



THexCAD: Uma Plataforma de Prototipagem e Simulação de Cobertura para Área com Múltiplos Drones

Maxwell F. da Silva^{1,2}, Alirio Santos de Sá¹

¹Laboratório de Sistemas Distribuídos (LaSiD)

Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica (PPGM)

Instituto de Computação – Universidade Federal da Bahia (UFBA)

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano (IF Baiano)

maxwell.silva@ifbaiano.edu.br, aliriossa@ufba.br

Abstract. This paper presents the THexCAD, a distributed platform for performing area coverage missions with multiple drones. The goal of our platform is to facilitate the testing, analysis, and validation of area coverage strategies in simulated and real environments. The main challenge in developing this type of application with multiple drones is the coordination of the drone swarm to cover an area efficiently, considering the movement, coordination, generation and allocation of subareas, and planning of paths for coverage. In this sense, THexCAD provides a framework that abstracts complex processes, allowing developers or users to focus on specific actions related to the mission with multiple drones. Initial experimental results show that THexCAD presents scalability when the number of drones involved in the mission varies.

Resumo. Este artigo apresenta o THexCAD, uma plataforma distribuída para a realização de missões de cobertura de área com múltiplos drones. O objetivo da plataforma é facilitar o teste, análise e validação de estratégias de cobertura de área em ambientes simulados e reais. O principal desafio no desenvolvimento deste tipo de aplicação com múltiplos drones é a coordenação do enxame de drones de modo a cobrir uma área de forma eficiente, considerando a movimentação, coordenação, geração e alocação de subáreas e planejamento de caminhos para a cobertura. Neste sentido, o THexCAD fornece um framework que abstrai processos complexos, permitindo que desenvolvedores ou usuários se concentrem nas ações específicas relacionadas à missão com múltiplos drones. Os resultados experimentais iniciais mostram que o THexCAD escala bem quando o número de drones envolvidos na missão varia.

1. Introdução

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), popularmente conhecidos como Drones, são aeronaves sem piloto a bordo, capazes de vôos pilotados por um operador remoto, com algumas ações pré-programadas ou completamente autônomos [Cabreira et al. 2019]. Atualmente, existe uma variedade dessas aeronaves, com diferentes graus de manobrabilidade, porte, autonomia de voo, facilidades de processamento, armazenamento, sensoriamento e atuação, o que viabiliza diversas aplicações, tais como: inspeções, levantamentos, mapeamentos de área e construções civis, vigilância e segurança patrimonial, gerenciamento de desastres, entre outros [Mishra and Palanisamy 2023]. Nessas aplicações, o drone realiza missões, nas quais sobrevoa uma determinada área,

por exemplo, coletando informações para processamento futuro, como nos casos de mapeamento de informações em regiões de desastres, ou atuando sobre essas áreas, como nos casos de dispersão de agentes biológicos para o tratamento de lavouras [Pellegrino et al. 2020, da Silva et al. 2022]. O sucesso dessas missões depende da realização adequada da cobertura de área, um problema básico da robótica móvel, que visa garantir que cada ponto (subárea) de uma determinada região (área) seja visitado (sobrevoada) pelo drone (robô móvel) durante sua missão [Batalin and Sukhatme 2004]. Nessas aplicações, o uso de múltiplos drones, colaborando e coordenando suas ações, para realizar a cobertura de área pode trazer potenciais benefícios para as missões. Por exemplo, cada drone pode se concentrar em uma porção da área a ser coberta, tornando possível a realização de missões em áreas territoriais maiores, reduzindo o tempo da cobertura da área e permitindo o uso de drones com menor autonomia energética e mais baratos. Além disso, existe também uma maior chance de conclusão da missão, pois a falha de um drone pode ser compensada pelos demais drones do grupo [Azpúrua et al. 2018].

O desenvolvimento de aplicações para cobertura de área com múltiplos drones precisa lidar com uma série de questões de projeto [Hossein Motlagh et al. 2023, Pellegrino et al. 2020, Almadhoun et al. 2016]: (a) a subdivisão da área a ser coberta deve ser realizada de modo a minimizar a quantidade de movimentação que os drones precisam fazer para cobrir (sobrevoar/sensoriar) a sua subárea específica; (b) a movimentação dos drones em sua subárea deve escolher caminhos viáveis e minimizar o tempo total para cobertura da área; (c) deve ser possível realizar dinamicamente re-divisões e realocações de subáreas, por exemplo, quando um novo drone é inserido ou quando um drone existente falha; (d) o controle das ações individuais e coordenação das ações coletivas devem ser realizadas de forma eficiente de modo a reduzir o tempo total de cobertura da área, evitar colisões ou não comprometer a autonomia energética do drone etc. A complexidade se intensifica ainda mais ao levar em conta os tipos de ambiente, os métodos de exploração e a estratégia de cobertura [Almadhoun et al. 2019]. Lidar com todos esses requisitos não é um desafio trivial e requer um conhecimento multidisciplinar, envolvendo teoria de controle de sistemas dinâmicos, robótica móvel, escalonamento em tempo real, inteligência artificial, algoritmos de coordenação distribuída e redes de computadores.

Apesar de existirem uma série de trabalhos que lidam com aspectos específicos relacionados à cobertura de área com múltiplos drones [Cabreira et al. 2019], são poucas as plataformas que oferecem um ambiente completo para a prototipagem e simulação deste tipo de aplicação. Entretanto, é fundamental a existência de plataformas que facilitem o desenvolvimento dessas aplicações de cobertura de área com múltiplos drones, oferecendo um ambiente controlado e seguro para validar e testar diferentes aspectos dessas missões. Uma plataforma de prototipagem e simulação, além de tornar possível superar desafios inerentes para esse tipo de aplicação, pode acelerar o desenvolvimento, reduzir custos, mitigar riscos e explorar diferentes estratégias [Azpúrua et al. 2018, Mishra and Palanisamy 2023, Pellegrino et al. 2020].

Nesse contexto, este artigo apresenta o THexCAD (*Tesselação Hexagonal para Cobertura de Área com Drones*)¹, um framework para prototipagem e simulação de

¹O THexCAD está disponível em https://gitlab.com/maxwellfdasilva/THEXCAD_APP e os vídeos com a demonstração de sua instalação, configuração e uso estão disponíveis em <https://www.youtube.com/playlist?list=PLn9Ykr2GAXTj2aCQgz7Xx-oZPvgifVMh6>

cobertura de área com múltiplos drones. O THexCAD oferece um ambiente controlado para desenvolver, testar e validar estratégias de cobertura de área, abstraindo a complexidade inerente à movimentação e coordenação dos drones. A plataforma permite que os desenvolvedores se concentrem nas ações específicas da missão e possibilita a interação dos algoritmos desenvolvidos com drones virtuais ambiente no Gazebo², ou com drones reais, a partir de uma arquitetura baseada no ROS (Robot Operating System)[Macenski et al. 2022], um framework para programação de sistemas robóticos, adotado por vários fabricantes.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 discute trabalhos relacionados; a Seção 3 descreve as principais funcionalidades, a arquitetura e a implementação da plataforma THexCAD; a Seção 4 apresenta uma avaliação do desempenho da proposta; e, por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões e os trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Diversos desafios devem ser superados na cobertura de área com múltiplos drones. Destacam-se, dentre eles, dois processos essenciais para definir a estratégia de cobertura: a divisão da área (ou geração de pontos de vista) e o planejamento de caminho [Azpúrua et al. 2018]. A divisão de área consiste em atribuir sub-regiões de uma área maior a diferentes drones, visando minimizar movimentos e otimizar a cobertura. Isso permite que cada drone se concentre em uma porção menor da área total. Já o planejamento de caminho envolve determinar a rota que cada drone deve seguir dentro de sua sub-região designada. O objetivo é garantir que toda a área seja coberta de maneira eficiente, evitando sobreposições e minimizando o tempo de deslocamento [Pellegrino et al. 2020].

Várias abordagens podem ser adotadas para compor a estratégia de cobertura, por exemplo: busca em grade, métodos geométricos, técnicas de aprendizado de máquina, técnicas baseadas em recompensas etc. Essas abordagens são escolhidas de acordo com o objetivo da cobertura, considerando os tipos de ambiente e os métodos de exploração da área [Almadhoun et al. 2019]. Assim, vários estudos sobre cobertura de área utilizam simulações para testar e prototipar algoritmos de cobertura com drones [Pellegrino et al. 2020, Perez-imaz et al. 2016, Anastasiou et al. 2024, Bernardeschi et al. 2019]. Isso permite avaliar o desempenho desses algoritmos em diversas condições sem riscos ou custos elevados, antes da aplicação em cenários reais.

Existem diversas ferramentas de software comerciais e de código aberto que facilitam o desenvolvimento, os testes e a implementação de algoritmos de controle e navegação para aplicações com drones, incluindo, por exemplo [Telli et al. 2023]: software de simulação – e.g., GazeboSim [Koenig and Howard 2004] e AirSim [Shah et al. 2017]; controle de voo – e.g., ArduPilot [ArduPilot Community 2025] e PX4 [Dronecode 2025b]; controle terrestre – e.g., QGroundControl [Dronecode 2025c] e UgCS [SPH Engineering 2025]; visão computacional – e.g., OpenCV [OpenCV Project 2025] e TensorFlow [Abadi et al. 2016]; e integração de sensores – e.g., MAVLink [Dronecode 2025a]. Essas ferramentas operam em várias plataformas e têm diversos requisitos e recursos. Algumas dessas plataformas oferecem suporte para missão, enquanto outros se concentram na operação do conjunto de drones e na operação pelos pilotos remotos. Muitas dessas plataformas ainda carecem de recursos para voos

²Simulador de sistemas robóticos – ver <https://gazebosim.org/>.

autônomos e integração com softwares de terceiros, além de geralmente suportarem apenas drones de um único fabricante. Essas limitações dificultam a criação de uma plataforma confiável para aplicações com múltiplos drones [Terzi et al. 2019].

O THexCAD busca oferecer um ambiente de simulação flexível, intuitivo e personalizável que permite aos desenvolvedores (ou usuários) prototipar, testar e validar algoritmos de cobertura de área de forma eficiente e econômica. Isso é possível por meio da reutilização ou adição de métodos de divisão de área e planejamento de caminho, além da customização de dados de supervisão e relatórios para implementar suas estratégias de cobertura. Dessa forma, os desenvolvedores (ou usuários) podem se concentrar nas ações específicas da missão, abstraindo a complexidade inerente à movimentação e coordenação dos drones, acelerando o processo de desenvolvimento.

3. A Plataforma de Prototipagem e Simulação Multi-UAV

O THexCAD é uma plataforma distribuída para missões com múltiplos drones (Figura 1). Nela, um operador, em uma estação base em solo, utiliza uma aplicação web para interagir com uma central de comandos, que disponibiliza um conjunto de componentes de controle de enxames de drones. A comunicação da central de comandos e os drones ocorre através de uma comunicação sem fio e os comandos são enviados em uma arquitetura do tipo publicar/assinar (publisher/subscriber [Steen and Tanenbaum 2023]) baseada no ROS, o que permite a interação com drones reais ou simulados.

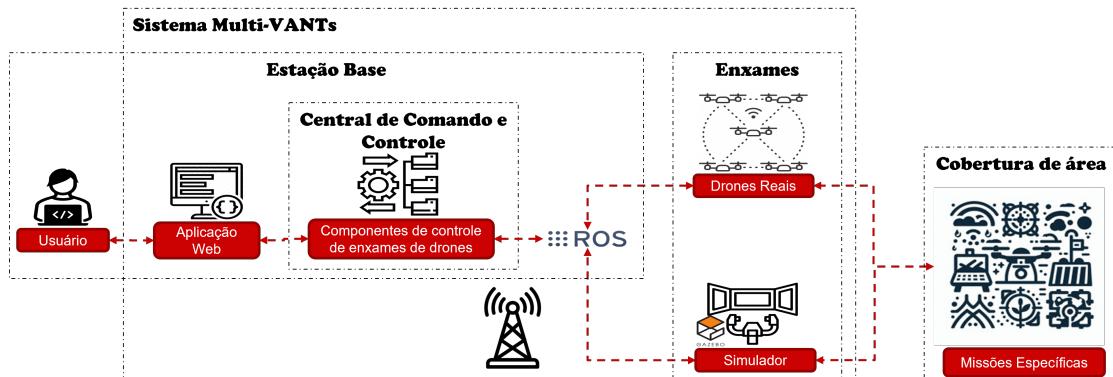


Figura 1. Visão geral do sistema

3.1. Descrição Geral do THexCAD

As principais funcionalidades do THexCAD são descritas a seguir.

Configuração da grade hexagonal – consiste em definir o layout da grade hexagonal através da configuração dos detalhes geométricos e de exibição dos hexágonos, e.g., o tamanho do raio do hexágono e orientação hexagonal (horizontal ou vertical). Essas configurações além de permitir ao sistema desenhar os hexágonos no mapa 2D também influenciam no processo de geração das subáreas através da distância entre eles e o ponto central de cada polígono. A estratégia de planejamento de caminho com a tesselação hexagonal foi adotada por sua capacidade de melhorar a cobertura de área, reduzindo a sobreposição e simplificando os cálculos de rota devido à distância fixa entre centroides de hexágonos adjacentes. Além disso, essa técnica é particularmente adequada para cenários

que envolvem cobertura circular, como o alcance de comunicação em robôs, garantindo maior precisão na cobertura e adaptando-se a diferentes resoluções de mapa.

Configuração dos drones da cobertura – permite definir as informações a serem exibidas no mapa 2D para rastreamento dos drones durante a cobertura de área, i.e., nome do drone, tipo de ícone a ser usado para o mesmo e cor dos seus rastros. Além disso, possibilitam identificar, armazenar e visualizar nos relatórios do sistema, em tempo real ou pós-execução, o status dos drones, as áreas visitadas e movimentos realizados por eles durante a cobertura da área.

Configuração dos pontos de vista – permite configurar a quantidade de drones que irão cobrir a área e selecionar os métodos para geração das subáreas (pontos de vista) e planejamento do caminho para cobertura da subárea por cada drone. Além da parametrização da geração dos pontos de vista, é possível configurar como os dados serão visualizados durante a execução da cobertura, e.g., mostrar rastro dos drones, exibir apenas os hexágonos da cobertura, tipo de visualização do percurso (região ou hexágono), mostrar sequência de visitas, exibir trajetos, mostrar identificador ou status do drone, etc.

Execução da cobertura de área – após a configuração da cobertura, diversos processos são executados para dividir a área, planejar o caminho, gerar mapas, executar as rotas ou movimentos, e permitir o acompanhamento da cobertura através de um mapa 2D atualizado em tempo real, conforme a movimentação dos robôs. Para tanto, essa execução é realizada em duas etapas: geração das subáreas e planejamento dos caminhos para cobertura. A decomposição da área é realizada através decomposição celular aproximada, usando uma metodologia baseada em grade que divide a área de interesse em células de grades uniformes no formato de hexágono regulares. Para tanto, o usuário delimita a sua área de interesse e, em seguida, a plataforma usa o algoritmo k-means [Gautam et al. 2015] para definir a subárea específica de cada drone – estratégia similar aquela usada em [Perez-imaz et al. 2016, Azpúrua et al. 2018]. A Figura 2 apresenta um exemplo desse processo de decomposição de área. O planejamento dos caminhos para a cobertura da área pode ser realizado usando o algoritmo do caxeiro viajante (TSP) ou pelo método do Boustrophedon [Choset and Pignon 1998]. Para solução do TSP, a plataforma usa a heurística proposta em [Christofides 2022], uma solução aproximada com um fator de no máximo 1,5 vezes a solução ótima. No método de Boustrophedon, o drone atravessa sua região em fases alternadas, nas quais se movimenta para o norte até alcançar a extremidade de sua região, em seguida, se movimenta para o leste e, logo depois, se movimenta para o sul. Chegando na extremidade sul, ele se movimenta para o leste e reinicia a movimentação em direção ao norte. A Figura 3 apresenta exemplos de caminhos gerados por cada um dos métodos. Por fim, os mapas com as áreas a serem cobertas e as rotas planejadas são enviados pela estação base para o respectivo drone. Durante o voo, cada drone registrará e armazenará em seu mapa local o status de cobertura e o número de visitas a cada células (hexágono) de sua região. O status da cobertura é periodicamente enviado para a estação base que mantém um mapa global da cobertura da área.

Geração de Relatórios – permite visualizar e exportar relatórios sobre a área de interesse, status da cobertura, drones, comandos executados, visitas por hexágonos com mapa de calor (heatmap), uso de recursos e logs, em formato de planilhas, PDFs ou CSVs.

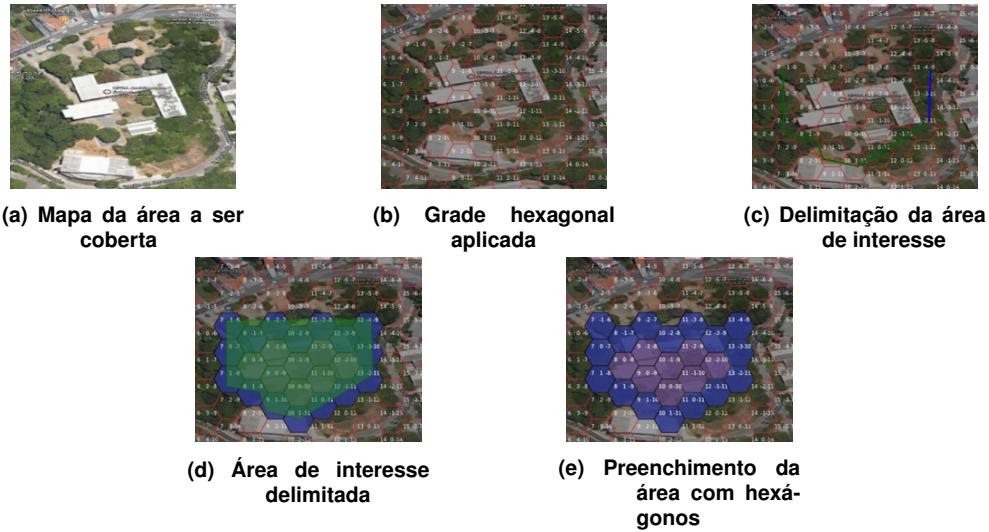


Figura 2. Processo de definição da área de interesse.

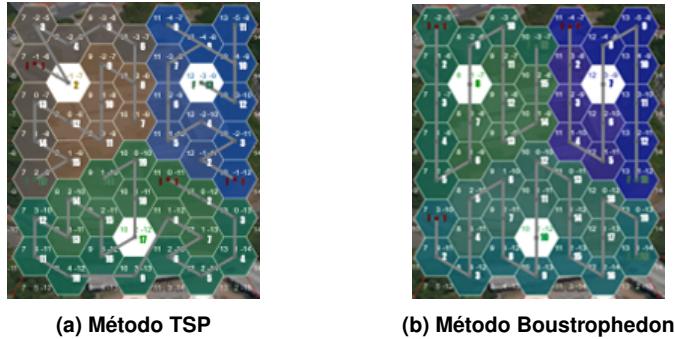


Figura 3. Exemplos de caminhos gerados de acordo com o tipo de método.

3.2. Detalhes da Implementação

O THexCAD é implementado em uma arquitetura com três camadas (Figura 1): **Supervisório (Interface com o usuário)** – camada de apresentação que permite ao usuário configurar, executar, gerenciar e acompanhar todo o processo de cobertura, bem como controlar remotamente o enxame de drones; **Central de Comando e Controle** – camada intermediária que contém os componentes para controlar, reportar e gerenciar o enxame, incluindo o planejamento de caminhos, a alocação de tarefas, o monitoramento de recursos de máquinas (CPU, memória, etc.) e também do status dos drones; e **Enxames de Drones** – camada na qual a cobertura de área é executada, onde os drones físicos ou virtuais executam as ações relacionadas a missão.

O Supervisório roda do lado do cliente e contém uma interface web implementada usando recursos tecnológicos básicos, e.g., HTML, CSS e JavaScript, e a API Canvas³, a qual permite desenhar gráficos e animações na interface e é usada para configurar e renderizar a grade hexagonal, que, por sua vez, é responsável por apresentar em tempo real o mapa global da cobertura e as movimentações dos drones com seus respectivos status. O Supervisório, por meio de eventos em sua interface, usa uma API de Comando e Controle (API CC) para utilizar os serviços providos pela Central de Comando e Controle.

³https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Canvas_API

A Central de Comando e Controle executada em um servidor web, é estruturada usando o framework Django⁴, que atua em conjunto com o Supervisório e estabelece uma conexão WebSocket com o ROS através do pacote ROSBridge⁵. Quando a conexão com o Servidor ROS (nó master) é estabelecida, as informações da aplicação web são atualizadas, permitindo enviar e receber comandos em tempo real através de mensagens baseadas na estrutura do ROS. Além de repassar comandos para os Drones a partir do ROS, a Central de Controle persiste informações em uma base de dados.

A interação com os drones simulados é realizada com o auxílio do Drone Middleware [Simões and de Sá 2020]. O Drone Middleware é um *framework* baseado em ROS e Gazebo que facilita a simulação e verificação de aspectos físicos, comunicação e coordenação entre drones. Esse framework simula a dinâmica de voo e controle dos drones, incluindo controladores de voo e sensores de drones quadrotores genéricos no ambiente ROS/Gazebo [Simões and de Sá 2020]. Para o ambiente real, é necessário que a aplicação no drones físico se conecte no servidor ROS.

4. Avaliação de Desempenho

Para avaliação de desempenho, o THexCAD foi implantado em um desktop com 34 GB de memória RAM, CPU 12th Gen Intel Core i7-12700, placa de vídeo NVIDIA GeForce RTX 3080, disco rígido de 512 GB e sistema operacional Ubuntu 18.04.6 LTS, instalado em uma partição de 100 GB. Ela executa o servidor de aplicação Django 4.0, o navegador Firefox 135.0b6, o ROS Melodic 1.14.13 e o Gazebo 9. Foram realizadas coberturas em áreas de 400 m², utilizando os métodos TSP e Boustrphedon, com 1 a 16 drones. A área de interesse é um retângulo dividido em uma grade hexagonal de aproximadamente 1m², livre de obstáculos. As posições de decolagem e pouso foram distribuídas conforme a quantidade de drones, com distância de 2m da borda da área. O fator de conversão dos pontos 2D para o plano 3D do Gazebo foi de 0,9167, 0,9552 e 1 nas coordenadas X, Y e Z, respectivamente. Os drones voam a uma velocidade de 1m/s.

Durante a execução, foram monitorados o consumo de memória (RAM), o uso de CPU, o acesso à disco rígido e o tráfego de rede (Figure 4). O uso de CPU (Figura 4a) se manteve estável variando, no pior caso, entre 40 a 57%, mesmo quando o número de drones varia de 1 a 16 drones. Um comportamento similar acontece, no pior caso, com o uso de memória (Figura 4b), que se manteve entre 60 e 81%, mesmo quando o número de drones varia de 1 a 16 drones. Esses resultados iniciais apontam a escalabilidade da plataforma. Os acessos à disco (Figura 4c) foi superior a 96% no pior caso. Isso porque a plataforma faz muitos acessos à disco para gravar logs, atualizar status de voo, informações de cobertura de área, entre outros. Devido ao alto volume de troca de mensagens entre os drones, a Central de Controle e o Supervisório, o volume de dados trafegado (Figura 4d) na rede varia 14 a 25GB, nos cenários de pior caso.

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este artigo apresentou o THexCAD, uma plataforma de protipagem e simulação de aplicações de cobertura de área com múltiplos drones. Os resultados experimentais simulados mostram a viabilidade da plataforma para auxiliar pesquisadores e desenvolvedores

⁴<https://www.djangoproject.com/>

⁵https://github.com/RobotWebTools/rosbridge_suite

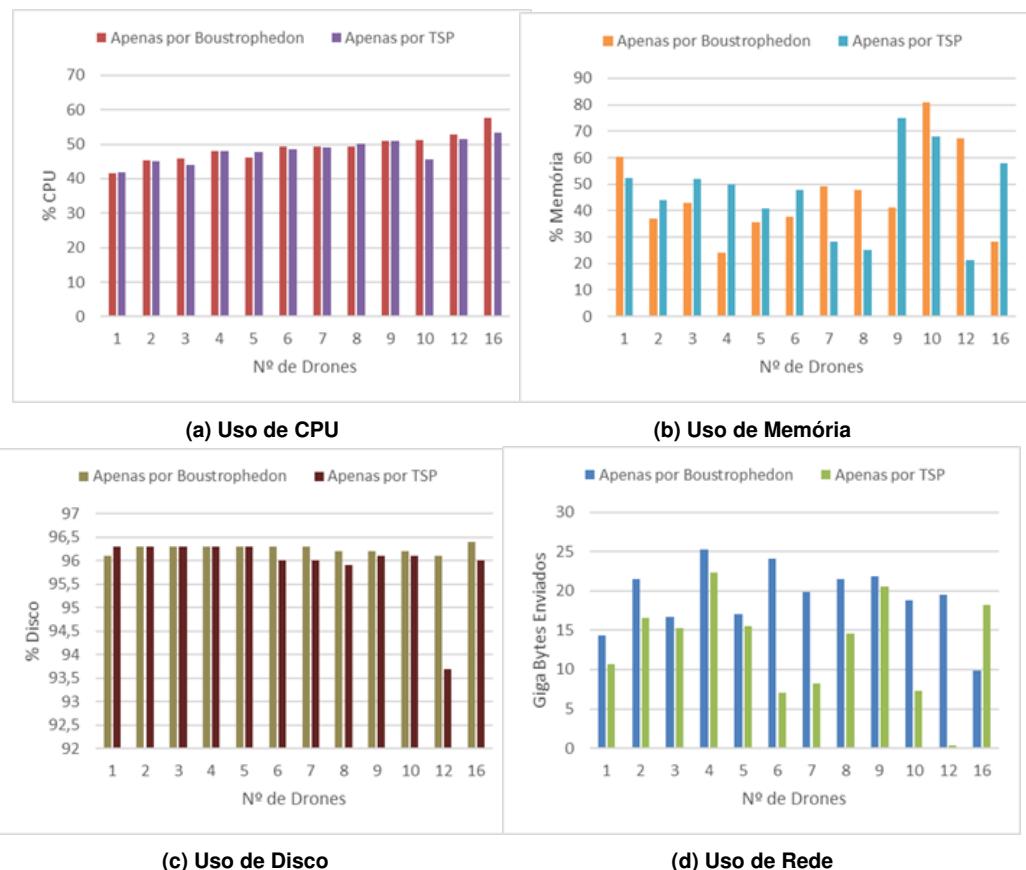


Figura 4. Uso de recursos computacionais durante a execução de uma missão de cobertura de área simulada com drones na plataforma THexCAD.

na criação de soluções para diversas aplicações de cobertura de área. A plataforma simplifica processos complexos, permitindo que desenvolvedores se concentrem nas ações específicas dos drones. Além disso, oferece flexibilidade na escolha e configuração das estratégias para cobertura de área, um ambiente seguro para testar e validar estas estratégias, e relatórios detalhados das missões realizadas.

Como trabalho futuro, devem ser desenvolvidos, por exemplo, algoritmos mais eficientes para coordenação de múltiplos drones e para o planejamento de trajetória, realização de experimentos com drones físicos, adaptação da plataforma em lidar com ambientes dinâmicos, implementação e disponibilização de algoritmos para gerenciar o consumo de bateria e otimização de rotas. Ao aprimorar a plataforma e expandir suas funcionalidades, o THexCAD poderá se tornar uma ferramenta ainda mais valiosa para a comunidade de pesquisa em sistemas multi-drone, impulsionando o desenvolvimento de soluções inovadoras e eficientes para uma ampla gama de aplicações que envolvam cobertura de área.

Referências

- Abadi, M., Barham, P., Chen, J., Chen, Z., Davis, A., Dean, J., Devin, M., Ghemawat, S., Irving, G., Isard, M., et al. (2016). Tensorflow: A system for large-scale machine learning. In *12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI16)*, pages 265–283.
- Almadhoun, R., Taha, T., Seneviratne, L., Dias, J., and Cai, G. (2016). A survey on inspecting structures using robotic systems. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 13(6):18.
- Almadhoun, R., Taha, T., Seneviratne, L., and Zweiri, Y. (2019). A survey on multi-robot coverage path planning for model reconstruction and mapping. *SN Applied Sciences*, 1(8):847.
- Anastasiou, A., Zacharia, A., Papaioannou, S., Kolios, P., Panayiotou, C. G., and Polycarpou, M. M. (2024). Automated real-time inspection in indoor and outdoor 3d environments with cooperative aerial robots. In *2024 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pages 496–504.
- ArduPilot Community (2025). ArduPilot Website. <https://ardupilot.org/>. [Online; accessed 2025-02-25].
- Azpúrrua, H., Freitas, G. M., Macharet, D. G., and Campos, M. F. M. (2018). Multi-robot coverage path planning using hexagonal segmentation for geophysical surveys. *Robotica*, 36(8):1144–1166.
- Batalin, M. A. and Sukhatme, G. S. (2004). Coverage, Exploration and Deployment by a Mobile Robot and Communication Network. *Telecommunication Systems*, 26(2):181–196.
- Bernardeschi, C., Fagiolini, A., Palmieri, M., Scrima, G., and Sofia, F. (2019). ROS/gazebo based simulation of co-operative UAVs. In Mazal, J., editor, *Modelling and Simulation for Autonomous Systems*, pages 321–334. Springer.
- Cabreira, T. M., Brisolara, L. B., and Ferreira Jr., P. R. (2019). Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles. *Drones*, 3(1):4.

- Choset, H. and Pignon, P. (1998). Coverage path planning: The boustrophedon cellular decomposition. In Zelinsky, A., editor, *Field and Service Robotics*, pages 203–209, London. Springer London.
- Christofides, N. (2022). Worst-Case Analysis of a New Heuristic for the Travelling Salesman Problem. *Operations Research Forum*, 3(1):20.
- da Silva, B. S., Cabreira, T. M., de Souza, B. J. O., Matias, N. R., Machado, R. A. O., Jorge, L. A. C., and Ferreira, P. R. (2022). Framework for biological control with unmanned aerial vehicles. In *2022 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2022 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), and 2022 Workshop on Robotics in Education (WRE)*, pages 25–30, São Bernardo do Campo, Brazil.
- Dronecode (2025a). MAVLink: Micro air vehicle communication protocol. <https://mavlink.io/>. [Online; accessed 2025-02-25].
- Dronecode (2025b). PX4: Open source autopilot for drone developers. <https://px4.io/>. [Online; accessed 2025-02-25].
- Dronecode (2025c). QGroundControl: Intuitive and powerful ground control station for the mavlink protocol. <https://qgroundcontrol.com/>. [Online; accessed 2025-02-25].
- Gautam, A., Murthy, J. K., Kumar, G., Arjun Ram, S. P., Jha, B., and Mohan, S. (2015). Cluster, Allocate, Cover: An Efficient Approach for Multi-robot Coverage. In *2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pages 197–203.
- Hossein Motlagh, N., Kortoçι, P., Su, X., Lovén, L., Hoel, H. K., Bjerkestrand Haugsvær, S., Srivastava, V., Gulbrandsen, C. F., Nurmi, P., and Tarkoma, S. (2023). Unmanned Aerial Vehicles for Air Pollution Monitoring: A Survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(24):21687–21704.
- Koenig, N. and Howard, A. (2004). Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. In *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, volume 3, pages 2149–2154 vol.3.
- Macenski, S., Foote, T., Gerkey, B., Lalancette, C., and Woodall, W. (2022). Robot operating system 2: Design, architecture, and uses in the wild. *Science Robotics*, 7(66).
- Mishra, S. and Palanisamy, P. (2023). Autonomous Advanced Aerial Mobility – An End-to-End Autonomy Framework for UAVs and Beyond. *IEEE Access*, 11:136318–136349.
- OpenCV Project (2025). OpenCV: Open source computer vision library. <https://opencv.org/>. [Online; accessed 2025-02-25].
- Pellegrino, G., Simões, G. M., Assis, F., Gorender, S., and de Sá, A. S. (2020). Simple Area Coverage by a Dynamic Set of Unmanned Aerial Vehicles. In *2020 X Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC)*, pages 1–8.
- Perez-imaz, H. I. A., Rezeck, P. A. F., Macharet, D. G., and Campos, M. F. M. (2016). Multi-robot 3d coverage path planning for First Responders teams. In *2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pages 1374–1379.

- Shah, S., Dey, D., Lovett, C., and Kapoor, A. (2017). Airsim: High-fidelity visual and physical simulation for autonomous vehicles. In *Field and Service Robotics*.
- Simões, G. M. and de Sá, A. S. (2020). Um Framework para Simulação de Sistemas Robóticos baseados em Múltiplos Veículos Aéreos Não Tripulados. In *Workshop de Trabalhos de Iniciação Científica e de Graduação do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (WTG/SBRC 2020)*, pages 217–224, Brasil. Sociedade Brasileira de Computação.
- SPH Engineering (2025). UgCS: Drone flight planning software. <https://www.sphengineering.com/flight-planning/ugcs>. [Online; accessed 2025-02-25].
- Steen, M. V. and Tanenbaum, A. S. (2023). *Distributed Systems*. Martten Van Steen, Birmingham Mumbai, 4th edition.
- Telli, K., Kraa, O., Himeur, Y., Ouamane, A., Boumehraz, M., Atalla, S., and Mansoor, W. (2023). A Comprehensive Review of Recent Research Trends on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Systems*, 11(8):400.
- Terzi, M., Anastasiou, A., Kolios, P., Panayiotou, C., and Theocharides, T. (2019). SWIFTERS: A Multi-UAV Platform for Disaster Management. In *2019 International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM)*, pages 1–7.