

Artigo

Inteligência Artificial no controle de drones aéreos: uma análise dos impactos científicos, éticos e sociais

Gerson Marcelo Camargo¹

Wanda Aparecida Machado Hoffman²

¹ Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP
prof.gersoncamargo@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6013-6538>

² Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR
wanda@ufscar.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1359-1802>

Resumo

As tecnologias de Inteligência Artificial (IA) vêm se desenvolvendo de forma exponencial, trazendo consigo dilemas ético-sociais relevantes. Drones, tecnicamente denominados veículos aéreos não tripulados (VANTs), prometem revolucionar diversos setores, como agricultura, logística, serviços especializados e segurança pública. Avanços significativos da IA e capacidade de aprendizado de sistemas algorítmicos contribuem à combinação que estabelece confiabilidade ao voo autônomo, descartando cada vez mais a ação cognitiva humana no controle dessas máquinas. No entanto, essa inovação traz consigo importantes questões socio-científicas que carecem de uma análise mais aprofundada. Ao delegar decisões críticas à algoritmos de máquinas com alto potencial de impacto, faz-se necessário primeiro avaliar o quão a sociedade está protegida em relação a essa nova tecnologia. A pesquisa propõe uma prospecção nesse campo emergente, analisando como a integração entre VANTs, IA e sociedade possam ser aprimoradas e quais seriam os obstáculos a serem superados para garantir um desenvolvimento sustentável e seguro. Através de uma abordagem multidisciplinar, buscou-se compreender as implicações desta combinação de tecnologias e suas aplicações futuras, e principalmente as tendências, ou “*trends*”, em desenvolvimento no meio científico e na indústria nacional e internacional.

Palavras chave: drones; inteligência artificial; sociedade

Artificial Intelligence in the Control of Aerial Drones: An Analysis of Scientific, Ethical, and Social Impacts

Abstract

Artificial intelligence (AI) technologies have been developing exponentially, bringing with them significant ethical and social dilemmas. Drones, technically referred as unmanned aerial vehicles (UAVs), promise to revolutionize various sectors, such as agriculture, logistics, specialized services, and public security. Significant advances in artificial intelligence and in the learning capabilities of algorithmic systems contribute to a combination of factors that establishes reliability in autonomous flight, increasingly reducing the need for human cognitive involvement in the control of these machines. However, this innovation also raises important socio-scientific issues that require more in-depth analysis. Delegating critical decisions to machine algorithms with high potential impact, it becomes necessary to first assess the extent to which society is protected in relation to this emerging technology. This research proposes a prospective analysis of this emerging field, examining how the integration of UAVs, artificial intelligence, and society can be improved, as well as identifying the obstacles that must be overcome to ensure safe and sustainable development. Through a multidisciplinary approach, the study seeks to understand the implications of this combination of technologies and their future applications, with particular emphasis on emerging trends within the scientific community and both national and international industries

Keywords: drones; artificial intelligence; society.

1. Introdução

A Inteligência Artificial (IA) é um advento que vem assumindo posição de grande relevância na substituição do trabalho de cognição humana para solução de problemas mais complexos. Áreas de pesquisa e desenvolvimento (P&D) de empresas de alta tecnologia vem trabalhando de forma frenética em desenvolvimentos de algoritmos de aprendizagem e respostas para resolução de questões que venham a substituir atuação humana no sentido de ampliar eficiência e segurança em operações.

Os desenvolvimentos se multiplicam nas mais diversas áreas da ciência, passando pela medicina, veículos e mais intensamente no modal de transportes aéreos, onde prevê-se uma futura disruptura tecnológica.

O presente artigo é parte de uma pesquisa que busca investigar qual nível de aplicação de IA no controle de veículos aéreos não tripulados (VANTs). Prospecções e investigações realizadas no ambiente da indústria aeronáutica, a exemplo da indústria automotiva, indicam que sistemas de controle automatizados comandados por IA tendem a assumir cada vez mais controles de dispositivos com a promessa de aumentar o conforto, segurança, precisão e confiabilidade.

Segundo a indústria Airbus (2023), diversos testes utilizando voo completamente autônomo foram realizados com sucesso em aeronaves de passageiros de grande porte, indicando que, em um futuro breve, a ação humana no comando de dispositivos voadores poderá tomar um papel secundário. Tal evolução tecnológica traz consigo preocupações inerentes aos riscos da confiança total em máquinas.

Os drones aéreos, ou VANTs, como são tecnicamente conhecidos, fazem parte de uma tecnologia que está revolucionando diversos segmentos da sociedade e vem substituindo gradativamente a ação humana em atividades de alta complexidade, agregando eficiência e segurança em determinadas operações (Santos e Loredsleem, 2020).

Segundo Austin (2010), nas últimas duas décadas a disseminação de novas tecnologias até então restritas ao uso militar (incluindo controles algorítmicos - IA), propiciaram a amplificação de modelos e aplicações de dispositivos de voo pilotados remotamente na sociedade. O uso civil de VANTs diversificou-se em segmentos importantes, tais como a vigilância em segurança pública, pulverização de insumos na agricultura, sistemas de georreferenciamento na agrimensura, inspeções detalhadas no segmento industrial, e mais recentemente, tornou-se um potencial disruptivo no modal de transportes de cargas e pessoas.

Basso *et. al.* (2024) detalha que o aprimoramento de técnicas de aprendizado profundo por meio de redes neurais, contidas na IA, propiciou avanços profundos na autossuficiência dos sistemas de controles embarcados em VANTs, obviamente com intuito único de minimização de esforço humano e consequente resistência a falhas.

No entanto, estudos indicam que as redes neurais de IA aplicadas em VANTs tem como fonte de alimentação de dados basicamente o processamento de imagens e interpretação dos sistemas de sensoriamento, o que levam a respostas fidedignas de controle conforme citado por Basso *et. al.* (2024). Neste sentido, as decisões e aprendizados da neutralidade do sistema apoiam-se nestes “*inputs*” que, em comparação à lógica do raciocínio humano, ainda estão muito aquém de oferecer operações em níveis aceitáveis que venham a garantir a segurança da sociedade.

As autoridades aeronáuticas no mundo todo vêm acompanhando a evolução da tecnologia em questão com preocupações e grandes desafios regulatórios. Em âmbito nacional, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), pautada no Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial – RBAC-E nº 94, ANAC (2017), estabelece classificação para VANTs em divisões que consideram variáveis como: peso do equipamento; forma de controle; teto e amplitude operacional, aplicando regras bastante restritivas devido ao alto potencial de periculosidade na operação destes dispositivos.

É neste contexto que a pesquisa propõe o objetivo de iniciar uma discussão sobre os impactos dessa nova tecnologia (IA no controle de VANTs), oriunda de laboratórios, institutos de pesquisa e indústria. As discussões propostas seguem a reflexão de Latour (2000), afirmando que inovações técnicas têm consequências sociais diretas, incluindo riscos e impactos sobre a segurança coletiva e, neste sentido, precisam ser discutidas.

Perrow (1999) auxilia na crítica de discussões ao questionar as fragilidades sistêmicas de tecnologias incipientes, neste caso, a substituição da inteligência humana por uma artificial em dispositivos de alto potencial de risco.

Faz-se necessário também discutir questões éticas sobre quem é o responsável moral sobre a aplicação da IA nestes dispositivos que permitem vigilância massiva. A tecnologia em questão progride a um potencial de processamento volumoso de dados em tempo real, como por exemplo, o reconhecimento facial e a análise de comportamento humano, o que amplia o potencial de violação de direitos fundamentais, especialmente em contextos civis, podendo elevar a tecnologia como ferramenta de assimetria de poder.

Considerando as hipóteses mencionadas, torna-se evidente que a incorporação da IA no comando autônomo de VANTs não pode ser analisada apenas sob a ótica da inovação, da eficiência e do desempenho técnico. Sob a ótica da Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS), tais inovações tecnológicas devem ser compreendidas como construções sociotécnicas, onde os impactos extrapolam o campo linear da engenharia e influenciam diretamente relações de poder, estruturas regulatórias, práticas institucionais e a própria percepção social de risco e segurança.

2. Materiais e métodos

Ao definir a pesquisa envolvendo uma análise crítica, no sentido de detectar os possíveis limites socialmente aceitáveis da implantação de uma nova tecnologia, faz-se também necessário compreender e definir os métodos e procedimentos mais adequados para investigar, expor e analisar novos conhecimentos. O grande desafio da pesquisa foi obter informações que ainda fazem parte de um contexto de sigilo tecnológico, devido a questões de competitividade industrial e uso de imagens negativas entre os atores que detém o estado da arte deste conhecimento.

Neste sentido, propõe-se inicialmente usar um modelo de delimitação baseado nos estudos de Miles e Huberman (1994), que indicam a adoção de uma representação visual ou textual em que seja possível fazer transparecer as relações que se dão entre os constructos e as variáveis influentes que devem ser estudadas na pesquisa, neste caso a relação entre uma inovação incipiente e a sociedade.

O objeto de estudo apresenta características específicas que demandam uma compreensão prévia a fim de possibilitar, posteriormente, a definição de critérios e classificações adequados à pesquisa. Ao se propor a compreensão de impactos de implantação de uma tecnologia de elevada complexidade, desenvolvida em um contexto científico-industrial de acesso restrito, estabelece-se que esta investigação possui natureza aplicada e está direcionada a um campo específico do conhecimento. A abordagem do problema e a obtenção de resultados plausíveis fundamentam-se no método qualitativo uma vez que, embora as informações analisadas sejam oriundas de dados empíricos, a construção das conclusões ocorre de forma indutiva, a partir da interpretação dos fenômenos observados e após as discussões necessárias (Miguel *et. al.*, 2018).

Seguindo a abordagem metodológica proposta por Miguel et al. (2018), as etapas iniciais desta pesquisa envolveram a realização de levantamentos bibliográficos em fontes especializadas, com ênfase em publicações nacionais e internacionais, visando à construção de uma base de conhecimento consistente. Tal procedimento teve como objetivo principal oferecer sustentação teórica ao pesquisador, conferindo maior rigor e coerência às etapas subsequentes, especialmente às fases de exploração e de pesquisa de campo.

As etapas subsequentes concentraram-se no planejamento e na condução da pesquisa de campo, orientadas pelo método indutivo conforme proposto por Eisenhardt (1989), cuja flexibilidade metodológica permite ajustes ao longo do desenvolvimento da investigação. Em consonância com essa abordagem, foram definidas como fontes de informação os institutos de pesquisa, universidades, indústrias especializadas, empresas de consultoria atuantes no setor e a autoridade aeronáutica brasileira.

O detalhamento do processo de coleta de dados envolveu a definição das organizações participantes da pesquisa, contemplando uma microempresa, três empresas de pequeno porte, uma empresa de médio porte e uma de grande porte. Adicionalmente, foram incluídos dois institutos de pesquisa vinculados a universidades brasileiras e um laboratório de pesquisa localizado em Portugal. Também integraram o estudo uma empresa de consultoria voltada à pesquisa e desenvolvimento de VANTs, e outra especializada em operações e prestação de serviços nesse segmento.

Neste universo de pesquisa foram abordados atores atuantes nas áreas de diretoria técnica, pesquisa e desenvolvimento (engenharia) e pesquisadores da área. Com os representantes desses segmentos, foram conduzidas onze entrevistas semiestruturadas, com o objetivo de conferir maior flexibilidade ao entrevistador e possibilitar a apreensão mais aprofundada dos aspectos cognitivos e das questões mais relevantes relacionadas ao tema investigado.

Por questões éticas e a pedido de alguns entrevistados, serão mantidos em sigilo a identificação das organizações e dos atores.

A etapa final consistiu na análise sistemática das informações coletadas, visando à consolidação do conhecimento produzido, e após o desenvolvimento das discussões recorrentes apoiadas em literaturas do campo da CTS. Esse procedimento possibilitou a convergência das evidências empíricas, resultando na identificação de aspectos que demandam maiores discussões e entendimentos nas dimensões da relação tecnologia-sociedade, aspectos político-regulatórios e ético-morais.

3. Resultados e discussões

3.1 A transição do controle humano para o controle algorítmico em dispositivos de voo e os impactos sociais e substituição da ação humana

Os anos pós Segunda Guerra Mundial foram responsáveis por um salto tecnológico vertiginoso na indústria aeronáutica. Tecnologias importantes na engenharia de construção de aeronaves, como os motores à reação, velocidades supersônicas, pressurização, sistemas avançados de comunicação e navegação desenvolvidos nos meios militares durante o esforço de guerra permearam à indústria civil, proporcionando grande impulso à aviação mundial (Espírito Santo Jr., 2003).

Uma das tecnologias que evoluíram foram os sistemas de pilotagem automática, que incorporaram gradativamente funcionalidades e sistemas de segurança. Entre as décadas de 1950 e 1980 houve uma grande evolução destes sistemas desenvolvendo-se, além dos sistemas de comandos, o sistema de controle automático de potência que, trabalhando conjuntamente com os demais, já permitiam pousos automáticos e travessias transatlânticas pilotadas por sistemas, reduzindo em muito a carga de trabalho humano em controle (Shy aviation, 2025).

A partir da década de 1980, a incorporação de sistemas de navegação inercial, controladores eletrônicos e filtros de frequência permitiram o aperfeiçoamento de sistemas de voo por instrumentos (*Instrument Flight Reference* – IFR) e do sistema de pouso por instrumentos (*Instrument landing System* - ILS), viabilizando operações de voo e aproximações e pousos automáticos, ficando a atuação humana apenas como *backup* (Cook, 2013).

Em meados da década de 1980 e início da década de 1990, com a introdução da eletrônica digital, e de processadores e computadores, os sistemas evoluíram para artefatos de controle automáticos mais simplificados, leves e muito mais seguros, destacando-se os sistemas de comando interpretados por computadores e transmitidos por fios conceituados como controle *fly-by-wire*. Neste sistema, os comandos do piloto são interpretados por sensores e passam por um controle de algoritmos que filtram os comandos, garantindo estabilidade e proteção do envelope de voo (Nelson, 1998).

O automatismo algorítmico do voo evoluiu a tal passo que, atualmente, em aeronaves modernas de médio e grande porte existe uma maior dependência dessa automação por parte da tripulação. Consequentemente, os riscos de falhas da automação têm prejudicado significativamente a consciência situacional dos pilotos, sendo que dispositivos com maior grau de automatismo reduzem a probabilidade de que os pilotos façam o esforço cognitivo necessário para processar todas as informações disponíveis (Uk caa, 2004).

Organizações governamentais de investigação de acidentes aéreos apontam inúmeros casos em que as surpresas da automação e a confusão de modos tecnológicos corroem as barreiras de segurança e atuam como fatores contributivos para acidentes (Li *et. al.*, 2016). É neste ponto que riscos produzidos pela modernidade avançada escapam aos sentidos humanos e só se tornam visíveis por meio de sistemas científicos e técnicos (Beck, 2010).

A progressiva incorporação da tecnologia de automação em aeronaves, tripuladas ou não, tem sido amplamente discutida na literatura técnica, científica e regulatória, justamente por provocar novas formas de risco operacional e, em muitos casos, riscos ocultos. Questões

como perda de controle situacional, degradação de habilidades cognitivas e transferência de responsabilidades às máquinas delimitam a fronteira onde as fragilidades anexas às novas tecnologias se tornam ameaças potenciais à sociedade.

3.2 Os VANTs, resultado de uma tecnologia sociotécnica

Os primeiros relatos de dispositivos aéreos não tripulados remetem à apresentação do brasileiro Bartolomeu Lourenço de Gusmão que demonstrou o voo de um aeróstato à corte portuguesa regida pelo Rei Dom João V em meados dos anos de 1709, comprovando a viabilidade de construção de dispositivos aéreos (Visioni e Canalle, 2009). Algumas iniciativas de construção ocorreram no início do século XX. No entanto, foi somente durante a Segunda Guerra Mundial que esses dispositivos passaram a ser desenvolvidos em massa para fins bélicos.

Nos anos em que seguiram a Segunda Grande Guerra, dispositivos de voo não tripulados passaram a ser desenvolvidos para servir como transporte de artefatos explosivos. A Alemanha passou a produzir em grande escala as bombas voadoras tipo V1 e V2 que proporcionavam ataques precisos de longo alcance. A trajetória de voo destes dispositivos era calibrada em solo antes do lançamento, considerando variáveis como peso de carga, distância, ventos previstos e um sofisticado sistema de orientação composto por giroscópios, barômetros e um anemômetro eram usados para determinar posição pretendida (Darack, 2011).

No entanto, com o desenvolvimento do aeromodelismo e os controles remotos de radiofrequência, a partir da década de 1950 alguns projetos passaram a ser desenvolvidos para aplicações mais específicas e restritas. Os aeromodelos, chamados de *Remotely-Piloted Aircraft* – RPA, amplamente utilizados para fins de lazer, também passaram a ser diversificados e amplamente utilizados em aplicações militares, sendo este o berço da evolução desta tecnologia (Usaf, 2009).

A consolidação da tecnologia dos VANTs e o estabelecimento das configurações próximas às conhecidas atualmente ocorreram durante o transcorrer da Guerra Fria como parte da corrida armamentista e da busca da supremacia militar, chamada de “poder do medo” (Keane e Carr, 2013). A partir da década de 1980 os VANTs evoluíram de plataformas rudimentares de alvos aéreos para dispositivos de missões avançadas de reconhecimento e intervenção precisa, desenvolvidas com intuito de reduzir riscos humanos e ampliar capacidades estratégicas, principalmente de longo alcance.

A partir de meados da década de 1990, com o desenvolvimento e disseminação dos sistemas de navegação por satélite (GPS) e o aprimoramento de dispositivos de estabilização e controle, evoluíram os experimentos e diversificaram-se ainda mais as aplicações destes dispositivos (Austin, 2010). Neste momento, a tecnologia dos VANTs, ainda contida nos meios militares, determina uma ruptura significativa nas estratégias de guerra: as batalhas passam a ser remotas (quilômetros de distância do operador) e assimétricas (eliminação de perda humana de um lado e ampliação da vulnerabilidade do outro).

A partir de meados da década de 2000 começa a ocorrer um processo de transferência tecnológica onde as tecnologias militares desenvolvidas para VANTs permearam para aplicações civis (Paz, *et. al.* 2023). Atualmente a difusão dos VANTs, das tecnologias associadas e da criatividade em sua aplicação viabilizaram a popularização destes dispositivos, permeando

em diversos setores da sociedade. Conforme dados coletados em pesquisa de campo os VANTs vêm assumindo, ora como coadjuvantes, ora como protagonistas, funções de extrema relevância no chamado Serviço Aéreo Especializado (SAE), onde a presença humana no controle de máquinas voadoras é essencial.

Mesmo a tecnologia dos VANTs sendo aberta à indústria civil, os atores investigados na pesquisa alertam que a disseminação e diversificação desse conhecimento não evolui de forma neutra ou linear. Pelo contrário, os países detentores (China, EUA, Alemanha, entre outros) retêm a expertise da produção de insumos e componentes específicos e forçadamente incorporam valores específicos conforme sua necessidade, refletindo em demandas sociais e econômicas específicas.

Análogo ao pensamento de Winner (1986), a pesquisa identifica que a tecnologia dos VANTs é um fenômeno que carrega arranjos de poder específicos. São artefatos tecnológicos que contribuem para a configuração de práticas de interesse social direcionado, especialmente no que se refere ao aumento de produção agrícola, vigilância de populações, monitoramento de territórios e inspeções de infraestruturas.

3.3 Inteligência Artificial no controle de VANTs, um dilema para ciência, tecnologia e Sociedade

A incorporação da IA em sistemas de controle de dispositivos aeroespaciais é uma tendência tecnológica que ocorre simultaneamente em diversos segmentos como, por exemplo, setor automotivo, setor marítimo, medicina, indústria de produções e tecnologia da informação. O governo norte americano foi o precursor do desenvolvimento científico para aplicação de sistemas algorítmicos nas mais diversas funções, principalmente em sistemas aeronáuticos (Chapman, 2003).

Nos VANTs a crescente demanda pelo uso da IA para execução do controle de operações e missões tornou-se uma tecnologia em ascensão, ao mesmo passo que evoluíram as diversidades de aplicabilidade e aceitação comercial destes dispositivos. Tanto em aplicações militares quanto, mais recentemente, em contextos civis, a crescente diversificação de usos dos VANTs, especialmente em missões de longo alcance e operações em ambientes com informações parciais (missões cegas ou confinadas), impulsiona a adoção acelerada de métodos baseados em IA para melhorar a autonomia, robustez e desempenho desses dispositivos (Floreano e Wood, 2015).

Diferentemente da automação tradicional, baseada em regras fixas e modelos determinísticos, a IA possibilita aprendizagem, adaptação e tomada de decisão em ambientes dinâmicos e incertos (Siciliano e Khatib, 2016). Tal evolução tem ampliado a autonomia operacional dos VANTs, especialmente em aplicações militares onde eficiência, precisão e redução do risco humano são fatores estratégicos fundamentais.

Com o aumento da autonomia operacional de VANTs de longo alcance (“*extended range*”), esses dispositivos deixaram de ser simplesmente aeronaves remotamente pilotadas (ARP) para ter um cérebro algorítmico de comando e controle (Ahmad, 2026). Organizações envolvidas nesta pesquisa relatam que projetos de VANTs capazes de realizar operações *Beyond*

Visual Line of Sight (BVLOS), ou seja, além do campo de visão do operador, estão em desenvolvimento. Como exemplo, uma das indústrias de médio porte investigada relata:

Existe demanda comercial e atualmente está em desenvolvimento projeto de aeronaves não tripuladas com autonomia de voo contínua de 13 horas, voos com distâncias de até 900 quilômetros sem abastecimento, para realizações de missões de vigilância e georreferenciamento. O projeto prevê voos de longa distância e precisão de navegação, considerando requisitos específicos de missão.¹

Em laboratórios de pesquisas também estão sendo desenvolvidos projetos específicos para outros tipos de missões:

Existem pesquisas avançadas no desenvolvimento de dispositivos específicos para realização de voos em ambientes confinados (tubulações, cavernas, labirintos), essa tecnologia prevê que o dispositivo tenha capacidade de se auto orientar sem na ausência completa de orientação visual humana. Tais dispositivos apresentam grande potencial de vantagem em condições de resgate e salvamento em cavernas, condições específicas de soterramento, ações policiais (ex. antibombas), inspeções internas de dutos, tubulações onde não existe luminosidade, nitidez ou acesso a visualização interna.²

As operações BVLOS permitirão em futuro próximo o afastamento de pilotos humanos em processos estabelecidos e rotineiros, conforme explica o proprietário da indústria de pequeno porte investigada:

A empresa está voltada exclusivamente ao atendimento de soluções aéreas para o setor agrícola. O principal desenvolvimento da organização é o projeto de um VANT com operação autônoma BVLOS para aplicação em massa de pulverização de defensivos agrícolas. O maior projeto já em fase avançada prevê capacidade de carga de aproximadamente 600 quilos de defensivos por viagem, o que representa 70% da capacidade de uma aeronave tripulada convencional, com custo de operação consideravelmente menor, sem riscos de fatalidades de pilotos.³

Nessas operações de longo alcance, a integração de algoritmos de IA passa a assumir, total ou parcialmente, funções de pilotagem e tomada de decisão do sistema, dependendo da arquitetura e do modelo empregado visando garantir autonomia, segurança e eficiência de missão.

1 Informação do diretor de engenharia empresa de médio porte 1 participante.

2 Informação do pesquisador do instituto de pesquisa 2 participante.

3 Informação do proprietário empresa de pequeno porte 1 participante.

Os sistemas clássicos de controle de VANTs utilizam modelos que dependem fortemente de informações precisas do sistema dinâmico da aeronave, informações sobre sua interação com o ambiente e as determinações pré estabelecidas sobre a missão a ser executada. Esse conjunto de variáveis é processada com uma lógica previamente definida e executada de forma binária e fidedigna.

Já as arquiteturas de controle por IA são baseadas em complexos computacionais como redes neurais artificiais, lógica *fuzzy* e algoritmos evolutivos que, além das informações do modelo tradicional, fornecem também controle adaptativo e robustez frente à incerteza e perturbações ambientais conferindo ao dispositivo as seguintes características:

- Os sistemas de controle por IA permitem o estabelecimento **de níveis graduais de autonomia** de pilotagem e operação de mecanismos.
- Nos VANTs autônomos, os algoritmos de aprendizado supervisionado e não supervisionado que interpretam sinais de sensores permitem a realização do **planejamento adaptativo de missão**, ou seja, possui autoridade para tomada de decisão e reconfiguração da rota do voo e desvios de obstáculos em tempo real.
- IA aplica algoritmos avançados (baseados em aprendizado profundo e metaheurísticas) que consideram múltiplos objetivos simultâneos, permitindo a **otimização de trajetórias**. Tais abordagens permitem o ajuste de rotas em tempo real com base em percepção ambiental superando limitações de algoritmos determinísticos pré-programados, proporcionando minimização de tempo de missão, economia de energia, diminuindo riscos de colisão com obstáculos e maior segurança.
- A interpretação de dados de sensores complexos pela IA como, por exemplo, câmeras hiperespectrais, sensores tipo *Laser Imaging Detection and Ranging* (LiDAR) e infravermelhos possibilitam a criação de representações contextuais do ambiente. Tais técnicas de visão computacional e fusão sensorial permitem detecção de obstáculos, reconhecimento de alvos e navegação em ambientes sem auxílio de navegação por satélite, desenvolvendo no dispositivo um **sentido artificial de consciência situacional**.
- Alguns sistemas de controle de IA (redes neurais multiagente e aprendizado por reforço emergente), coordenados com sistemas de comunicação integrado, viabilizam a **coordenação descentralizada** entre múltiplos dispositivos idênticos (enxame) ou entre VANTs e aeronaves tripuladas. Essa capacidade é valiosa para operações militares, agrícolas e em regiões de intenso tráfego aéreo que exigem cobertura ampla e resiliência a falhas de contato.
- O avanço na capacidade de processamento e a evolução algorítmica permite aos sistemas de IA desenvolverem **capacidade de auto diagnose de falhas e anomalias**. Associada à esta capacidade, também é possível a previsão de protocolos de reconfiguração automáticos em respostas a falhas e anomalias, inferindo níveis maiores de segurança ao produto.

Laboratórios de pesquisas e as áreas de pesquisa e desenvolvimento de indústrias tem trabalhado de forma incisiva em dois dos grandes demandas da tecnologia de VANTs conforme se destacam:

1 - Em um contexto geral, existe um grande desafio em relação à alimentação dos sistemas de propulsão dos VANTs. Grande parte dos dispositivos são equipados com motores elétricos e com a amplificação das missões e da capacidade de carga, as baterias são atualmente uma muralha tecnológica a ser derrubada. A nossa indústria, por exemplo, desenvolveu um sistema híbrido de geração e propulsão onde um motor à combustão movimenta um gerador elétrico que transmite energia ao motor principal de tração dos rotores. Observa-se que outros concorrentes internos também adotam essa metodologia em projetos específicos, no entanto, ainda está aquém da melhor relação de eficiência e da melhor relação custo benefício.⁴

2 – O desenvolvimento de algoritmos de IA para aplicação em controle de artefatos de uso aeronáutico apresentam características de complexidade relevantemente maiores. A questão do potencial de riscos associados, a determinação de requisitos de segurança severos, determinação de sistemas de redundância fazem com que o desenvolvimento desta ciência em âmbito civil, caminhe a passos mais moderados.⁵ O desenvolvimento de inteligência de controle autônomo está ocorrendo de forma mais avançada em outros segmentos como por exemplo o automotivo. Indústrias deste setor já tem lógicas algorítmicas com capacidade de decisão apuradas, baseadas em dados coletados sobre o comportamento de motoristas diferentes em situações mais diversas possíveis. São zetabytes de dados alimentando lógicas de controle, o que ainda não é disponível para os VANTs.⁶

O dilema desta nova tecnologia se concentra na interação humano–máquina. Ao mesmo ritmo que a autonomia algorítmica promete ganhos expressivos em eficiência, precisão e rapidez, também torna cada vez mais passiva a participação da cognição humana no processo crítico de decisão. Com o aumento progressivo do número de operações e do tamanho e potência dos dispositivos, é possível prever que falhas catastróficas possam ocorrer.

A crescente utilização de IA intensifica esse dilema ao promover uma transição direta do controle humano para modelos de supervisão ou decisão algorítmica. Níveis elevados de automação tendem a deslocar a responsabilidade humana e a dificultar a compreensão do funcionamento do sistema, ampliando os riscos sociotécnicos (Parasuraman, Sheridan e Wickens, 2000).

Neste ponto, são pertinentes discussões quanto à dissociação entre decisão e responsabilidade, pois o resultado de uma falha fatal ocasionada por uma inteligência algorítmica não elimina a responsabilidade humana do processo. Pelo contrário, não existe um vácuo ético, ao passo que a realocização temporal e estrutural da figura humana passa a responder pelo processo, detendo o comando na forma de antes (projeto), durante (supervisão) e depois (responsabilização), sendo a autonomia algorítmica condicionada à decisão humana (Winner, 1986).

4 Informação do diretor técnico empresa de médio porte 2 participante.

5 Informação do pesquisador do instituto de pesquisa internacional participante.

6 Informação do gestor de engenharia indústria de grande porte participante.

3.4 Inteligência Artificial no controle de VANTs: o estado da arte da tecnologia

Obter a compreensão sobre quais níveis de incorporação de IA existe atualmente na indústria não é tarefa simples e objetiva. Sigilo industrial, projetos e aplicabilidades a operações diversas fazem com que haja uma amplitude significativa no entendimento exato do estágio tecnológico. No entanto, baseado na pesquisa de campo realizada, é possível estabelecer um panorama que permita o entendimento aproximado.

A IA associada aos VANTs tem se consolidado como uma tecnologia de caráter potencialmente disruptivo, sendo frequentemente apresentada como capaz de transformar e, em alguns casos substituir, modelos tradicionais de logística e de prestação de serviços em múltiplos setores de atuação. Um participante, professor de universidade nacional renomada e pesquisador, destaca:

O elevado potencial estratégico dessa convergência tecnológica é evidenciado pelo fato de que tais sistemas deixaram de constituir apenas objetos de pesquisa em ambientes laboratoriais e experimentais. Atualmente, desenvolvimentos científicos de IA para sistemas de controle passaram a ocupar posição central nas estratégias de inovação e competitividade de grandes corporações globais “*big techs*” onde os institutos de pesquisa configuram como berço dos “*insights*” de inovação.⁷

A automação inteligente de sistemas embarcados consiste na necessidade de integração de tecnologias distintas a serem entendidas abaixo.

1- Sistemas eletrônicos:

- Controlador de voo ou *Flight Controller Unit* (FCU), unidade que contém microprocessadores e softwares de controle que executam navegação, controles de voo e motores (ex.: *ArduPilot*, *Betaflight*, PX4), que podem comandar o veículo aéreo não tripulado (VANT) por meio dos sinais recebidos de sensores e sistemas de posicionamentos embarcados e controlar o voo e motores no modo de voo autônomo, havendo softwares específicos para planejamento desse tipo de voo como por exemplo o *Mission Planner* ou *QGroundControl*.
- Sistemas *Global Position System* (GPS) / *Global Navigation Satellite System* (GNSS), fornecem dados em tempo real de posicionamento geográfico, altitude velocidade de deslocamento.
- Sensores inerciais, *Inertial Measurement Unit* (IMU), sistema de referência posicional composto por acelerômetros e giroscópios que permitem identificar a atitude (posição angular) do VANT.
- Bússola eletrônica (Magnetômetro) para determinação de rumos em relação ao norte magnético.
- Tubo de pitot para aferir velocidade do vento relativo em voo.

⁷ Informação do pesquisador do instituto de pesquisa 1 participante.

- Sensores anemométricos (Barômetro) para medir a pressão atmosférica, calcular altitude relativa e razões de subida e descida.
- Sensores como radares ultrassônicos e eletromagnéticos para detecção de obstáculos para auxílio contra colisões com objetos e pousos precisos.
- Câmeras com visão de espectro computacional para detecção de obstáculos para auxílio contra colisões com objetos e pousos precisos.
- Transponder com protocolo de transmissão de sinais de identificação por rádio frequência - *Radio-Frequency IDentification* (RFID) para evitar colisão em voo com outras aeronaves.

2 - Sistemas de comunicação:

- Protocolos de transmissão e recepção de radiofrequências, operando comumente em bandas Industrial, *Scientific and Medical* (ISM) de 2,4 GHz, 5,8 GHz ou faixas específicas de frequência que podem variar entre 900 MHz e 1,2 GHz.
- Link de comando e controle modo C2 e C3, que promovem a transmissão de comandos de voo da estação de controle de solo ao VANT e a recepção de dados de telemetria como posição, velocidade e monitoramento dos sistemas embarcados, funcionando como backup para voos autônomos ou centro de comando auxiliar para voos semiautônomos.
- Link de dados de transmissão para fluxo de informações coletadas pelos sensores para transmissão de dados, imagens e vídeos, usados geralmente em voos BVLOS. Normalmente utilizam sistema de link via satélite SATCOM, com abrangência mundial.

3 Sensores:

- Passivos, que identificam transmissão e reflexos óticos ou eletromagnéticos próprios da superfície do ambiente permitindo identificação de padrões.
- *Laser Imaging Detection and Ranging* (LiDAR), cujo funcionamento está baseado em um transmissor de pulsos de laser e um receptor do reflexo dos respectivos pulsos, com a capacidade de processar os reflexos criando um mapa de pontos que reflete um modelo em 3 dimensões do terreno analisado.
- *Syntetic Aperture Radar* ou Radar de Abertura Sintética (SAR) que funcionam por meio de transmissão e recepção de reflexos de pulsos eletromagnéticos possibilitando a criação de espectro de imagens de alta resolução do terreno independente de condições de luminosidade.
- Ultrassom que funcionam por meio de transmissão e recepção de reflexos de pulsos de ondas sônicas de altíssima frequência para detectar anomalias como trincas e corrosões em inspeções especiais.
- Sensores meteorológicos que funcionam como radiossonda coletando dados anemométrico ambientais, oceanográficos para pesquisas científicas e previsibilidade.
- Sensores de detecção de Gases, funcionam como sondas de detecção de elementos em estado gasoso, principalmente concentrações de gases voláteis, gases agressivos como NOx, SO₂, CO₂, CH₄, sendo possível detecção de ambientes hostis ou contaminados.

4 – Softwares algorítmicos:

- Ferramentas de aprendizado de máquina (*machine learning*) e aprendizados profundo (*deep learning*) que viabilizam comandos de tomada de decisões em tempo real, incluindo aprendizado de trajetória, otimização de energia e detecção de obstáculos. Tais ferramentas possibilitam que sistemas tradicionais de controle sejam complementados ou substituídos por percepções aprendidas que se adaptam às mudanças ambientais.
- Ferramentas de visão computacional. São lógicas que utilizam informações de sensores embarcados integrando a redes neurais convolucionais e biblioteca de dados como Open-CV, YOLO, que geram mapas e funções de detecção de obstáculos, reconhecimento de objetos e navegação em ambientes complexos.
- Modelos de fusão sensorial que executam a interligação de dados entre GPS, unidades de medida inercial (IMUs), LiDAR e câmeras para estimar a posição e trajetória do VANT em tempo real. Técnicas como odometria visual permitem estender essas capacidades a ambientes sem o sinal do sistema de posicionamento global, o que é fundamental para navegação autônoma confiável em cenários complexos (urbanos ou confinados).
- Lógicas de *swarm Intelligence*, que possibilita que permite que outros dispositivos distribuídos se comuniquem entre si e cooperem para alcançar objetivos comuns, como mapeamento de grandes áreas, busca e resgate ou missões complexas. Algoritmos de IA desempenham a divisão autônoma de tarefas, manutenção de formação e tomada de decisões colaborativas.

O atuante em cargo de direção de uma das indústrias investigadas infere:

VANTs militares desenvolvidos para missões de vigilância e ataque já dispõem de sistemas de navegação autônoma avançada que permitem execução de voos precisos de longa distância sem atuação humana, e em condições de previsão de variações ambientais. Lógicas ainda contidas em sigilo, já permitem que VANTs realizem mapeamentos de terrenos e ambientes, já prevendo variações dinâmicas desenvolvendo voos autônomos sem auxílio de GPS, aproximando-se da orientação cognitiva e de memória humana.⁸

Em âmbito civil também são verificados sistemas que permitem operações autônomas em ambientes mapeados com eficiência. Observam-se já diversos sistemas e dispositivos capazes de realizarem missões definidas utilizando a integração da visão computacional a modelos de fusão sensorial, suportados pelo aprendizado de máquina e retroalimentação de dados.

O atuante em instituto de pesquisa e desenvolvimento em uma renomada universidade pública nacional destaca:

Pesquisas e ensaios recentes indicam bons resultados para sistemas inteligentes de controle para VANTs em execução de operações con-

⁸ Informação do diretor técnico empresa de médio porte 3 participante.

finadas. Considerando que ambiente contido proporciona um grande espectro de referências de posicionamento, lógicas de navegação variadas estão sendo desenvolvidas, o que resultará, em um futuro breve, evoluções significativas de voo próximo a objetos estáticos.⁹

No entanto, em âmbito civil são verificadas ainda lapsos importantes do automatismo de controle em VANTs, como:

- Imprecisão de sensores e lógicas de criação de visão computacional que ainda estão aquém de transmitir mapas algorítmicos confiáveis em determinadas situações, o que leva a problemas de confiabilidade de navegação.
- Algoritmos de controle por IA baseados nos conceitos de *machine learning* e *deep learning*, apresentam grande dependência de dados para treinamento dos softwares. No caso dos VANTs, isso implica que a confiabilidade do sistema é garantida apenas em cenários previamente conhecidos, degradando-se significativamente em ambientes novos, dinâmicos ou meteorologicamente adversos. Considerando essa dificuldade, a indústria automotiva já tem desenvolvido modelos de aprendizado contínuo suportado em base de dados obtido por meio da observação de reações humanas diferentes frente às mesmas situações inesperadas, ou naquelas em que a previsibilidade de soluções é ampla.
- Fragilidade de incorporação de valores e referências para julgamento. Os sistemas de sensoriamento e as lógicas de controle atuais ainda não possuem robustez suficiente para atribuir pesos em decisões relevantes. Por exemplo, em uma condição de risco iminente, onde a saída pode resultar na colisão com uma estátua humana ou com um ser humano, a inteligência não consegue julgar a diferença entre os espectros, inferindo em riscos.
- Mesmo sendo considerado autônomo, grande parte dos sistemas de inteligência que controlam VANTs dependem de sistemas de telemetria para comunicação contínua de dados em bancos externos ou nuvens. Também são dependentes da comunicação de sinais de geoposicionamento, assim em ambientes de comunicação degradados ocorrem riscos de falhas de processamento levando a comportamentos imprevisíveis.

A investigação de campo indica desenvolvimento futuro de novas lógicas de arquiteturas denominadas *Agentic AI*:

As novas arquiteturas se configuram em uma nova geração de tecnologias de IA que propõem a integração de grandes modelos de linguagem (*Large Language Models*) e agentes cognitivos capazes de desenvolver uma nova perspectiva de raciocínio contextual, adaptação contínua e planejamento em tempo real. Tais conceitos prometem aproximar ainda mais a navegação autônoma à cognição humana, permitindo missões mais complexas.¹⁰

⁹ Informação do pesquisador do instituto de pesquisa 2 participante.

¹⁰ Informação do pesquisador do instituto de pesquisa internacional participante.

3.5 As questões de regulação, ética e justiça tecnológica

Sob o ponto de vista regulatório os VANTs são considerados como aeronaves comuns, estando submetidas obrigatoriamente a regulamentos e normativas governamentais que visam assegurar requisitos mínimos de segurança para sua construção, operação e manutenção.

De modo geral, e a nível mundial, os VANTs são regulados e fiscalizados em três esferas de atuação distintas, sendo que a primeira esfera atua sob as questões de projeto, produção, operação e manutenção, visando questões de segurança e aeronavegabilidade. VANTs dependem de um sistema de comunicação e telemetria robustos, desta forma a segunda esfera atua sobre questões de transmissão e recepção de sinais de radiofrequência e telecomunicações. Já a terceira esfera regulatória está centrada nas questões de uso do espaço aéreo e as interações com ambientes e outras aeronaves.

Considerando a tecnologia em questão como um processo de inovação emergente, detectam-se adversidades importantes relacionadas ao controle da tecnologia. O primeiro grande obstáculo é uma questão premente de gestão do conhecimento, considerando uma assimetria entre a velocidade de evolução da tecnologia e a capacidade de instituições governamentais de produzirem regulamentos e requisitos eficazes.

A problemática passa a ser mais acentuada à medida que os VANTs deixam de ser caracterizados apenas como aeromodelos ou dispositivos de pequeno porte e passam a configurar-se como complexas ferramentas de uso profissional, com o surgimento de dispositivos mais pesados e velozes (análoga às aeronaves comerciais), bem como pela ampliação de seus cenários de emprego, incluindo operações em áreas densamente povoadas, em baixas altitudes, em espaços aéreos com tráfego intenso e em missões realizadas além da linha de visada do operador (*Beyond Visual Line of Sight* – BVLOS).

Mais recentemente, a incorporação de IA no controle destes dispositivos introduz um novo patamar no complexo conjunto de desafios regulatórios. Ao contrário dos sistemas de controle por ação humana, mesmo que a distância, os sistemas algorítmicos de controle apresentam graus diferentes de autonomia decisória, sendo que o aprendizado da máquina, dependendo das circunstâncias, pode imprimir graus de incerteza na previsibilidade de comportamento da aeronave.

O sistema mundial de certificação do produto aeronáutico é suportado a partir de testes exaustivos, validações e consubstanciações de arquiteturas determinísticas nas quais o comportamento do sistema pode ser previsto, antecipado e confirmado. Ao substituir a lógica cognitiva humana por sistemas de inteligência adaptativa baseados em aprendizado de máquina, faz-se necessário a construção de um novo modelo de validação tecnológica que considere a explicabilidade do comportamento algorítmico, o que atualmente é impreciso.

Sendo ainda opaca a confiabilidade de decisões críticas da navegação autônoma artificial emergem questões sobre a responsabilidade civil e criminal e os riscos de falhas e acidentes associados ao viés algorítmico. A ausência de marcos regulatórios específicos e robustos para gerir tal questão sociotécnica promove certa insegurança jurídica na adoção da tecnologia.

O custo relativamente baixo e a ampliação desenfreada de aplicabilidades têm levado ao uso indiscriminado da tecnologia dos VANTs, elevando vertiginosamente o número de operações.

Se por um lado a tecnologia tornou-se ferramenta útil de desenvolvimento da sociedade, por outro, sua proliferação acende um alerta em relação aos conflitos de convivência em espaços aéreos compartilhados, especialmente em ambientes urbanos.

Atualmente, inexistem protocolos universais e suficientemente seguros de comunicação que viabilizem a integração operacional entre o gerenciamento do tráfego aéreo tripulado e não tripulado (*Unmanned Traffic Management* – UTM). Da mesma forma, ainda não há padronização consolidada das lógicas de IA capazes de mitigar riscos de interferência com pessoas, animais e objetos. A regulamentação dessa integração requer um redesenho nos padrões de requisitos para desempenho algorítmico, considerando níveis aceitáveis de risco, interoperabilidade entre sistemas e códigos de comunicação confiáveis.

Conforme explanado anteriormente, a concentração do desenvolvimento da tecnologia de IA aplicada em VANTs é restrita a poucos países de características dominantes no cenário geopolítico. Neste contexto, emergem três questões de caráter ético de elevada relevância.

A primeira se relaciona às preocupações com cibersegurança e a privacidade de dados conforme destaca o investigado atuante na indústria.

Os sistemas de IA funcionam suportados na dependência de sensores avançados, redes de comunicação e uma gama volumétrica de aquisição de dados para treinamento e operação dos sistemas algorítmicos. Neste caso, a fragilidade de segurança nas redes de comunicação, ou até mesmo o domínio monopólico destas, podem se tornar potentes fontes geradoras de informações sobre indivíduos, grupos sociais, ecossistemas e os respectivos valores associados.¹¹

A ausência de políticas universais para tratamento e proteção destes dados contra ataques, mau uso e interferências vulnerabilizam a tecnologia, tornando-a passível de práticas de controle social, informações privilegiadas e monitoramento seletivo, principalmente no contexto da segurança pública.

A segunda preocupação de ordem ética está centrada na constituição da tecnologia como ferramenta de assimetria de poder e o uso letal. Estados dominantes concentram o conhecimento de IA associadas aos VANTs como plano estratégico de coerção militar e supremacia informacional.

A terceira inquietude considera as imperfeições tendenciosas passíveis de ocorrer nas lógicas algorítmicas. Cientificamente já foi detectado em sistemas de decisão algorítmica ocorrências de exclusões discriminatórias ou amplificação de distinções ou desigualdades estruturais. Considerando a percepção de que dados não são apenas insumos tecnocientíficos, mas sim resultados da produção social, fica evidenciada a necessidade de considerar um modelo de governança sociotécnica que transcenda os limites binários do sistema regulatório convencional.

Neste contexto, a ausência de um modelo de justiça tecnológica permite com que a inovação provoque efeitos de desigualdade social, ao passo que a submissão e dependência tecnológica de países periféricos amplificam as relações de subordinação econômica e política no cenário global.

¹¹ Informação do diretor técnico empresa de médio porte 1 participante.

4. Conclusões e perspectivas

O estudo sobre o uso da IA no controle de VANTs constata que esse produto de inovações tecnológicas se encontra em um estágio de pleno avanço e consolidação técnica, ao mesmo tempo em que evolui cercada por significativos desafios sociotécnicos.

A tecnologia dos VANTs promete revolucionar o atual sistema de logística e serviços, afastando o ser humano de atividades perigosas ou complexas, reduzindo o esforço e minimizando vertiginosamente custos. A gradativa incorporação da IA nos sistemas de controle destes dispositivos promete transformá-los em plataformas ainda mais inteligentes, adaptáveis e integradas aos ecossistemas operacionais humanos.

Contudo, o processo de transição do controle cognitivo humano para a inteligência algorítmica e a liberdade de autonomia para tomada de decisões complexas ainda está em desenvolvimento. Neste sentido, as arquiteturas que operam nesse tipo de comando configuram-se em sistemas de “caixa-preta”, nos quais não é possível rastrear de forma clara os critérios que levaram a uma determinada decisão de voo ou manobra, não sendo possível avaliar e certificar a previsibilidade de riscos destes artefatos.

A dissociação do julgamento humano em operações aéreas complexas com potencial de riscos desencadeiam discussões tecno-éticas sobre quais os limites socialmente sadios desta transição. Como processo sociopolítico, observa-se um descompasso entre a velocidade da inovação tecnológica e a capacidade governamental de formular normativas e regulações que venham a promover o uso seguro do conhecimento.

Lacunas associadas à segurança e ao uso ético produzem no artefato tecnológico fragilidades quanto à susceptibilidade do uso como ferramenta de dominação social e controle geopolítico. Tecnologias desenvolvidas para fins científicos que são apropriadas para dominação social, como o controle de massa de dados e letalidade, constituem-se pesos importantes na assimetria do poder.

No entanto, as discussões afunilam para a necessidade da determinação de um modelo específico de governança para a tecnologia. Tal modelo deve incluir princípios estruturantes como a transparência graduada (auditabilidade aberta nos processos), a inclusão epistêmica (todos os afetados participam da construção), supervisão humana substantiva (capacidade de intervenção efetiva no processo), responsabilidade estrutural (responsabilidade regulamentada e juridicamente rastreável), a precaução tecnológica (prevalência da minimização de danos) e a justiça sociotécnica (onde a tecnologia não pode ampliar desigualdades estruturais).

Sob o ponto de vista da Ciência, Tecnologia e Sociedade, a diversificação e a proliferação das tecnologias de VANTs revelam um processo de coexistência entre os benefícios operacionais e os com riscos sociais, éticos e políticos. Compreender esse movimento científico implica no entendimento de que inovações emergentes podem não apenas atenderem as demandas sociais, mas também reconfiguram relações de poder, segurança e limites da vida privada, exigindo modelos de governança tecnológica mais atuantes e socialmente responsáveis.

Referências

AHMAD, Shakeel. *et al.* Flight into the future: a holistic review of AI-trends, vision, and challenges in drones technology. **Artif Intell Rev** 59, 59 (2026). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11449-7>. Acesso em 02 jan. 2026.

AIRBUS. **Airbus tests new technologies to enhance pilot assistance**. Airbus.com, 2023. Disponível em: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2023-01-airbus-tests-new-technologies-to-enhance-pilot-assistance#:~:text=Share,the%20ability%20to%20recognise%20landmarks>. Acesso em 20 out. 2025.

AUSTIN, Reg. **Unmanned aircraft systems: UAVs design, development and deployment**. Wiltshire: John Wiley & Sons Ltd, 2010. 332 p.

BASSOI, Luiz Henrique; *et. al.* **Agricultura de precisão: um novo olhar na era digital**. São Carlos, SP: Cubo, 2024. seção 4, cap. 70.

BECK, Ulrich. **Sociedade de risco: rumo a uma outra modernidade**. 2. ed. São Paulo: Editora 34, 2010.

BRASIL. **Regulamento Brasileiro de Aviação Civil: RBAC-E nº 94, Emenda nº 03**. Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), 2023. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94>. Acesso em: 02 Fev. 2025.

CHAPMAN, G. **An introduction to the Revolution in military affairs**. 2003. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.557.4787&rep=rep1&type=pdf>>. “Acesso em: 02 abr. 2024”.

COOK, Michael V. **Flight dynamics principles**. Butterworth-Heinemann, 2013.

EISENHARDT, Kathleen M. **Building theories from case study research**. *Academy of Management Review*, V. 14, n. 4, p. 532-550, out. 1989.

ESPÍRITO SANTO JR. Respício Antônio. **Transporte aéreo internacional**. [S.L.], 2003. Ministério do Turismo. Disponível em: <<http://www.turismo.gov.br/publicacoes.html?start=60>>. Acesso em: 01. Out. 2016.

FLOREANO, Dario; WOOD, Robert. J. Science, technology and the future of small autonomous drones. **Nature**, v. 521, n. 7553, p. 460–466, 2015

DARACK, Ed. **A brief history of unmanned aircraft**. Air and Space Magazine. 2011. Disponível em: <<http://www.airspacemag.com/photos/a-brief-history-of-unmanned-aircraft-174072843/>>. “Acesso em: 05.Set.2025”.

KEANE, John F.; CARR, Stephen S. **A brief history of early unmanned aircraft**. Johns Hopkins APL Technical Digest, v. 32, n. 3, 2013.

LATOURE, Bruno. **Ciência em ação: como seguir cientistas e engenheiros sociedade afora**. São Paulo: Editora UNESP, 2000.

Li, Wen-Chin et. al. The activated failures of human-automation interactions on the flight deck. **Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation**. Vol.48, nº3 (2016/09), p. 163-171.

MIGUEL, Paulo Cauchick. *et al.* **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier (GEN LTC), 2018.

MILES, Mathew B.; HUBERMAN, Michael. **Qualitative data analysis: an expanded source book**. 2. ed. London: Sage Publications, 1994.

PARASURAMAN, Raja; SHERIDAN, Thomas B.; WICKENS, Christopher D. A model for types and levels of human interaction with automation. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. 30, n. 3, p. 286–297, 2000.

PAZ, Otacílio Lopes de Souza; *et al.* **Evolução e tendências do uso de aeronaves remotamente pilotadas no Brasil (2017-2022) e suas implicações para o geoprocessamento**. Entorno Geográfico, (26), e22513072. 2023. <https://doi.org/10.25100/eg.v0i26.13072>

PERROW, Charles. **Normal accidents: living with high-risk technologies**. Princeton: Princeton University Press, 1999.

SANTOS, Bruna; LORDSLEEM JR., Alberto. **Revisão sistemática da literatura sobre o uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) como equipamento de transporte**. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2020. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2020. p. 1–8. DOI: 10.46421/entac.v18i.1193. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/1193>. Acesso em: 12 jan. 2026.

SHY AVIATION. **Aviation tech: explore the history of autopilot**. Disponível em: <https://www.shyaviation.com/blog/aviation-tech-history-of-autopilot-and-its-role-in-modern-private-flight>. Acesso em: 10 dez. 2025.

SICILIANO, Bruno; KHATIB, Oussama. **Springer Handbook of Robotics**. 2. ed. Cham: Springer International Publishing, 2016.

UNITED STATES OF AMERICA AIR FORCE (USAF). **Unmanned aircraft systems flight plan 2009 to 2047**. 2009. Disponível em: <https://fas.org/irp/program/collect/uas_2009.pdf>. “Acesso em: 14.Set. 2025”.

UK CAA. **Flight crew reliance on automation**. Paper 2004/10. United Kingdom Civil Aviation Authority, December 2004. Disponível em: <https://www.caa.co.uk/data-and-publications/publications/documents/content/caa-paper-200410/>. Acesso em 02 dez. 2025.

VISONI, Rodrigo Moura; CANALLE, João Batista Garcia. Bartolomeu Lourenco de Gusmão: o primeiro cientista brasileiro. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 3, 3604 (2009). www.sbfisica.org.br.

WINNER, Langdon. **The whale and the reactor: a search for limits in an age of high technology**. Chicago: University of Chicago Press, 1986.

Recebimento: 21/1/ 2026

Avaliação: 2/4/2026

Aceite: 18/4/2026



www.revistabrasileiradeestudoscts.com

Essa publicação é exclusiva da Rev. Bras. Est. CTS.
A tradução e a revisão dos textos submetidos
são de inteira responsabilidade dos autores e co-autores.

Este é um artigo em acesso aberto distribuído nos termos da
Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional.



**Revista Brasileira
de Estudos CTS**

Mantenedora

