



## Métodos de Planejamento de Rotas para RPAs: uma Revisão da Literatura

### *Route Planning Methods for RPAs: a Literature Review*

Débora Paula Simões<sup>1</sup>, Henrique Candido de Oliveira<sup>2</sup>, Orlando Fontes Lima Júnior<sup>3</sup> e Diógenes Cortijo Costa<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Campinas, Pós-Graduação em Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, Brasil. [d263621@dac.unicamp.br](mailto:d263621@dac.unicamp.br).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1615-988X>

<sup>2</sup> Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Infraestrutura e Ambiente, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, Brasil. [hcandido@unicamp.br](mailto:hcandido@unicamp.br).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2783-4668>

<sup>3</sup> Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Infraestrutura e Ambiente, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, Brasil. [oflimaj@fec.unicamp.br](mailto:oflimaj@fec.unicamp.br).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4283-8245>

<sup>4</sup> Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Infraestrutura e Ambiente, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, Brasil. [dcortijo@unicamp.br](mailto:dcortijo@unicamp.br).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0084-6252>

Recebido: 03.2021 | Aceito: 05.2022

**Resumo:** Nos dias atuais, as aeronaves remotamente pilotadas (RPAs), popularmente conhecidas como drones, atuam em aplicações de diversas áreas, aumentando em número de aeronaves e compartilhando do espaço aéreo. Nesse cenário, a segurança é fator crucial e, portanto, planejar rotas confiáveis se torna essencial. Múltiplos são os algoritmos baseados em inteligência computacional, bem como as funções heurísticas, adotados para a roteirização de RPAs. No entanto, para bem aplicá-los, dependendo da finalidade do voo, é fundamental conhecer os diversos métodos de planejamento de rotas para RPAs. Diante disso, o presente estudo tem por objetivo apresentar, por meio de uma revisão de literatura, os diferentes métodos de roteirização de RPAs, enfatizando suas principais características e apresentando estudos que os envolvam. Trinta e nove artigos publicados entre 2002 e 2020, disponíveis em diferentes bases de dados, foram estudados, os quais possibilitaram classificar os métodos de planejamento em três grupos: baseados no domínio do tempo (*online* ou *offline*), em função do modelo de ambiente (2D ou 3D) e com relação às características da aeronave (asa fixa, rotativa, oscilante ou modelo híbrido). Ademais, destacam-se estudos envolvendo algoritmos e funções heurísticas aplicados a cada método de roteirização identificado. Com base nas referências revisadas, evidencia-se que as pesquisas tendem para a roteirização tridimensional e *online*, uma vez que abordam condições e ambientes mais realistas de voo, cujas características principais são enfatizadas ao final desse estudo.

**Palavras-chave:** UAV. Drone. Roteirização *online*. Roteirização *offline*. Rota 3D.

**Abstract:** Nowadays, remotely piloted aircraft (RPAs), popularly known as drones, have a range of applications in several areas, increasing in number and sharing the airspace. In this scenario, security is a crucial factor and, therefore, planning reliable routes is essential. Various are the algorithms based on computational intelligence, as well as the heuristic functions, adopted for the RPAs routing. However, in order to apply them properly, depending on the purpose of the flight, it is essential to know these different methods of planning routes for RPAs. Therefore, this study aims to present, through a literature review, the different methods of RPAs routing, emphasizing their main characteristics and presenting studies that involve them. Thirty-nine articles published from 2002 to 2020, available in different scientific databases were studied, which made possible to classify the planning methods in three main groups based on: the time domain (*online* and *offline*), the environment model (2D and 3D), and regarding the characteristics of the aircraft (fixed-wings, multirotors, flapping-wing or hybrids model). In addition, studies involving algorithms and heuristic functions applied to each identified routing method were highlighted. Based on the revised references, it is evident that the research tends towards three-dimensional and *online* processing - since they address more realistic flight conditions and environments, whose main characteristics are emphasized at the end of this study.

**Keywords:** UAV. Drone. *Online* routing. *Offline* routing. 3D route.

## 1 INTRODUÇÃO

Na última década, devido aos avanços tecnológicos, o uso dos Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANTs) ou, em inglês, *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV), também conhecidos como Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) ou *Remotely Piloted Aircraft* (RPA), em inglês, ou, ainda, popularmente como drones (MURRAY; CHU, 2015), ganharam destaque nas mais diversas áreas, como logística, segurança pública, vigilância de tráfego e monitoramento (MACRINA et al., 2020), aeronáutica (ZHAO; ZHENG; LIU, 2018), aplicações militares (NEX; REMONDINO, 2014), geomática (ALVES JÚNIOR et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2017; OLIVEIRA; BRITO, 2019), dentre inúmeras aplicações civis em potencial (RADMANESH et al., 2018).

Nesse estudo, adota-se o termo RPA para referir-se à aeronave sem pilotos que pode ser controlada remotamente ou pode voar de forma autônoma com base em planos de voo pré-programados (LIU et al., 2016; NEX; REMONDINO, 2014), podendo transportar uma carga letal ou não, utilizada para fins militares e comerciais (PFEIFFER et al., 2005), devido às suas capacidades de trabalhar remotamente e sob ambientes extremamente perigosos (LIU et al., 2016). Esse termo (RPA) é adotado pela legislação brasileira, mais especificamente pela Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA) 100-40/2020, que regulamenta o acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro por RPAs, tendo conformidade com as diretrizes da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) e atendendo às demandas de segurança dos usuários do espaço aéreo (BRASIL, 2020). De acordo com a ICA 100-40 (BRASIL, 2020), as RPAs consistem em aparelhos que se sustentam na atmosfera a partir de reações do ar sem piloto a bordo e que tem finalidade não recreativa.

No contexto da logística, por exemplo, as RPAs se mostram como uma solução inovadora e sustentável (MACRINA et al., 2020). *Amazon*, *DHL*, *Zookal* e *Google* são algumas empresas que têm usado o transporte por meio de RPAs, adotando, em grande parte, sistemas que associam caminhões e aeronaves, o que diminui custo de distribuição e atende aos clientes de forma mais rápida (MURRAY; CHU, 2015).

Entretanto, há impasses a serem superados no que diz respeito ao amplo uso das RPAs nas diferentes áreas e aplicações. Ressalta-se que, à medida que as demandas crescem, gerando uma maior inserção desses veículos no espaço aéreo, a manutenção da segurança nas operações da aviação em geral se torna uma preocupação. Rubio-Hervas, Gupta e Ong (2018) citam o risco de colisões entre aeronaves tripuladas ou não, caso o piloto não veja outros veículos, por exemplo, ou se houver perda de controle por falhas no sistema ou devido ao alcance dos sinais (de rádio, redes *WiFi* ou GSM), ou, então, por condições ambientais. Tan et al. (2019) salientam que, em cidades altamente urbanizadas e densamente povoadas, torna-se maior o desafio para gerenciamento de voos com RPAs com segurança e privacidade à população.

Nessa perspectiva, um sistema de gerenciamento de tráfego de RPAs ou, do inglês, *UAS Traffic Management* (UTM), deve levar em consideração o ambiente da operação, fornecendo uma recomendação que minimize os riscos envolvidos (RUBIO-HERVAS; GUPTA; ONG, 2018). Para garantir segurança e eficiência ao sistema UTM, Tan et al. (2019) apresentam três componentes principais: construção da rede de tráfego, planejamento de rotas e programação de horários de decolagem. Em destaque, o sistema de planejamento de rota é baseado em três etapas: definição do plano de voo, no qual o usuário indica os pontos de pouso e decolagem, em especial; o planejamento da rota em si na rede de tráfego pré-estabelecida para os usuários; e o agendamento do voo, a fim de reduzir conflitos e atrasos. Os voos aprovados são definidos como programados, enquanto que, para os rejeitados, há a indicação do motivo de rejeição pelo sistema (TAN et al., 2019).

Salienta-se, diante desses estudos, que para garantia da segurança do espaço aéreo, as rotas das aeronaves não tripuladas devem ser definidas com cuidado e eficiência (POTTER NETO; BERTOLI; SAOTOME, 2020). Diante desse cenário, De Filippis, Guglieri e Quagliotti (2012) apresentam que o planejamento de rotas tem sido um dos principais elementos no gerenciamento de RPAs, explorando sua capacidade de voo autônoma, condição que, segundo Rathbun et al. (2002), permite sua transição para locais desejados, evitando obstáculos fixos em seu caminho.

O principal objetivo do planejamento de rotas de RPAs é produzir um trajeto de voo que conecte um

estado inicial a um estado objetivo (CHEN et al., 2016; DONG et al., 2011; RADMANESH et al., 2018; ZHUONING et al., 2010), atendendo as restrições necessárias, os requisitos de desempenho da aeronave, como segurança e limitações físicas (ZHAO; ZHENG; LIU, 2018), e um tempo determinado (WU; CAMPBELL; MERZ, 2009).

Wu, Campbell e Merz (2009) classificam o planejamento de rotas de RPAs como sendo um problema complexo e multiobjetivo, uma vez que deve levar em consideração as regras para operar no espaço aéreo, a segurança da aeronave e a eficiência da missão (ZHAO; ZHENG; LIU, 2018), não se restringindo a um problema do caixeiro viajante, mas associando o caminho que minimiza a distância percorrida, a altitude média, o consumo de combustível, a exposição do radar etc. (ROBERGE; TARBOUCHIET; LABONTE, 2013), isto é, um caminho ótimo com diferentes critérios de seleção e de acordo com as restrições da missão (LIU et al., 2016).

De Filippis Guglieri e Quagliotti (2012) complementam que o planejamento de rotas deve ser definido de maneira que melhore o tempo computacional e a eficácia do sistema, associados aos requisitos da missão, e, geralmente, visa gerar uma trajetória em tempo real, evitando obstáculos ou colisões. Além disso, ressalta-se que a navegação da RPA deve ser realizada com o melhor esforço do veículo, ou seja, com o menor custo (GUGLIERI; QUAGLIOTTI; SPECIALE, 2008).

Em aplicações na área da Geomática, majoritariamente são realizados voos automatizados, cuja rota é pré-definida por meio de aplicativos de planejamento de voo que consideram, dentre outras informações, os recobrimentos lateral, longitudinal e a altura de voo de acordo com a finalidade do mapeamento, associados aos parâmetros internos da câmera da RPA. Como exemplo, destaca-se o estudo realizado por Magalhães e Moura (2021). No entanto, embora o voo seja automatizado é essencial que o operador conheça as particularidades da aeronave, especialmente de acordo com seu modelo, caso haja uma falha no sistema de comunicação entre a RPA e a estação de pilotagem remota. Nesse caso, o operador deve assumir o controle da aeronave para evitar quedas e garantir a segurança das pessoas que possam estar circulando pela área em que se realiza o voo. Caso a RPA esteja devidamente configurada, pode ser gerada uma rota em tempo real para que a aeronave retorne até o ponto inicial do voo ou pouse com segurança, sendo capaz de sentir e detectar o que há em seu entorno, por exemplo, evitando acidentes. Situações semelhantes podem ser observadas em outras áreas, como no uso das RPAs na agricultura ou em transportes/logística, por exemplo, o que permite inferir que o estudo da roteirização das RPAs é indispensável a todos que fazem uso dessas aeronaves.

Nesse contexto, ressalta-se a importância de se conhecer os diferentes métodos de roteirização de RPA, uma vez que cada um apresenta necessidades e limitações específicas, as quais devem ser observadas no planejamento da rota, que inclui a implementação de algoritmos e/ou funções heurísticas na busca por um caminho ideal que resulte em um voo eficiente.

Assim, o principal objetivo desse trabalho é identificar os diferentes métodos de planejamento de rotas para RPAs, apresentando as especificidades de cada um deles por meio de uma revisão de literatura envolvendo trabalhos publicados nessa temática. Além disso, vislumbrando que a Inteligência Computacional (IC) faz-se presente na implementação dessas rotas, apresenta-se também exemplos da aplicação de diferentes algoritmos e/ou funções heurísticas para os métodos de planejamento definidos.

## 2 METODOLOGIA DE PESQUISA

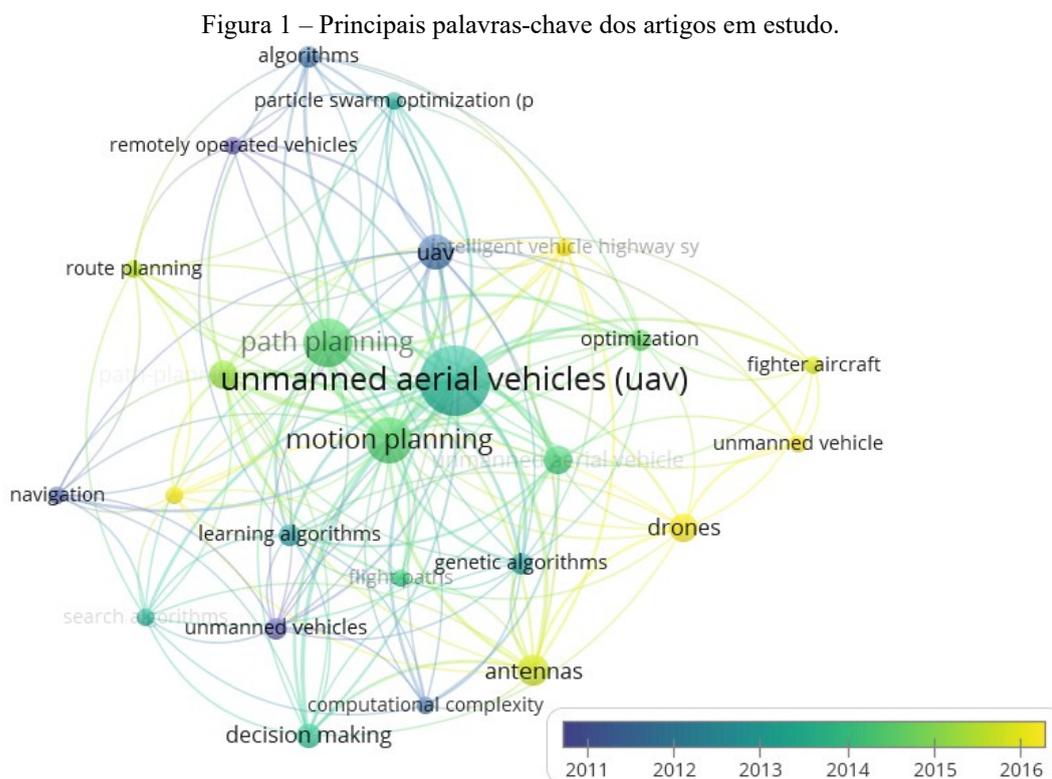
O presente estudo utilizou como metodologia a revisão sistemática da literatura (LOUREIRO et al., 2016) e se concentrou na revisão de artigos publicados entre 2002 e 2020 com a temática de planejamento de rotas de RPAs.

Para a busca de trabalhos publicados na área de interesse, de início, realizaram-se pesquisas nas plataformas *Google Scholar* e *IEEE Xplore Digital Library*, em especial, restringindo-se a estudos publicados recentemente (últimos cinco anos). Como principais palavras-chave utilizadas nas pesquisas, destacam-se: *Unmanned aerial vehicle*, *Path planning*, *Drone*, *Online routing*, *Offline routing*, *3D route* e *2D route*. Destaca-se que o termo *Unmanned aerial vehicle* (UAV) foi adotado como palavra chave na pesquisa uma vez que é a nomenclatura adotada internacionalmente para se referir às Aeronaves Remotamente Pilotadas. Como

a grande parte dos artigos adotados na revisão foram obtidos de revistas internacionais, optou-se por utilizar o termo UAV para a pesquisa em substituição ao termo RPA, que é adotado na legislação brasileira.

Entretanto, como o presente estudo trata de uma revisão de literatura e considerando que encontrou-se um número restrito de trabalhos publicados nos últimos cinco anos devido à restrição inicial adotada, realizou-se, então, uma busca mais ampla, considerando artigos publicados desde 2005, com exceção de três trabalhos que foram considerados por suas importantes contribuições para a temática e que datam de 2002 (um deles) e 2003 (os outros dois). Ao todo foram estudados trinta e nove artigos relacionados ao planejamento de rotas de RPAs, os quais podem ser encontrados nas seguintes bases de dados: *Google Scholar*, *IEEE*, *ScienceDirect* e *Scopus*.

A Figura 1 apresenta a conectividade das principais palavras-chave que podem ser encontradas nos artigos científicos abordados nessa revisão de literatura. Na figura, pode-se observar também o ano de publicação dos artigos que contém as referidas palavras-chave, sendo a coloração amarela para artigos mais recentes e a cor azul para os mais antigos.



Fonte: Os autores (2022).

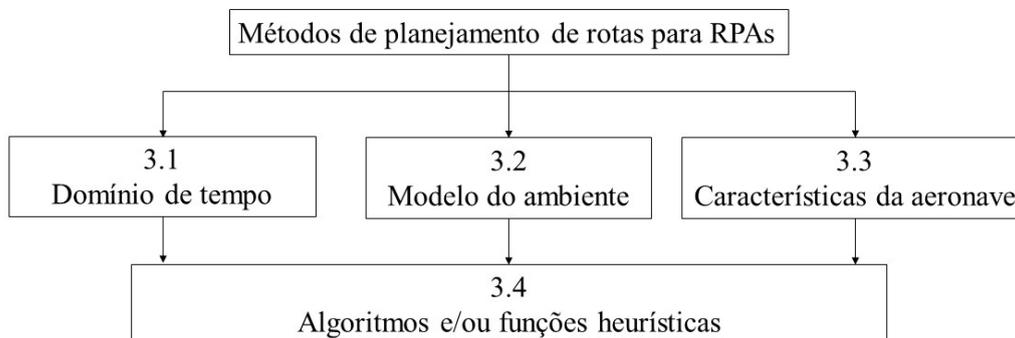
É possível notar, com a figura apresentada, que os artigos utilizados nesta revisão trazem diferentes nomenclaturas para as RPAs, o que fortalece a necessidade de um material que compile tais contribuições científicas, como essa revisão, apresentando o termo que é adotado pela legislação brasileira: RPA. Outro aspecto importante é a presença de diferentes algoritmos computacionais utilizados nas tarefas de planejamento de rota, a exemplo de *particle swarm optimization*, *learning algorithms* e *genetic algorithms*, o que também destaca a atualidade da temática e a necessidade de uma melhor explicação sobre seus usos em diferentes aplicações.

### 3 MÉTODOS DE PLANEJAMENTO DE ROTAS PARA RPAs

Os métodos de planejamento de rotas para RPAs foram divididos em três grupos/classes, conforme apresenta a Figura 2, na qual observa-se que os mesmos podem ser definidos com base no domínio de tempo, destacando-se as rotas *offline* ou *online*; em função do modelo de ambiente, no qual encontram-se a roteirização bidimensional e a tridimensional, principalmente; e com relação às características da aeronave, isto é, dependendo do modelo da RPA (asa fixa, rotativa, oscilante ou híbrido).

Nesse aspecto, é importante destacar que muitos dos trabalhos relacionados a tais métodos estabelecem um cenário único, considerando características específicas dentre as subdivisões dos métodos de roteirização. Como exemplo, cita-se o trabalho desenvolvido por Cakir (2015), o qual trata especificamente do planejamento de rotas para RPA em ambiente bidimensional (2D), cujo caminho é definido antes da execução da missão, ou seja, trata-se de um planejamento *offline*.

Figura 2 – Classificação dos métodos de planejamento de rotas para RPAs.



Fonte: Os autores (2022).

Além disso, visualiza-se que, independentemente do método de planejamento de rota, o mesmo sempre estará relacionado a um algoritmo e/ou função heurística, os quais devem atender às limitações e imposições de cada método específico de roteirização. Em Cakir (2015), por exemplo, é adotado o algoritmo genético para planejar rotas 2D, de modo que a RPA evite zonas proibidas.

Nesse sentido, destaca-se que diversos são os algoritmos e funções heurísticas aplicados no planejamento de rotas para RPAs, para o qual a inteligência computacional pode produzir soluções eficazes, precisas e rápidas (ZHAO; ZHENG; LIU, 2018). Independente da função, heurística ou não, o objetivo é gerar uma trajetória que atinja o objetivo, mantendo uma distância segura dos obstáculos (RADMANESH et al., 2018).

Cabe ressaltar que este estudo não aborda questões envolvidas às regulamentações para acesso ao espaço aéreo, uma vez que cada país tem sua própria legislação, como, por exemplo, a ICA 100-40 no caso brasileiro. Salienta-se que essa revisão de literatura busca destacar as peculiaridades dos diferentes métodos de roteirização de RPAs.

### 3.1 Métodos de planejamento baseados no domínio de tempo

O planejamento de rotas de RPAs tem muitos requisitos, dentre os quais aponta-se a suavização do caminho, a capacidade de fuga e a obtenção de uma rota ótima. Cabe destacar que as RPAs enfrentam ambientes complexos quando voam, nos quais encontram-se objetos obstrutivos que não podem ser evitados em baixas altitudes ou ataques do solo, por exemplo (LI et al., 2018).

Nesse contexto, salienta-se que o ambiente de planejamento de rotas para RPAs pode ser dinâmico ou estático, dependendo da presença ou ausência de obstáculos móveis, bem como conhecido ou desconhecido, a partir da determinação prévia da posição dos obstáculos (POTTER NETO; BERTOLI; SAOTOME, 2020). Há algum tempo, a operação das RPAs se restringia às áreas sem veículos fora do controle da autoridade encarregada do voo de RPAs. Entretanto, nos dias atuais, grande parte das pesquisas se desenvolvem no sentido de planejar rotas fora dessa restrição e em áreas de uso geral, para as quais, além de evitar obstáculos fixos, lida-se com obstáculos móveis (outros veículos) (RATHBUN et al., 2002).

Ressalta-se a importância dos sistemas UTM para manter a segurança e a eficácia das missões com RPAs, de modo a encontrar uma rota com custos e riscos mínimos, atendendo às restrições relacionadas à missão, conforme citam Rubio-Hervas, Gupta e Ong (2018). Os mesmos autores abordam um sistema UTM que dispensa operadores humanos no monitoramento de cada RPA, mas fornece aos gerentes humanos dados para tomadas de decisão estratégicas. Tan et al. (2019) apontam que dividir o espaço aéreo em faixas de altitude é útil no projeto de Mobilidade Aérea Urbana do sistema UTM. Outro fator crucial apontado pelos autores, é

o replanejamento dinâmico da rota a partir das informações geoespaciais obtidas pela própria aeronave em tempo real, como obstáculos não mapeados *a priori*, atualizando a rede de tráfego, o que será relevante para replanejar voos posteriores.

Nesse sentido, ao referir-se em planejamento de rota a partir de obstáculos identificados em tempo real pela aeronave ou elementos pré-mapeados, observa-se na literatura especificações quanto aos métodos de planejamento de rotas baseados no domínio de tempo, considerando-se que a rota da RPA pode ser obtida em tempo real ou não.

Pode-se dizer que um método *online* é aquele em que a aeronave pode identificar mudanças no ambiente e reagir a elas – atualizando sua rota. Já o método *offline* executa o planejamento de rotas com base em informações pré-existentes e fixas (ZHAO; ZHENG; LIU, 2018).

Destaca-se que o tipo de missão é o que define o ambiente para o planejamento de ações, as restrições de caminho, o processo de otimização necessário e a necessidade de replanejamento *offline* ou em tempo real. Nesse contexto, ressalta-se que o método de planejamento de caminhos desenvolvido por meio de algoritmos baseados em abordagens probabilísticas e mapas de risco podem resolver problemas em domínios estáticos, o que caracteriza uma rota *offline*, bem como dinâmicos, ou seja, para rotas *online*, para os quais necessita-se de sistemas sensores disponíveis a bordo da aeronave durante o voo (DE FILIPPIS; GUGLIERI; QUAGLIOTTI, 2012).

Conforme Zhao, Zheng e Liu et al. (2018), os pesquisadores têm se concentrado em métodos de planejamento de caminhos *online* em comparação com os métodos *offline*, especialmente a partir de 2015. Nessa abordagem de roteirização *online*, inicialmente, é importante citar o replanejamento em voo, necessário quando mudanças no ambiente operacional, na RPA ou nos objetivos da missão invalidam o plano estratégico inicial. Isso porque a aeronave opera em um ambiente externo dinâmico, no qual é impossível prever com certeza as verdadeiras condições de funcionamento (WU; CAMPBELL; MERZ, 2009). Durante o voo, as aeronaves estarão vulneráveis a ataques no solo e podem colidir com obstáculos (montanhas e edifícios, por exemplo). Assim, devem manter distância das ameaças e escolher uma rota econômica em relação ao tempo e combustível, ajustando tarefas, tempo e segurança (LI et al., 2018).

Dong et al. (2011) apontam que o replanejamento de rotas é crucial ao planejamento da missão da RPA, em que, com base no caminho pré-planejado, modela-se o mesmo para garantir que as ameaças sejam evitadas, os novos alvos sejam atribuídos e os requisitos em tempo real do planejamento sejam satisfeitos. Nesse contexto, os mesmos autores estudam a integração do método de força virtual e do algoritmo A\* para obter alta capacidade de computação em tempo real e um caminho ideal (DONG et al., 2011). Observa-se, portanto, que para o replanejamento de rotas é essencial dispor, a priori, de uma roteirização *offline*.

Nos últimos anos, a capacidade de replanejamento *online* das RPAs tornou-se tema de interesse para os pesquisadores, envolvendo aeronaves avançadas e inteligentes (LI et al., 2018). Roberge, Tarbouchi e Labonte (2013) afirmam que dez segundos para a geração de uma rota *online* permite facilmente que a aeronave calcule o próximo caminho, enquanto voa o atual (ROBERGE; TARBOUCHI; LABONTE, 2013).

Nesse mesmo cenário e considerando a vasta gama de aplicações das RPAs, em especial em operações militares e em transportes, a roteirização das aeronaves de maneira *online*, em reação às mudanças de cenário, torna-se essencial (ZHAO; ZHENG; LIU, 2018). Zhao et al. (2018) destacam o termo “*planejamento de rota completa*”, no qual uma RPA procura caminhos apropriados usando informações em todo o ambiente com algumas restrições específicas: obstáculos e ameaças, restrições de velocidade e aceleração, restrições mínimas de trajetos e consumo de combustível (ZHAO; ZHENG; LIU, 2018), otimização de desempenho e prevenção de colisões (DE FILIPPIS; GUGLIERI; QUAGLIOTTI, 2012).

O planejamento de caminho *online* para RPAs é uma questão básica na implementação de um voo real inteligente, isto é, capaz de reagir às mudanças no ambiente, o qual deve ser eficiente, preciso e adaptável a ambientes reais, além de ser um problema dinâmico de otimização de vários objetivos (PENG; XU, 2012). Roberge, Tarbouchi e Labonte (2013) corroboram que um aspecto essencial da autonomia da RPA é a capacidade de planejamento automático do caminho.

Para uma rota *online* também devem ser consideradas as características do voo da RPA, em termos de altura máxima de voo, por exemplo, e os obstáculos dos terrenos 3D (montanhas, vales, edificações etc.). Além

disso, considera-se que a RPA esteja equipada com um conjunto de sensores, incluindo sonares, sistema de posicionamento global por satélite (GNSS) e sistema de navegação inercial (INS), por exemplo, através dos quais a aeronave pode localizar-se e identificar obstáculos naturais e artificiais, como, por exemplo, outras aeronaves que estejam ao seu entorno (NIKOLOS, 2003). Li et al. (2018) destacam que, com os avanços tecnológicos e aplicação de sistemas de posicionamento globais por satélites, é possível o planejamento de rotas diretamente num mapa digital em tempo real.

No procedimento *online* definido em Nikolos et al. (2003), como o terreno é completamente desconhecido e um radar gradativamente faz a varredura da área, é impossível gerar um caminho viável que conecta o ponto inicial com o final e, assim, enquanto o radar varre uma região ao redor da RPA, uma linha de caminho vai sendo gerada, conectando o ponto de partida temporário com o ponto final temporário. Ao final, gera-se um grupo de segmentos de curvas suaves, conectando o ponto inicial e o destino (NIKOLOS, 2003).

Zheng, Liu e Zhang (2016) apresentam dois problemas conflitantes no planejamento em tempo real: a velocidade de computação, que limita o tempo para as RPAs calcularem o caminho durante o voo (tempo de resposta), e a integridade das informações no ambiente. Além disso, para uma operação robusta da RPA, é essencial manter links de comunicação sem fio confiáveis para interação, comando e controle em tempo real (BAI, 2019). Nesse contexto, Bai et al. (2019) exploram em sua pesquisa as informações do trajeto do voo para projetar um esquema de gerenciamento de mobilidade aprimorado para oferecer suporte à comunicação confiável das aeronaves, propondo um algoritmo baseado em redes de celulares.

No estudo apresentado por Chen et al. (2016), as posições de uma RPA de asa rotativa variam no tempo, se afastando dos obstáculos e atraindo-se aos alvos por meio da implementação de algoritmos de campo de potencial artificial (APF). Nesse trabalho, os autores destacam a importância de um rastreador de posição, composto por um controlador de atitude de *loop* interno e por um controlador de posição de *loop* externo (CHEN et al., 2016).

Pfeiffer et al. (2005) destacam que o processo de decisão em rotas *online* deve prezar por encontrar um caminho que minimize o número de detecções de *waypoints* ao longo da rota e considere o tempo de voo relacionado, caracterizando um problema de otimização bicritério. Ressaltam também a importância de levar em consideração a escolha do caminho mais seguro, considerando a probabilidade de fuga em operações militares, conciliando o risco da aeronave e da missão. Para tanto, salienta-se que as RPAs disponíveis no mercado podem ser equipadas com detecção automatizada de obstáculos e funcionalidade de prevenção de obstáculos (MURRAY; CHU, 2015), fatores importantes para geração de rotas *online*, mas que por si só não realizam tal operação.

Um fator chave, nesse sentido, seria a capacidade de “sentir e evitar”, atualmente de imenso interesse para os pesquisadores. Essa capacidade é necessária para a operação segura de RPAs no domínio civil e é desafiadora em um ambiente 3D, especialmente ao considerar o ruído do sensor, as incertezas nas condições operacionais e a aplicabilidade em tempo real (RADMANESH et al., 2018).

Como exemplo de planejamento de rotas *offline*, Liu et al. (2016) apresentam o planejamento de uma rota 3D *offline*, em que há uma modelagem do ambiente 3D (terreno) e das ameaças *a priori* e os pontos de partida e destino são determinados antecipadamente, bem como as características do espaço de voo, incluindo alcance geográfico e condições topográficas, por exemplo. Ressalta-se que, no procedimento *offline*, os pontos inicial e final devem ser determinados, junto com a direção de voo e os limites do espaço físico onde o veículo pode voar, isto é, devem ser consideradas as características conhecidas do ambiente e as restrições do voo (NIKOLOS et al., 2003).

De Filippis et al. (2011) também abordam o planejamento de rota *offline* tridimensional, considerando como parâmetros as condições de voo, as características do ambiente e componentes específicos da missão. Nesse estudo, um mapa de risco é gerado, com base nos obstáculos definidos a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de voo e o algoritmo  $\theta^*$  é adotado (DE FILIPPIS et al., 2011).

Uma problemática relacionada ao planejamento de rotas *offlines* diz respeito a voos de longo alcance, sobre planaltos e áreas montanhosas. Sendo o planejamento *offline*, não se realiza o replanejamento em tempo real, pois o mapa é invariável durante a missão (DE FILIPPIS et al., 2012), o que pode ser um grande problema no cumprimento da missão quando possíveis fatores externos interferirem no voo.

Uma forma alternativa de fornecer execuções mais rápidas no planejamento de rotas *offlines* é a redução de *waypoints* intermediários. Guglieri, Quagliotti e Speciale (2008) descrevem o planejamento de rota *offline* para uma aeronave de asa fixa, e afirmam que a trajetória ótima é uma compensação entre três fatores: o custo de energia necessário, a distância mínima do ponto de passagem necessário e a viabilidade da trajetória, isto é, a função custo do algoritmo de planejamento desenvolvido é um equilíbrio entre a energia necessária para realizar a trajetória e a precisão de rastreamento de *waypoints* (GUGLIERI; QUAGLIOTTI; SPECIALE, 2008).

### 3.2 Métodos de planejamento em função do modelo de ambiente

Nessa seção, subdividem-se os métodos de planejamento de caminho de RPAs em métodos bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), considerando o tipo de domínio espacial. De modo sucinto, a diferença entre esses dois métodos está na consideração ou não da altura do voo durante o planejamento (ZHAO; ZHENG; LIU, 2018).

Nos métodos tradicionais de roteirização, as informações do ambiente são descritas por uma cena 2D, considerando-se que a altura de voo é constante (DE FILIPPIS et al., 2011; RAGI; CHONG, 2013) ou que há um ajuste manual (ZHAO; ZHENG; LIU, 2018). Zhao, Zheng e Liu (2018) destacam que, do ponto de vista da otimização, esse é um problema difícil de ser resolvido, mas que tem sido otimizado considerando algoritmos de inteligência computacional.

No planejamento de rotas bidimensionais para RPAs, além da altura constante, Ragi e Chong (2013) destacam que as coordenadas 2D de cada posição da aeronave são variadas aplicando-se a aceleração e ângulo de inclinação lateral da aeronave. Em seu trabalho, esses autores introduziram uma métrica de desempenho, denominada Índice de Ameaça de Colisão, que pode ser adaptada para prevenção de colisão em rotas tridimensionais.

Grande parte dos estudos analisados abordam o planejamento tridimensional de rotas de RPAs, uma vez que, considerando as aplicações dessas nos dias atuais, observa-se que tratam diretamente com ambientes reais complexos, nos quais observam-se restrições e incertezas estruturais que devem ser otimizadas. Diante desses avanços, são urgentes e necessários os algoritmos de planejamento de rotas 3D para navegação de RPAs, especialmente em ambientes complexos, como florestas, cavernas e áreas urbanas com alta densidade de edificações (ZHAO; ZHENG; LIU, 2018).

Para modelagem dos métodos de roteirização tridimensional, Liu et al. (2016) afirmam que existem elementos cruciais: descrições de recursos internos e externos, que incluem as configurações de desempenho da aeronave; o terreno e a modelagem de ameaças; a definição da função objetivo e a implementação do algoritmo. Em seu trabalho, os mesmos autores realizaram um estudo considerando que o terreno é conhecido com antecedência e, assim, a RPA deve evitar montanhas ou obstáculos no ambiente 3D.

Uma das dificuldades observadas nos estudos que envolvem roteirização tridimensional, é modelar o ambiente levando em consideração as restrições cinemáticas, com a inclusão de restrições geométricas, físicas e temporais, para planejar um caminho sem colisões (ZHAO; ZHENG; LIU, 2018), haja vistas que no processo de mudança do ponto de partida para o alvo, a RPA pode encontrar muitos obstáculos típicos, como edifícios, montanhas, ameaças de incêndio, outros veículos, etc. Assim, a primeira etapa do planejamento da rota tridimensional é discretizar o espaço de mundo em uma representação que será significativa para o algoritmo de planejamento do caminho, considerando suas limitações (ROBERGE; TARBOUCHI; LABONTE, 2013).

Num ambiente 3D de simulação, o trabalho desenvolvido por Chen et al. (2016) simplifica o modelo real. Já Roberge, Tarbouchi e Labonte (2013) assumem uma representação matricial do terreno, em que cada elemento associa-se a uma determinada elevação extraída de um MDE. De Filippis et al. (2012) adotam uma interface gráfica simples para os ambientes urbanos, usada para atribuir dimensões e posição no mapa, que permite desenhar os obstáculos interativamente, os quais são representados como paralelepípedos ou cubos (voxels).

Complementa-se que, para rotas 3D, a definição do estado posicional do veículo geralmente consiste em três coordenadas de posição e três coordenadas de orientação (RADMANESH et al., 2018), sendo, no mínimo, três dimensões espaciais necessárias para o planejamento de voo de RPAs. Além disso, por causa da

presença de obstáculos dinâmicos (por exemplo, clima e outras aeronaves), condições variáveis de vento e a necessidade de otimizar o tempo de voo, é desejável incluir uma dimensão de tempo. Isso garante integridade de resolução e otimização de caminho ao usar um algoritmo como o A\*, por exemplo (WU; CAMPBELL; MERZ, 2009).

Nesse contexto, Rubio e Kragelund (2003) apresentam um planejador de rota 3D para RPA, que incorpora as condições do vento para encontrar um caminho que minimiza o consumo de combustível. No entanto, as regras do ar não foram incorporadas ao processo de planejamento, o que também pode ser relevante em roteirização 3D (RUBIO; KRAGELUND, 2003), em especial *online*.

Para uma maior segurança da rota 3D, é necessário estabelecer um *buffer* vertical e horizontal em torno do trajeto e ajustar a elevação. Assim, em seu estudo, Zhang et al. (2016) usaram do método da altitude mínima de voo para atualizar a altitude média da rota e avaliaram a rota de planejamento 3D com base no consumo mínimo de combustível, risco mínimo, segurança de desempenho e eficiência do planejador. Liu et al. (2016) corroboram que é necessário considerar a altitude de voo, estabelecendo altitudes máxima e mínimas como critério de segurança, e uma distância mínima ao solo (LIU et al., 2016), bem como o comprimento mínimo da rota, visto que um caminho mais curto tende a aumentar o tempo de vida de uma aeronave, além de que, na geração dos *waypoints* da rota, uma distância mínima entre pontos deve ser considerada a fim de minimizar erros no planejamento do caminho (DE FILIPPIS et al., 2011).

Com destaque para a altitude do veículo, De Filippis et al. (2011) apontam que pode haver erros de detecção associados ao sistema de sensores a bordo, incertezas da altitude do piloto automático e condições atmosféricas (DE FILIPPIS et al., 2011). Manter uma altitude média é importante para evitar que a RPA esteja muito perto da superfície do solo, o que, numa mudança abrupta de trajetória e direção, pode causar uma colisão com o solo (NIKOLOS et al., 2003). Nesse sentido, Zhuoning et al. (2010) consideram, além da altura mínima de voo, ângulos máximos de subida e de inclinação da aeronave (ZHUONING et al., 2010).

Outra questão crucial quando se trata de rotas tridimensionais, com relação a proximidade dos obstáculos e ameaças existentes, é que o risco varia proporcionalmente à variação da elevação (DE FILIPPIS et al., 2011). Para correlacionar a distribuição de risco com o relevo, De Filippis et al. (2011) utilizam mapas geográficos e MDEs da área de interesse, de modo que as coordenadas nos mapas (em pixel) estejam associadas a esse arquivo correspondente, para atribuir a elevação dada. A desvantagem deste método é o alto custo computacional devido a utilização de mapas de alta resolução (DE FILIPPIS et al., 2011).

Nesse contexto, De Filippis et al. (2012) exploram uma ferramenta denominada *PCube*, que utiliza do MDE para obter um mapa de risco da área a ser sobrevoada. Zhang et al. (2016), considerando a dificuldade de um radar em encontrar alvos em voos de baixa altitude, estudaram o uso de uma plataforma de “globo virtual”, como espaço de planejamento da rota tridimensional, ideal para modelagem e visualização tridimensional da roteirização. Os mesmos autores enfatizam a utilização de MDE para descrever o terreno, cuja textura resulta de uma ortofoto digital (ZHANG et al., 2016).

Wu, Campbell e Merz (2009) descrevem o planejamento de uma rota de voo destinado à entrega de uma mercadoria médica. Em função do tipo de mercadoria, afirmam que o espaço de estudo é 4D, pois envolve o fator tempo devido a emergência da entrega do pacote. Outros aspectos importantes que os autores consideram para a definição da rota são (WU; CAMPBELL; MERZ, 2009):

- a) Combustível, definido em função do tempo de passagem entre os nós, altitude de voo, ângulo de subida/descida, parâmetros da aeronave e temperatura e pressão atmosféricas;
- b) Altitude acima do nível do solo, cujas informações podem ser obtidas em um MDE, como o *Shuttle Radar Topografia Mission* (SRTM);
- c) Classes de espaço aéreo: o planejamento do caminho na rota é restringido pelas diferentes classes de espaço aéreo e os requisitos para operação em cada classe. No estudo, os autores consideraram as Regras de Voo Visual (*Visual Flight Rules* - VFR) do espaço aéreo australiano;
- d) Risco de separação de aeronaves: incorporando *a priori* o conhecimento do movimento da aeronave, é possível evitar estrategicamente cenários de colisão sem ativar sistemas anticisão de emergência. Potencialmente, estas informações podem ser obtidas a partir de planos de voo apresentados ao órgão regulador;

- e) Risco Populacional: as duas principais preocupações de segurança para a operação de RPAs são de colisão no ar e o término de voo em uma área povoada.

### 3.3 Métodos de planejamento com relação às características da aeronave

As RPAs podem ser classificadas, de acordo com suas características aerodinâmicas e físicas, em asa rotativa (elétrica ou com motor de combustão, podendo ser de um único rotor ou multirrotores), em asa fixa (sem alimentação, elétrica ou com motor de combustão interna) (NEX; REMONDINO, 2014) e, mais atualmente, em RPAs de modelos híbridos, que integram os recursos de aeronaves de asa fixa e rotativa e, assim, herdam as vantagens de ambos (SAEED et al., 2015).

Considerando as duas primeiras classes (RPA de asa fixa e RPA de asa rotativa), com base no tamanho, peso, resistência, alcance e altura de voo, a *UVS International*, associação que tem por objetivo promover o estabelecimento de comunidades nacionais, europeias e regulamentos internacionais para o uso seguro de Sistemas de Aeronaves não Tripuladas (UAS) e criar padrões e normas de gestão de tráfego aéreo (UVS INTERNATIONAL, 2020), define três categorias principais de RPAs (NEX; REMONDINO, 2014):

- a) RPAs táticas, que incluem micro e mini aeronaves, de alcance alto, médio e baixo, resistência de médio alcance, longa resistência em baixa altitude e sistemas de longa resistência de média altitude;
- b) RPAs estratégicas, incluindo sistemas resistentes a grandes altitudes;
- c) RPAs de tarefas especiais, como veículos de combate autônomo não tripulado, letais e de armadilha.

Tais classificações são importantes uma vez que as características do veículo são relevantes no planejamento de rotas, seja 2D ou 3D e *offline* ou *online*, resultando em pesquisas nas quais são estudadas a capacidade de movimento, de prevenção de obstáculos e de pouso e decolagem da aeronave. Ressalta-se, nesse contexto, que a estabilidade das plataformas, com destaque para aquelas leves e de baixo custo, é muito importante, em especial em áreas de ventos fortes, mesmo considerando os estabilizadores da plataforma, que reduzem essa interferência (NEX; REMONDINO, 2014).

No estudo de De Filippis et al. (2011), por exemplo, curvas de suavização são geradas modificando as posições nominais dos *waypoints* de rotas tridimensionais *offlines*, dependendo das características do veículo (ângulo máximo de inclinação e velocidade de voo), as quais podem ser específicas dependendo da classe em que a RPA se enquadra.

De Filippis et al. (2012) pontuam que o objetivo do voo, a carga útil exigida e os sistemas de vigilância orientam a escolha da plataforma, cujas características influenciam no planejamento da rota. Como exemplo, a cinemática de quatro rotores oferece recursos de manobras para aeronaves de asas rotativas, o que é um problema decisivo para veículos de asa fixa (DE FILIPPIS et al., 2012).

A principal vantagem das RPAs com asas fixas é sua estrutura mais simples, que requer manutenção e reparos menos complexos, e a capacidade de carga útil maior em distâncias mais longas usando menos energia. Uma de suas principais desvantagens é que as asas fixas precisam de um movimento de ar constante durante o voo, o que significa que as aeronaves não podem ficar paradas no ar e, por esse motivo, não são indicadas para operações estacionárias como monitoramento (MACRINA et al., 2020), além de requererem velocidades relativamente altas para voar (HASSANALIAN; ABDELKEFI, 2017).

Ao contrário, as aeronaves de asas rotativas têm como principal vantagem a capacidade de decolagem e pouso de forma vertical em pequeno espaço, apresentando, assim, maior desempenho em termos de agilidade de manobra, sendo indicadas para operações que requeiram alto nível de precisão nas manobras, como monitoramento (MACRINA et al., 2020). Considera-se que tal vantagem das aeronaves de asas rotativas reflete diretamente na conclusão do estudo realizado por Lobo et al. (2020), que analisaram 64 trabalhos acadêmicos (monografias, dissertações e teses) publicados entre 2008 e 2018, e afirmam que 59% desse total envolve RPAs de asas rotativas.

Apesar de sua alta capacidade de manobra, permitindo melhor desempenho em observação, reconhecimento, monitoramento e outras missões, as aeronaves de asa rotativa não podem realizar missões que requerem alta velocidade, longo alcance de voo ou alta capacidade de carga útil (SAEED et al., 2015). Além disso, as estruturas eletrônicas e mecânicas das RPAs com asas rotativas são mais complexas do que as

das asas fixas, o que é sua principal desvantagem pois demanda maior custo de manutenção (MACRINA et al., 2020). Ademais, Lobo et al. (2020) apontam, como desafio no uso de RPAs de asa rotativa, em especial, o uso de baterias com grande autonomia e capacidade de processamento, permitindo voos mais longos e de modo que o peso da bateria não afete a sustentação da aeronave.

As RPAs de asa rotativa são projetadas com base no número e posições de seus motores (HASSANALIAN; ABDELKEFI, 2017), sendo a mais comum o quadricóptero (MACRINA et al., 2020; LOBO et al., 2020). Nesse contexto, com relação ao planejamento de rotas para RPAs de asa rotativa, características relacionadas às suas formas de pouso e decolagem e alta capacidade de manobras em locais reduzidos devem ser consideradas (MACRINA et al., 2020), fazendo do quadricóptero ou quadrirrotor a aeronave mais ideal para operações logísticas (RADMANESH et al., 2018). Radmanesh et al. (2018) complementam sobre a relevância do controle da atitude e da posição da plataforma, em que cada hélice possui velocidades independentes e o ângulo de orientação da aeronave deve estar próximo de zero.

Para as RPAs de asa fixa, o planejamento da rota leva em consideração o tempo, uma vez que o veículo está em constante movimento. Além disso, deve-se considerar os benefícios da automatização do processo de planejamento da missão a bordo da RPA, cujo replanejamento garante conformidade com as regras aéreas e mudanças no ambiente, mesmo em casos de falha de comunicação (WU; CAMPBELL; MERZ, 2009).

Como exemplo, para o micro veículo aéreo MicroHawk, uma RPA de asa fixa, Guglieri Quagliotti e Speciale (2008) consideram, no modelo matemático da rota a ser planejada, a dinâmica do veículo, destacando os ângulos de rotação, o impulso do motor, o arraste aerodinâmico, a massa, as coordenadas (x, y e z) referentes ao Centro de Gravidade (CG), a altitude e a velocidade da aeronave. Além disso, restrições são definidas no estado e controle da aeronave. Durante a navegação, limitações são aplicadas no ângulo da trajetória de voo e nos limites superior e inferior para a velocidade e ângulo de arfagem (GUGLIERI; QUAGLIOTTI; SPECIALE, 2008).

Conforme abordado, enquanto RPAs de asa rotativa têm facilidade no pouso e decolagem, ainda que em locais perigosos, as RPAs de asa fixa requerem pistas de lançamento e recuperação para pouso e decolagem, porém atingem maior velocidade de cruzeiro e maior alcance de voo, além de terem maior capacidade de carga útil. As aeronaves híbridas combinam essas vantagens, apresentando habilidade para pouso e decolagem, alta velocidade de cruzeiro e maior resistência, o que garante um ótimo desempenho em diversos tipos de missões (SAEED et al., 2015).

Hassanalian e Abdelkefi (2017) apontam que há diferentes tipos de RPAs híbridas, dentre os quais citam o *tilt-rotor* (rotor inclinado), o *tilt-boby* (corpo inclinado) e o ventilador canalizado. Já Saeed et al. (2015), as classificam em dois tipos: os *convertiplanes*, aeronaves que decolam, cruzam, pairam e pousam permanecendo sempre na horizontal; e os *tail-sitters*, que decolam e pousam verticalmente, mas voam horizontalmente, sendo mais leves que os *convertiplanes*. Os mesmos autores destacam que, comparados a RPAs de asa fixa ou rotativa, os modelos híbridos se mostram mais complexos, no que diz respeito, por exemplo, às suas características aerodinâmicas, o que interfere diretamente no voo.

Atualmente, há projetos envolvendo a construção de RPAs com diferentes habilidades, como voar e andar, ou, ainda, voar e nadar ou mergulhar sob a água, isto é, para serem aplicados em diferentes ambientes, o que se mostra favorável para diversos tipos de missões. Hassanalian e Abdelkefi (2017) também os categorizam como RPAs de modelo híbrido.

Outro tipo de RPAs, menos conhecidas, são as de asas oscilantes ou de “*asas batendo*” (*flapping-wing*), que imitam pássaros voando usando dois mecanismos idênticos acionados por dois motores (MACRINA et al., 2020). Um exemplo é o ornitóptero (do grego *ornithos*, que significa pássaro, e *pteron*, asa) (HASSANALIAN; ABDELKEFI, 2017).

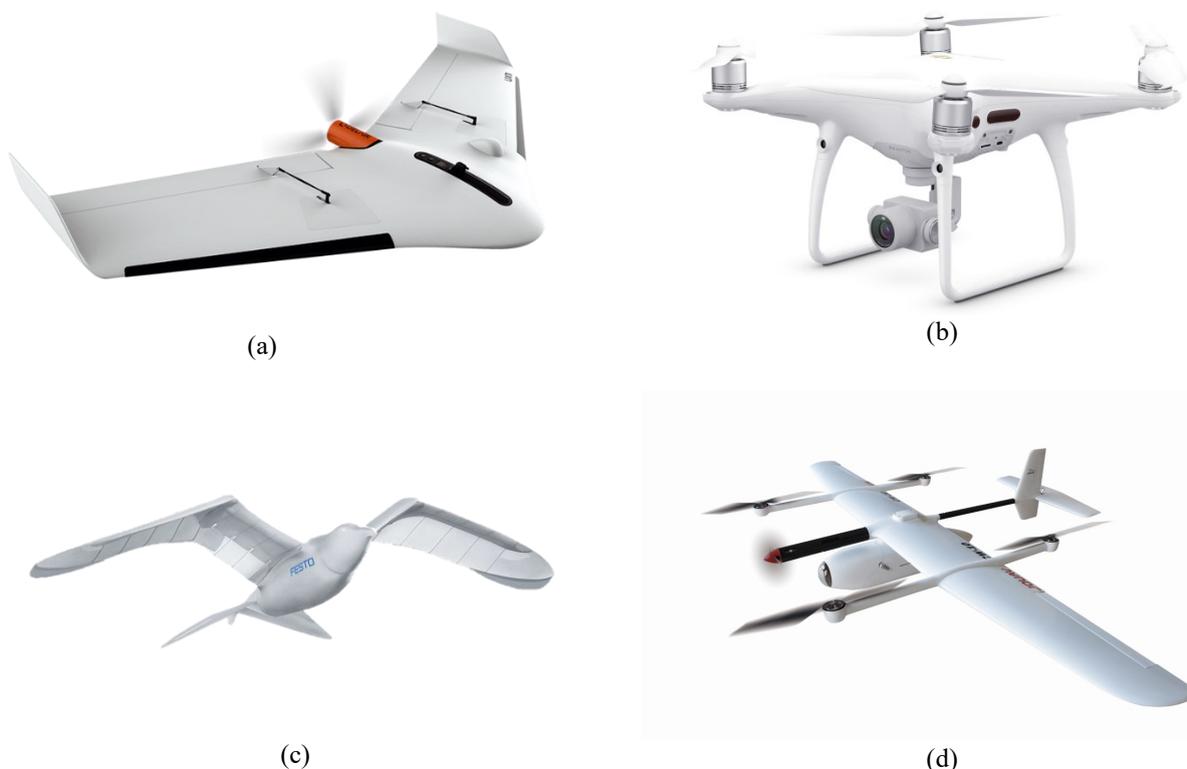
As RPAs de asas oscilantes geralmente consistem em asas, fuselagem, caudas e mecanismo de atuação (HASSANALIAN; ABDELKEFI, 2017). Seu design e tecnologia são mais complexos, em comparação com as RPAs de asas fixas e rotativas, seus custos operacionais são altos e a durabilidade do tempo de voo é reduzida devido à extrema potência necessária para a tecnologia de oscilação. Sua principal vantagem é a alta capacidade das manobras, o que tem despertado o interesse de pesquisadores, os quais também começaram a projetar RPAs híbridas que combinam sistemas de asas fixas, rotativas e oscilantes (MACRINA et al., 2020).

Jones et al. (2005) apresentam um projeto de modelo híbrido, envolvendo asa fixa e asa oscilante. Os autores afirmam que as asas oscilantes/batendo ocasionam em perdas mecânicas e aumento de cargas estruturais, mas em contrapartida fornecem um balanceamento aerodinâmico e produzem impulso com maior eficiência do que em sistemas convencionais de asas oscilantes (não híbridos). Soma-se, portanto, às asas oscilantes, a grande sustentação proporcionada pela asa fixa.

Cabe ressaltar que há outras classificações para os diferentes tipos de RPAs existentes, conforme mostrado em Hassanalian e Abdelkefi (2017), em função de suas características específicas, como peso, envergadura, capacidade de carga, alcance, altitude máxima, velocidade, resistência, custos de produção, dentre outros parâmetros de design. Nesse estudo, concentrou-se em quatro classes principais (RPA de asa fixa, rotativa, oscilante e híbrida) a fim de enfatizar características essenciais quando no planejamento da rota em função da aeronave escolhida para determinada missão.

A Figura 3 ilustra uma RPA de asa fixa (a), uma aeronave de asa rotativa (b), uma RPA de asa oscilante (c) e um modelo híbrido (d).

Figura 3 – (a) Delair UX11, RPA de asa fixa; (b) Phantom 4 Pro v2.0, RPA de asa rotativa; (c) SmartBird, RPA de asa oscilante, e (d) RPA híbrida (asa fixa e rotativa).



Fonte: (a) DELAIR (2020); (b) DJI (2021); (c) FESTO (s.d.); (d) SUASNEWS (s.d.).

### 3.4 Algoritmos e funções heurísticas aplicados aos métodos de roteirização

Para solucionar o problema de otimização de caminhos, há métodos heurísticos, cuja eficiência computacional se sobressai à otimização e exatidão, e métodos não heurísticos ou exatos, os quais usam de princípios matemáticos para obter, em geral, soluções de alto esforço computacional (RADMANESH et al., 2018). Nesse contexto, destaca-se que a inteligência computacional pode produzir soluções eficazes, precisas e rápidas no planejamento de rotas (ZHAO et al., 2018).

O grupo de pesquisa em mecânica de voo do *Politecnico di Torino*, por exemplo, estudou e implementou diferentes funções de planejamento de trajetos (DE FILIPPIS et al., 2012). Zhao et al. (2018) estudaram a roteirização de RPAs e apresentam que os principais algoritmos de inteligência computacional adotados nesse planejamento são: Algoritmo genético (GA), *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Ant Colony Optimization* (ACO), Rede Neural Artificial (ANN), *Fuzzy Logic* (FL), Métodos baseados em aprendizagem (destacando-se, dentre eles, o *Q-Learning*) e outros métodos, como *Simulated Annealing* (SA), *Imunidade*

*Artificial* (AI) e Evolução Diferencial (DE) (ZHAO; ZHENG; LIU, 2018).

Radmanesh et al. (2018) enfatizam a aplicação dos seguintes algoritmos no planejamento de caminhos para RPAs: de campo potencial e campo de força vetorial; algoritmo de Floyd-Warshall; algoritmo genético (GA); algoritmo ganancioso e política de antecipação de várias etapas (MSLAP); A\*; D\*; *Iterative Deepening A\** (IDA\*); algoritmo de Fringe;  $\theta^*$ ; Programação dinâmica (DP), da qual deriva o Dijkstra; algoritmo de Bellman-Ford; Q-Learning; Programação Linear Inteira Mista (MILP) e Algoritmo de Bug.

Todos os algoritmos de otimização inteligente têm suas próprias características e complexidade de programação (LI et al., 2018) e múltiplos são os estudos nessa temática. Nesse contexto, destacam-se a seguir exemplos de estudos que envolvem o uso e a potencialidade e/ou fragilidade de algoritmos ou funções heurísticas específicas para os métodos de planejamento de rota destacados nas seções anteriores.

### 3.4.1 ALGORITMOS E FUNÇÕES HEURÍSTICAS RELACIONADOS AO DOMÍNIO DE TEMPO

Ragi e Chong (2013) apresentam um algoritmo de planejamento de caminho de RPAs que rastreiam alvos terrestres com base na teoria dos processos de decisão de Markov parcialmente observáveis (POMDPs), em que os comandos de orientação são calculados em tempo real enquanto incorporam restrições dinâmicas no movimento da aeronave em resposta às informações de feedback e levam em consideração a compensação do vento e a prevenção de colisões (RAGI; CHONG, 2013).

Li et al. (2018), prezando por segurança, afirmam ser essencial escolher uma maneira rápida de atingir o objetivo em planejamentos de rotas *onlines*, aplicando, para tanto, o algoritmo de planejamento de trajetória de voo baseado no método de aprendizagem geométrica, que possui robustez e capacidade adaptativa. Os mesmos autores destacam que a pesquisa heurística é altamente adaptável a ambientes dinâmicos e pode ser aplicada ao planejamento em tempo real, mas tem deficiências de baixa velocidade de pesquisa e grande espaço de memória (LI et al., 2018).

O algoritmo genético (GA) e a otimização de enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO) são propostos para o planejamento de caminhos em tempo real, permitindo determinar um caminho ótimo em ambientes estáticos e dinâmicos complicados (ZHAO et al., 2018). O uso de algoritmos evolutivos para otimização do caminho dos veículos é outra solução importante que permite aplicar restrições cinemáticas ao caminho (DE FILIPPIS et al., 2012).

Guoshi, Qiang e Lejiang (2010) apresentaram uma abordagem que combina o planejamento de caminho estático com o planejamento de caminho dinâmico de várias RPAs, de forma cooperativa, com base em um algoritmo PSO. Algoritmos evolucionários são eficazes no planejamento de rotas, tanto *online* quanto *offline*, sob as condições estipuladas e num período de tempo aceitável, especialmente para o planejador *online*, onde o tempo de execução é de grande importância (NIKOLOS et al., 2003).

A Programação Linear Inteira Mista (MILP) apresenta potencial para aplicações em tempo real em ambientes hostis (RADMANESH et al., 2018). Zhuoning et al. (2010) utilizam do algoritmo *Fuzzy Logic* (FL) para planejamento de rotas *online*, no qual um coeficiente de proporção com base no raciocínio lógico se adapta às mudanças de cada situação.

### 3.4.2 ALGORITMOS E FUNÇÕES HEURÍSTICAS RELACIONADOS AO MODELO DE AMBIENTE

Considerando rotas bidimensionais, Radmanesh et al. (2018) apontam que o algoritmo  $\theta^*$  é eficiente em ambientes 2D incertos. Rathbun et al. (2002) apresentam uma rota bidimensional para RPA usando algoritmos baseados em evolução (EA). O resultado obtido no estudo realizado por esses autores consiste em um caminho contínuo no espaço, que atende às restrições de velocidade e manobra da aeronave, equilibrando a probabilidade de colisão e o combustível necessário para implementar um comportamento excessivamente cauteloso (RATHBUN et al., 2002).

Somado às restrições e características já enfatizadas para a roteirização 3D, esse método de planejamento enfrenta limitações relacionadas aos algoritmos tradicionais de IC, que, dentre outros agravantes,

tem convergência lenta (ZHAO; ZHENG; LIU, 2018). Considerando os algoritmos de inteligência artificial, Zhao, Zheng e Liu (2018) citam diferentes abordagens no planejamento 3D, apontando que são aplicados os algoritmos genéticos, PSO, ACO e métodos de aprendizagem de máquina, em especial, para o planejamento tridimensional.

O algoritmo A\*, por exemplo, se mostra amplamente maduro e bem desenvolvido, bem como uma alternativa eficiente, quando se tem rotas 2D (SAMAR; REHMAN, 2011) ou problemas com caminhos mais curtos (Zhang et al., 2016). Embora a implementação 3D, considerando o terreno local, ainda ofereça desafios computacionais (Samar; Rehman, 2011; Zhang et al., 2016), Zhan et al. (2014) introduziram o algoritmo A\* para o planejamento de trajetos em tempo real de RPAs em campo de batalha tridimensional e obtiveram alta taxa de sobrevivência e baixo consumo de combustível. Já o algoritmo  $\theta^*$ , um aprimoramento do A\*, se mostra vantajoso ao planejamento de rotas 3D, sendo aplicado em obstáculos orográficos e urbanos (DE FILIPPIS et al., 2012). Wu, Campbell e Merz (2009) adotam o algoritmo A\* para planejamento de caminho tridimensional associado ao uso da Função de Decisão Multicritério (MCDM).

### 3.4.3 ALGORITMOS E FUNÇÕES HEURÍSTICAS RELACIONADOS ÀS CARACTERÍSTICAS DA AERONAVE

Considerando as restrições das aeronaves, os algoritmos de planejamento de caminho 2D podem ser divididos em três tipos. Os algoritmos do primeiro tipo modelam o veículo como uma partícula, concentrando-se no cálculo da rota ideal. Já os do segundo tipo consideram a forma da RPA, analisando requisitos como envergadura e centro de gravidade. Por último, o terceiro tipo de algoritmos refere-se àqueles que modelam a aeronave em função de suas restrições cinemáticas e dinâmicas e, por isso, são considerados mais complexos que os algoritmos dos dois primeiros tipos; entretanto, os autores afirmam serem os mais práticos em termo de aplicações (ZHAO; ZHENG; LIU, 2018).

Levando em consideração as propriedades dinâmicas de RPAs de asa fixa em um ambiente tridimensional complexo, Roberge, Tarbouchi e Labonte (2013) utilizam os algoritmos genético e PSO para o cálculo de rotas ótimas. Além desse estudo, De Filippis et al. (2012) afirmam que o algoritmo  $\theta^*$  é uma melhor solução, comparada ao A\*, para o planejamento de rotas de aeronaves de asa fixa usadas no monitoramento e vigilância no solo (DE FILIPPIS et al., 2012).

De Filippis et al. (2012) destacam para o fato de que alguns algoritmos usados no planejamento de rotas de RPA não consideram a cinemática do veículo, o que gera, conseqüentemente, numa exigência de suavização para realocar as sequências de *waypoints* para obtenção de rotas por meio de RPAs de asa fixa. Os autores complementam que, nesse processo, uma das metodologias utilizadas seria as curvas de Dubins (DE FILIPPIS et al., 2012).

Guglieri, Quagliotti e Speciale (2008), estudando aeronaves de asa fixa, apresentam que os algoritmos genéticos se mostram benéficos no planejamento de caminhos.

Por fim, apresenta-se o estudo de Lin e Goodrich (2009), os quais apontam o uso de mini RPAs para problemas de pesquisa e resgate (*Wilderness Search and Rescue – WiSAR*) devido ao seu baixo custo, portabilidade e uso potencial em campo (GOODRICH et al., 2008). Os autores modelam o problema de planejamento de rota de RPAs em dois grupos de algoritmos, com ou sem destino definido, usando algoritmos baseados em Escalada Local (*Local Hill Climbing*) e algoritmos evolucionários usando técnicas novas, como "efeito de aquecimento global" e cruzamento de caminho/mutação. O desempenho dos algoritmos foi avaliado em representações de mapas típicos de distribuição de probabilidade WiSAR, com tempos de voo distintos e mapas simplificados para validar a eficiência do estudo em mapas reais. Os resultados demonstram alta eficiência nos algoritmos desenvolvidos, aproximando-se da solução ideal dentro do tempo de computação razoável (LIN; GOODRICH; 2009).

## 4 DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Conforme Zhao, Zheng e Liu (2018), que cerca de 29,9% dos trabalhos publicados entre 2007 e 2018 tratam de roteirização *online*, enquanto 70,1% apresentam estudos envolvendo algoritmos *offline* de

planejamento de caminhos. No entanto, esses autores salientam que, à medida que o número total de artigos em estudo aumenta, os pesquisadores se concentram cada vez mais nos métodos de planejamento de caminhos *online*, especialmente a partir de 2015. Os autores também apresentam que 55,8% dos artigos exploram métodos de planejamento de caminhos 2D, enquanto 44,2% dos artigos exploram métodos 3D. Entretanto, a proporção de artigos relacionados aos métodos tridimensionais cresceu muito após 2016, face à queda dos estudos envolvendo métodos de roteirização 2D, o que pode ser explicado pela aplicação prática das RPAs, que envolvem ambientes reais (ZHAO; ZHENG; LIU, 2018). Portanto, a perspectiva futura é de que cada vez mais os estudos sobre o planejamento de rotas para RPAs concentrem-se na roteirização *online* e tridimensional.

Nesse contexto, para que se possa planejar rotas *onlines* tridimensionais eficientes no que diz respeito aos algoritmos utilizados para a roteirização, Potter Neto, Bertoli e Saotome (2020) destacam que a distância a ser percorrida pela RPA e o tempo de execução da rota são os principais fatores que definem qual algoritmo adotar na roteirização. Radmanesh et al. (2018) complementam que a escolha do algoritmo ideal deve-se basear no tempo computacional e na otimização da rota. Além disso, Potter Neto, Bertoli e Saotome (2020) apontam, para estudos futuros, simulações envolvendo o sistema UTM em grandes áreas, adotando, por exemplo, mapas representativos de cidades.

Com relação às características da RPA, o modelo da aeronave deve ser definido em função da aplicação. Para entregas de mercadorias com RPAs (logística), por exemplo, Macrina et al. (2020) apontam que as RPAs de asa rotativa são as que apresentam melhor desempenho; no entanto, modelos híbridos, que envolvam asas rotativas, podem levar a soluções mais eficazes e eficientes. Cabe destacar, nesse contexto, que a tendência é de que as pesquisas futuras se concentrem em maximizar o desempenho da RPA e minimizar os custos, considerando cenários mais realistas (MACRINA et al., 2020). Para tanto, a bateria é um desafio, segundo Lobo et al. (2020). Para esses autores, a bateria da RPA deve ser capaz de sustentar a aeronave, cada vez mais autônoma, de modo que seu peso não comprometa o voo, principalmente para RPAs de asa rotativa, as quais também vêm sendo muito adotadas para as aplicações na área da geomática.

Ainda observando as características da RPA, Lobo et al. (2020) apresentam, como uma perspectiva futura para as RPAs, “o contínuo desenvolvendo da tecnologia embarcada”, o que permite obter informações confiáveis e que podem auxiliar na roteirização *online*, por exemplo. Nesse mesmo aspecto, Murray e Chu (2015) já apontavam como perspectiva futura que as RPAs seriam equipadas com funcionalidades automatizadas de detecção e prevenção e obstáculos, o que exige maior investimento nas aeronaves, porém reduz a necessidade de pessoas para pilotar a RPA.

Nesse sentido, Gupta e Fernando (2022) destacam a associação entre RPA e a técnica SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), que mostra potencial na detecção de objetos e percepção da cena como um todo, permitindo obter um conjunto de informações que possibilitam a definição da trajetória da RPA. Complementando, os autores apontam que o SLAM auxilia a navegação autônoma da RPA sem ter um mapa pré-definido para a trajetória (GUPTA; FERNANDO, 2022), o que é indispensável quando se pensa em roteirização *online*.

Tan et al. (2019), nessa abordagem, destacam como perspectivas para pesquisas futuras o replanejamento e mapeamento dinâmicos para rotas gerenciadas por um sistema UTM, no qual as informações geoespaciais são obtidas pelas próprias RPAs, que alimentam uma rede de tráfego que auxilia no replanejamento de voos posteriores que sejam solicitados ao sistema UTM. O uso do SLAM é uma tendência que se mostra promissora nesse contexto.

Essa técnica também se mostra como importante para a roteirização de RPAs ao se observar a segurança da operação. Tan et al. (2019) destacam também que trabalhos futuros de planejamento de rotas de RPAs devem considerar, além da busca pelo menor caminho, a eficiência energética do veículo e a evasão da rota em locais populosos, o que é indispensável à segurança.

Nesse sentido, devem ser observadas as regras de acesso ao espaço aéreo de cada país, que definem qual o distanciamento horizontal mínimo, considerando a projeção vertical da RPA no solo, que deve existir entre a aeronave e as pessoas, bem como entre a RPA e edificações, tendo em vista a probabilidade de se ter pessoas em seus arredores. No Brasil, por exemplo, essas regras são definidas pelo Departamento de Controle

do Espaço Aéreo (DECEA) por meio da ICA 100-40, em conjunto com a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), responsável pela homologação dos elementos de comunicação envolvidos com a operação por meio da Resolução nº 715 (ANATEL, 2019), e com a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), por meio do RBAC-E nº 94 (BRASIL, 2017). Com o aumento do uso das RPAs em diversas áreas, esses órgãos reguladores têm investido na simplificação e modernização dos processos, legislações e sistemas (LOBO ET AL., 2020), adotando o Sistema de Aeronaves Não Tripuladas (SISANT), para registro das RPAs, e o sistema de Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARPAS), para autorização dos voos com RPA.

Ainda no contexto brasileiro, ressalta-se que tem ocorrido a simplificação para acesso ao espaço aéreo também para operações além da linha de visada do operador, isto é, para operações BVLOS (BRASIL, 2020). Como exemplo, em janeiro de 2022, a Speedbird Aero e a AL Drones obtiveram uma autorização de projeto da ANAC para *Drone Delivery* no Brasil, envolvendo operações BVLOS em ambiente urbano (MUNDOGEO, 2022). Esse fato chama a atenção para a necessidade de pesquisas que prezem pelo planejamento de rotas *online* para as RPAs, a fim de garantir a segurança dos espaços urbanos, e que considerem a capacidade da aeronave de detectar e evitar (Detect and Avoid) e um sistema UTM para gerenciar as rotas com RPAs, o que apresenta cada vez mais uma demanda crescente.

Além do desafio de planejar rotas seguras em ambientes urbanos, em que há grande concentração de pessoas, Macrina et al. (2020) também apresentam como desafio futuro a roteirização de RPAs em zonas de exclusão aérea ou “*no fly zone*”, ou seja, “área específica na qual o voo não é permitido em condições normais” (BRASIL, 2020). É essencial investigar e traçar soluções seguras para os casos em que é extremamente necessário o voo sobre essas áreas, como para fins de mapeamento da região, por exemplo.

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos trabalhos publicados entre 2002 e 2020, abordados nessa revisão de literatura, evidencia-se a necessidade de compreensão dos diferentes métodos de planejamento de rotas para RPAs, independente da área de estudo ou da temática em que são utilizadas essas aeronaves. Por meio das referências apresentadas e dos exemplos de aplicação destacados, é perceptível que a roteirização *online* e tridimensional é a que vem sendo mais pesquisada e explorada, especialmente envolvendo RPAs de asa fixa ou rotativa, que são as mais comuns no mercado.

Nesse sentido, pontuam-se os principais fatores apresentados pelos estudos destacados nesse artigo quando se trata dos métodos de planejamento em função do domínio de tempo, enfatizando a roteirização *online*: presença de obstáculos, deslocamento longe de ameaças, restrições de velocidade e aceleração, consumo de combustível, otimização de desempenho da aeronave, prevenção de colisões, altura máxima de voo, potência máxima do sistema de comunicação e compensação do vento. Ademais, no planejamento de caminho *online*, a implementação de um voo real inteligente e a capacidade de planejamento automático e replanejamento de caminhos são cruciais.

Somado a esses fatores, para implementação dos métodos de roteirização tridimensional, a literatura apresenta a modelagem do terreno e das ameaças, a posição e orientação da aeronave, as condições atmosféricas, a otimização do tempo de voo, o cumprimento das regras de voo para controle do espaço aéreo e a definição de uma função objetivo, bem como do algoritmo mais apropriado, como condições relevantes.

Outra contribuição desse estudo para pesquisadores da área, diz respeito ao detalhamento das condições impostas para o planejamento de rotas em função das características físicas da aeronave. Os diferentes tipos de RPAs (de asa fixa e rotativa, principalmente) têm limitações quanto ao pouso e decolagem, capacidade de carga, tempo de voo, cinemática do veículo, dentre outras características que influenciam no planejamento da rota e que, conseqüentemente, podem inviabilizar o uso de determinada aeronave para a finalidade em questão.

Acrescenta-se, como contribuição desse estudo, a dificuldade e a impossibilidade de se considerar cada método de planejamento de forma isolada, isto é, uma rota nunca será somente *online* ou *offline*, sem também ser 2D ou 3D, e sempre irá adotar um tipo de aeronave específico e um algoritmo ou função heurística no planejamento da rota. Embora isso pareça óbvio, é importante ressaltar para corroborar com a importância

desse estudo ao apresentar as particularidades, exemplos e considerações referentes a cada um dos métodos de roteirização definidos, bem como estudos envolvendo algoritmos de inteligência computacional e funções heurísticas aplicados a tais métodos, o que pode beneficiar pesquisadores da área em trabalhos futuros, especialmente voltados à roteirização *online* tridimensional, que se mostra como tendência.

## Agradecimentos

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FECFAU / Unicamp) por todo apoio institucional durante a realização do trabalho.

## Contribuição dos Autores

À 1ª autora (Débora Paula Simões) coube a responsabilidade das etapas de pesquisa bibliográfica, conceituação teórica, desenvolvimento da metodologia, discussões, redação e revisão do texto, com a contribuição, supervisão e orientação do 2º autor (Henrique Candido de Oliveira). O 3º autor (Orlando Fontes de Lima Júnior) e o 4º autor (Diógenes Cortijo Costa) revisaram todas as etapas, contribuindo com a conceituação teórica e o desenvolvimento da metodologia.

## Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há conflito de interesse.

## Referências

- ALVES JÚNIOR, L. R.; CÔRTEZ, J. B. R.; SILVA, J. R.; FERREIRA, M. E. Validação de ortomosaicos e modelos digitais de terreno utilizando fotografias obtidas com câmera digital não métrica acoplada a um VANT. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n. December, p. 1453–1466, 2015.
- ANATEL – AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Resolução nº 715, de 23 de outubro de 2019**. Aprova o Regulamento de Avaliação da Conformidade e de Homologação de Produtos para Telecomunicações. 2019. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2019/1350-resolucao-715>>. Acesso em: 23 abr. 2022.
- BAI, J.; YEH, S. P.; XUE, F.; TALWAR, S. Route-aware handover enhancement for drones in cellular networks. **2019 IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM 2019 - Proceedings**, p. 1–6, 2019. IEEE.
- BRASIL. ANAC. Requisitos Gerais para Aeronaves Não Tripuladas de uso civil. **RBAC-E nº 94**. 2017.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Aeronaves Não Tripuladas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro. **ICA 100-40**. 2020.
- CAKIR, M. 2D Path Planning of UAVs with Genetic Algorithm in a Constrained Environment. **6ª Conferência Internacional sobre Modelagem, Simulação e Otimização Aplicada (ICMSAO)**, p. 1–5, 2015.
- CHEN, Y. B.; LUO, G. C.; MEI, Y. S.; YU, J. Q.; SU, X. L. UAV path planning using artificial potential field method updated by optimal control theory. **International Journal of Systems Science**, v. 47, n. 6, p. 1407–1420, 2016. Taylor & Francis. DOI. 10.1080/00207721.2014.929191.
- DELAIR. **Delair UX11**: o drone de mapeamento mais inteligente. 2020. Disponível em <<https://delair.aero/delair-commercial-drones/professional-mapping-drone-delair-ux11/>>. Acesso em 19 mar. 2021.
- DE FILIPPIS, L.; GUGLIERI, G.; QUAGLIOTTI, F. A minimum risk approach for path planning of UAVs. **Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications**, v. 61, n. 1–4, p. 203–219, 2011.
- DE FILIPPIS, L.; GUGLIERI, G.; QUAGLIOTTI, F. Path planning strategies for UAVS in 3D environments.

- Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications**, v. 65, n. 1, p. 247–264, 2012.
- DJI. **Phantom 4 PRO v2.0**. 2021. Disponível em < <https://www.dji.com/br/phantom-4-pro-v2>>. Acesso em 19 mar. 2021.
- DONG, Z.; CHEN, Z.; ZHOU, R.; ZHANG, R. A hybrid approach of virtual force and A\* search algorithm for UAV path re-planning. **6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2011**, p. 1140–1145, 2011. IEEE.
- FESTO. **SmartBird: voo de pássaro decifrado**. Disponível em <<https://www.festo.com/group/en/cms/10238.htm>>. Acesso em 19 mar. 2021.
- GOODRICH, M. A.; MORSE, B. S.; GERHARDT, D.; COOPER, J. L. Supporting Wilderness Search and Rescue using a Camera-Equipped Mini UAV. **Journal of Field Robotics**, v. 25, n. 1–2, p. 89–110, 2008. DOI: 10.1002/rob.20226.
- GUGLIERI, G.; QUAGLIOTTI, F. B.; SPECIALE, G. OPTIMAL TRAJECTORY TRACKING FOR AN AUTONOMOUS UAV. **Università di Bologna**, p. 1–9, 2008.
- GUOSHI, W.; QIANG, L.; LEJIANG, G. Multiple UAVs routes planning based on particle swarm optimization algorithm. **2010 2nd International Symposium on Information Engineering and Electronic Commerce, IEEC 2010**, p. 150–154, 2010.
- GUPTA, A.; FERNANDO, X. Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) and Data Fusion in Unmanned Aerial Vehicles: Recent Advances and Challenges. **Drones**. 2022, 6, 85. DOI: 10.3390/drones6040085.
- HASSANALIAN, M.; ABDELKEFI, A. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 91, p. 99–131, 2017.
- JONES, K. D.; BRADSHAW, C. J.; PAPADOPOULOS, J.; PLATZER, M. F. Bio-inspired design of flapping-wing micro air vehicles. **The Aeronautical Journal**, v. 109, p. 385–393, 2005.
- LI, H.; WU, S. T.; XIE, P.; QIN, Z.; ZHANG, B. A Path Planning for One UAV Based on Geometric Algorithm. **2018 IEEE CSAA Guidance, Navigation and Control Conference, CGNCC 2018**, p. 1–5, 2018. IEEE.
- LIN, L.; GOODRICH, M. A. UAV intelligent path planning for wilderness search and rescue. **2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009**, p. 709–714, 2009. IEEE.
- LIU, Y.; ZHANG, X.; GUAN, X.; DELAHAYE, D. Adaptive sensitivity decision based path planning algorithm for unmanned aerial vehicle with improved particle swarm optimization. **Aerospace Science and Technology**, v. 58, p. 92–102, 2016. Elsevier Masson SAS. DOI: 10.1016/j.ast.2016.08.017.
- LOBO, F.; FERREIRA, M. E.; UCHOA, C.; COSTA, J. V. DA. Uso de Plataformas Aéreas Não Tripuladas no Brasil – um Panorama de Dez Anos ( 2008-2018 ) de Publicações Acadêmicas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, p. 785–806, 2020.
- LOUREIRO, S. A. ; NOLLETO, A. P. R. ; SANTOS, L. S. ; SANTOS JUNIOR, J. B. S. ; LIMA JÚNIOR, O. F. . O uso do método de revisão sistemática da literatura na pesquisa em logística, transportes e cadeia de suprimentos. **Transportes (Rio de Janeiro)**, v. 24, p. 95-106, 2016.
- MACRINA, G.; PUGLIESE, L. D. P.; GUERRIERO, F.; LAPORTE, G. Drone-aided routing: A literature review. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 120, n. August, p. 102762, 2020. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102762.
- MAGALHÃES, D. M.; MOURA, A. C. M. Análise da Morfologia de Modelos Digitais de Superfície Gerados por VANT. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 73, n. 3, p. 707–722, 2021. DOI: 10.14393/rbcv73n3-51600. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/51600>. Acesso em: 23 abr. 2022.
- MUNDOGEO. **Speedbird Aero e AL Drones garantem a primeira Autorização de Projeto ANAC para Drone Delivery no Brasil**. 2022. Disponível em: < <https://mundogeo.com/2022/01/20/speedbird-aero-e-al-drones-garantem-a-primeira-autorizacao-de-projeto-anac-para-drone-delivery-no-brasil/#:~:text=Desde%20ent%C3%A3o%2C%20as%20empresas%20trabalham,o%20modelo%20DLV%2D1%20Legacy>>. Acesso em: 23 abr. 2022.
- MURRAY, C. C.; CHU, A. G. The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 54, p. 86–109, 2015. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.trc.2015.03.005.
- NEX, F.; REMONDINO, F. UAV for 3D mapping applications: A review. **Applied Geomatics**, v. 6, p. 1–15,

2014.

- NIKOLOS, I. K.; VALAVANIS, K. P.; TSOURVELOUDIS, N. C.; KOSTARAS, A. N. Evolutionary Algorithm Based *Offline/Online* Path Planner for UAV Navigation. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics**, v. 33, n. 6, p. 898–912, 2003.
- OLIVEIRA, D. R.; CICERELLI, R. E.; ALMEIDA, T.; MAROTTA, G. S. A. Geração de Modelo Digital do Terreno a partir de imagens obtidas por Veículo Aéreo Não Tripulado. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 6, p. 1143–1151, 2017. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/323812670\\_GERACAO\\_DE\\_MODELO\\_DIGITAL\\_DO\\_TERRENO\\_A\\_PARTIR\\_DE\\_IMAGENS\\_OBTIDAS\\_POR\\_VEICULO\\_AEREO\\_NAO\\_TRIPULADO](https://www.researchgate.net/publication/323812670_GERACAO_DE_MODELO_DIGITAL_DO_TERRENO_A_PARTIR_DE_IMAGENS_OBTIDAS_POR_VEICULO_AEREO_NAO_TRIPULADO)>.
- OLIVEIRA, D. V.; BRITO, J. L. S. Avaliação da Acurácia Posicional de Dados Gerados por Aeronave Remotamente Pilotada. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 4, p. 934–959, 2019.
- PENG, X.; XU, D. Intelligent *online* path planning for UAVs in adversarial environments. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, v. 9, p. 1–12, 2012.
- PFEIFFER, B.; BATTÀ, R.; KLAMROTH, K.; NAGI, R. Path Planning for UAVs in the Presence of Threat Zones Using Probabilistic Modeling. **IEEE Trans. Autom. Control**, v. 43, p. 278–283, 2005.
- POTTER NETO, C. A.; BERTOLI, G. DE C.; SAOTOME, O. 2D and 3D A\* Algorithm Comparison for UAS Traffic Management Systems. **International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)**, n. 1–4, p. 72–76, 2020.
- RADMANESH, M.; KUMAR, M.; GUENTERT, P. H.; SARIM, M. Overview of Path-Planning and Obstacle Avoidance Algorithms for UAVs: A Comparative Study. **Unmanned Systems**, v. 6, n. 2, p. 95–118, 2018.
- RAGI, S.; CHONG, E. K. P. UAV path planning in a dynamic environment via partially observable markov decision process. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 49, n. 4, p. 2397–2412, 2013. IEEE.
- RATHBUN, D.; KRAGELUND, S.; PONGPUNWATTANA, A.; CAPOZZI, B. An evolution based path planning algorithm for autonomous motion of a UAV through uncertain environments. **AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings**, v. 2, 2002.
- ROBERGE, V.; TARBOUCHI, M.; LABONTE, G. Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time UAV path planning. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 9, n. 1, p. 132–141, 2013. IEEE.
- RUBIO-HERVAS, J.; GUPTA, A.; ONG, Y. S. Data-driven risk assessment and multicriteria optimization of UAV operations. **Aerospace Science and Technology**, v. 77, p. 510–523, 2018. DOI: 10.1016/j.ast.2018.04.001.
- RUBIO, J. C.; KRAGELUND, S. The trans-pacific crossing: Long range adaptive path planning for UAVs through variable wind fields. **AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings**, v. 2, p. 1–12, 2003.
- SAEED, A. S.; CAI, G.; YOUNES, A. B.; et al. A review on the platform design, dynamic modeling and control of hybrid UAVs. **2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2015**, p. 806–815, 2015.
- SAMAR, R.; REHMAN, A. Autonomous terrain-following for unmanned air vehicles. **Mechatronics**, v. 21, n. 5, p. 844–860, 2011. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2010.09.010.
- SUASNEWS. **sUASNews: the business of drones**. Disponível em: <<https://www.suasnews.com/>>. Acesso em 29 mar. 2021.
- TAN, Q.; WANG, Z.; ONG, Y. S.; LOW, K. H. Evolutionary optimization-based mission planning for UAS traffic management (UTM). **2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2019**, p. 952–958, 2019. IEEE.
- UVS INTERNATIONAL. **Review of activities (1995 - 2020)**. 2020. Disponível em <[https://uvs-international.org/wp-content/uploads/2021/01/UVSI\\_Review-of-Activities\\_210124\\_B\\_TR.pdf](https://uvs-international.org/wp-content/uploads/2021/01/UVSI_Review-of-Activities_210124_B_TR.pdf)>. Acesso em 12 mar. 2021.
- WU, P. P. Y.; CAMPBELL, D.; MERZ, T. On-board multi-objective mission planning for unmanned aerial vehicles. **IEEE Aerospace Conference Proceedings**, p. 1–10, 2009. IEEE.
- ZHAN, W.; WANG, W.; CHEN, N.; WANG, C. Efficient UAV Path Planning with Multiconstraints in a 3D Large Battlefield Environment. **Mathematical Problems in Engineering**, 2014.

- ZHANG, M.; SU, C.; LIU, Y.; HU, M.; ZHU, Y. Unmanned aerial vehicle route planning in the presence of a threat environment based on a virtual globe platform. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 5, n. 10, p. 184, 2016.
- ZHAO, P.; YANG, Y.; ZHANG, Y.; et al. Optimal Trajectory Planning of Drones for 3D Mobile Sensing. **2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)**, p. 1–6, 2018. IEEE.
- ZHAO, Y.; ZHENG, Z.; LIU, Y. Survey on computational-intelligence-based UAV path planning. **Knowledge-Based Systems**, v. 158, n. March, p. 54–64, 2018. Elsevier. DOI: 10.1016/j.knosys.2018.05.033.
- ZHENG, Z.; LIU, Y.; ZHANG, X. More Threat Information Sharing, More Effective UAV Real-time Path Planning? **Knowledge-Based Systems**, v. 114, p. 36–46, 2016. Elsevier B.V. DOI: 10.1016/j.knosys.2016.09.021.
- ZHUONING, D.; RULIN, Z.; ZONGJI, C.; RUI, Z. Study on UAV Path Planning Approach Based on Fuzzy Virtual Force. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 23, n. 3, p. 341–350, 2010. Chinese Journal of Aeronautics. DOI: 10.1016/S1000-9361(09)60225-9.

### Biografia do autor principal



Débora Paula Simões, natural de Bueno Brandão – MG, é Engenheira Agrimensora e Cartógrafa pelo IFSULDEMINAS – Campus Inconfidentes (2016), Especialista em Gestão Ambiental (2018) e em Docência na Educação Profissional e Tecnológica (2020) também pelo IFSULDEMINAS, e Mestra em Engenharia Civil, na área de concentração Transportes, pela Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FECFAU/Unicamp). Atualmente, é docente no IFSULDEMINAS – Campus Inconfidentes e doutoranda do programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da FECFAU (Unicamp), atuando em pesquisas relacionadas à roteirização de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs).



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.