema de controle, a opção pelo protocolo SBUS revelou-se apropriada. Ao contrário das opções analisadas (UART e CAN), o SBUS ofereceu uma comunicação estável e consistente, possibilitando a execução de comandos contínuos mesmo após reinicializações do sistema. Tal resultado é significativo, pois ultrapassa uma restrição importante do ecossistema fechado do RoboMaster S1 e entra na questão de criação de trajetórias autônomas em pesquisas futuras. Contudo, até agora, o controle adotado se fundamenta em ações temporizadas, e não em realimentação sensorial contínua, o que restringe a exatidão e a capacidade de adaptação do movimento.

4.1 Análise de Deslocamento Longitudinal (Canal 2 S-Bus)

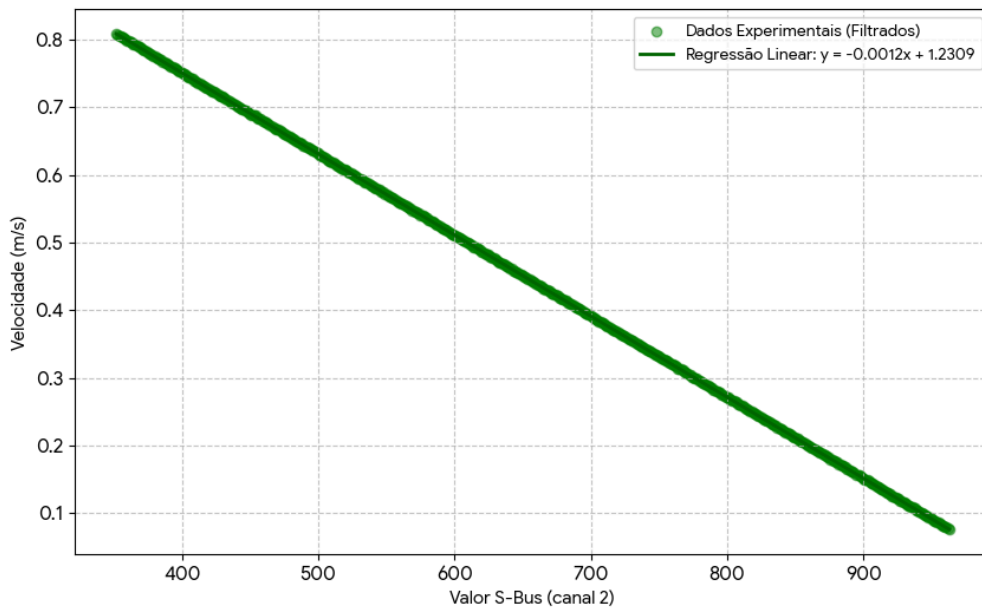
Para validar a precisão do controle via SBUS no eixo longitudinal (frente e trás), foram realizados ensaios de velocidade em malha fechada. Como demonstrado nas Figuras 5 e 6, a relação entre o comando digital e a velocidade linear (m/s) apresentou uma linearidade quase perfeita, com um coeficiente de determinação (R^2) de 1,0000. As equações obtidas, $y = 0,0012x - 1,2313$ (frente) e $y = -0,0012x + 1,2309$ (trás), permitem que o algoritmo de navegação converta comandos de um microcontrolador externo diretamente em unidades métricas, garantindo previsibilidade no avanço do robô dentro da pá eólica.

Figura 5: Relação entre canal 2 S-Bus e velocidade de deslocamento frontal



Fonte: autores (2026)

Figura 6: Relação entre canal 2 S-Bus e velocidade de deslocamento traseiro

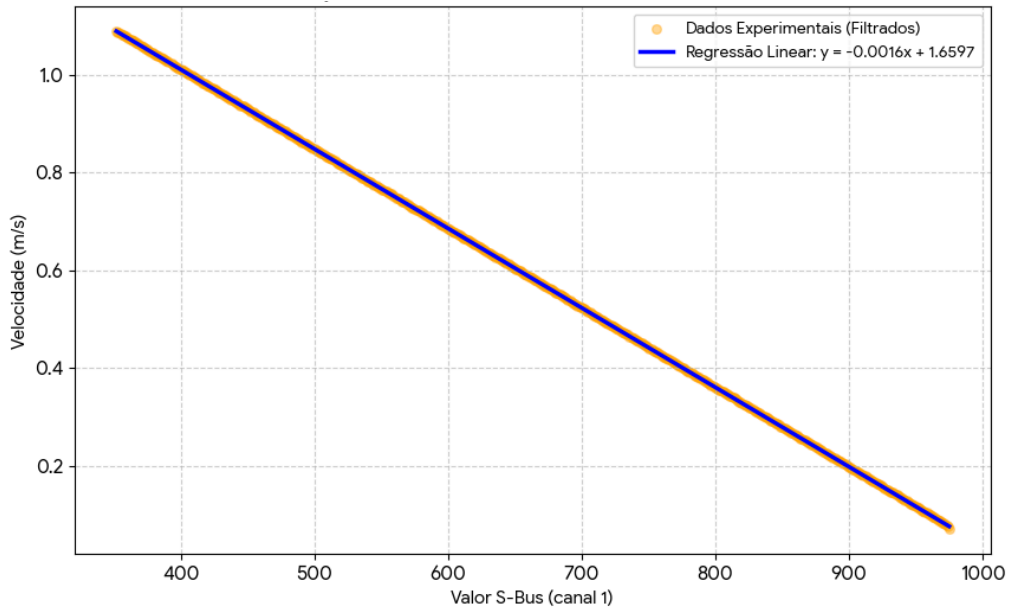


Fonte: autores (2026)

4.2 Análise de Deslocamento Lateral (Canal 1 S-Bus)

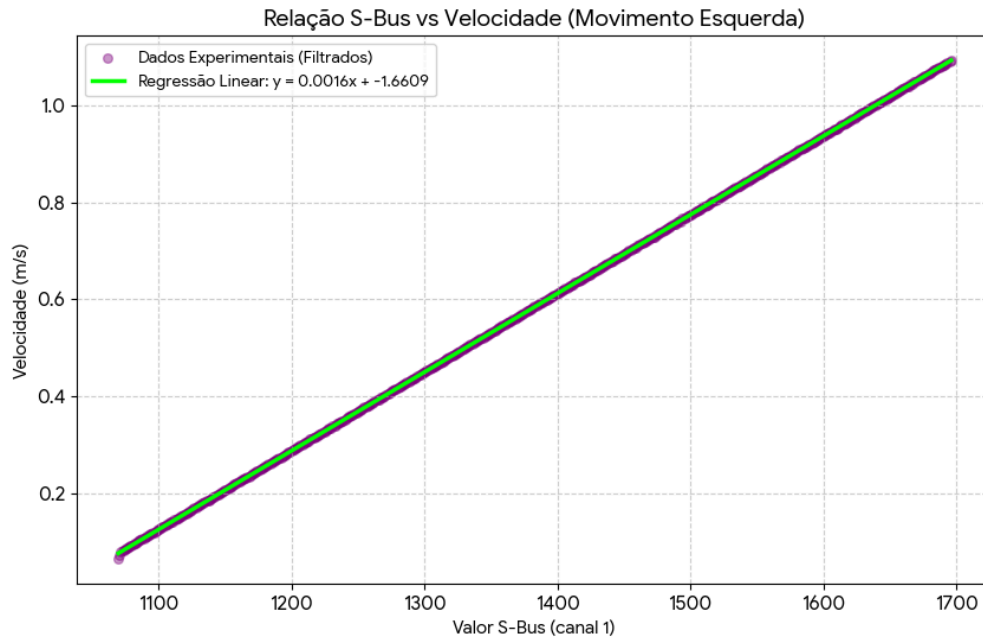
A relação entre o comando digital e a velocidade linear resultante em metros por segundo (m/s) foi modelada para garantir que o robô possa realizar manobras de centralização precisas dentro da pá eólica. Conforme ilustrado nas Figuras 7 e 8, o sistema apresenta uma resposta linear extremamente estável em ambos os sentidos.

Figura 7: Relação entre canal 1 S-Bus e velocidade de deslocamento lateral direito



Fonte: autores (2026)

Figura 8: Relação entre canal 1 S-Bus e velocidade de deslocamento lateral esquerdo



Fonte: autores (2026)

A análise estatística dos dados resultou nas seguintes funções de transferência:

- Movimento para Direita: $y = -0,0016x + 1,6597$ ($R^2=1,0000$)
- Movimento para Esquerda: $y = 0,0016x - 1,6609$ ($R^2=1,0000$)

A obtenção de um R^2 de 1,0000 valida a eficácia da engenharia reversa aplicada ao firmware original, permitindo um controle determinístico da velocidade. Nota-se então que a magnitude do coeficiente angular (0,0016) é idêntica para ambos os lados, o que comprova a simetria mecânica das rodas Mecanum e a precisão do sistema de malha fechada.

4.3 Comportamento de Guinada (Canal 4 S-Bus)

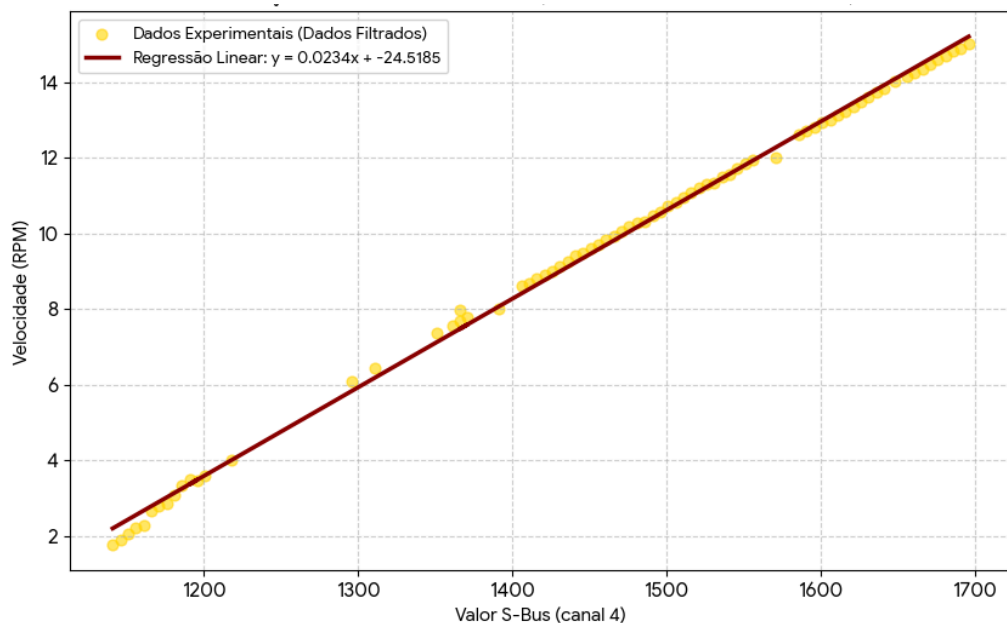
Por fim, a resposta angular do sistema foi testada nos sentidos horário e anti-horário utilizando o sensor magnetômetro HMC5883L. A aplicação de filtros estatísticos para a remoção dos pontos paralelos (degraus de leitura) resultou em curvas de resposta lineares e estáveis, como ilustrado nas Figuras 9 e 10.

As funções de transferência obtidas para a velocidade angular em rotações por minuto (RPM) são:

- Sentido Horário: $y = 0,0234x - 24,52$ ($R^2=0,9981$)
- Sentido Anti-horário: $y = -0,0256x + 25,4491$ ($R^2=0,9965$)

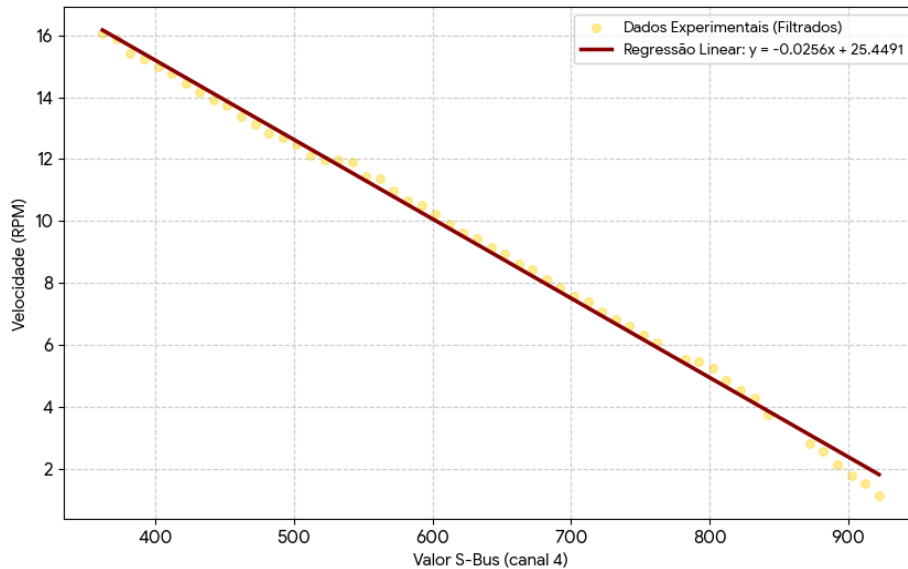
Com um R^2 superior a 0,99 em ambos os ensaios, essas equações consolidam a precisão do sistema em função da eficácia na correção angular e da elevada manobrabilidade da plataforma. Essa fundamentação matemática assegura que as correções de trajetória sejam executadas com estabilidade dinâmica, mitigando oscilações que poderiam comprometer a nitidez das capturas visuais da câmera Insta360 X4, fator determinante para a detecção confiável de falhas estruturais durante a inspeção das pás eólicas.

Figura 9: Relação entre canal 4 S-Bus e velocidade guinada no sentido horário



Fonte: autores (2026)

Figura 10: Relação entre canal 4 S-Bus e velocidade guinada no sentido anti-horário



Fonte: autores (2026)

4.4 Sistema de sensoriamento

Em relação ao sistema de sensoriamento, apesar dos sensores ultrassônicos HC-SR04 terem sido integrados fisicamente e testados de forma individual, a calibração final e a fusão dos dados para a tomada de decisão automática ainda não foram executadas completamente. Os testes iniciais mostraram que diminuir a quantidade de sensores de oito para quatro é compatível com a geometria interna usual das pás eólicas, tornando o sistema mais simples sem comprometer sua funcionalidade de forma significativa. No entanto, a falta de dados consolidados de distância impede, neste momento, a confirmação do alinhamento automático e a detecção confiável do fim de percurso. Assim, os resultados sugerem que a proposta é tecnicamente viável, mas ainda está incompleta.

5 CONCLUSÃO

Este estudo descreveu o desenvolvimento inicial de um sistema robótico fundamentado na plataforma DJI RoboMaster S1, com ênfase na modificação para inspeção não destrutiva do interior de pás eólicas. Os resultados alcançados até agora indicam que a plataforma tem potencial para essa aplicação, principalmente por causa de suas dimensões compactas, mobilidade e habilidade de adaptação mecânica e eletrônica.

A engenharia reversa e a adoção do protocolo SBUS possibilitaram o controle persistente e a superação das limitações impostas pelo ecossistema fechado do fabricante, além de abrirem oportunidades para automação futura.

É relevante mencionar que o robô ainda não está em sua configuração definitiva. Até agora, não foram implementados o modo automático completo, a integração dos sensores de distância para navegação autônoma, nem a sincronização entre movimento, sensoriamento e captura de imagens. Assim, os resultados expostos devem ser considerados como validações parciais de conceito.

Como direções para trabalhos futuros, podemos citar a integração completa do sistema, a aplicação de algoritmos de controle fundamentados em realimentação sensorial, a combinação dos dados de distância com a navegação do robô e a vinculação direta das imagens capturadas à posição ao longo da pá. A consolidação dessas etapas possibilitará uma avaliação mais sólida da viabilidade do sistema como uma solução automatizada para a inspeção interna de pás eólicas.

REFERÊNCIAS

- BALZA, M.; GOLDBARG, M. A.; SILVA, S. N.; SILVA, L. M. D.; FERNANDES, M. A. C. A Real-Time Safe Navigation Proposal for Mobile Robots in Unknown Environments Using Meta-Heuristics. *IEEE Access*, New York, v. 13, p. 23987–24013, 2025. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3536081.
- BANGERT, P. et al. Data-driven condition monitoring of wind turbines. In: *ASSET MANAGEMENT CONFERENCE 2017*, London. *Proceedings...* London: IET, 2018. p. 1–6. DOI: 10.1049/cp.2017.0423.
- BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS, N.; BOSSANYI, E. *Wind energy handbook*. 2. ed. Chichester: Wiley, 2011.
- CARROLL, J.; MCDONALD, A.; MCMILLAN, D. Failure rate, repair time and unscheduled O&M cost analysis of offshore wind turbines. *Wind Energy*, v. 19, n. 6, p. 1107–1119, 2016.
- CHWALEK, P. *insta360_ble_esp32: Arduino library for controlling Insta360 cameras via BLE using ESP32*. [S.l.]: GitHub, 2023. Disponível em: https://github.com/pchwalek/insta360_ble_esp32. Acesso em: 18 jan. 2026.

CIANG, Chia-Cheng; LEE, Jae-Ryeong; BANG, Hyo-Jong. Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods. *Measurement Science and Technology*, Bristol, v. 19, n. 12, p. 1–20, 2008.

CIANG, C. C.; LEE, J. R.; BANG, H. J. Structural health monitoring for a wind turbine system: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 12, n. 4, p. 984–1007, 2008.

DIMITROVA, Mariya; AMINZADEH, Ahmad; MEIABADI, Mohammad Saleh; KARGANROUDI, Sasan Sattarpanah; TAHERI, Hossein; IBRAHIM, Hussein. A survey on non-destructive smart inspection of wind turbine blades based on Industry 4.0 strategy. *Applied Mechanics*, Basel, v. 3, n. 4, p. 1299–1326, 16 nov. 2022.

DJI. *RoboMaster S1 user manual*. Version 1.8. Shenzhen: DJI, 2020. Disponível em: <https://www.dji.com/robomaster-s1>. Acesso em: 18 jan. 2026.

DU, Y.; ZHOU, S.; JING, X.; PENG, Y.; WU, H.; KWOK, N. Damage detection techniques for wind turbine blades: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Amsterdam, v. 141, p. 106445, 2020.

DUDEK, Gregory; JENKIN, Michael. *Computational principles of mobile robotics*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

GWEC – GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. *Global wind report 2023*. Brussels: GWEC, 2023.

HAU, E. *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*. 3. ed. Berlin: Springer, 2013.

HEO, S.-J.; NA, W. S. Review of Drone-Based Technologies for Wind Turbine Blade Inspection. *Electronics*, v. 14, n. 2, p. 227, 2025. DOI: 10.3390/electronics14020227. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/electronics14020227>.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for Industrie 4.0 scenarios. In: *Proceedings of the 49th Hawaii International Conference on System Sciences*. Honolulu: IEEE, 2016. p. 3928–3937.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *Renewable Capacity Statistics 2022*. Abu Dhabi: IRENA, 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2022/Apr/Renewable-Capacity-Statistics-2022>. Acesso em: 25 jan. 2026.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H.-A. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, Amsterdam, v. 3, p. 18–23, 2015.

MALDAGUE, Xavier P. V. *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. New York: John Wiley & Sons, 2001.

MONOSTORI, L. Cyber-physical production systems: roots, expectations and R&D challenges. *Procedia CIRP*, v. 17, p. 9–13, 2014.

NIJSSEN, R. P. L. *Fatigue life prediction and strength degradation of wind turbine rotor blade composites*. 2007. Tese (Doutorado) – Delft University of Technology, Delft, 2007.

SIEGWART, Roland; NOURBAKHSI, Illah R.; SCARAMUZZA, Davide. *Introduction to autonomous mobile robots*. 2. ed. Cambridge: MIT Press, 2011.

SØRENSEN, B. F. et al. Improved design of large wind turbine blade of fibre composites based on studies of scale effects. *Journal of Composite Materials*, v. 38, n. 4, p. 271–292, 2004.

TAVNER, Peter. *Offshore wind turbines: reliability, availability and maintenance*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2012.