




## C A P Í T U L O 3

# VANTs NA PRÁTICA: FUNDAMENTOS DE CONTROLE,

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.823112628013>

### **Márcio Mendonça**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica CP/PG  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/5415046018018708>

### **Vitor Blanc Milani**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Mestrando - PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica CP/PG  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/4504374098250296>

### **Cintya Wedderhoff Machado**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus  
Cornélio Procópio/Londrina, Paraná – Brasil  
Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Ensino de  
Ciências Humanas, Sociais e da Natureza – PPGEN  
Londrina - PR  
<http://lattes.cnpq.br/4604594140489347>

### **Rodolfo Alexandre Hildebrandt**

Unisenai PR Campus Londrina  
Londrina – PR  
<http://lattes.cnpq.br/0404166941815645>

### **Leonardo Yuji Ishizaki**

Unisenai PR Campus Londrina  
Londrina – PR  
<http://lattes.cnpq.br/0404166941815645>

### **Victor Emanuel Correria De La Rosa**

UnisenaiPR Campus Londrina  
Londrina – PR  
<http://lattes.cnpq.br/8291937002754173>

**Antonio Carlos Rodrigues**

UnisenaiPR Campus Londrina  
Londrina – PR  
<http://lattes.cnpq.br/1963491889845252>

**Fabio Rodrigo Milanez**

UnISENAIPR-Campus Londrina  
Londrina-PR  
<http://lattes.cnpq.br/3808981195212391>

**Francisco de Assis Scannavino Junior**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento Acadêmico de  
Engenharia Elétrica (DAELE)  
Cornélio Procópio - PR  
<http://lattes.cnpq.br/4513330681918118>

**Armando Paulo da Silva**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências  
Humanas, Sociais e da Natureza (PPGEN-CP/LD)  
Cornélio Procópio-PR  
<http://lattes.cnpq.br/6724994186659242>

**Paulo Alexandre Lourenço Jesus**

Afiliação acadêmica: Aluno externo no Programa de Pós-Graduação em Ensino  
de Ciências Humanas, Sociais e da Natureza – PPGEN – Curso de Mestrado  
Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR) – Campus Cornélio Procópio/Londrina – PR  
<https://lattes.cnpq.br/1346404833044235>

**Adriano da Silva Moreira**

Afiliação acadêmica: Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Educação – PPEDU  
Instituição: Universidade Estadual de Londrina (UEL) –  
Campus Londrina – PR  
<https://lattes.cnpq.br/0686904669527189>

**Ana Clara Augusto Jesus**

Acadêmica do curso de Pedagogia da Universidade Estadual do Norte  
do Paraná (UENP) Campus de Cornélio Procópio - Paraná – Brasil  
Cornélio Procópio – PR  
<https://lattes.cnpq.br/5330914992553099>

**Gilberto Dias de Melo**

Conselheiro do CREA-PR e atua em funções estratégicas no  
Conselho durante a gestão atual (2024-2026)  
Curitiba - PR  
<https://www.linkedin.com/in/gilberto-melo-5b6759a9>

**Henrique Cavalieri Agonilha**

Universidade Filadélfia (Unifil) Londrina  
Londrina-PR  
<http://lattes.cnpq.br/9845468923141329>

### **Eduardo Filgueiras Damasceno**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus  
Cornélio Procópio/Londrina, Paraná – Brasil  
Coordenador no Programa de Pós-Graduação em Ensino de  
Ciências Humanas, Sociais e da Natureza – PPGEN  
Cornélio Procópio - PR  
<http://lattes.cnpq.br/7333630388674575>

### **Elisângela Santos Romano**

Aluna externa no Programa de Pós-Graduação em Ensino de  
Ciências Humanas, Sociais e da Natureza – PPGEN  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus  
Cornélio Procópio/Londrina, Paraná – Brasil  
[lattes.cnpq.br/6016897529605020](http://lattes.cnpq.br/6016897529605020)

### **Iago Maran Machado**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Mestrando (aluno externo) - PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica CP/PG  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/3808981195212391>

### **Tatiane Monteiro Pereira**

Mestranda - Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Humanas,  
Sociais e da Natureza (PPGEN-CP/LD)  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/9520601026438758>

### **Juliana Maria de Jesus Ribeiro**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Cornélio  
Procópio/Londrina, Paraná – Brasil  
Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Humanas,  
Sociais e da Natureza – PPGEN  
Londrina - PR  
<http://lattes.cnpq.br/6279504657014354>

**RESUMO:** Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) têm se consolidado como ferramentas estratégicas em diferentes domínios da engenharia e da segurança, impulsionados pelos avanços em sistemas embarcados, sensores, algoritmos de controle e técnicas de autonomia. Este trabalho apresenta uma abordagem aplicada sobre os fundamentos de controle e autonomia em VANTs, com ênfase em sua utilização prática nas engenharias e em operações de segurança. Inicialmente, são discutidos os princípios fundamentais de dinâmica de voo e controle, contemplando estratégias clássicas e modernas, tais como controle PID, controle em malha fechada e noções introdutórias de controle adaptativo. Em seguida, aborda-se a arquitetura dos sistemas autônomos, destacando a integração entre sensores

inerciais, sistemas de posicionamento, comunicação e processamento embarcado, bem como os algoritmos responsáveis pela navegação, estabilização e tomada de decisão. O estudo enfatiza aplicações reais em engenharia civil, elétrica e ambiental, incluindo inspeção de infraestruturas, monitoramento de redes aéreas, avaliação ambiental e apoio a levantamentos técnicos, além de cenários voltados à segurança, como vigilância, análise de riscos e resposta a emergências. Aspectos normativos, operacionais e de segurança também são considerados, evidenciando a necessidade de conformidade regulatória e de capacitação técnica para a operação segura dos VANTs. Por fim, o trabalho discute os desafios e limitações atuais relacionados à autonomia, confiabilidade e escalabilidade desses sistemas, apontando perspectivas futuras para sua ampliação no contexto das engenharias e da segurança, com foco na integração de técnicas avançadas de inteligência artificial e sistemas ciberfísicos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Veículos Aéreos Não Tripulados, Sistemas Embarcados, Inteligência Artificial, Sistemas Ciberfísicos.

## UAVs IN PRACTICE: FUNDAMENTALS OF CONTROL, AUTONOMY APPLIED TO ENGINEERING AND SAFETY

**ABSTRACT:** Uncrewed Aerial Vehicles (UAVs) have become established as strategic tools across diverse engineering and security domains, driven by advances in embedded systems, sensors, control algorithms, and autonomy techniques. This paper presents an applied approach to the fundamentals of control and autonomy in UAVs, with emphasis on their practical use in engineering applications and security operations. Initially, the fundamental principles of flight dynamics and control are discussed, encompassing classical and modern strategies such as PID control, closed-loop control, and introductory notions of adaptive control. Subsequently, the architecture of autonomous systems is addressed, highlighting the integration of inertial sensors, positioning systems, communication, and embedded processing, as well as the algorithms responsible for navigation, stabilization, and decision-making. The study emphasizes real-world applications in civil, electrical, and environmental engineering, including infrastructure inspection, overhead network monitoring, environmental assessment, and support for technical surveys, as well as security-oriented scenarios such as surveillance, risk analysis, and emergency response. Regulatory, operational, and safety aspects are also considered, underscoring the need for regulatory compliance and technical training to ensure safe UAV operation. Finally, the paper discusses current challenges and limitations in autonomy, reliability, and scalability, outlining future perspectives for expanding these systems across engineering and security contexts, with a focus on integrating advanced artificial intelligence techniques and cyber-physical systems.

**KEYWORDS:** Uncrewed Aerial Vehicles, Embedded Systems, Artificial Intelligence, Cyber-Physical Systems.

## INTRODUÇÃO

A crescente adoção de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) nas engenharias e em atividades de segurança decorre de uma convergência entre demandas operacionais complexas e avanços tecnológicos recentes. Inspeções de infraestrutura, monitoramento ambiental, avaliação de riscos e operações de vigilância exigem soluções capazes de combinar mobilidade, rapidez de resposta e aquisição confiável de dados, frequentemente em ambientes de difícil acesso ou potencialmente perigosos. Nesse contexto, VANTs emergem como alternativas técnicas viáveis, reduzindo custos, riscos humanos e tempo de execução quando comparados a métodos tradicionais. Contudo, a ampliação dessas aplicações evidencia uma lacuna recorrente entre o uso empírico dessas plataformas e a compreensão sistemática dos fundamentos de controle e autonomia que sustentam sua operação segura e eficiente, especialmente quando consideradas as restrições normativas e os requisitos das engenharias e da segurança.

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) vêm assumindo papel crescente nas engenharias e em atividades de segurança por combinarem mobilidade aérea, baixo custo relativo de operação e capacidade de aquisição rápida de dados em áreas de difícil acesso. Esse avanço decorre da maturação de plataformas embarcadas, da miniaturização de sensores e do desenvolvimento de técnicas de controle e estimação que viabilizam estabilidade, navegação e execução de missões com maior grau de autonomia (BEARD; McLAIN, 2012). No contexto aplicado, VANTs têm ampliado a eficiência de inspeções e levantamentos técnicos em infraestrutura civil, energia e meio ambiente, ao mesmo tempo em que oferecem suporte operacional em cenários de vigilância, avaliação de riscos e resposta a incidentes.

Do ponto de vista dos fundamentos, a operação confiável de VANTs depende de modelagem dinâmica e de estratégias de controle em malha fechada capazes de lidar com perturbações externas, incertezas paramétricas e variações de carga. Controladores clássicos, como o PID, permanecem amplamente empregados devido à sua simplicidade, interpretabilidade e facilidade de implementação, especialmente em plataformas multirrotoras e em aplicações de caráter prático. Estudos comparativos com técnicas modernas indicam que a escolha do método de controle envolve compromissos entre desempenho, robustez e complexidade computacional, aspectos particularmente relevantes em sistemas embarcados com recursos limitados.

A ampliação do grau de autonomia em VANTs demanda, adicionalmente, a integração entre percepção, estimação de estado, navegação e tomada de decisão.

A fusão sensorial baseada em sensores inerciais e referências externas é fundamental para garantir estimativas estáveis de atitude e posição, sustentando o controle em tempo real. Paralelamente, técnicas baseadas em aprendizado de máquina e visão computacional têm sido incorporadas para interpretação automática do ambiente, inspeção de estruturas e apoio à tomada de decisão, embora ainda apresentem desafios relacionados à generalização, confiabilidade e explicabilidade dos resultados.

No contexto brasileiro, o emprego de VANTs deve ser compreendido como um sistema sociotécnico, no qual desempenho de controle e autonomia coexistem com exigências regulatórias, operacionais e de segurança. Normativas como o RBAC-E nº 94 da ANAC e as instruções do DECEA condicionam o planejamento e a execução das missões, influenciando diretamente perfis de voo, limites operacionais e procedimentos de mitigação de risco. Dessa forma, uma abordagem aplicada requer a articulação entre fundamentos técnicos, requisitos normativos e necessidades reais das engenharias e da segurança.

Diante desse cenário, o objetivo deste artigo é analisar e sistematizar os fundamentos de controle e autonomia aplicados a VANTs, com ênfase em sua utilização prática nas engenharias e em contextos de segurança, destacando limitações, requisitos operacionais e perspectivas de evolução tecnológica. Para tanto, o artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta os fundamentos de dinâmica e controle de VANTs, com foco em estratégias clássicas e sua aplicação prática; a Seção 3 discute os conceitos de autonomia, abordando arquitetura de sistemas, fusão sensorial e navegação; a Seção 4 analisa aplicações representativas nas engenharias e na segurança, considerando aspectos operacionais e normativos; e, por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões e perspectivas futuras, destacando desafios técnicos e direções para pesquisas subsequentes.

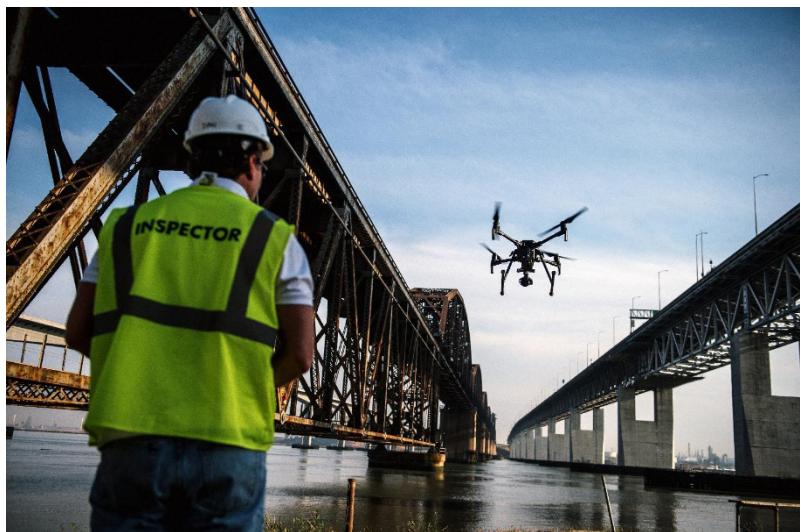
## FUNDAMENTOS E CONTROLE DE VANTS

A adoção de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) e, em especial, de drones autônomos, é indissociável do avanço do raciocínio computacional, que fornece a base lógica para modelagem de problemas, decomposição de tarefas e desenvolvimento de algoritmos (WING, 2006). Ao empregar esse arcabouço, os drones autônomos são capazes de executar missões complexas, desde a percepção do ambiente até a tomada de decisão autônoma, integrando algoritmos de aprendizado e estratégias de controle (BEARD; McLAIN, 2012).

O desempenho, a estabilidade e a segurança operacional de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) estão intrinsecamente associados à compreensão rigorosa de sua dinâmica de voo e à adoção de estratégias de controle compatíveis com as restrições físicas, computacionais e operacionais dessas plataformas. Do ponto de vista

da modelagem, VANTs constituem sistemas dinâmicos não lineares, multivariáveis e fortemente acoplados, sujeitos a incertezas paramétricas, atrasos de atuação e perturbações externas, como rajadas de vento, variações de carga útil e efeitos aerodinâmicos não modelados. Tais características impõem desafios significativos ao projeto de controladores capazes de garantir estabilidade, robustez e desempenho adequado em condições reais de operação (BEARD; McLAIN, 2012).

A Figura 1 mostra VANTs aplicáveis à inspeção urbana.



**Figura 1: Aplicação de VANTs à inspeção urbana**

Em plataformas multirrotores, amplamente empregadas em aplicações civis e de segurança, a dinâmica de voo resulta da interação entre forças aerodinâmicas geradas pelos rotores, momentos de controle associados às variações de velocidade angular dos atuadores e o movimento rígido do corpo no espaço tridimensional. A formulação matemática completa envolve equações diferenciais não lineares que descrevem a cinemática e a dinâmica do veículo, frequentemente expressas em referenciais inerciais e do corpo. Embora modelos de alta fidelidade sejam relevantes para análises teóricas e simulações, sua implementação direta em sistemas embarcados é, em muitos casos, inviável, o que justifica o uso de modelos simplificados e técnicas de linearização em torno de pontos de operação específicos.

Nesse contexto, estratégias de controle clássico permanecem amplamente empregadas em aplicações práticas de VANTs. Controladores do tipo Proporcional–Integral–Derivativo (PID) são utilizados de forma extensiva para estabilização

de atitude, controle de altitude e rastreamento de referências, em razão de sua simplicidade estrutural, baixo custo computacional e facilidade de ajuste em plataformas com recursos limitados. Estudos experimentais demonstram que, quando adequadamente sintonizados, controladores PID são capazes de fornecer desempenho satisfatório e robustez aceitável frente a perturbações moderadas e incertezas paramétricas, especialmente em cenários de voo estacionário e missões de inspeção (BOUABDALLAH; NOTH; SIEGWART, 2004).

A arquitetura de controle em cascata, usualmente organizada em múltiplas malhas hierárquicas — tipicamente atitude, velocidade e posição — constitui uma abordagem consolidada no projeto de sistemas de controle para VANTS. Essa decomposição permite tratar separadamente dinâmicas em diferentes escalas de tempo, simplificando o projeto, a análise de estabilidade e a implementação prática. Em aplicações reais, tal estrutura tem se mostrado eficaz ao combinar controladores clássicos com sensores inerciais e sistemas de posicionamento, assegurando comportamento previsível e confiável durante a execução de missões técnicas e operacionais.

Em cenários que demandam maior precisão, agilidade ou complexidade operacional, como manobras agressivas, seguimento de trajetórias tridimensionais ou voo em ambientes restritos, estratégias avançadas de controle e geração de trajetórias têm sido investigadas. Abordagens baseadas em controle ótimo, controle preditivo e técnicas de planejamento de movimento permitem ampliar o envelope operacional dos VANTS, embora frequentemente impliquem maior complexidade computacional e sensibilidade a incertezas de modelagem. Trabalhos recentes demonstram que a integração entre modelos dinâmicos refinados e algoritmos de planejamento viabiliza manobras de alta precisão, desde que acompanhada por adequada estimação de estado e sincronização sensorial (MELLINGER; MICHAEL; KUMAR, 2012).

Do ponto de vista aplicado, particularmente nas engenharias e em operações de segurança, a escolha das estratégias de controle deve considerar não apenas métricas de desempenho, mas também critérios de confiabilidade, interpretabilidade e compatibilidade com requisitos normativos e operacionais. Assim, observa-se que, mesmo diante do avanço de técnicas modernas, o controle clássico permanece como solução tecnicamente consistente e amplamente adotada em sistemas embarcados de VANTS, sobretudo quando integrado a arquiteturas de autonomia e supervisão adequadas. Essa articulação entre fundamentos dinâmicos, estratégias de controle e contexto de aplicação constitui a base para o desenvolvimento de sistemas aéreos não tripulados seguros, eficientes e alinhados às demandas práticas das engenharias e da segurança.



## AUTONOMIA EM VANTS: ARQUITETURA, FUSÃO SENSORIAL E NAVEGAÇÃO

A autonomia em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTS) extrapola a mera estabilização do voo, configurando-se como um problema sistêmico complexo que envolve a integração coordenada de percepção, estimação de estado, planejamento e tomada de decisão em tempo real. Sob uma perspectiva arquitetural, sistemas autônomos são, em geral, organizados em camadas funcionais hierárquicas, nas quais os níveis inferiores são responsáveis pelo controle dinâmico e pela estimação de estados, enquanto camadas superiores tratam da navegação, do planejamento de missões e da adaptação a ambientes dinâmicos e incertos. Essa organização modular favorece a escalabilidade, a robustez e a reutilização de componentes, além de permitir a incorporação progressiva de capacidades cognitivas mais avançadas (BEARD; McLAIN, 2012).

Nesse contexto, a fusão sensorial desempenha papel central na viabilização da autonomia, uma vez que sensores individuais estão sujeitos a limitações físicas, ruídos e vieses sistemáticos. A integração de Unidades de Medição Inercial (IMUs), magnetômetros, barômetros e sistemas de posicionamento possibilita a obtenção de estimativas mais consistentes de atitude, velocidade e posição do veículo. Para tal, filtros não lineares e técnicas de estimação em espaços de rotação, como filtros complementares e abordagens baseadas em representações geométricas, têm sido amplamente empregadas, garantindo estabilidade numérica, baixo custo computacional e desempenho adequado em tempo real, mesmo sob condições operacionais adversas e com restrições de processamento embarcado (MAHONY; HAMEL; PFLIMLIN, 2008).

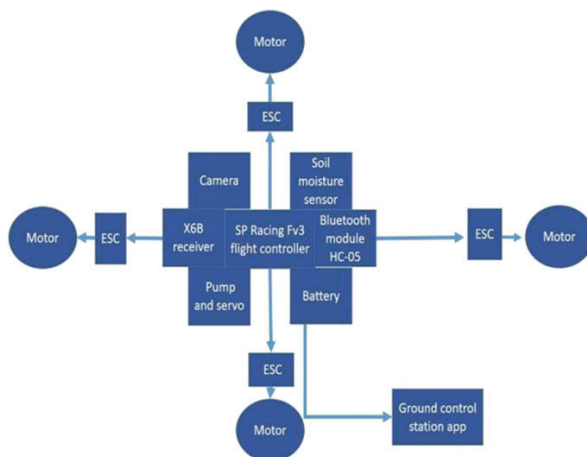


Figura 2: Estrutura de um VANT.

## APLICAÇÕES EM ENGENHARIAS E DE SEGURANÇA: ASPECTOS OPERACIONAIS E NORMATIVOS

Na engenharia agrônômica, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) autônomos têm promovido avanços expressivos na agricultura de precisão, ao possibilitar o mapeamento detalhado de lavouras, a análise espacial de atributos do solo e o monitoramento contínuo da saúde das plantas com elevada resolução temporal e espacial (OLIVEIRA; SOUSA, 2024). Esses recursos permitem a otimização do uso de insumos agrícolas, como água, fertilizantes e defensivos, bem como a implementação de estratégias de manejo integrado de pragas baseadas em intervenções localizadas e respostas rápidas às variações do ambiente produtivo. Nesse contexto, a convergência com os princípios da Indústria 4.0 torna-se evidente, uma vez que os VANTs passam a integrar ecossistemas digitais compostos por Internet das Coisas (IoT), Big Data e Inteligência Artificial, alimentando plataformas de fazendas inteligentes capazes de apoiar decisões automatizadas e predições em tempo real (RODRIGUES; MARTINS, 2023).

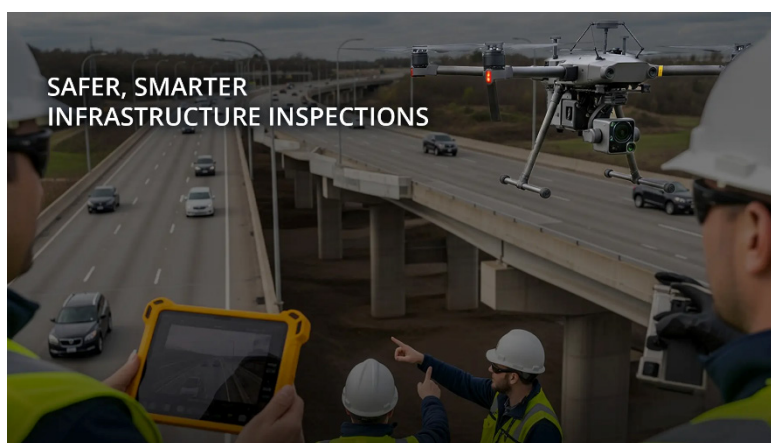


Figura 3: Aplicação de VANT's em inspeção de grandes estruturas.

A incorporação de técnicas de swarm robotics amplia ainda mais esse potencial, ao permitir que múltiplos VANTs operem de forma cooperativa e descentralizada. Por meio de algoritmos de coordenação distribuída, enxames de drones podem executar tarefas como pulverização, semeadura, monitoramento e colheita em grandes extensões agrícolas com maior eficiência, escalabilidade e tolerância a falhas, reduzindo custos operacionais e aumentando a robustez do sistema (ZHANG et al., 2025). Essa abordagem encontra paralelo em aplicações de segurança e resposta a

emergências, como evidenciado por Mendonça (2019), que demonstrou, em trabalho publicado no IEEE, a eficácia do uso cooperativo de robôs terrestres em operações de resgate. Quando integrados a enxames de VANTS, esses sistemas híbridos aéreo-terrestres ampliam significativamente a capacidade de busca, reconhecimento e apoio à tomada de decisão em cenários complexos e dinâmicos, combinando vantagens complementares de mobilidade, percepção e persistência operacional. O estado da arte, portanto, aponta para uma convergência crescente entre drones autônomos, robótica cooperativa e sistemas ciberfísicos, com impactos diretos na eficiência e na segurança das operações de engenharia e resgate.

Em uma perspectiva mais ampla, os VANTS têm consolidado seu papel como ferramentas estratégicas em diferentes ramos das engenharias e da segurança. Na engenharia civil, destacam-se aplicações voltadas à inspeção de pontes, viadutos, barragens e obras lineares, nas quais técnicas de fotogrametria e reconstrução tridimensional permitem a identificação de fissuras, deformações e patologias estruturais com elevado grau de detalhamento, reduzindo a exposição de equipes a riscos operacionais (PEREIRA et al., 2023). Na engenharia elétrica, o emprego de VANTS no monitoramento de linhas de transmissão e redes aéreas possibilita a detecção precoce de falhas, como pontos de aquecimento, desgaste de isoladores e anomalias em cabos e torres, frequentemente sem a necessidade de interrupção do fornecimento de energia (SILVA; LIMA, 2022). Já na engenharia ambiental, essas plataformas têm sido amplamente utilizadas no mapeamento de áreas de preservação, na detecção de desmatamento, na avaliação de impactos ambientais e na análise da qualidade de corpos hídricos, beneficiando-se da coleta recorrente de dados georreferenciados de alta resolução (SANTOS; ALMEIDA, 2021).

No campo da segurança, os VANTS assumem funções relevantes em vigilância perimetral, monitoramento de fronteiras, apoio a operações de resgate em desastres naturais e acompanhamento de grandes eventos, nos quais a capacidade de resposta em tempo real e a autonomia para navegação em ambientes dinâmicos são fatores críticos (FERREIRA; COSTA, 2024). Entretanto, a adoção dessas tecnologias no contexto brasileiro está condicionada ao cumprimento de um rigoroso arcabouço normativo. O Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial RBAC-E nº 94, da Agência Nacional de Aviação Civil, e as diretrizes operacionais do Departamento de Controle do Espaço Aéreo estabelecem limites de altitude, requisitos de certificação, restrições de áreas de voo e procedimentos de planejamento e mitigação de riscos (ANAC, 2017; DECEA, 2023). Dessa forma, o êxito das aplicações de VANTS nas engenharias e na segurança depende da articulação consistente entre técnicas avançadas de controle e autonomia, robustez operacional e estrita conformidade regulatória.

Estudos recentes têm evidenciado, de forma quantitativa, os ganhos operacionais associados à utilização de VANTS autônomos em aplicações de engenharia e

segurança. Na engenharia civil, análises comparativas indicam reduções de até 60% no tempo de inspeção de pontes e estruturas de grande porte quando comparadas a métodos convencionais baseados em acesso humano direto, além de uma diminuição superior a 70% na exposição de equipes a riscos ocupacionais, particularmente em ambientes elevados ou confinados (PEREIRA et al., 2023; LYU et al., 2025). Do ponto de vista da qualidade dos dados, técnicas de fotogrametria aérea associadas a VANTs têm alcançado erros médios inferiores a 3 cm em reconstruções tridimensionais, atendendo aos requisitos técnicos de inspeção estrutural e monitoramento de deformações.

Na engenharia elétrica, aplicações voltadas à inspeção de linhas de transmissão e redes aéreas demonstram ganhos expressivos em eficiência operacional. Estudos reportam redução de custos operacionais entre 30% e 50%, associada à eliminação de desligamentos preventivos e à diminuição do uso de helicópteros tripulados. Adicionalmente, o uso de sensores termográficos embarcados em VANTs possibilita a identificação precoce de pontos de aquecimento com taxas de detecção superiores a 90%, contribuindo para a manutenção preditiva e a redução de falhas não programadas no sistema elétrico (SILVA; LIMA, 2022).



Figura 4: Aplicação de VANTs em fiscalizações.

No contexto da engenharia agrônômica, VANTs aplicados à agricultura de precisão têm apresentado impactos mensuráveis na eficiência produtiva. Resultados experimentais indicam economias de até 25% no uso de fertilizantes e defensivos agrícolas, associadas ao mapeamento espacial detalhado de culturas e à aplicação

localizada de insumos. Paralelamente, incrementos de produtividade da ordem de 10% a 15% têm sido observados em sistemas que integram VANTs, sensores IoT e algoritmos de análise de dados, caracterizando uma convergência efetiva com os princípios da Agricultura 4.0 (OLIVEIRA; SOUSA, 2024; RODRIGUES; MARTINS, 2023).

Em aplicações de segurança e resposta a emergências, os ganhos quantitativos também são relevantes. Operações de busca e salvamento assistidas por VANTs apresentam redução média de 40% no tempo de localização de vítimas em áreas extensas ou de difícil acesso, quando comparadas a estratégias exclusivamente terrestres. Além disso, sistemas cooperativos envolvendo múltiplos VANTs e robôs terrestres demonstram aumento significativo da cobertura espacial e da robustez operacional, mantendo níveis de desempenho mesmo diante da falha parcial de agentes individuais (MENDONÇA, 2019; FERREIRA; COSTA, 2024).

Esses resultados quantitativos reforçam que os benefícios associados ao emprego de VANTs não se limitam a ganhos qualitativos ou operacionais, mas se traduzem em indicadores mensuráveis de eficiência, segurança e qualidade dos dados, desde que as operações sejam conduzidas em conformidade com o arcabouço normativo vigente, incluindo as exigências do RBAC-E nº 94 da ANAC e as diretrizes do DECEA para acesso ao espaço aéreo brasileiro (ANAC, 2017; DECEA, 2023).

Um resumo qualitativo pode ser conferido na tabela 1.

Área de aplicação	Uso específico	Tecnologias utilizadas	Ganhos quantitativos	Principais desafios	Referência normativa/técnica
Engenharia Civil	Inspeção de pontes, viadutos, barragens e obras lineares, com identificação de fissuras e patologias estruturais.	Fotogrametria, reconstrução tridimensional (3D) e algoritmos de visão computacional.	Redução de até 60% no tempo de inspeção; diminuição superior a 70% na exposição a riscos ocupacionais; erros médios inferiores a 3 cm em reconstruções tridimensionais.	Interpretação automática do ambiente; desafios de generalização e explicabilidade da Inteligência Artificial (IA).	RBAC-E nº 94 (ANAC); ICA 100-40 (DECEA).
Engenharia Elétrica	Monitoramento de linhas de transmissão e redes aéreas, com detecção de pontos de aquecimento e desgaste de isoladores.	Sensores termográficos, controle PID em cascata e fusão sensorial (IMU/GPS).	Redução de custos operacionais entre 30% e 50%; taxas de detecção de aquecimento superiores a 90%.	Operação em ambientes com elevada interferência eletromagnética; necessidade de alta precisão em manobras.	RBAC-E nº 94 (ANAC); ICA 100-40 (DECEA).

Área de aplicação	Uso específico	Tecnologias utilizadas	Ganhos quantitativos	Principais desafios	Referência normativa/técnica
Engenharia Agronômica	Agricultura de precisão: mapeamento de lavouras, análise de solo, monitoramento da saúde das plantas e pulverização localizada.	Robótica em enxame ( <i>swarm robotics</i> ), Internet das Coisas (IoT), Big Data, Inteligência Artificial e sensores multiespectrais.	Economia de até 25% no uso de fertilizantes e defensivos; incremento de produtividade entre 10% e 15%.	Coordenação distribuída em grandes extensões; integração com ecossistemas digitais da Indústria 4.0.	RBAC-E nº 94 (ANAC).
Segurança e resposta a emergências	Busca e salvamento, vigilância perimetral, monitoramento de fronteiras e resposta a desastres naturais.	Sistemas híbridos aéreo-terrestres, visão computacional e algoritmos de navegação autônoma.	Redução média de 40% no tempo de localização de vítimas.	Navegação em ambientes dinâmicos e incertos; confiabilidade em aplicações críticas de segurança.	RBAC-E nº 94 (ANAC); ICA 100-40 (DECEA)
Engenharia Ambiental	Mapeamento de áreas de preservação, detecção de desmatamento e análise da qualidade de corpos hídricos.	Coleta de dados georreferenciados, sensores inerciais e sistemas de posicionamento.	Não informado na fonte.	Monitoramento recorrente em áreas de difícil acesso; restrições de processamento de dados embarcado.	RBAC-E nº 94 (ANAC); ICA 100-40 (DECEA).

Tabela 1: Resumo qualitativo das áreas de aplicação de VANTs.

E finalmente a apresentação de uma visão macro na figura 5.



Figura 5: Ganhos com a aplicação de VANTs em diversas áreas.



A consolidação dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) como ferramentas operacionais em diferentes domínios da engenharia resulta de avanços simultâneos em aerodinâmica, sistemas de controle, sensoriamento embarcado e inteligência computacional. Estudos clássicos e contemporâneos indicam que a redução de custos operacionais, o aumento da segurança e a ampliação da capacidade de monitoramento são fatores determinantes para a adoção crescente desses sistemas em ambientes civis, industriais e de segurança (AUSTIN, 2010; VALAVANIS; VACHTSEVANOS, 2015).

No contexto das inspeções de infraestrutura, a literatura aponta que o uso de VANTs equipados com sensores ópticos e termográficos tem se mostrado particularmente eficaz na identificação precoce de falhas estruturais, degradação de materiais e anomalias térmicas, superando limitações associadas a métodos tradicionais baseados em acesso humano direto (METNI; HAMEL, 2007; COLOMINA; MOLINA, 2014). Esses sistemas permitem a aquisição de dados com elevada resolução espacial, além de reduzir significativamente a exposição de operadores a riscos físicos, aspecto especialmente relevante em estruturas de grande porte e redes elétricas aéreas.

Na agricultura de precisão, pesquisas recentes demonstram que a integração de VANTs com sensores multiespectrais e técnicas de processamento de imagens contribui para a otimização do uso de insumos, o monitoramento do estresse hídrico e a estimativa de produtividade agrícola (ZHANG; KOVACS, 2012; HUNT et al., 2018). Esses avanços evidenciam o papel dos VANTs como plataformas de coleta de dados em sistemas ciberfísicos aplicados ao agronegócio, alinhados aos princípios de sustentabilidade e eficiência produtiva.

Do ponto de vista dos fundamentos de controle, grande parte das plataformas comerciais e experimentais de VANTs ainda se apoia em estratégias clássicas, notadamente controladores do tipo Proporcional–Integral–Derivativo (PID), devido à sua robustez, simplicidade de implementação e previsibilidade dinâmica (BOUABDALLAH; NOTH; SIEGWART, 2004). Embora abordagens avançadas baseadas em controle adaptativo, ótimo e aprendizado por reforço tenham ganhado espaço na literatura recente, os controladores clássicos permanecem centrais em aplicações reais, sobretudo em missões críticas que exigem estabilidade e comportamento determinístico.

A autonomia operacional dos VANTs está diretamente associada à capacidade de percepção e interpretação do ambiente. Nesse sentido, a fusão sensorial emerge como um dos principais pilares tecnológicos, combinando dados provenientes de unidades de medição inercial, sistemas de posicionamento global e sensores visuais para permitir navegação robusta e tomada de decisão em tempo real (THRUN;

BURGARD; FOX, 2005; MAHTANI et al., 2021). Essa integração é fundamental para operações em ambientes dinâmicos ou parcialmente estruturados, nos quais incertezas e perturbações são inerentes.

Além dos aspectos técnicos, a literatura recente enfatiza que a efetiva incorporação de VANTs em cenários reais depende do atendimento a requisitos regulatórios e institucionais. Estudos apontam que a ausência de conformidade normativa compromete não apenas a segurança operacional, mas também a legitimidade do uso dessas tecnologias em ambientes urbanos e sensíveis (CLOTHIER et al., 2015; STÖCKER et al., 2017). No Brasil, esse debate ganha relevância diante da necessidade de alinhamento entre inovação tecnológica, segurança do espaço aéreo e proteção de direitos fundamentais.

Em síntese, o estado da arte indica que os VANTs constituem sistemas tecnológicos maduros, cuja eficácia decorre da integração entre aplicações orientadas a dados, fundamentos sólidos de controle e autonomia, e estruturas regulatórias bem definidas. Essa convergência posiciona os VANTs como elementos centrais em soluções contemporâneas de engenharia, monitoramento e segurança, especialmente em contextos que demandam eficiência operacional e mitigação de riscos humanos.

A figura 6 mostra um Modelo conceitual de governança da infraestrutura aérea urbana

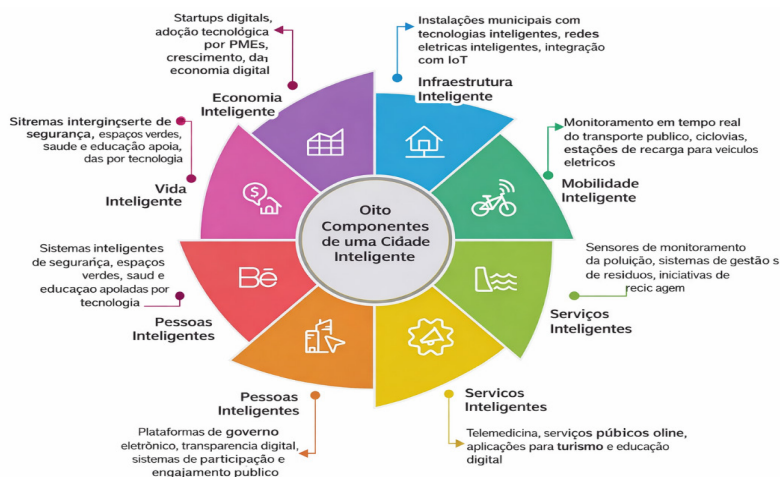


Figura 6: Modelo conceitual de governança da infraestrutura aérea urbana.



## CONCLUSÃO

Este artigo analisou os fundamentos de controle e autonomia aplicados aos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), com ênfase em sua utilização prática nas engenharias e em contextos de segurança. Ao longo do trabalho, evidenciou-se que a efetividade dessas plataformas depende da articulação entre modelagem dinâmica, estratégias de controle em malha fechada, arquiteturas de autonomia e conformidade regulatória, superando abordagens empíricas ainda recorrentes em aplicações reais.

Os resultados indicam que controladores clássicos, em especial arquiteturas em cascata baseadas em controladores do tipo Proporcional–Integral–Derivativo (PID), permanecem amplamente empregados em sistemas embarcados de VANTs, em razão de sua robustez, previsibilidade e viabilidade computacional. Embora técnicas modernas baseadas em inteligência artificial apresentem potencial para ampliar o grau de autonomia, sua adoção em aplicações críticas ainda enfrenta desafios relacionados à confiabilidade, à explicabilidade e à compatibilidade com restrições operacionais e normativas.

A análise das aplicações discutidas demonstrou ganhos operacionais mensuráveis nas engenharias civil, elétrica, agrônoma e ambiental, incluindo reduções de tempo, custos e exposição humana a riscos, além de melhorias na qualidade dos dados coletados. Em aplicações de segurança e resposta a emergências, observou-se redução significativa no tempo de resposta e ampliação da cobertura operacional, reforçando o papel dos VANTs como ferramentas técnicas viáveis e eficientes.

Por fim, o estudo reforça que os benefícios associados ao uso de VANTs são indissociáveis do atendimento às exigências regulatórias, especialmente no contexto brasileiro. Como perspectivas futuras, destaca-se a integração entre controle clássico e técnicas adaptativas e preditivas, bem como o desenvolvimento de métodos de inteligência artificial explicáveis, visando ampliar a confiabilidade e a aceitabilidade de sistemas autônomos nas engenharias e na segurança.

## AGRADECIMENTO

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial – RBAC-E nº 94: requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil**. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbac/rbac-e/rbac-e-94>. Acesso em: 22 jan. 2026.

BEARD, Randal W.; McLAIN, Timothy W. **Small unmanned aircraft: theory and practice**. Princeton: Princeton University Press, 2012.

BOUABDALLAH, Samir; NOTH, André; SIEGWART, Roland. PID vs LQ control techniques applied to an indoor micro quadrotor. In: **PROCEEDINGS OF THE IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS**. Sendai, 2004. p. 2451–2456.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO (DECEA). **ICA 100-40: aeronaves não tripuladas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro**. Brasília, DF, 2023. Disponível em: <https://www.decea.mil.br/drone/>. Acesso em: 22 jan. 2026.

FERREIRA, L. R.; COSTA, M. A. Aplicações de veículos aéreos não tripulados em operações de segurança pública e resposta a emergências. **Revista Brasileira de Segurança e Defesa**, v. 12, n. 1, p. 45–62, 2024.

GOODFELLOW, Ian; BENGIO, Yoshua; COURVILLE, Aaron. **Deep learning**. Cambridge: MIT Press, 2016.

LYU, Chenguang et al. UAV-based deep learning applications for automated inspection of civil infrastructure: a review. **Automation in Construction**, v. 158, p. 105168, 2025. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105168.

MAHONY, Robert; HAMEL, Tarek; PFLIMLIN, Jean-Michel. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 53, n. 5, p. 1203–1218, 2008. DOI: 10.1109/TAC.2008.923738.

MELLINGER, Daniel; MICHAEL, Nathan; KUMAR, Vijay. Trajectory generation and control for precise aggressive maneuvers with quadrotors. **The International Journal of Robotics Research**, v. 31, n. 5, p. 664–674, 2012. DOI: 10.1177/0278364911434236.

MENDONÇA, M. M. Cooperative terrestrial robotic systems for search and rescue operations. In: **IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA)**. Montreal: IEEE, 2019. p. 1–7.

OLIVEIRA, T. S.; SOUSA, R. P. Uso de veículos aéreos não tripulados na agricultura de precisão: monitoramento e manejo inteligente de culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 2, p. 134–148, 2024.

PEREIRA, A. L.; COSTA, R. M.; SILVA, J. F. Inspeção de estruturas civis por meio de fotogrametria com VANTs. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 16, n. 3, p. 1–15, 2023.

RODRIGUES, H. L.; MARTINS, E. F. Agricultura 4.0: integração de IoT, big data e inteligência artificial em sistemas produtivos agrícolas. **Computação Aplicada à Agricultura**, v. 9, n. 1, p. 22–38, 2023.

SANTOS, D. P.; ALMEIDA, C. R. Monitoramento ambiental com veículos aéreos não tripulados: aplicações e desafios. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 4, p. 987–1003, 2021.

SANTOS, L. F.; OLIVEIRA, G. M. Sistemas ciberfísicos e drones autônomos no contexto da Indústria 4.0. **Journal of Intelligent Manufacturing Systems**, v. 6, n. 2, p. 55–71, 2024.

SILVA, P. H.; LIMA, A. J. Inspeção de linhas de transmissão com veículos aéreos não tripulados e sensores termográficos. **Revista Brasileira de Energia**, v. 28, n. 1, p. 89–104, 2022.

VILLARINO, Aitor et al. UAV applications for monitoring and management of civil infrastructures. **Infrastructures**, v. 10, n. 5, p. 106, 2025. DOI:10.3390/infrastructures10050106.

ZHANG, Y.; LI, X.; WANG, H. Swarm robotics for agricultural applications: coordination, scalability and fault tolerance. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 168, p. 104447, 2025.