DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE AUTÔNOMO DE ENXAME DE DRONES

Marcos Antonio T. Oliveira, Hian R. Bastos, Alexandro G. Brito

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico de Joinville
Joinville/SC, Brasil (alexandro.brito@ufsc.br)

Resumo: A utilização de veículos aéreos não tripulados (VANT's), também conhecidos como "drones", é hoje uma realidade em diversas aplicações, incluindo-se as áreas de defesa, logística, manutenção e monitoramento, segurança pública, agronegócio, entre outras. Em face do progressivo aumento das demandas tecnológicas, fazem-se necessários drones com capacidade de atuarem em aplicações que envolvem a ação coordenada de múltiplos deles, denominada na literatura como "enxame de drones". Neste sentido, surge a necessidade de estratégias de controle e navegação cada vez aprimoradas, seja para controle individual das trajetórias de cada drone, seja para a coordenação operacional de alto nível. Este artigo apresenta o status de desenvolvimento de um ambiente de controle remoto de enxame de drones. Apresentar-se-ão as etapas de implementação dos drones, bem como do desenvolvimento do ambiente de operação remota em ROS/Gazebo. Esta etapa é essencial para a proposição de missões tecnológicas em que os drones trabalhem cooperativamente para solução de um problema de engenharia.
Palavras-chave: quadricópteros; sistemas de controle; enxame de drones

INTRODUÇÃO

A aplicação contemporânea de drones encontra-se bastante evoluída, estando esta tecnologia presente em inúmeros problemas práticos, incluindo sensoriamento remoto, transporte de cargas, agronegócio, segurança e monitoramento, etc. (ABDELKADER, 2021; DE MORAES, 2022). Apesar disso, há ainda muito desafios tecnológicos a serem enfrentados. Adicionalmente, tem sido comum a utilização de "enxame de drones" para a realização de ações em que a coordenação das tarefas de cada um dos veículos é uma necessidade prática. Isso exige uma camada superior em termos de comando e monitoramento, uma vez que cada um dos quadricópteros deve possuir o seu próprio sistema de controle embarcado, mas cujas trajetórias sejam coordenadas por um sistema supervisório global. Dessa forma, as ações individuais dos veículos necessitam ser comandadas seja remotamente por uma estação-base, seja por algoritmos interativos drone-drone implantados em cada veículo. Tais estratégias são, então, responsáveis pelo monitoramento e coordenação das ações (SAFFRE, 2021; RAJ, 2026; CAMPION, 2019).

Este trabalho apresenta o status atual de desenvolvimento de um sistema de operação e controle de um enxame experimental de drones. O objetivo é pesquisar a integração dos ambientes ROS (AL-BATATI, 2026) e Gazebo (DIMMIG, 2025) operando em um computador-base em solo para coordenação de um conjunto de drones em uma ação conjunta. Estes drones foram pensados para serem de implementação simples em ambiente universitário, utilizando-se sensores e microcontroladores de baixo custo.

MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento do protótipo representa o marco fundamental de transição do projeto da fase teórica para a validação prática. A construção desta plataforma física inicial é crucial, pois consolida a integração dos sistemas e atesta que a arquitetura concebida é capaz de suportar as exigências operacionais. Mais do que um simples modelo de testes, o primeiro VANT implementado atua como a unidade de referência técnica — de baixo custo e alta eficiência — que será replicada para compor o enxame. Em suma, o protótipo estabelece a base física indispensável para que os algoritmos de autonomia e a sincronia inter-veicular possam ser validados com segurança e escalabilidade nos trabalhos futuros.

As simulações concentram-se na visualização e implementação dos algoritmos da camada de *middleware* do drone, uma vez que as malhas de controle de baixo nível contidas no firmware do *PX4 Autopilot* atendem perfeitamente aos requisitos dinâmicos atuais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenvolvimento do veículo aéreo não tripulado (VANT) foi pautado na premissa de conceber uma plataforma de baixo custo, alta modularidade e com capacidade de processamento dedicada para integração de algoritmos de voo autônomo e formação em enxame. A arquitetura de hardware foi dividida em quatro frentes principais: controle de voo, propulsão e energia, telecomunicações e projeto estrutural.

O núcleo computacional do VANT baseia-se em um controlador de voo com arquitetura STM32F405. A escolha por este microcontrolador justifica-se pelo equilíbrio entre custo de aquisição e poder de processamento, provendo as interfaces de comunicação (UARTs e barramentos I2C/SPI) necessárias para a futura integração de módulos GPS, sensores de fluxo óptico e comunicação drone-to-drone.

Acoplado ao controlador de voo, adotou-se um controlador eletrônico de velocidade (ESC) do tipo 4-em-1 com capacidade de corrente contínua de 55 A por canal. O arranjo integrado do ESC 4-em-1 favorece a centralização da massa no centro de gravidade (CG) da aeronave e reduz significativamente a fiação, minimizando interferências eletromagnéticas nos sensores de navegação, conforme Figura 1.

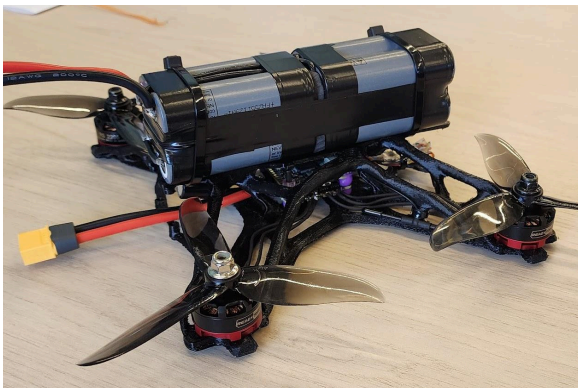


Figura 1: Fotografia detalhada da stack eletrônica (Controladora F405 e ESC 55A) montada no chassi.

O sistema motriz foi dimensionado para operar com alta eficiência geométrica e térmica, garantindo a sustentação de voos de longa duração. Foram empregados motores *brushless* do tipo RS2205. Estes motores oferecem uma excelente curva de torque em regimes de média rotação, perfil ideal para o transporte da carga útil embarcada sem penalizar o consumo elétrico.

Para suprir a demanda energética, maximizando o tempo de operação, desenvolveu-se uma matriz de baterias baseada na tecnologia de Íons de Lítio (Li-Ion), em detrimento das baterias convencionais de Polímero de Lítio (LiPo). O arranjo customizado foi construído utilizando células do formato 21700 na configuração 4S2P (quatro células em série e dois arranjos em paralelo), conforme Figura 2. Este pack entrega uma capacidade aferida de aproximadamente 9.850 mAh, apresentando uma densidade energética significativamente superior, fator determinante para alcançar a marca de 21 minutos de autonomia em voo pairado (*hover*).

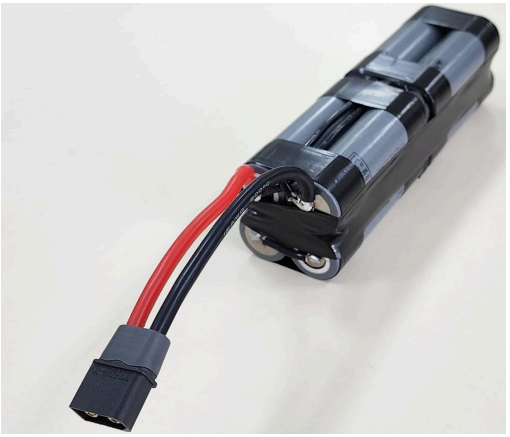


Figura 2: Imagem do pack de baterias Li-Ion 21700 4S2P montado.

O projeto mecânico do chassi (*frame*) do VANT encontra-se atualmente em fase de desenvolvimento e validação prática. A modelagem tridimensional está sendo iterada utilizando o software de CAD Autodesk Fusion 360, buscando a otimização espacial contínua para a acomodação ergonômica da stack eletrônica e do pack de baterias, além do correto alinhamento do centro de massa. Um vista de uma estrutura preliminar é apresentada na Figura 3.



Figura 3: Configuração preliminar do chassi do drone.

Um dos pilares do desenvolvimento estrutural é a aplicação do método de otimização topológica (CAE). O estudo concentra-se primariamente nos braços do drone, por figurarem como os elementos mais solicitados mecanicamente. As simulações computacionais avaliam cenários de cargas combinadas, incluindo o empuxo contínuo gerado

pelos motores, o peso próprio do conjunto, as vibrações induzidas pelos rotores e os esforços resultantes de eventuais impactos. A partir dessas análises de tensão, a malha geométrica tem sido refinada para suprimir material em zonas de baixa solicitação e reforçar áreas críticas.

Nesta etapa atual do projeto, o foco está na transição dos modelos digitais (conversão das malhas otimizadas) para a manufatura aditiva (impressão 3D). Estão sendo realizados testes práticos com diferentes protótipos e configurações de filamentos técnicos para avaliar o comportamento estrutural do chassi no mundo real. O objetivo destas iterações é garantir que o design final atinja a massa projetada (estimada na faixa de 95 g) mantendo a rigidez mecânica necessária para a operação segura. Uma vez validadas as propriedades físicas e os materiais de impressão, o design do *frame* será congelado e padronizado para as demais unidades do enxame.

A confiabilidade do link de rádio é um critério crítico de segurança, especialmente durante as fases de transição para o voo autônomo. O protótipo foi equipado com um receptor de rádio operando no protocolo *Express LRS* (ELRS) na frequência de 2,4 GHz. O protocolo ELRS foi selecionado devido à sua altíssima taxa de atualização (*refresh rate*) e resiliência contra perdas de pacotes (*packet loss*), assegurando comunicação estável mesmo em ambientes industriais com alta poluição de radiofrequência.

Para viabilizar a execução de missões autônomas baseadas em coordenadas geográficas (*waypoints*), a plataforma conta com a integração de um módulo de GPS da *Holybro* conectado diretamente a uma das portas UART do controlador de voo. Este módulo é responsável por fornecer os dados de posicionamento tridimensional, velocidade e orientação em tempo real.

O sistema opera de forma integrada com o firmware *ArduPilot*, que realiza a fusão sensorial dos dados de localização do GPS com as leituras do acelerômetro, giroscópio e barômetro internos. Esta abordagem de filtragem e fusão de dados mitiga o impacto de ruídos de leitura e variações ambientais, como rajadas de vento, garantindo a precisão posicional necessária tanto para a manutenção do voo estável de uma unidade quanto para a futura coordenação de trajetórias em enxame.

A camada de *middleware* posiciona-se hierarquicamente acima do controle de baixo nível (*firmware*). É através dela que enviamos comandos de alto nível, gerenciamos missões e monitoramos as variáveis de estado do drone.

A escolha do ROS-2 para essa camada justifica-se por sua ampla documentação, comunidade ativa e pelo fato de os comandos e primitivas básicas de robótica já estarem nativamente implementados. O ROS-2 é o responsável direto pela transmissão de informações e pela orquestração do sistema distribuído através de tópicos (arquitetura *Publish-Subscribe*). Além dos tópicos convencionais, o ecossistema oferece diferentes abstrações para a comunicação entre nós:

- *Services* (Serviços): Comunicação síncrona do tipo requisição/resposta (*Request/Response*), ideal para transmissões pontuais.
- *Actions* (Ações): Comunicação assíncrona baseada em metas de longo prazo, permitindo feedback em tempo real e a possibilidade de cancelamento durante a execução da missão.

O ecossistema também disponibiliza recursos para o gerenciamento do ciclo de vida dos nós (*Lifecycle Nodes*), alteração dinâmica de parâmetros em tempo de execução e a definição de *namespaces* para isolar tópicos semanticamente idênticos aplicados a múltiplos robôs.

Os nós (*nodes*) e tópicos do ROS-2 encapsulam os dados para que possam ser acessados de forma modular e reutilizável. O desenvolvimento no projeto é híbrido: utiliza-se C++, onde o desempenho e o determinismo temporal são críticos, e Python pela versatilidade e rapidez de prototipagem.

Para viabilizar a operação do enxame, cada drone possui um *namespace* exclusivo que identifica sua precedência.

A inicialização e o controle da simulação acontecem através de linhas de comando no terminal do computador (Interface de Linha de Comando - CLI). O sistema funciona através da integração de três ferramentas principais:

- **O "Cérebro" (ROS-2):** Controla a lógica do enxame e envia as ordens de voo;
- **O "Simulador" (Gazebo):** Cria o mundo virtual em 3D com a física realista (vento, gravidade) onde os drones vão voar;
- **O "Piloto Automático" (Firmware PX4):** Controla os motores de cada drone individualmente para garantir que eles obedeçam aos comandos.

Dentro do simulador, os drones ganham vida em um cenário digital controlado, permitindo visualizar o comportamento do enxame em tempo real antes do teste de campo, conforme ilustrado na Figura 4.

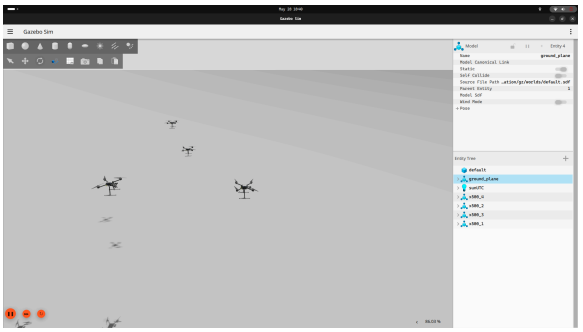


Figura 4: Ambiente de simulação no Gazebo.

Como é mostrado na Figura 5, para acompanhar a saúde e o status de cada um dos quatro drones durante o voo, utilizamos uma central de controle visual chamada *QGroundControl*. Ela funciona como o "painel de controle do piloto", permitindo monitorar:

- **Nível da Bateria:** Para saber o tempo restante de voo de cada unidade.
- **Status dos Sensores:** Verificação de GPS, bússola e sensores de distância.
- **Dados de Telemetria:** Velocidade, altitude e posição exata no mapa em tempo real.

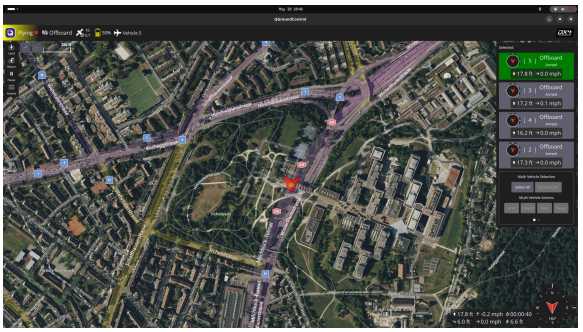


Figura 5: Central de controle visual *QgroundControl* em operação.

CONCLUSÃO

Este artigo apresentou os passos preliminares de desenvolvimento de um ambiente remoto de operação e controle de um enxame de drones. Os drones foram implementados com base em sensores e componentes acessíveis em ambiente universitário, enquanto o ambiente computacional é estabelecido em ROS-2 e Gazebo. Os próximos passos do desenvolvimento incluem a produção de drones adicionais para a composição do enxame, além de plena integração destes com o ambiente de simulação e controle em solo. Vencida esta etapa, iniciam-se os estudos para proposições de missões coordenadas de engenharia com o objetivo de testar e validar a proposta de controle remoto do enxame para aplicações reais.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao grupo PET-CTJ, à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica e Tecnológica (PIBIC-UFSC / PIBITI-UFSC) pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABDELKADER, M. *et al.* Aerial swarms: recent applications and challenges. *Current Robotics Reports*, v. 2, p. 309–320, 2021. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s43154-021-00053-9. Acesso em: 29 maio 2026.

AL-BATATI, A.; KOUBAA, A.; GABR, K.; ABDELKADER, M.; ALOQAILY, H. ROS 2 in a nutshell: a survey. *ACM Computing Surveys*, Just Accepted, maio 2026. DOI: 10.1145/3815113.

CAMPION, M.; RANGANATHAN, P.; FARUQUE, S. UAV swarm communication and control architectures: a review. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, v. 7, n. 2, p. 93–106, 2019. DOI: 10.1139/juvs-2018-0009.

DIMMIG, C. A. *et al.* Survey of simulators for aerial robots: an overview and in-depth systematic comparisons [Survey]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, v. 32, n. 2, p. 153–166, jun. 2025. DOI: 10.1109/MRA.2024.3433171.

MORAES, L. de *et al.* Desenvolvendo simulações de uso de drones em cidades inteligentes. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS COMPUTACIONAIS*, 2022. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2022. p. 40–47.

RAJ, R.; KOS, A. Recent developments and applications of drone swarm: techniques, strategies, and challenges. *Sensors*, v. 26, n. 10, p. 2943, 2026. DOI: 10.3390/s26102943.

SAFFRE, F.; HILDMANN, H.; KARVONEN, H. The design challenges of drone swarm control. In: HARRIS, D.; LI, W. C. (eds.). *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. Cham: Springer, 2021. (Lecture Notes in Computer Science, v. 12767). DOI: 10.1007/978-3-030-77932-0_32.