

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Computação



Tese

**Planejamento de Rotas de Cobertura para Veículos Aéreos Não Tripulados
Aplicados no Controle Biológico de Pragas em Cenários Reais de Grandes
Áreas**

Bruno Siqueira da Silva

Pelotas, 2024

Bruno Siqueira da Silva

**Planejamento de Rotas de Cobertura para Veículos Aéreos Não Tripulados
Aplicados no Controle Biológico de Pragas em Cenários Reais de Grandes
Áreas**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Ferreira Jr.
Coorientador: Prof. Dr. Tauã Milech Cabreira

Pelotas, 2024

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

S586p Silva, Bruno Siqueira da

Planejamento de rotas de cobertura para veículos aéreos não tripulados aplicados no controle biológico de pragas em cenários reais de grandes áreas [recurso eletrônico] / Bruno Siqueira da Silva ; Paulo Roberto Ferreira Júnior, orientador ; Tauã Milech Cabreira, coorientador. — Pelotas, 2024.
135 f.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Computação, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2024.

1. Planejamento de rotas de cobertura. 2. Dispersão de agentes biológicos. 3. Algoritmos de decomposição. 4. Framework. 5. Voronoi. I. Ferreira Júnior, Paulo Roberto, orient. II. Cabreira, Tauã Milech, coorient. III. Título.

CDD 005

Bruno Siqueira da Silva

**Planejamento de Rotas de Cobertura para Veículos Aéreos Não Tripulados
Aplicados no Controle Biológico de Pragas em Cenários Reais de Grandes
Áreas**

Tese aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutor em Ciência da Computação, Programa de Pós-Graduação em Computação, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 24 de Setembro de 2024

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Roberto Ferreira Jr. (orientador)

Doutor em Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Tauã Milech Cabreira (Co-orientador)

Doutor em Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Felipe de Souza Marques

Doutor em Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Alisson Vasconcelos de Brito

Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande.

Prof. Dr. Eduardo Todt

Doutor em Automatización Avanzada y Robótica pelo Universidad Politécnica de Cataluña.

Dedico esta tese à minha esposa Juliana, pelo amor e incentivo sempre presentes, e às minhas filhas, Olívia e Sofia, por iluminarem minha vida com sua alegria e ternura.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à minha mãe pelo apoio, incentivo e compreensão em todos os momentos da minha vida.

À minha esposa, Juliana de Magalhães Bandeira, que esteve comigo ao longo de toda a trajetória, dividindo os cuidados e a atenção com nossas filhas. Enfrentamos juntos os desafios de atravessar a pandemia em casa com as duas crianças, e sem o seu apoio e paciência, este trabalho não teria sido possível. Foste fundamental, e por isso, sou imensamente grato.

Ao Instituto Federal Farroupilha (IFFar) e à Universidade Federal de Pelotas (UF-Pel) pela oportunidade de realizar o curso de Pós-Graduação em Computação (PPGC) na modalidade Dinter, área de concentração em Sistemas Inteligentes. Agradeço em especial a todos os professores do PPGC pela oportunidade de aprender, pelo profissionalismo e pelos valiosos ensinamentos transmitidos.

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto Ferreira Jr., pela imprescindível orientação, apoio e por ter guiado este trabalho com sabedoria e paciência. Também gostaria de expressar minha profunda gratidão ao Dr. Tauã Milech Cabreira, por sua especial atenção, profissionalismo e capacidade técnica exemplar, incansável colaboração, incentivo contínuo e, acima de tudo, pela amizade sincera. Sua orientação foi fundamental ao longo de toda a minha trajetória, e sou imensamente grato pelos ensinamentos valiosos que recebi, os quais foram essenciais para o sucesso deste trabalho.

Aos responsáveis pela BirdView Drone Bio Control, Ricardo Machado e Nícolas Matias, que foram fundamentais para a contribuição técnica e a realização dos experimentos desta tese. A colaboração de vocês foi essencial para o sucesso dos estudos e para a aplicação prática das soluções desenvolvidas.

Aos pesquisadores Dr. Bruno Olivieri e Dr. Lúcio André Castro Jorge, que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento da tese, trazendo contribuições valiosas e sempre apontando caminhos que foram essenciais para alcançar os objetivos desta tese.

Aos meus amigos, que muitas vezes, sem entender as preocupações que me cercavam, sempre estiveram presentes me auxiliando, apoiando e vibrando a cada conquista, amenizando os percalços desta caminhada.

E é claro, a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e para o meu crescimento profissional.

RESUMO

DA SILVA, Bruno Siqueira. **Planejamento de Rotas de Cobertura para Veículos Aéreos Não Tripulados Aplicados no Controle Biológico de Pragas em Cenários Reais de Grandes Áreas**. Orientador: Paulo Roberto Ferreira Jr.. 2024. 135 f. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) – Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2024.

O Controle Biológico (CB) é um método sustentável para o manejo de pragas agrícolas, utilizando agentes naturais para regular suas populações. O uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) para a liberação desses agentes biológicos oferece vantagens como baixo custo operacional e alta eficiência em grandes áreas. Contudo, os métodos de Planejamento de Rotas de Cobertura (PRC) para VANTs no CB são empíricos e dependem da experiência dos pilotos, carecendo de uma abordagem sistemática que considere todas as variáveis críticas envolvidas. Ao mesmo tempo, literatura disponível não abrange todos os aspectos relevantes para o CB. Neste contexto, o objetivo desta tese foi aprimorar a geração de trajetórias para operações com VANTs na liberação de agentes biológicos em grandes áreas, utilizando conceitos de PRC. Para alcançar esse objetivo, foram desenvolvidos e validados um framework e dois algoritmos. O framework foi materializado como uma aplicação web que automatiza a geração das rotas, incorporando os algoritmos propostos. O primeiro algoritmo (Sub-rotas) realiza a decomposição da rota completa em sub-rotas, aplicando um padrão de vai-e-volta para minimizar a sobreposição de trajetetos e otimizar o tempo de voo, alinhando a trajetória à maior aresta da área a ser coberta pelo VANT. O segundo algoritmo (Subáreas) também aplica o padrão de vai-e-volta, mas propõe uma decomposição da área de interesse em subáreas utilizando o diagrama de Voronoi, visando uma divisão mais equilibrada, especialmente em áreas com ângulos internos côncavos. A validação dos algoritmos foi realizada por meio de experimentos com voos reais em três cenários distintos e com diferentes configurações de carga útil (*payload*). Sabendo que foi utilizado um dispositivo de liberação de agentes biológicos acoplado à aeronave, o experimento também avaliou a possível influência do *payload* na cobertura. Os resultados quantitativos obtidos mostram que, ao utilizar o Algoritmo de Sub-rotas, a área total coberta foi de 114,61 hectares, com uma distância total percorrida de 29,7 km em 44 minutos e 48 segundos. Por outro lado, o Algoritmo de Subáreas resultou em uma distância percorrida ligeiramente menor, de 28,9 km em 42 minutos e 57 segundos, representando uma redução de 2,6 km (aproximadamente 2,8%) na distância total e 1 minuto e 51 segundos (cerca de 4,1%) no tempo de voo. Além disso, a distribuição de trabalho entre os voos foi mais equilibrada com o Algoritmo de Subáreas, onde os voos cobriram 36,5%, 32,5% e 31,0% da área

total, respectivamente, sugerindo uma eficiência operacional aumentada. Embora ambos os algoritmos tenham mostrado eficácia, o Algoritmo de Subáreas mostrou-se particularmente vantajoso em cenários que envolvem áreas de interesse com ângulos internos côncavos, onde a uniformidade e a eficiência de cobertura são cruciais. Adicionalmente, a influência do *payload* foi mínima, indicando que o peso adicional não comprometeu o desempenho da cobertura, confirmando a eficácia das soluções de planejamento de rotas propostas.

Palavras-chave: planejamento de rotas de cobertura; dispersão de agentes biológicos; algoritmos de decomposição; framework; algoritmo vai-e-volta; Voronoi.

ABSTRACT

DA SILVA, Bruno Siqueira. **Coverage Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles Applied to Biological Pest Control in Real Scenarios of Large Areas.** Advisor: Paulo Roberto Ferreira Jr.. 2024. 135 f. Thesis (Doctorate in Computer Science) – Technology Development Center, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2024.

Biological Control (CB) is a sustainable method for managing agricultural pests, using natural agents to regulate their populations. The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to release these biological agents offers advantages such as low operational costs and high efficiency over large areas. However, the current Coverage Path Planning (CPP) methods for UAVs in CB are empirical and heavily reliant on the pilots' experience, lacking a systematic approach that considers all critical variables. Furthermore, the existing literature does not fully address all aspects relevant to CB. In this context, the objective of this thesis was to enhance the generation of trajectories for UAV operations in the release of biological agents across large areas, utilizing CPP concepts. To achieve this goal, a framework and two algorithms were developed and validated. The framework was implemented as a web application that automates the generation of routes, incorporating the proposed algorithms. The first algorithm, "Sub-routes," decomposes the complete route into sub-routes, applying a back-and-forth pattern to minimize path overlap and optimize flight time by aligning the trajectory with the largest edge of the area to be covered by the UAV. The second algorithm, "Sub-areas," also applies the back-and-forth pattern but proposes a decomposition of the area of interest into subareas using the Voronoi diagram, aiming for a more balanced division, especially in areas with concave internal angles. The validation of these algorithms was conducted through experiments involving real flights in three different scenarios with various payload configurations. Given that a biological agent release device was attached to the aircraft, the experiment also evaluated the potential influence of the payload on coverage. The quantitative results show that, when using the Sub-routes Algorithm, the total area covered was 114.61 hectares, with a total distance of 29.7 km covered in 44 minutes and 48 seconds. In contrast, the Subareas Algorithm resulted in a slightly shorter distance of 28.9 km covered in 42 minutes and 57 seconds, representing a reduction of 2.6 km (approximately 2.8%) in the total distance and 1 minute and 51 seconds (approximately 4.1%) in flight time. Furthermore, the distribution of work among the flights was more balanced with the Subareas Algorithm, where the flights covered 36.5%, 32.5%, and 31.0% of the total area, respectively, suggesting increased operational efficiency. Although both algorithms demonstrated effectiveness, the Subareas Algorithm proved particularly advantageous in scenarios

involving areas with concave internal angles, where coverage uniformity and efficiency are crucial. Additionally, the influence of the payload was minimal, indicating that the additional weight did not significantly compromise coverage performance, confirming the effectiveness of the proposed route planning solutions.

Keywords: coverage path planning; dispersion of biological agents; decomposition algorithms; framework; back-and-forth algorithm; voronoi.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Projeção do Mercado Mundial de VANT para uso civil.	29
Figura 2	Exemplos de VANTs: (a) hexacóptero - seis asas rotativas, (b) asas fixas de grande porte, (c) híbrido pequeno porte, (d) quadricóptero - quatro asas rotativas, (e) mini asas fixas, e (f) híbrido de grande porte.	30
Figura 3	Multicóptero totalmente montado junto com seus componentes. . .	33
Figura 4	Talhões de uma região agrícola próxima ao município de São Carlos, SP.	37
Figura 5	Exemplo de áreas de interesse com vértices, arestas e ângulos: (a) Retangular; (b) Polígono Convexo; (c) Polígono côncavo com zonas de exclusão aérea.	37
Figura 6	(a) Decomposição trapezoidal; (b) Decomposição <i>boustrophedon</i> . .	39
Figura 7	Decomposição Morse de um espaço de trabalho de exemplo com seu gráfico de adjacência associado.	39
Figura 8	(a) Área projetada do VANT; (b) Células obtidas pela aplicação de decomposição celular aproximada.	41
Figura 9	Ilustração de (a) diagrama de Voronoi ilimitado e (b) diagrama de Voronoi limitado, onde a linha tracejada vermelha representa a área à qual o diagrama de Voronoi está sendo limitado.	42
Figura 10	(a) posição inicial com partições não proporcionais e (b) ilustra a posição final com partições proporcionais.	43
Figura 11	Padrões de trajetória: (a) vai-e-volta e (b) esperial e (c) curvas de Hilbert	43
Figura 12	Polígono convexo com decomposição de área para equipe de VANT	54
Figura 13	Decomposição e cobertura de polígonos côncavos: (a) Decomposição convexa; (b) Combinação de subáreas; (c) Caminho de cobertura; (d) Grafo não direcionado.	55
Figura 14	Cobertura usando movimentos de vai-e-volta em polígonos côncavos: (a) Trajeto não interrompido; (b) Trajeto interrompido. . .	56
Figura 15	Comparação entre as abordagens: (a) Decomposição convexa (Jiao et al., 2010); (b) Decomposição côncava e convexa (Li et al., 2011).	56
Figura 16	Método baseado em grade em uma Rol de formato irregular.	59
Figura 17	Trajectoria ótima: (a) Wavefront; (b) Interpolação cúbica.	60
Figura 18	Algoritmo de cobertura E-BF: (a) N°. ímpar de linhas; (b) N°. par de linhas.	65

Figura 19	Trajetórias geradas com algoritmos E-Spiral e E-BF para áreas retangulares e poligonais. (a) Algoritmo E-Spiral em área poligonal. (b) Algoritmo E-BF em área poligonal. (c) Algoritmo E-Spiral em área retangular. (d) Algoritmo E-BF em área retangular.	65
Figura 20	Etapas do processo: (A) Rol, área de atuação, (B) parâmetros da missão, (C) decolagem e pouso, (D) algoritmos de PRC, (E) gera planos de voo, <i>waypoints</i> e (F) execução da missão.	70
Figura 21	Decomposição da rota completa em quatro sub-rotas: (A) Rota original, (B) 1ª sub-rota; (C) 2ª sub-rota; (D) 3ª sub-rota; (E) 4ª sub-rota. Pontos vermelhos sobre a rota em laranja são os locais de quebra da rota original (3 pontos no total); Seta AZUL em (C) e (D) representa o caminho de ida da base para o local de quebra anterior, início da sub-rota subsequente; Seta VERDE em (B), (C), (D) e (E) representa o retorno à base (RTL).	75
Figura 22	Representação visual das etapas de criação das subáreas utilizando o algoritmo de Voronoi Ordinário.	80
Figura 23	Área completa dividida em sete subáreas: Figuras de A até E representam variações do diagrama Voronoi, geradas a partir de novos pontos aleatórios.	80
Figura 24	Área completa dividida em quatro subáreas: Figuras de A até E mostram variações do diagrama Voronoi, geradas a partir de quatro pontos aleatórios.	81
Figura 25	Área completa contendo 178,5 ha dividida em cinco subáreas: A sequência de imagens de A a G mostra as variações das células a partir da geração de novos pontos aleatórios.	81
Figura 26	Interface do sistema: (1) Menu salvar e importar; (2) Rota gerada pelo sistema, a partir da delimitação da área manualmente; (3) Informação da missão (área, distância percorrida e tempo); (4) Campo de busca; (5) Parâmetros da missão (distância entre linhas, velocidade, altitude, tempo de missão); e (6) Ferramentas de desenho, lixeira e zoom.	84
Figura 27	Voo real realizado: Plano de voo elaborado manualmente.	90
Figura 28	Voo real realizado: Plano de voo automatizado gerado pela aplicação.	90
Figura 29	Gráfico de projeção: Rol, distância entre linhas e planos manual e automatizado.	91
Figura 30	Gráfico de projeção dos waypoints: <i>waypoints</i> dos planos manual e automatizado em relação a Rol e distância entre linhas.	91
Figura 31	Equipamentos utilizados: (A) DJI Phantom 3 Adv. com dispersador modular acoplado; e (B) Dispersador modular.	93
Figura 32	Material biológico utilizado: (A) Box/Cassete do dispersador (B) imagem ilustrativa do (<i>trichogramma galloi</i>).	94
Figura 33	Rota completa dividida em três sub-rotas: (A) Rota original, (B) 1ª sub-rota; (C) 2ª sub-rota; (D) 3ª sub-rota. Pontos vermelhos da rota original (A) são os locais de quebra.	96

Figura 34 **Área completa dividida em três subáreas:** área equivalente utilizada no experimento com o algoritmo de vai-e-volta para CB. (A) Área original com divisão por Voronoi, (B) 1^a subárea; (C) 2^a subárea; (D) 3^a subárea. 100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Modos de Voo Recomendados	31
Tabela 2	Palavras de busca utilizadas	52
Tabela 3	Contribuições dos Métodos Baseados em Diagrama de Voronoi	61
Tabela 4	Resultados do experimento para voos reais: comparação entre o planejamento manual e o uso da aplicação (<i>Framework</i>)	89
Tabela 5	Peso das tecnologias e material utilizados durante os experimentos	94
Tabela 6	Especificação dos parâmetros de voo (Etapa B)	95
Tabela 7	Condições Ambientais: voos com algoritmo de sub-rotas	97
Tabela 8	Resultado voos com dispersador vazio: cobertura com 3 sub-rotas.	97
Tabela 9	Resultado voos com dispersador cheio: cobertura com 3 sub-rotas.	98
Tabela 10	Resultado voos com dispersador cheio com soltura: cobertura com 3 sub-rotas.	99
Tabela 11	Condições Ambientais: voos com algoritmo de subáreas	101
Tabela 12	Resultado voos com dispersador vazio: cobertura com 3 subáreas	101
Tabela 13	Resultado voos com dispersador cheio, sem soltura: cobertura com 3 subáreas.	102
Tabela 14	Resultado voos com dispersador cheio, com soltura: cobertura com 3 subáreas.	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACM	Association for Computing Machinery
API	Application Programming Interface
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CASA	Civil Aviation Safety Authority
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CB	Controle Biológico
CMA	Certificado Médico Aeronáutico
CPU	Central Processing Units
DJI	Dà-Jiāng Innovations Science and Technology
DVO	Diagrama de Voronoi Ordinário
EASA	European Aviation Safety Agency
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAA	Federal Aviation Administration
FAO	Food and Agriculture Organization
FAPED	Fundação de Apoio a Pesquisa e ao Desenvolvimento
GPS	Global Position System
GCS	Ground Control Station
GIS	Geographic Information System
HD	High Definition
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IMU	Unidade de Medição Inercial
INC	Instruções Normativas Conjuntas
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
LIDAR	Light Detection and Ranging
LiPO	Lithium Polymer Battery

MAPA	Ministério da Agricultura e Pecuária
MIP	Manejo Integrado de Pragas
MST	Minimum Spanning Tree
NFZ	No-Fly Zone
NIR	Near-Infrared
PRC	Planejamento de Rotas de Cobertura
RAB	Registro Aeronáutico Brasileiro
RPAS	Remotely Piloted Aircraft Systems
RDE	Recursive Density Estimation
RET	Registro Especial Temporário
Roi	Region of Interest
SBC	Sociedade Brasileira da Computação
SCoPP	Scalable Coverage Path Planning
SD	Secure Digital
STC	Spanning Tree Coverage
MST	Minimum Spanning Tree
RTL	Return To Launch
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VTOL	Vertical Take-Off and Landing

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1	Veículos Aéreos Não Tripulados	27
2.2	Planejamento de Rota de Cobertura	35
2.2.1	Área ou Região de Interesse - Rol	36
2.2.2	Técnicas de Decomposição da Região de Interesse	38
2.2.3	Técnicas Sem Decomposição da Região de Interesse	43
2.2.4	Disponibilidade das Informações	44
2.2.5	Métricas de Desempenho	45
2.3	Controle Biológico de Pragas - CB	46
2.3.1	Tipos de Controle Biológico - Terminologia	48
2.3.2	Agentes Biológicos Registrados no Brasil	49
3	TRABALHOS RELACIONADOS	52
3.1	Soluções de Planejamento de Rotas de Cobertura com VANT	53
3.1.1	Métodos Baseados em Decomposição Celular Exata	53
3.1.2	Métodos Baseados em Decomposição Celular Aproximada	58
3.1.3	Métodos Baseados em Diagrama de Voronoi	60
3.1.4	Métodos Sem Decomposição da Região de Interesse	64
3.2	Avanços Tecnológicos no Controle Biológico com VANT	66
3.3	Considerações Finais	67
4	PLANEJAMENTO DE ROTAS DE COBERTURA DE VANTS NO CONTROLE BIOLÓGICO EM GRANDES ÁREAS	69
4.1	Framework para Controle Biológico com VANT	70
4.2	Algoritmos para Divisão de Grandes Áreas	72
4.2.1	Decomposição da Rota Completa em Sub-Rotas	72
4.2.2	Decomposição da Área de Interesse em Subáreas	75
4.3	Considerações Finais	81
5	RESULTADOS OBTIDOS	83
5.1	Framework: Implementação e Validação	83
5.1.1	Implementação	83
5.1.2	Validação	88
5.2	Tecnologias Utilizadas nos Experimentos	92
5.3	Algoritmo de Decomposição em Sub-Rotas: Experimentos e Resultados	95

5.3.1	Resultados dos Voos com Algoritmo de Sub-Rotas	96
5.4	Algoritmo de Decomposição em Subáreas: Experimentos e Resultados	99
5.4.1	Resultados dos Voos com Algoritmo de Subáreas	101
5.5	Considerações Finais	102
6	CONCLUSÃO	105
	REFERÊNCIAS	108
ANEXO A	REGRAS DA ANAC PARA USO DE DRONES	124
ANEXO B	CARTA DE ACEITE	132
ANEXO C	CARTA DE ACEITE	134

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização de Agricultura e de Alimentos das Nações Unidas (ONU) (Fao, 2019), estima-se que entre 20 e 40% da produção agrícola mundial sejam perdidos anualmente devido a pragas que afetam as lavouras, um valor correspondente a aproximadamente 220 bilhões de dólares. No Brasil, as perdas agrícolas devido a pragas podem chegar a 55 milhões de dólares anuais. Para reduzir as perdas, uma grande quantidade de agentes químicos é empregada durante o ciclo de produção. Contudo, o uso intensivo desses produtos acarreta um aumento progressivo na resistência das pragas e doenças, o que eleva os custos de produção (Sousa et al., 2022). Adicionalmente, o uso frequente de produtos químicos prejudica a saúde de agricultores e consumidores, além de impactar negativamente o meio ambiente (Almeida et al., 2017).

Com o desenvolvimento contínuo da agricultura de precisão e a adoção de técnicas mais sustentáveis, o Controle Biológico (CB) tem sido amplamente utilizado por ser mais conveniente e economicamente competitivo em relação ao controle químico (Bettiol; Silva; Castro, 2019). O CB atua no combate a pragas agrícolas e insetos transmissores de doenças através do uso de inimigos naturais, como insetos benéficos, predadores, parasitoides, microrganismos, incluindo fungos, vírus e bactérias (Parra et al., 2002). De acordo com Embrapa (2021), o CB é um método racional e seguro, que não deixa resíduos nos alimentos e é benéfico tanto para o meio ambiente quanto para a saúde humana. Santos; Martinelli (2022) ressaltam que esta abordagem sustentável minimiza impactos ambientais, reduz desequilíbrios biológicos e diminui a emergência de populações de pragas resistentes.

Os métodos tradicionais de aplicação de bio defensivos incluem técnicas manuais e mecanizadas. Na abordagem manual, trabalhadores distribuem o material biológico, frequentemente em cartelas de papelão ou cápsulas, o que implica percorrer longas distâncias e pode exigir aplicações repetidas semanais, aumentando o tempo e o esforço de trabalho (Pastori et al., 2020). Já o método mecanizado utiliza tratores ou pulverizadores adaptados, mas seu uso é limitado por condições de solo, sendo ineficaz em solos irrigados ou encharcados para evitar danos às culturas ou compactação

do solo (Zhan et al., 2021; Grego et al., 2014). Adicionalmente, o manejo inclui inspeções por especialistas e, às vezes, a aplicação de inseticidas, o que pode elevar os custos de produção (Fontes; Valadares-Ingles, 2020).

Encontrar um método eficiente e economicamente viável para dispersar agentes biológicos em áreas agrícolas representa um grande desafio. Uma solução promissora é o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) como meio de transporte e dispersão desses agentes. Esta técnica, destacada por Freitas et al. (2020), apresenta potencial para o controle biológico. Ela não só ajuda a reduzir custos, mas também permite superar obstáculos naturais, como rios e a proximidade de animais silvestres perigosos, oferecendo alta eficiência e uma extensa área de aplicação.

Neste tipo de tarefa, o VANT deve sobrevoar uma determinada área transportando os agentes biológicos, enquanto mecanismos de liberação acoplados na aeronave realizam a dispersão sobre a plantação; essa dispersão se dá por meio de cápsulas ou sem embalagem ou acondicionamento (a granel). Na literatura, a tarefa de elaboração da trajetória do VANT é um subtópico da Robótica conhecido como Planejamento de Rotas de Cobertura (PRC)¹. Uma solução eficiente para este tipo de problema no contexto do CB deve abranger a escolha dos melhores pontos de decolagem e pouso e considerar tanto as necessidades do operador humano em missões não-autônomas quanto a supervisão de missões autônomas.

Conforme informações apontadas por empresa² pioneira no Brasil de aplicação de biodefensivos com VANT, o PRC depende da experiência e agilidade dos operadores em gerar rotas, pois estes profissionais se deparam com algumas situações adversas não previstas no planejamento, que podem comprometer a eficiência da operação em campo, tais como bloqueios de certas localidades, erosão ou inundação de estradas não frequentadas de grandes fazendas. Lidar com estas adversidades demanda tempo no replanejamento de rotas que pode elevar os custos e o tempo para executar as missões. Outro aspecto relevante apontado é que as rotas devem respeitar uma distância entre linhas visando o melhor aproveitamento e eficiência do material biológico utilizado. Esta distância entre linhas, em formato paralelo, varia de acordo com o tipo agente biológico em uso e respeita as bordas da lavoura (região limítrofe da cobertura), formando geralmente um polígono, e a trajetória deve estar contida dentro deste polígono. Por isso, ferramentas de planejamento para o controle biológico devem apresentar flexibilidade e agilidade na modificação da rota previamente elaborada, evitando o erro humano na geração das rotas e garantindo a precisão do material aplicado.

Outro fator crucial no planejamento de rotas é a quantidade de energia disponível nas baterias dos VANTs. Para evitar colisões ou quedas, os veículos devem retornar

¹Ou Planejamento de Caminhos de Cobertura, do inglês *Coverage Path Planning* (CPP)

²BirdView Drone Bio Control <<https://birdview.com.br>>

à base antes que a energia se esgote completamente. Elementos adicionais como vento, velocidade, a quantidade de manobras de conversão e o peso de carga podem reduzir a autonomia de voo da aeronave (Fevgas et al., 2022). Por isso, quando são utilizados veículos de pequeno porte, com peso inferior a 25 Kg (ANAC, 2017)³ (que permanecem ao alcance do observador humano durante o voo e não dependem de registro prévio do órgão regulador), usualmente, adota-se uma relação 70/30 de uso da bateria durante uma missão, em que o voo é executado utilizando apenas 70% da energia disponível na bateria e reserva-se os outros 30% restantes para um retorno seguro à base⁴ (Serôdio, 2018; Manyá, 2023; Droneng, 2023). Isto implica em um planejamento mais inteligente, que considera rotas mais curtas e simples, que possam ser executadas em apenas um voo com duração de tempo limitada - geralmente em torno de 15 a 20 minutos, dependendo do modelo de VANT adotado (Elmeseiry; Alshaer; Ismail, 2021; Cabreira; Brisolara; Ferreira Jr, 2019). Todas essas questões são restrições significativas a serem consideradas no problema de PRC.

Esforços recentes no PRC com preocupação energética foram propostos por Di Franco; Buttazzo (2016) e Cabreira et al. (2018a). Ambos exploram a aplicação de fotogrametria, que consiste em tirar uma sequência de fotos aéreas para montagem de um mosaico e pode ser utilizada na agricultura de precisão para identificação de pragas e doenças. Em Di Franco; Buttazzo (2016) é proposto um algoritmo baseado no movimento de vai-e-volta; Cabreira et al. (2018a) explora a área com movimento em espiral obtendo melhores resultados em termos de consumo de energia em relação ao seu antecessor. Ambas as soluções lidam com áreas de cobertura regulares (retângulos e polígonos simples), mas não consideram regiões mais complexas e outros aspectos para dispersão de agentes biológicos. Ambas as soluções lidam com o planejamento de rotas para um único voo em áreas de cobertura regulares (retângulos e polígonos simples) e de tamanho limitado. No entanto, essas abordagens não consideram regiões mais complexas e outros aspectos importantes, como a dispersão de agentes biológicos em áreas maiores, o que gera a necessidade de novas soluções para essas situações.

Soluções para dividir a área em várias partes (subáreas) para cobertura de terreno utilizando múltiplos veículos simultaneamente⁵ foram propostos por Maza; Ollero (2007); Barrientos et al. (2011); Valente et al. (2013); Berger et al. (2016) e Skorobogatov et al. (2021), onde suas contribuições foram apresentadas apenas em ambiente simulado. Estes autores consideram as capacidades relativas dos VANTs para gerar

³Aeronaves Classe 3, conforme classificação da ANAC. O Anexo A traz um resumo do Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial – RBAC-E nº 94, de 03 de maio de 2017, segue definições de outras autoridades de aviação civil pelo mundo, como *Federal Aviation Administration (FAA)*, *Civil Aviation Safety Authority (CASA)* e *European Aviation Safety Agency (EASA)*, reguladores dos Estados Unidos, Austrália e da União Europeia, respectivamente.

⁴Fabricantes recomendam não descarregá-las completamente para prolongar sua vida útil

⁵Também chamado de frota, enxame, equipe, múltiplos VANTs ou multi-VANTs.

as rotas que contribuem para melhor eficiência do voo em relação a energia disponível. Contudo, não fornecem flexibilidade na escolha dos locais de decolagem e pouso, nem geração de rotas baseada na distância entre linhas. Somado a estes problemas, a adoção de múltiplos VANTs exige o processamento de tarefas adicionais de controle, organização e coordenação. O trabalho de Almadhoun et al. (2019) registra alguns desafios que dificultam o avanço do uso de múltiplos VANTs operando simultaneamente em cenários reais; padronizar sensores, movimentos, capacidade de bateria e a supervisão dos voos pode elevar significativamente os custos da aplicação; além do tempo e experiência exigidos dos operadores para traçar rotas viáveis.

Apesar da utilização de VANT como plataforma para dispersão de agentes biológicos já ter sido relatada em trabalhos recentes, como em Xu et al. (2016); Rangel (2016a,b); Freitas et al. (2018, 2020) e Zhan et al. (2021), esses autores não oferecem flexibilidade para lidar com locais de decolagem e pouso, não consideram toda a extensão do campo agrícola para gerar as rotas de cobertura e limitam-se a áreas de cobertura regulares como retângulos ou quadrados.

Considerando que as soluções de PRC utilizando aeronaves não tripuladas no contexto do controle biológico de pragas ainda é um desafio a ser superado, a pesquisa proposta neste documento será norteada pelas seguintes hipóteses:

- 1) A definição de um método de decomposição da rota completa em sub-rotas, onde é possível gerar trajetórias de forma automatizada e arbitrar as posições de decolagem e de pouso, resulta na melhor relação entre eficiência no planejamento das rotas e tempo de voo para cobertura completa da área?
- 2) A definição de um método de decomposição da área de interesse em subáreas, onde é possível gerar trajetórias de forma automatizada e arbitrar as posições de decolagem e de pouso, resulta na melhor relação entre eficiência no planejamento das rotas e tempo de voo para cobertura completa da área?

Estas hipóteses levam em consideração situações em cenário real de grandes áreas agrícolas, com a utilização de um único VANT realizando múltiplos voos autônomos em cada missão, com supervisão de operador em solo e que retorna à base para a troca de bateria entre um voo e outro. Tais aspectos são relevantes e explorados em pesquisas desenvolvidas com empresa especialista em CB⁶.

⁶Projeto intitulado “Desenvolvimento de veículos aéreos autônomos ou remotamente controlados para liberação de agentes de controle biológico em campo” (Projeto n°. 706 - Processo: 23700.20/0091-0-01), uma parceria entre a EMBRAPA Instrumentação, a SPIT-FIRE Multimídia S/S Ltda. (BirdView Drone Bio Control) e a Fundação de Apoio a Pesquisa e ao Desenvolvimento (FAPED) onde o autor (Plano de Trabalho: <https://painel.autentique.com.br/documentos/cfa5fb2f0d84b89bab35dc2f47cf6e07982dcc052b6eb6737>) e co-orientador desta tese fizeram parte. O projeto foi estendido para o Edital do Programa BI-OTA - PIPE/FAPESP (Processo: 22/15486-5), com o objetivo de desenvolver estratégias de decomposição de rotas para lidar com grandes áreas. O projeto foi intitulado: “Plataforma

Com a hipótese definida, torna-se possível a compreensão do trabalho que será realizado no escopo do projeto proposto e a definição do objetivo geral e dos objetivos específicos.

O objetivo geral desta tese consiste no desenvolvimento de uma solução de planejamento de rotas de cobertura para aplicação aérea não tripulada na dispersão de agentes biológicos em grandes áreas agrícolas, que resultem na melhor relação entre eficiência operacional e tempo de voo em áreas agrícolas.

Para que o objetivo geral seja atingido, os seguintes objetivos específicos deverão ser alcançados ao longo do desenvolvimento desta Tese de Doutorado:

- Revisar, na perspectiva do Planejamento de Rotas Cobertura com VANT, os conceitos fundamentais para o entendimento da área;
- Compreender e caracterizar o contexto de aplicação agentes biológicos para o controle de pragas utilizando VANTs como plataforma de transporte;
- Propor um método (*framework*) para realizar operações envolvidas na liberação de agentes biológicos sem embalagem ou acondicionamento (a granel) por VANT;
- Propor algoritmo de decomposição da rota em sub-rotas, gerando trajetórias de forma automatizada, retorno inteligente a base e com flexibilidade na escolha no local de pouso e decolagem;
- Propor algoritmo de decomposição da área em subáreas, gerando trajetórias de forma automatizada, retorno inteligente e com flexibilidade na escolha no local de pouso e decolagem;
- Quantificar e validar as contribuições dos algoritmos propostos quanto aos ganhos operacionais proporcionados e tempo para concluir a cobertura completa da área de interesse em voos reais realizados com quadricóptero;
- Divulgar na comunidade científica os resultados atingidos pela pesquisa por meio de publicações em conferências e periódicos especializados da área.

As principais contribuições científicas, tecnológicas, bibliográficas e prêmios desta tese para área de planejamento de rotas de cobertura:

- Um método (*framework*) que guiar o planejamento de rotas de cobertura com VANTs na liberação de agentes biológicos;

de Gestão e Otimização de Rotas para Aplicação Aérea Não Tripulada de Agentes Biológicos”. Detalhes do projeto podem ser obtidos em: <https://bv.fapesp.br/pt/auxilios/112489/plataforma-de-gestao-e-otimizacao-de-rotas-para-aplicacao-aerea-nao-tripulada-de-agentes-biologicos>

- Dois algoritmos de planejamento de rotas de cobertura de grandes áreas: o primeiro decompõe a rota completa em sub-rotas e o segundo decompõe a área em sub-áreas baseada em diagrama Voronoi, reduzindo a complexidade das sub-áreas resultantes. Ambos consideram parâmetros de voo e incluem um trecho de retorno à base inteligente, com posições de decolagem e pouso definidas pelo usuário;
- Aplicação web que materializa a solução de planejamento de rotas de cobertura, abordando aspectos críticos de cenários reais como a indisponibilidade de internet, a possibilidade de ajustes *in loco* das missões, e o uso de computadores de baixo custo com capacidade computacional limitada, o que culminam no registro de um software. Este registro valida a conformidade técnica com as principais controladoras de voo disponíveis no mercado;
- Resultados de aplicação prática em cenários reais, demonstrando a eficácia dos métodos e algoritmos desenvolvidos em situações de campo, destacando-se dos estudos anteriores que não exploraram tais condições práticas.
- Artigos Publicados em Anais de Congressos
 - a) DA SILVA, Bruno S.; CABREIRA, Tauã M.; DE SOUZA, BRUNO J. O.; MATIAS, Nicholas R.; MACHADO, Ricardo A. O.; JORGE, Lúcio André C.; FERREIRA JR., Paulo Roberto. Framework for Biological Control with Unmanned Aerial Vehicles. *In: 2022 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2022 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), and 2022 Workshop on Robotics in Education (WRE)*. IEEE, 2022. p. 25-30. DOI: 10.1109/LARS/SBR/WRE56824.2022.9995875.
 - b) DA SILVA, Bruno; CABREIRA, T. M.; JORGE, L. A. C.; MACHADO, RICARDO A. O.; MATIAS, NICHOLAS R.; FERREIRA JR., PAULO R.; MOREIRA, M. S.. ORBIO Web: Sistema de Gestão de Rotas de VANTs no Controle Biológico de Pragas. *In: Anais Estendido do Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação (SBSI 2024)*. SBC, 2024. p. 241-248. DOI: 10.5753/sbsi_estendido.2024.238776.
- Capítulo de Livro
 - a) Capítulo intitulado: “ORBIO: Uma Aplicação Web para Controle Biológico com Veículos Aéreos Não Tripulados” aceito para publicação no Livro **AGRICULTURA DE PRECISÃO: RESULTADOS DE UM NOVO OLHAR**, Editora Cubo Multimídia (Brasília/DF). Autoria de DA SILVA, Bruno S.; CABREIRA,

Tauã M.; DE SOUZA, BRUNO J. O.; MATIAS, Nicholas R.; MACHADO, Ricardo A. O.; JORGE, Lúcio André C.; FERREIRA JR., Paulo Roberto. Capítulo encontra-se em fase final de editoração, com previsão de publicação em setembro de 2024. Capítulo apresenta uma visão abrangente sobre o controle biológico com VANTs no Brasil, patentes e produções científicas, também é destacado o desafio ainda não superado, o desenvolvimento de sistemas de planejamento de rotas de cobertura inteligentes, flexíveis e dinâmicos para cenários reais, motivando assim, para o desenvolvimento do sistema web e o aprofundamento do conhecimento neste domínio específico.

- Trabalhos apresentados no forma de Pôster
 - a) DA SILVA, B. S.; CABREIRA, T. M.; DE SOUZA, B. J. O.; MATIAS, N. R.; MACHADO, R. A. O.; JORGE, L. A. C.; FERREIRA JR., P. R. “Plataforma para Gerenciamento e Automatização de Rotas de VANTs para Controle Biológico de Pragas”. *In: 17° Simpósio de Controle Biológico, 2023. Anais...SICONBIOL 2023.*
 - b) DA SILVA, B. S.; CABREIRA, T. M.; DE SOUZA, B. J. O.; MATIAS, N. R.; MACHADO, R. A. O.; JORGE, L. A. C.; FERREIRA JR., P. R. “ORBIO Drone - VANT de baixo custo e alta resistência para emprego de Controle Biológico de Pragas”. *In: 17° Simpósio de Controle Biológico, 2023. Anais...SICONBIOL 2023.*
- Registro de Programa de Computador
 - a) **Registro de Programa de Computador** no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) intitulado “Software Otimizador de rotas para aplicação aérea não tripulada de agentes biológicos - ORBIO”. O programa de computador⁷ foi desenvolvido em parceria entre BirdView, Embrapa e UF-Pel. Os autores do software são DA SILVA, Bruno S.; CABREIRA, Taua M.; DE SOUZA, Bruno J. O.; MATIAS, Nicholas R.; MACHADO, Ricardo A. O.; JORGE, Lúcio André C.; MOREIRA, Marcelo S. é um dos resultados do projeto de pesquisa realizado em parceria Embrapa/BirdView. O pedido de registro foi aceito e o processo encontra-se em fase de publicação junto ao INPI .
- Prêmio
 - a) **Selo da Inovação da SBC (Sociedade Brasileira da Computação) 2024**⁸.

⁷O código fonte do software não foi disponibilizado para uso público, pois está protegido sob medidas de direitos autorais e propriedade intelectual.

⁸<https://www.sbc.org.br/institucional-3/selo-de-inovacao-sbc>

O prêmio de 1º LUGAR⁹ foi concebido ao projeto “ORBIO: Otimização e Gestão de Missões com Veículos Aéreos Não Tripulados para Dispersão de Agentes no Controle Biológico de Pragas”, de autoria de DA SILVA, Bruno S.; CABREIRA, Taua M.; FERREIRA JR., Paulo Roberto, Bruno J. O.; MATIAS, Nicholas R.; MACHADO, Ricardo A. O.; JORGE, Lúcio André C.; MOREIRA, Marcelo S. Este concurso anual, organizado pela SBC com o apoio do Ecossistema Brasileiro de Startups, reconhece projetos de Computação desenvolvidos durante a graduação, mestrado ou doutorado que apresentem soluções inovadoras.

Além desse capítulo introdutório, este documento está organizado da seguinte forma:

- O **Capítulo 2** aborda os conceitos fundamentais sobre aeronaves não tripuladas, planejamento de rotas de cobertura e controle biológico, essenciais para o entendimento e implementação das soluções propostas nesta tese.
- O **Capítulo 3** oferece uma revisão da literatura, incluindo artigos e patentes, relacionados à área de pesquisa. São destacadas as principais contribuições e características implementadas nos trabalhos existentes, apresentando uma síntese crítica.
- No **Capítulo 4**, são introduzidos os algoritmos desenvolvidos como soluções para o problema da cobertura em operações de controle biológico com VANTs em grandes áreas. O foco é maximizar a eficiência da cobertura e reduzir o tempo total das operações.
- O **Capítulo 5** descreve os resultados obtidos, detalhando os procedimentos experimentais utilizados e realizando uma análise criteriosa dos dados coletados.
- Por fim, o **Capítulo 6** traz a conclusão da tese, além de sugerir direções para trabalhos futuros na área.

⁹<https://www.sbc.org.br/conheca-os-projetos-vencedores-do-selo-de-inovacao-sbc-2024/>

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma visão geral da fundamentação teórica deste trabalho. As seções a seguir cobrem sete tópicos principais da literatura relevantes. A Seção 2.1 traz a definição de VANT, os tipos, classes e funcionamento; a Seção 2.2 discute sobre o problema de Planejamento de Rotas de Cobertura, apresenta técnicas e estratégias de decomposição da área de interesse, bem como métricas de desempenho utilizadas para avaliar a qualidade do planejamento e a cobertura obtida; por fim, a Seção 2.3 traz a definição de controle biológico, os tipos existentes e alguns exemplos de uso bem sucedidos no ambiente agrícola.

2.1 Veículos Aéreos Não Tripulados

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT, ou VANTs), também conhecidos como Drones (nome popular), *Remotely Piloted Aircraft Systems* (RPAS) ou *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) consistem em aeronaves sem pilotos a bordo, normalmente controladas remotamente por um piloto no solo, pré-programadas com um plano de voo ou controladas por sistemas inteligentes. De acordo com a ANAC (ANAC, 2018, 2017), para homologação de uso, os VANTs foram divididos em três classes:

- **Classe 1:** aeronaves com peso máximo de decolagem maior que 150 kg. A regulamentação prevê que aeronaves desse porte sejam submetidas a processo de certificação similar ao existente para aeronaves tripuladas. Esses veículos devem ser registradas no Registro Aeronáutico Brasileiro (RAB), identificados com suas marcas de nacionalidade e matrícula. Além disso, os pilotos devem possuir Certificado Médico Aeronáutico (CMA), licença e habilitação. Todos os voos devem ser registrados;
- **Classe 2:** aeronaves com peso máximo de decolagem maior que 25 kg e menor ou igual a 150 kg; O regulamento estabelece os requisitos técnicos que devem ser observados pelos fabricantes e determina que o projeto deve ser aprovado pela Agência. Além disso, as aeronaves também devem ter RAB, identificados

com suas marcas de nacionalidade e matrícula. Pilotos também devem possuir CMA, licença e habilitação. Todos os voos devem ser registrados;

- **Classe 3:** com peso máximo de decolagem menor ou igual a 25 kg. Se estes modelos forem operados até 400 pés (aproximadamente 120 metros) acima do nível do solo e em linha visada visual, não precisam de registro prévio. A licença e habilitação serão obrigatórias para quem pretende operar acima dos 400 pés. Os voos devem respeitar a distância de 30 metros de distância na horizontal de pessoas. Essa distância pode ser menor no caso de pessoas anuentes (que concordam com a operação) ou de pessoas envolvidas na operação. Em áreas urbanas e aglomerados rurais, as operações serão de no máximo 200 pés (aproximadamente 60 metros) acima do nível do solo.

A inspiração para os VANTs atuais tem origem nos mísseis balísticos alemães V-1 e V-2¹ (Keane; Carr, 2013) e por aeromodelos controlados por radiofrequência (Freitas et al., 2020). Essas aeronaves foram inicialmente criadas para fins militares como tecnologia de patrulhamento e monitoramento aéreo, bem como para acesso a regiões hostis e perigosas para o ser humano. Com os avanços na tecnologia computacional, o desenvolvimento de software, sistemas globais de navegação, sofisticados sensores e a miniaturização, os VANTs foram incorporados rapidamente em aplicações civis, sendo usados no monitoração ambiental (poluição, florestas, clima ou aplicações científicas), acompanhamento de incêndios, controle de fronteiras, combate ao tráfico de drogas, vigilância aérea, mapeamento, monitoramento de tráfico, ajuda humanitária, buscas e salvamentos, entrega de mercadorias, inspeção de infraestrutura civil, agricultura de precisão, entre outros (Shakhatreh et al., 2019).

A aquisição de VANTs também tem aumentado, de acordo com levantamento realizado pela Teal Group (Teal group, 2022) - empresa de análise de mercado aeroespacial e de defesa - disponível no relatório "*2022/2023 World Civil Unmanned Aerial Systems Market Profile and Forecast*", o qual aponta que a produção de VANTs civis promete ser um dos setores de crescimento aeroespacial mais dinâmicos para a próxima década, emergindo de um mercado de US\$ 7,2 bilhões em 2022, para US\$ 19,8 bilhões até 2031. Isto representa uma taxa de crescimento anual composta (CAGR)² de 10,1% em dólares constantes, conforme mostrado na Figura 1. Segundo este levantamento, nos próximos 10 anos, o mercado totalizará US\$ 139 bilhões. Além de cada vez mais acessíveis, o uso de VANTs estão sendo facilitado pelo fato de que muitas funções de controle serem migradas da camada de hardware para camada de software (Vieira, 2020).

Atualmente, existem três modelos de VANT (Delavarpour et al., 2021):

¹ *Vengeance Weapon-1* e 2, "Buzz Bomb" – lançado a partir do solo com capacidade de atingir até 600 km/h – foi o precursor dos mísseis de longo alcance teleguiados

²Do do inglês: *Compound Annual Growth Rate* (CAGR)

Mercado Global de Sistemas Aéreos Não Tripulados

Mercado prevê uma Taxa de Crescimento Anual Composta (CAGR) de 10,1% (em dólares US\$)

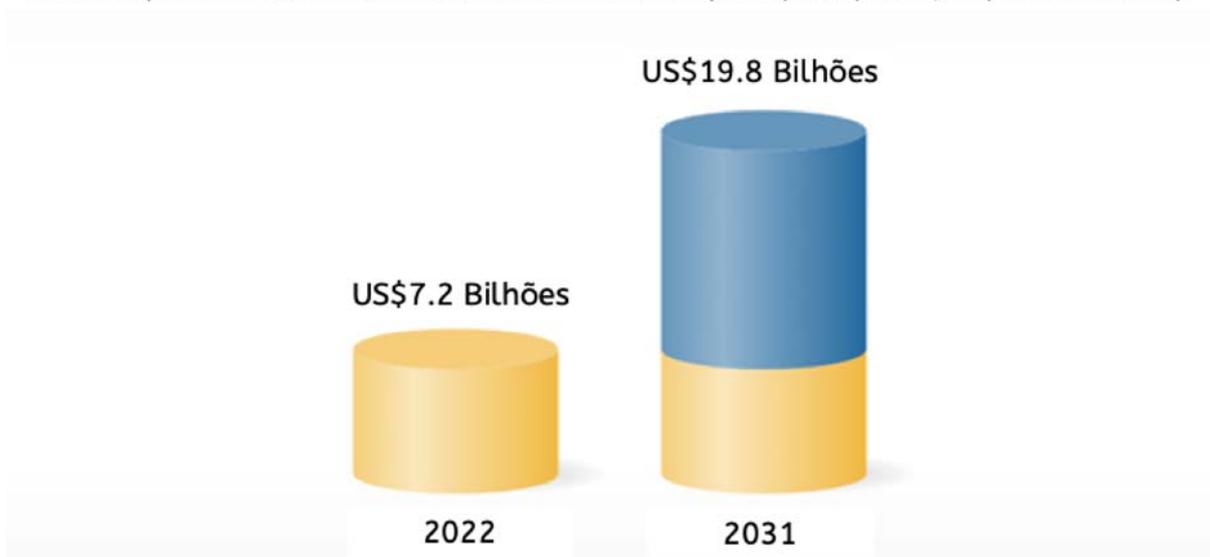


Figura 1 – Projeção do Mercado Mundial de VANT para uso civil.

Fonte: <http://www.researchandmarkets.com/reports/5685194>

- Asa Rotativa:** esta categoria de aeronaves inclui os monorrotoros (helicópteros) e multirrotoros ou multi-rotoros (quadricóptero e hexacóptero)(Oliveira et al., 2020). Possuem capacidade de decolagem e pouso vertical (ou VTOL, *Vertical Take-Off and Landing*), costumam ser mais leves, de fácil transporte e oferecem um conjunto de vantagens tecnológicas que otimizam sua performance, como: Estabilização autônoma da altitude em voo da plataforma obtido pelo acionamento direto das hélices e sistema de controle embarcado; Comando de retorno autônomo para a base operacional (RTL - *Return To Launch*); Possibilidade de programação de voo estacionário ou avanço em alta velocidade até pontos pré-determinados (coordenadas geográficas), por computador; Baixo peso da plataforma e alto potencial de carregamento (câmeras e sensores embarcados); Possibilidade de uso de câmeras especiais, como infravermelho (NIR- *Near-Infrared*) e de alta resolução (HD - High Definition) de foto e vídeo; Estação Base em terra com integração de dados de voo, captura de imagem e cartografia; Alta capacidade de customização para diferentes aplicações. Nessa categoria que enquadram-se os VANTs pulverizadores (Fornari et al., 2020). No entanto, possuem curtos períodos de voo, característica que limita a distância máxima percorrida.
- Asa Fixa:** são aeronaves que podem viajar vários quilômetros a partir do ponto de lançamento, voando em grandes altitudes e a velocidades elevadas, cobrir áreas maiores e obter uma precisão de nível centimétrico da distância da amos-

tra do solo. Essas características os tornam excelentes plataformas para obter informações rápidas e detalhadas de ambientes de campo agrícola; no entanto, não podem ficar suspensas no ar nem sobrevoar muito próximas da superfície. São lançados manualmente a partir de uma rampa de lançamento e requerem pistas para áreas de decolagem e pouso (Kanellakis; Nikolakopoulos, 2017), o que pode comprometer a viabilidade dos voos caso esta condição não seja atendida.

- **Híbridos:** são aeronaves que combinam as características dos modelos de asa fixa e rotativa, como aeronaves do tipo rotor inclinado. Esta configuração permite inclinar os rotores para atingir a mesma capacidade VTOL dos VANTs de asa rotativa ou dinâmica de voo como a asa fixa, melhorando significativamente sua resistência (Santos et al., 2017).

A Figura 2 ilustra os três modelos diferentes.

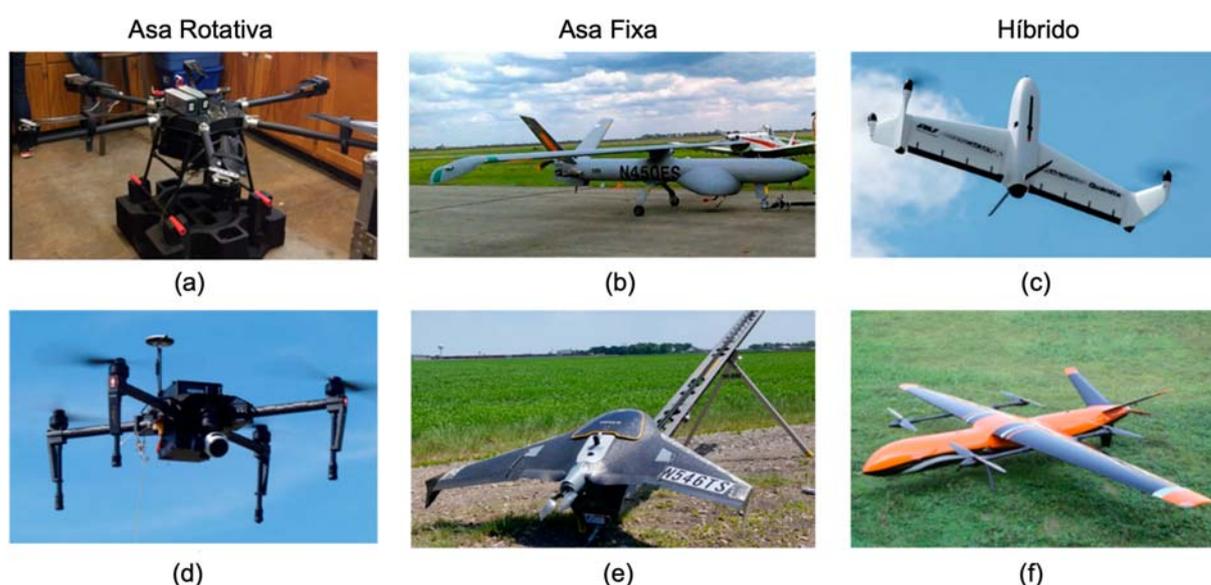


Figura 2 – **Exemplos de VANTs:** (a) hexacóptero - seis asas rotativas, (b) asas fixas de grande porte, (c) híbrido pequeno porte, (d) quadricóptero - quatro asas rotativas, (e) mini asas fixas, e (f) híbrido de grande porte.

Fonte: adaptado de (Delavarpour et al., 2021)

Os componentes de um VANT variam conforme o modelo escolhido, sendo que um componente comum entre eles é a controladora de voo. A controladora de voo é um microcontrolador com software embarcado dedicado às funções básicas da aeronave, é geralmente referido como o cérebro da aeronave. Ela possui sensores inerciais embutidos para comandar a dinâmica de voo da aeronave, além de possuir interface eletrônica com outros componentes como módulos GPS³, módulos receptores de rádio, módulos de telemetria entre outros. Sem a controladora de voo, seria uma tarefa

³Do inglês: *Global Position System* (GPS).

humanamente impossível controlar o voo da aeronave, visto que a controladora depende de um *feedback* contínuo e instantâneo dos parâmetros inerciais (Pereira Neto; Zebendo, 2022).

Entre as placas controladoras mais conhecidas para drones, destacam-se a Pixhawk, The Cube, Pixracer, NAVIO2, Bebop2, entre outras⁴. Todas essas placas são compatíveis com o software de controle de navegação ArduPilot. O ArduPilot, um projeto de código aberto, opera em uma variedade de veículos, incluindo aéreos, terrestres e aquáticos, juntamente com o software de Estação de Controle de Solo (GCS)⁵. Nesta tese, priorizou-se a compreensão do ArduPilot devido à sua natureza flexível e à sua ampla aceitação na comunidade de drones autônomos e sistemas de piloto automático. Essa escolha permite uma adaptação mais fácil a diferentes plataformas, como os drones DJI⁶, facilitando suas operações em contextos científicos e práticos.

O ArduPilot compreende quatro conjuntos de softwares para piloto automático, incluindo “Plane”, “Copter”, “Rover” e “Sub”. O “Coper”⁷ é um sistema de piloto automático para multicópteros, helicópteros e outros veículos de rotor, oferecendo diversos modos de voo, desde manual até totalmente autônomo, como “Stabilize”, “Alt Hold”, “Loiter”, “Return-to-Launch” (RTL) e “Auto”. Cada modo controla altitude ou posição e pode exigir informações de sensores, como GPS. A Tabela 1 descreve os principais modos de voo:

Tabela 1 – Modos de Voo Recomendados

Modo de Voo	Descrição
Stabilize	Permite que o piloto controle o veículo manualmente, mas nivela automaticamente o eixo de rotação e inclinação.
Alt Hold	Mantém uma altitude consistente enquanto permite que comandos “Roll”, “Pitch” e “Yaw” sejam controlados normalmente.
Loiter	Tenta automaticamente manter a localização, direção e altitude atuais.
RTL	Navega o veículo de sua posição atual para pairar acima da posição inicial, também conhecida como RTL.
Auto	Segue um <i>script</i> de missão pré-programado armazenado no piloto automático.

Adaptado de (Ardupilot, 2022a).

O modo “Loiter” oferece controle manual com assistência automática sobre a localização, direção e altitude do veículo, sendo adequado para atividades recreativas. Por exemplo, o piloto pode voar livremente sobre uma área de interesse, e quando

⁴Lista de controladoras: <https://ardupilot.org/rover/docs/common-autopilots.html>

⁵Do inglês: *Ground Control Station* (GCS).

⁶A Dà-Jiāng Innovations Science and Technology, conhecida como DJI. Fabricante de Drones fundada em 2006, na China, por Frank Wang.

⁷Documentação *Coper*: <https://ardupilot.org/copter/docs/flight-modes.html>.

solta os controles, o veículo desacelera até parar e manter a posição. No entanto, para coberturas específicas em pesquisas ou aplicações comerciais, é necessário utilizar o modo Auto, que contém um script pré-programado para garantir o sucesso da missão. Esse script inclui comandos de navegação (*waypoints* que definem a rota da aeronave) e comandos “Do” para ações auxiliares que não afetam a rota da aeronave (Ardupilot, 2022b; Cabreira et al., 2018a).

Uma missão começa com o comando de navegação “Takeoff”, que faz a aeronave subir até uma altitude específica em metros. A aeronave pode então se deslocar para diferentes locais definidos por *waypoints*, que incluem latitude, longitude e altitude. Durante a missão, é possível executar comandos “Do” para ações como ajustar a velocidade ou acionar o obturador de uma câmera. Ao completar todos os *waypoints*, a aeronave pode retornar ao ponto inicial usando o comando “RTL” ou pousar em outro local usando o comando “Land”. A posição inicial é determinada no início da missão e geralmente é onde a aeronave foi armada pela última vez ou onde o GPS foi bloqueado, dependendo do tipo de veículo (Cabreira et al., 2018a).

A Figura 3 ilustra um VANT montado, um multicóptero composto por um controlador de voo (Autopilot), um módulo GPS, um transmissor/receptor de controle de rádio para controlar manualmente o veículo e ativar seus modos de voo, uma bateria recarregável de Polímero de Lítio⁸ (LiPo) e uma estação de controle de solo (GCS) com software Mission Planner⁹ instalado.

Os comandos de missão podem ser configurados e carregados no VANT usando uma GCS, que consiste em um aplicativo de software executado em um computador terrestre que se comunica com o VANT via telemetria sem fio (Ardupilot, 2022a). Existem pelo menos dez diferentes softwares GCS que podem ser usados para se comunicar com o ArduPilot: o Mission Planner, APM Planner, MAVProxy, QGroundControl e UgCS são para plataformas Desktop; e Tower (DroidPlanner 3), MAVPilot, AndroPilot e SidePilot que são compatíveis com Tablets e Smartphones. O GCS monitora o voo mostrando dados em tempo real sobre o desempenho e posição do VANT, como velocidade, orientação, altitude, qualidade do sinal de rádio, corrente usada e status da bateria (Cabreira et al., 2018a).

Usando um GCS, o piloto pode enviar comandos para o VANT e alterar os modos de voo durante a execução de uma missão. Também se beneficia de outras partes do ecossistema ArduPilot, incluindo simuladores, ferramentas de análise de log e APIs¹⁰ que auxiliam na inspeção de todos os dados de voo após a conclusão da missão.

Existem duas maneiras de registrar seus dados de voo. Com algumas exceções, os dois métodos registram dados muito semelhantes, mas de maneiras diferentes:

⁸Do inglês: *Lithium Polymer Battery*

⁹<https://ardupilot.org/planner/>

¹⁰Do inglês: *Application Programming Interface* (API).



Figura 3 – Multicóptero totalmente montado junto com seus componentes.

Fonte: adaptado de Ardupilot (2022a).

- **Os logs de dataflash:** são gravados no piloto automático (geralmente no cartão SD¹¹), portanto, podem ser baixados do piloto automático para um computador após um voo.
- **Os logs de telemetria:** (também conhecidos como “tlogs”) são registrados pela GCS no computador desktop quando o piloto automático é conectado por meio de um link de telemetria.

A partir dos registros produzidos e armazenados a bordo dos veículos equipados com o sistema ArduPilot, é possível extrair uma ampla gama de informações. Esses dados incluem, por exemplo, informações sobre a atitude da aeronave, como ângulos de rotação, inclinação e guinada; comandos recebidos ou executados durante a missão; dados sobre a tensão da bateria e corrente elétrica; informações sobre aceleração e altitude; além de coordenadas GPS, como latitude, longitude, altitude e velocidade. Também são registrados dados dos sensores de movimento, como acelerômetro e giroscópio, entre outros¹² (Ardupilot, 2022b).

As informações disponíveis nos logs podem auxiliar na identificação de vários problemas importantes que podem ocorrer durante as missões, como falhas mecânicas,

¹¹Do inglês: *Secure Digital*

¹²Mais detalhes sobre informações que podem ser extraídas dos logs: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-downloading-and-analyzing-data-logs-in-mission-planner.html>

vibrações, interferência da bússola, falhas no GPS e problemas de energia. Também é possível reproduzir os logs e observar o movimento do veículo no mapa, enquanto os valores de dados individuais podem ser exibidos e explorados em um gráfico durante o andamento do voo (Cabreira et al., 2018a). Por fim, imagens da trajetória de voo podem ser visualizadas em ferramentas como Google Earth¹³, Litchi¹⁴, QGIS¹⁵, AutoCAD Map 3D¹⁶ usando arquivos .kmz criados a partir dos logs.

O “Copter”¹⁷ inclui diversos mecanismos à prova de falhas para lidar com perda de controle ou imprevistos durante o voo. Estes mecanismos são ativados em situações como falhas de comunicação entre o VANT e a estação de controle ou quando o veículo voa para além do alcance do rádio. Quando acionados, o veículo entra no modo “RTL” e retorna ao ponto inicial. Após a restauração do sinal, o piloto precisa retomar o controle alterando o modo de voo. No modo “Auto”, esses mecanismos não são acionados e o veículo continua sua missão normalmente.

Em termos de energia, os VANTs são equipados com baterias que possuem um mecanismo de proteção contra descarga completa para evitar problemas causados pelo esgotamento da bateria. Esse mecanismo não só evita falhas inesperadas, mas também contribui para prolongar a vida útil da bateria. Os fabricantes de baterias LiPo recomendam não descarregar totalmente as baterias para evitar danos às células ou degradação da bateria (Trindade, 2022). Portanto, é aconselhável manter a carga da bateria entre 20% e 30% ao final de cada missão para garantir seu bom funcionamento (Amanor-boadu; Guiseppi-elie; Sánchez-sinencio, 2018; Cabreira et al., 2018a).

Para ativar o mecanismo de proteção da bateria com base nos limites mencionados, é necessário ajustar manualmente os parâmetros da bateria, como sua tensão e corrente estimada. Quando o primeiro limite é ultrapassado, o VANT entra no modo “RTL”. Durante esse modo, é possível que o segundo limite seja excedido antes que o veículo retorne ao ponto inicial seguro. Nessa situação, o VANT muda para o modo “Land” e desce até o solo. No entanto, isso pode resultar em problemas de pouso em locais inadequados, como árvores, rios ou redes elétricas de alta tensão. Uma solução proposta por Di Franco; Buttazzo (2016) é um mecanismo de falha que monitora continuamente a distância do VANT em relação ao ponto inicial e estima a energia restante da bateria. Se o VANT estiver próximo de um ponto em que a energia restante seja apenas suficiente para retornar ao ponto inicial com uma margem de erro, o modo “RTL” é ativado.

Embora existam avanços tecnológicos nesse tipo de plataforma aérea em relação

¹³<https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>

¹⁴<https://flylitchi.com/>

¹⁵Quantum GIS (Do inglês: *Geographic Information System*)<https://maps.cga.harvard.edu/qgis/>

¹⁶<https://www.autodesk.com/products/autocad/included-toolsets/autocad-map-3d>

¹⁷Mais informações podem ser encontradas em: <https://ardupilot.org/copter/docs/failsafe-landing-page.html>

ao voo autônomo, é importante ressaltar que as fases de decolagem, execução da missão e pouso devem ser assistidas como medidas de segurança (ANAC, 2018). Barrientos et al. (2011) propõe que um piloto supervisione a missão, podendo mudar o modo de voo de automático para manual em caso de falha do sistema ou emergência, enquanto o operador da base monitora os dados de navegação durante a execução da missão, como variação de altitude e descarga da bateria. Estas são situações que geralmente ocorrem em cenários reais que devem ser consideradas durante o planejamento de rotas de cobertura, que será melhor detalhado na próxima seção.

2.2 Planejamento de Rota de Cobertura

O estado da arte em métodos de PRC para robótica em geral é resumido em Galceran; Carreras (2013) e trabalhos voltados para VANTs são apresentados em Cabreira; Brisolará; Ferreira Jr (2019). O PRC é uma variante do planejamento de trajetórias na robótica que visa encontrar um caminho que passe por todos os pontos dentro de uma região de interesse (RoI)¹⁸, evitando possíveis obstáculos (Choset, 2001). Em um contexto aéreo, os obstáculos podem representar zonas de exclusão aérea (NFZ)¹⁹ que o VANT não deve considerar durante a fase de planejamento (Cabreira et al., 2018a). Além disso, as capacidades relativas da aeronave, seus sensores à bordo, as características da área de interesse e fatores ambientais devem ser consideradas no planejamento.

Segundo Apostolidis et al. (2022), os métodos PRC podem ser divididos em categorias de acordo com diferentes critérios que enfocam aspectos específicos do problema. Os mais importantes deles são:

1. **decomposição celular, baseados em grade ou diagrama Voronoi**, com base em como o método discretiza o RoI para calcular caminhos;
2. métodos com **robô individual** ou **múltiplos robôs**, em relação ao número de robôs que podem participar de uma missão;
3. métodos **on-line** ou **off-line**, com base na possibilidade ou não de uma missão em andamento ser ajustada obtendo *feedback* em tempo real da área operacional;
4. **consciente de energia** ou **não**, com base em se algumas ações são tomadas para fornecer caminhos com eficiência energética (por exemplo, reduzir curvas, evitar sobreposição de rotas, retornar a base com segurança, etc.).

¹⁸Do inglês *Region of Interest*.

¹⁹Do inglês *No Fly Zone*, zonas de voo proibidas ou zonas de exclusão.

Além disso, também existem diferentes categorias quanto aos padrões de trajetória. Os mais dominantes deles são:

1. os que usam padrões simples de **vai-e-volta** com uma distância definida entre eles;
2. padrões em trajetória em **espiral**, navegando de um ponto inicial lateral para um ponto final centralizado da Rol, ou reverso;
3. padrões em **árvores**, como *Spanning Tree Coverage* (STC), onde uma *Minimum Spanning Tree* (MST) é construída primeiro e um caminho que contorna o MST é gerado depois; e
4. trajetórias baseadas em **algoritmos evolutivos** (ex. redes neurais e algoritmos genéticos) combinados como estratégias em grade, buscam estabelecer um conjunto de locais (*waypoints*) válidos²⁰ para gerar a rota.

Existem várias métricas para avaliar o desempenho do planejamento da cobertura, as quais devem atender aos requisitos de cada aplicação. Dentre as métricas mais exploradas estão: a distância total percorrida ou o comprimento do caminho, o tempo para completar uma missão, a maximização da área de cobertura, o número de manobras de viragem, o consumo de energia (bateria), qualidade de imagens coletadas (criando um mosaico/mapas da área), taxa de sobreposição da rota, o número de objetos/eventos detectados.

As próximas subseções visam facilitar a compreensão sobre o problema de planejamento de rotas de cobertura e como os conceitos são apresentados na literatura.

2.2.1 Área ou Região de Interesse - Rol

O formato dos talhões²¹ representam nesta pesquisa a região de interesse, Rol, e pode ser descrito por um polígono irregular, quando seus lados não são todos iguais e seus ângulos internos não possuem a mesma medida, e/ou não convexo, quando qualquer segmento de reta que tenha suas extremidades dentro do polígono não possui todos os pontos dentro desse mesmo polígono. A Figura 4 ilustra alguns formatos de Rol comuns em regiões agrícolas, onde o formato dos talhões apresentam formas variadas.

A imagem da esquerda (Figura 4a) apresenta uma aérea sem marcações e a imagem da direita (Figura 4b) possui destaques importantes: **(A)** talhão em formato triangular, **(B)** árvores de grande porte ou sede de uma propriedade rural, que são obstáculos para o voo com VANT, **(C)** talhão com formado irregular, **(D)** talhão retangular irregular e **(E)** talhão trapezoidal.

²⁰Também pode ser entendido como peso ou custo de cada célula/waypoint.

²¹Talhão é uma unidade mínima de cultivo dentro de uma propriedade.



Figura 4 – Talhões de uma região agrícola próxima ao município de São Carlos, SP.
Fonte: Elaborada pelo autor (Imagem obtida do Google Earth)

Na área agrícola, as zonas de exclusão podem ocorrer devido à presença de barreiras naturais, como árvores de grande porte ou rios, ou infraestrutura agrícola, como armazéns, cilos, galpões ou sede de fazendas. Ou seja, as zonas de exclusão são, por qualquer motivo, áreas onde o VANT não deve passar.

A RoI e as zonas de exclusão (NFZ) também podem ser compreendidas como uma sequência de n vértices v_1, \dots, v_n , onde cada vértice é definido como um par de coordenadas (x_i, y_i) de um polígono. Cada vértice possui um ângulo λ_i . Considerando cada v_i , o próximo vértice do polígono pode ser descrito como $v_{prox(i)}$, onde $prox(i) = i(\|n\|) + 1$. Uma aresta localizada entre dois vértices v_i e seu vértice adjacente pode ser referida como e_i , enquanto seu comprimento por $d_i = \|v_i - v_{prox(i)}\|$. Além disso, a área pode conter NFZ interna representada como uma sequência de pontos-obstáculo u_1, \dots, u_p . A Figura 5 mostra três exemplos da área.

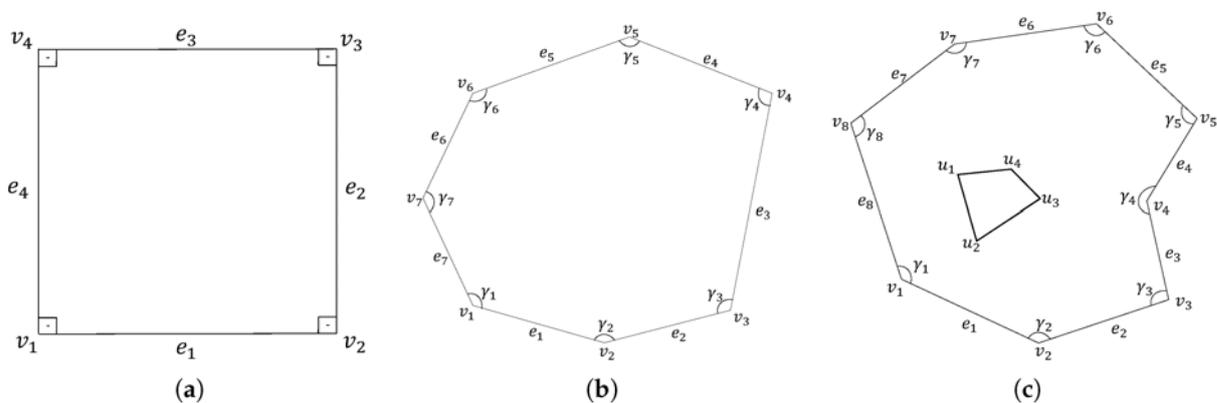


Figura 5 – **Exemplo de áreas de interesse com vértices, arestas e ângulos:** (a) Retangular; (b) Polígono Convexo; (c) Polígono côncavo com zonas de exclusão aérea.

Fonte: Retirado de Cabreira; Brisolara; Ferreira Jr (2019)

Um adequada definição da área de interesse é crucial para o planejamento da cobertura. A próxima seção apresenta uma visão geral das diferentes técnicas de

decomposição celular, geralmente utilizadas para reduzir as concavidades de áreas complexas ou dividir a área em células menores para facilitar a cobertura.

2.2.2 Técnicas de Decomposição da Região de Interesse

Segundo a classificação de Choset (2001), os algoritmos podem ser divididos em heurísticos ou completos. Nas abordagens heurísticas, o comportamento dos robôs segue um conjunto de regras simples, contudo, não garante o sucesso de cobertura. Já os métodos completos podem fornecer essas garantias usando a decomposição celular do ambiente, que consiste na discretização do espaço em células. A taxonomia de Choset (2001), considerada clássica e amplamente referenciada em trabalhos subsequentes, destaca-se por ser a base para muitas abordagens em problemas de PRC envolvendo VANTs. As técnicas mais comuns derivadas dessa taxonomia incluem a decomposição celular exata e a decomposição celular aproximada, ambas amplamente utilizadas devido à sua eficácia na discretização do espaço em células para garantir a cobertura completa da área de interesse.

Técnicas de **Decomposição Celular Exata** dividem a área-alvo em subáreas, que geralmente são cobertas usando movimentos de vai-e-volta. Seguindo essa divisão, o problema de PRC pode ser considerado como uma busca em grafos para criar um caminho que conecte todas as subáreas. A trajetória final é uma combinação dos movimentos de vai-e-volta dentro de cada subárea e o trajetória que conecta subáreas adjacentes (Galceran; Carreras, 2013). Conforme Cabreira; Brisolara; Ferreira Jr (2019), a decomposição do ambiente exato se destaca especialmente em ambientes com contornos de forma irregular e na presença de obstáculos de forma côncava, pois a reunião das células sob este método de decomposição representaria totalmente o espaço livre.

Entre as técnicas de Decomposição Celular Exata mais comuns, destaca-se a decomposição **Trapezoidal** e **Boustrophedon**. A primeira delas divide a RoI em células trapezoidais convexas, realiza movimentos de vai-e-volta e utiliza uma caminhada exaustiva para determinar a sequência de exploração das células para cumprir a cobertura. A segunda técnica cria células maiores não convexas considerando apenas os vértices dos obstáculos. Uma linha de varredura é prolongada em ambos os sentidos dos obstáculos e essas zonas são chamadas de pontos críticos. A decomposição em *boustrophedon* é superior à decomposição trapezoidal em termos de número de células e comprimento do caminho (Cabreira; Brisolara; Ferreira Jr, 2019). As duas técnicas mencionadas são ilustradas na Figura 6.

A **Decomposição Celular baseada em Morse** é uma forma avançada da decomposição do *boustrophedon*, que se baseia nos pontos críticos das funções de Morse (Acar et al., 2002). As diferentes funções de Morse são capazes de tratar obstáculos não poligonais, em teoria as decomposições de Morse podem ser aplicadas a qual-

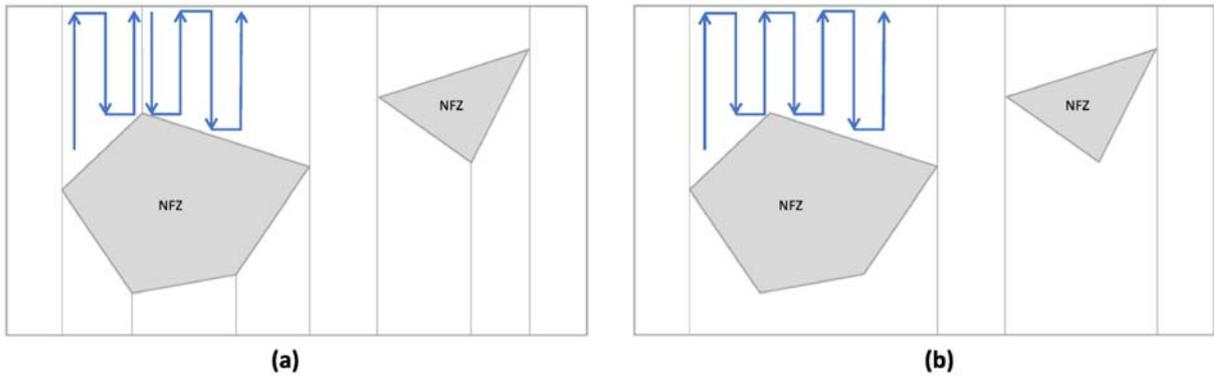


Figura 6 – (a) Decomposição trapezoidal; (b) Decomposição *boustrophedon*.
Fonte: Adaptado de Cabreira; Brisolara; Ferreira Jr (2019).

quer espaço n -dimensional. Além disso, elas apresentam um método para realizar a cobertura de espaços planares detectando os pontos críticos usando informações de alcance sensorial e um algoritmo baseado em um modelo de movimento, que consegue encontrar todos os pontos críticos na área alvo.

O método de decomposição de Morse encontra limitações ao lidar com ambientes não retilíneos, uma vez que não é possível determinar pontos críticos que correspondem a mudanças na topologia do espaço. Nesses ambientes, os limites paralelos à linha de varredura são considerados casos degenerados para as funções de Morse (Acar et al., 2002). A Figura 7 mostra a decomposição de célula de *boustrophedon* baseada em Morse de um espaço de trabalho de exemplo com seu gráfico de adjacência associado sobreposto.

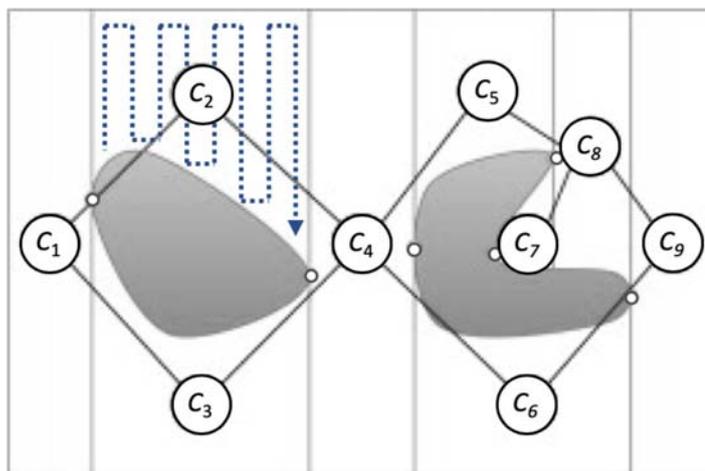


Figura 7 – Decomposição Morse de um espaço de trabalho de exemplo com seu gráfico de adjacência associado.

Fonte: Adaptado de Galceran; Carreras (2013).

A **Decomposição Celular baseada em Pontos de Referência** é uma abordagem projetada para ambientes planos simples (Wong; Macdonald, 2004; Wong, 2006), e como a técnica de decomposição de Morse, usa conceitos semelhantes à abordagem

boustrophedon. Porém, diferente das funções de Morse, o método utiliza segmentação em fatias, ou seja, são utilizados pontos de referência para determinar a decomposição celular exata.

Uma das principais vantagens deste método é sua simplicidade e minimalismo, permitindo que seja aplicado em diferentes modelos de ambientes, incluindo poligonais, elípticos ou retilíneos (Hassan, 2018). Além disso, como os obstáculos podem ser detectados de todos os lados do robô, é utilizado um padrão de vai-e-volta para gerar o caminho de cobertura, o que torna o percurso ainda mais curto. No entanto, é importante ressaltar que este método usa cinco eventos diferentes, o que pode tornar o cálculo custoso e limitar sua aplicação em ambientes mais complexos (Annamalai et al., 2020).

A **Decomposição Baseada em Grafos** é uma técnica de cobertura que se baseia na abordagem clássica proposta por Choset (2000). Nessa abordagem, cada nó de um grafo é representado por células e as arestas servem como conectores entre os nós em um ambiente decomposto. O objetivo é encontrar a sequência de cobertura ótima, que equivale a definir o caminho mais curto dentro da matriz de adjacência de um grafo para visitar cada nó pelo menos uma vez. Essa técnica é similar ao conhecido Problema do Caixeiro Viajante.

Em propostas apoiadas em grafos, é importante destacar que o robô geralmente precisa percorrer o centro das células para transitar de uma para outra, o que pode resultar em sobreposições, uma distância extra percorrida. Além disso, o menor caminho que visita todos os nós pode não ser necessariamente análogo ao caminho mais curto percorrido pelo robô, pois o grafo não considera as sobreposições dos caminhos de transição com cobertura de movimentos de vai-e-volta em linha reta dentro da célula (Nasirian; Mehrandezh; Janabi-sharifi, 2021).

Técnicas de **Decomposição Celular Aproximada**, ou Decomposição em **Grade** (Galceran; Carreras, 2013) executam a discretização apoiada no formato, tamanho e posição das células (Choset, 2001). Estas seguem todas a mesma proporção, via de regra quadradas, mas também podem ser usadas diferentes formas como triângulos ou hexágonos, para que sua união se aproxime da região de destino. O tamanho das células é comumente determinado pelo campo de visão do sensor, geralmente um sensor LiDAR²² ou uma câmera, conectado ao VANT e a distância do VANT em relação ao terreno, conforme visto na Figura 8a. Após a aeronave visitar o ponto central de cada célula a cobertura é considerada completa.

Os algoritmos que utilizam a decomposição celular aproximada funcionam dividindo um mapa de grade em submapas menores, nos quais as células são definidas como obstáculos ou não (Cheng et al., 2019). Com base nesta abordagem, vários projetos de grade alternativos foram desenvolvidos para melhorar o desempenho do

²²Do inglês: *Light Detection And Ranging*

robô, como decomposição baseada em redes neurais (Sanna; Godio; Guglieri, 2021), em busca heurística (Cho et al., 2021) e em árvore de abrangência (Bansal; Sikdar, 2021). O centro de cada célula, como pode ser visto na Figura 8b, também chamado de *waypoint*, representa um comando de navegação para guiar o VANT, como decolagem, mudança de velocidade ou deslocamento para um local específico, além contém informações sobre latitude, longitude e altitude (Cabreira; Brisolara; Ferreira Jr, 2019).

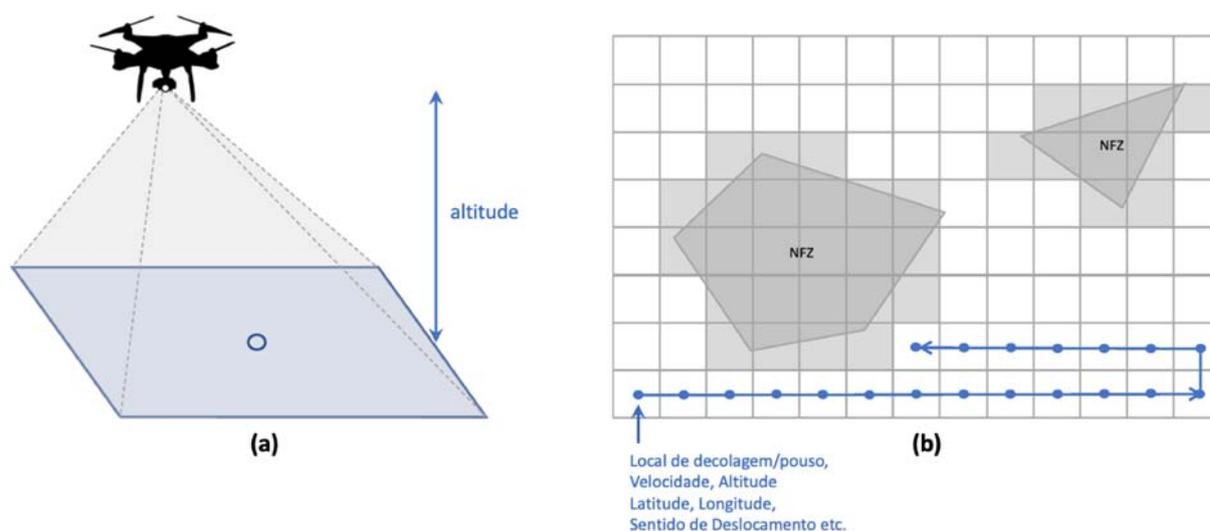


Figura 8 – (a) Área projetada do VANT; (b) Células obtidas pela aplicação de decomposição celular aproximada.

Fonte: Adaptado de Cabreira; Brisolara; Ferreira Jr (2019).

A **Decomposição Semi-Aproximada** também consiste em dividir a região em células, porém, a divisão ocorre em apenas uma direção, resultando em células com largura fixa, mas com formas variáveis na parte superior e inferior (Hert; Tiwari; Lumelsky, 1996). Ou seja, as células têm largura fixa, mas podem ter comprimentos variáveis. O algoritmo pode ser utilizado em um ambiente simples e não necessariamente conectado, funcionando através da recursão. Um robô seguindo essa metodologia pode começar a cobertura a partir de qualquer ponto do ambiente e usar um movimento de varredura para cobrir a RoI.

O **Diagrama de Voronoi**²³ também tem sido utilizado para particionar a área a ser coberta por VANTs individuais ou enxames (Davis et al., 2012; Chen; Li; Zhuo, 2017). Desenvolvido pelo matemático Georgii Feodosevich Voronoi, consiste em uma técnica que permite dividir um espaço métrico em subpartes com base na distância em relação a um determinado conjunto de pontos. Estes pontos, também chamados de “sementes geradoras”, são usados para gerar a estrutura de um Diagrama de Voronoi. Cada ponto gerador é o centro de um polígono (célula ou sub-área) no diagrama,

²³Os diagramas de Voronoi também recebem outros nomes: Tesselações de Dirichlet, partição de Thiessen, zonas de Brillouin, celas de Wigner-Seitz ou regiões potencialmente disponíveis são algumas das denominações recebidas em função do campo de estudo (Salgado et al., 2019).

que é formado pela região do espaço mais próxima a esse ponto gerador do que a qualquer outro ponto gerador (Das et al., 2021).

Os diagramas de Voronoi possuem duas propriedades que são úteis para o problema de decomposição de área. Primeiro, eles podem ser calculados localmente, uma subárea atribuída a um VANT é calculada com base em sua posição de decolagem e pouso, ou na posição de seus vizinhos em operações com enxames de VANTs (Maarouf; Ko; Nouh, 2019). Esse comportamento localizado pode diminuir a quantidade de dados a serem trocados entre VANTs e a estação base e, assim, melhorar a escalabilidade. A segunda propriedade importante é que as regiões geradas são convexas, o que simplifica o movimento dos VANTs dentro de sua subárea ao considerar as linhas de cada polígono como fronteiras de atuação (Srivastava et al., 2019). A Figura 9 ilustra uma aplicação do diagrama de Voronoi no particionamento de uma área de interesse (RoI).

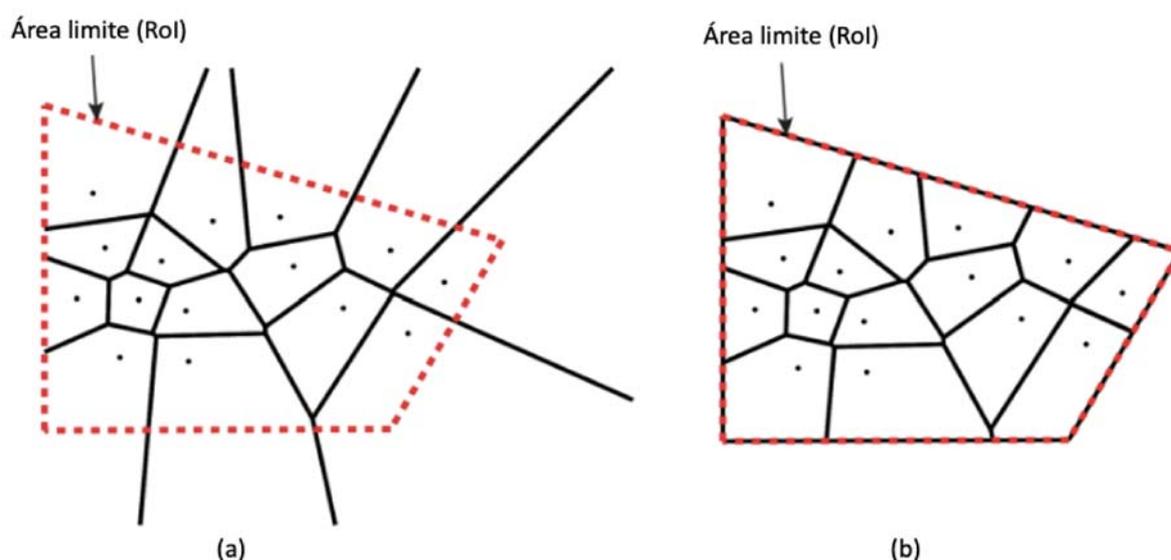


Figura 9 – Ilustração de (a) diagrama de Voronoi ilimitado e (b) diagrama de Voronoi limitado, onde a linha tracejada vermelha representa a área à qual o diagrama de Voronoi está sendo limitado.

Fonte: Adaptado de Jensen-nau; Hermans; Leang (2021).

Na abordagem clássica do diagrama de Voronoi, é importante considerar que as regiões geradas podem ter tamanhos diferentes (Aurenhammer; Klein, 2000). No entanto, podem ser escolhidas estrategicamente para atender a um objetivo específico e garantir uma proporção entre os tamanhos das partições (Chen; Li; Zhuo, 2017; Wang et al., 2019). Dessa forma, é possível construir uma malha de Voronoi com modelagem parametrizada, favorecendo a simetria das regiões geradas, como mencionado por Su et al. (2021). Em aplicações envolvendo VANTs, considerar a capacidade de energia disponível para definir o tamanho de cada sub-região do Diagrama de Voronoi pode ser uma estratégia interessante. A Figura 10 mostra a representação gráfica de

um diagrama de Voronoi, destacando as diferenças entre partições não proporcionais e partições proporcionais.

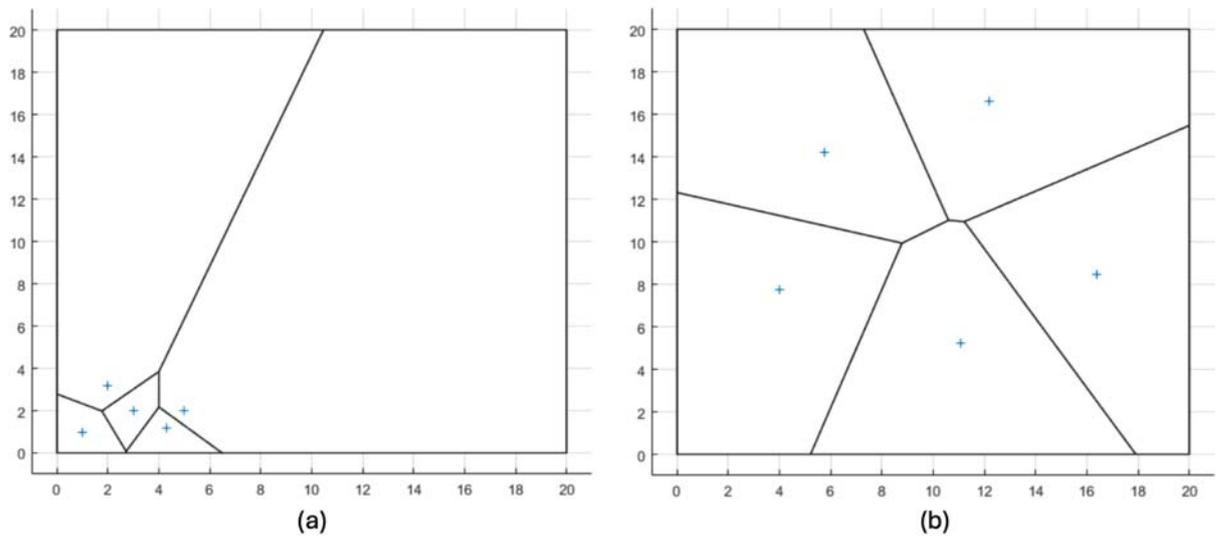


Figura 10 – (a) posição inicial com partições não proporcionais e (b) ilustra a posição final com partições proporcionais.

Fonte: Adaptado de Chen; Li; Zhuo (2017).

2.2.3 Técnicas Sem Decomposição da Região de Interesse

Geralmente, áreas de interesse com formatos regulares e de pequenas dimensões e com baixa complexidade não exigem a utilização de técnicas de decomposição. Missões de cobertura **sem decomposição**, geralmente são realizadas sobre áreas com padrões geométricos simples como quadrados e retângulos. Os padrões de trajetória mais comuns são o Vai-e-volta (Zig-Zag, ou *Back-and-Forth*), Espiral e Curvas de Hilbert. A figura 11 ilustra os padrões mencionados.

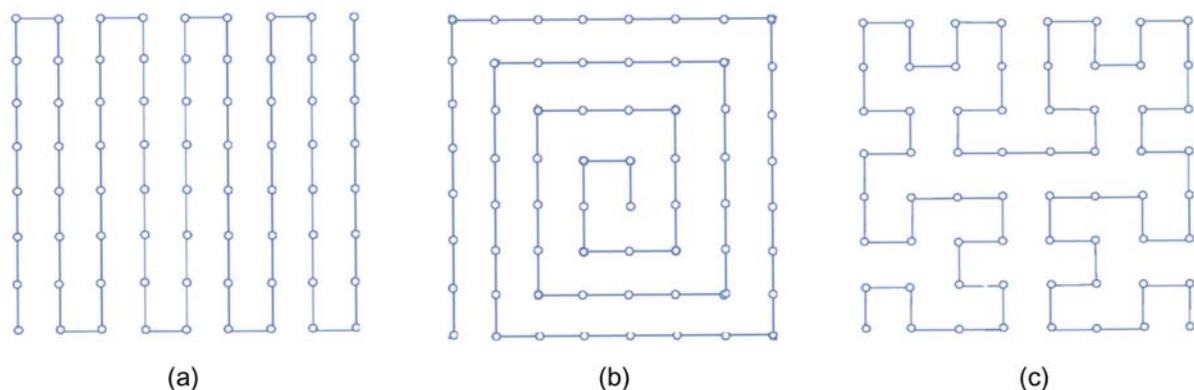


Figura 11 – **Padrões de trajetória:** (a) vai-e-volta e (b) esperial e (c) curvas de Hilbert

Fonte: Adaptado de Cabreira; Brisolara; Ferreira Jr (2019).

A cobertura com padrão **Vai-e-volta** geralmente é empregado em áreas de investigação com padrões geométricos considerados simples (formas regulares). O Mission

Planner, um dos softwares de controle de voo mais populares para cobertura de ambientes (Cabreira et al., 2018a), utiliza amplamente essa proposta. Nessa técnica, os movimentos consistem em deslocamentos retilíneos e manobras em 180° ao final de cada volta, quando o VANT encontra o limite da área. Esse padrão de comportamento também é conhecido como *boustrophedon* ou movimento em Zigue-Zague (Hu; Xu; Wang, 2021), e é repetido até que toda a RoI seja investigada.

O padrão de cobertura em **Espiral**, tradicionalmente proposto para áreas de interesse com dimensões regulares, envolve a criação de um caminho de cobertura que passa pelos vértices da área. Após a conclusão da primeira camada de cobertura, o raio da região é reduzido para que o robô se mova em direção ao ponto central. Nessa abordagem, o VANT executa manobras de giro com ângulos mais amplos, o que elimina a necessidade de reduzir abruptamente a velocidade em cada curva e diminui os períodos de aceleração e desaceleração. Isso melhora o desempenho do robô em comparação com o modelo anterior (Cabreira et al., 2018b, 2019).

A técnica de **Curva de Hilbert** segue um padrão de preenchimento de espaço baseado em fractais (Bai; Li; Miao, 2022), que exibe características de auto-similaridade determinística (Chen; Zhang; Xu, 2014). Essa curva é sobrejetora e contínua (Shaikh et al., 2016), obedecendo um comportamento de ordem N , o que a torna útil em problemas de varredura de ambiente, permitindo um mapeamento congruente entre espaços de dimensões 1D, 2D ou n D preservando a localidade (Dai; Su, 2003). Ao seguir uma trajetória baseada nessa técnica, um robô permanece próximo a áreas já exploradas, o que favorece a conformidade durante a investigação da área de interesse (Sadat; Wawerla; Vaughan, 2015).

2.2.4 Disponibilidade das Informações

Na literatura, os algoritmos de cobertura podem ser classificados em duas categorias principais: *on-line* e *off-line* (Choset, 2001). Os algoritmos *on-line* são baseados em dados do ambiente em tempo real que são recuperados de sensores integrados. Os algoritmos *on-line* não conhecem completamente o ambiente da RoI, e o caminho de cobertura é executado em tempo real pelo VANT após processar os dados dos sensores. Os benefícios dos algoritmos *on-line* são o desenho da rota em voo para completar a missão independentemente de situações imprevistas e o desnecessário conhecimento prévio da RoI (Galceran; Carreras, 2013; Paull et al., 2013).

Os algoritmos *off-line* precisam conhecer previamente o ambiente e as suas informações incluídas (estacionárias), como obstáculos e a geometria da RoI (Galceran; Carreras, 2013). Geralmente, o conhecimento da área fica a cargo do operador que planeja a rota. Estes algoritmos não conseguem lidar com obstáculos dinâmicos (desconhecidos), porém, fornecem planos de rota mais eficientes e convenientes e usam menos energia da unidade central de processamento (CPU) do que os algoritmos *on-*

line (Valente et al., 2013; Fevgas et al., 2022).

2.2.5 Métricas de Desempenho

As métricas são utilizadas para avaliar o desempenho das soluções para o planejamento das rotas de coberturas, podendo variar de acordo com o modelo de aeronave²⁴ (ex. asa-fixa, multirroto, etc.), a capacidade dos sensores ou câmeras acoplados no VANT, a quantidade de robôs (único ou múltiplos), o tipo de movimento realizado (ex. vai-e-volta, espiral, árvore, etc.) e os algoritmos de processamento (*on-line/off-line*). Além disso, deve-se levar em consideração se a cobertura é simples ou contínua. Em um contexto de cobertura simples, a RoI é percorrida apenas uma vez, enquanto em uma cobertura contínua o cenário é percorrido várias vezes (Cabreira; Brisolara; Ferreira Jr, 2019).

As métricas mais comuns de cobertura simples são: a distância total percorrida ou o comprimento do caminho (Jiao et al., 2010; Xu; Viriyasuthee; Rekleitis, 2011; Öst, 2012), o tempo para completar uma missão (Valente; Barrientos; Del Cerro, 2011), a maximização da área de cobertura (Li; Wang; Sun, 2016), e o número de manobras de viragem (Maza; Ollero, 2007; Torres et al., 2016). Há situações onde se busca minimizar a distância percorrida. Quando se divide a RoI por decomposição celular, o caminho também deve ser minimizado entre as células adjacentes, ou seja, o caminho que liga o final de uma célula e o início da próxima célula. As estratégias de manter o VANT dentro da área de interesse, evitar a sobreposição de rotas e voar em altitudes mais elevadas também minimizam a distância de cobertura (Cabreira; Brisolara; Ferreira Jr, 2019).

Uma estratégia para reduzir o tempo de voo é utilizar frotas, enxames ou múltiplos VANTs. O uso de vários robôs geralmente requer um processo de coordenação que inclui a divisão da RoI em subárea, e a alocação de subáreas resultantes entre os VANTs. O espaço de trabalho pode ser dividido e atribuído em duas etapas diferentes (Maza; Ollero, 2007) ou simultaneamente usando um protocolo de negociação de forma distribuída (Nakashima et al., 2020; Brito, 2020; Barrientos et al., 2011) considerando as capacidades relativas dos veículos. Contudo, soluções com múltiplos VANTs são classificadas como NP-difícil, pois qualquer alteração no cenário exige uma reconfiguração para dividir e atribuir trajetórias para os VANTs. Uma simplificação para este problema é considerar que os veículos devem voar em altitudes distintas ou observar uma distância de segurança para evitar colisões (Skorobogatov; Barrado; Salamí, 2020). Esta primeira alternativa não é adequada para o controle biológico, pois especialistas recomendam que a dispersão dos agentes biológicos deve ser realizada com altura e velocidades constantes.

Outra métrica utilizada é o número de manobras de conversão. Quando um VANT

²⁴ Aspectos aerodinâmicos de voo.

executa uma manobra de giro, ele deve reduzir sua velocidade, girar e aumentar novamente sua velocidade. Assim, quanto maior o número de manobras executadas, maior o tempo e a energia gasta (Cabreira et al., 2018a). Dessa forma, minimizar do número de manobras é frequentemente explorada para economizar indiretamente energia e prolongar o tempo de missão. Alguns trabalhos exploram outras métricas em conjunto com o consumo de energia, como comprimento da trajetória, tempo para completar uma missão e número de voltas na tentativa de economizar energia. Além disso, é possível adicionar outras características ao problema, como restrições ambientais, restrições aerodinâmicas do veículo, ângulos de viragem e velocidades ideais (Di franco; Butazzo, 2015), diferentes distâncias podem ter diferentes velocidades ótimas com consumo mínimo de energia dependendo de seu comprimento (Cabreira; Brisolará; Ferreira Jr, 2019). Independente do tipo de aplicação, o consumo de energia assume um papel importante no PRC, pois além de métrica de desempenho também é uma limitação tecnológica dos VANTS.

2.3 Controle Biológico de Pragas - CB

Esta seção explora o conceito de CB e seu potencial para mitigar pragas agrícolas. Destacando a importância dessa abordagem, a discussão ressalta sua conexão com esta tese, que busca implementar estratégias de planejamento de rotas de cobertura com VANT no controle biológico de pragas.

O CB constitui um campo extenso de pesquisa, fundamentado no princípio natural pelo qual diversas espécies se sustentam e regulam suas populações através da predação ou parasitismo de outros organismos. Tais espécies são conhecidas como inimigos naturais e já eram reconhecidas por Linnaeus, em 1760, que afirmava que cada organismo possui seu antagonista natural. Este princípio é crucial para a proteção de culturas agrícolas e florestais, definindo-se o controle biológico como o processo natural de regulação de populações de plantas e animais por meio desses agentes bióticos (Berti Filho; Macedo, 2011).

O termo “Controle Biológico” foi utilizado pela primeira vez por Harry Scott Smith em 1919, para descrever o uso de inimigos naturais no combate a insetos-praga (Huffaker, 2012). Segundo alguns autores, CB é o uso de predadores, parasitoides e patógenos no controle de pragas. Outros incluem na definição o uso de feromônios, resistência de plantas, técnica do macho estéril, reguladores de crescimento, inseticidas de origem vegetal e inseticidas biológicos à base de patógenos (Fontes; Valadares-Ingles, 2020; Berti Filho; Macedo, 2011).

O CB emerge como a técnica preeminente na proteção das plantas contra o ataque de artrópodes-praga, devido à sua eficácia, permanência, viabilidade econômica e benefícios ecológicos. No entanto, como qualquer prática, apresenta suas próprias

limitações. Nesse sentido, Parra et al. (2002) destacaram uma série de vantagens e desvantagens inerentes a essa abordagem:

Vantagens:

- **Ausência de efeitos colaterais adversos:** Em comparação com o controle químico, o controle biológico oferece uma solução sem efeitos prejudiciais ao meio ambiente.
- **Alto nível de controle a baixo custo:** Uma vez estabelecido, o controle biológico mantém um alto nível de eficácia com custos reduzidos.
- **Permanência após a implementação:** Após um investimento inicial, o controle biológico tende a manter-se eficaz a custos mínimos.
- **Inocuidade para humanos, plantas e outros organismos:** Ao contrário dos pesticidas, o controle biológico não causa danos aos seres humanos, plantas cultivadas, animais domésticos, vida selvagem ou outros organismos benéficos.
- **Capacidade de reprodução rápida dos inimigos naturais:** Os agentes de controle biológico têm a capacidade de se reproduzir rapidamente e adaptar-se às suas presas, garantindo uma resposta eficiente mesmo em densidades populacionais baixas.
- **Não desenvolvimento de resistência:** Ao contrário dos pesticidas, os inimigos naturais não desenvolvem resistência às pragas.

Desvantagens:

- **Dependência das características do habitat e do hospedeiro:** O sucesso do CB está condicionado às propriedades do ambiente e do hospedeiro, podendo ser necessário um controle integrado em casos de níveis econômicos de danos persistirem.
- **Requisitos exigentes de pesquisa:** A busca por soluções de Controle Biológico demanda recursos significativos e não garante uma solução imediata, exigindo investimentos em pesquisa científica e técnica.

Apesar das limitações existentes, a urgência em desenvolver e implementar programas de CB é reforçada pelos crescentes níveis de resistência das pragas aos pesticidas. Segundo a Organização de Agricultura e Alimentos das Nações Unidas (FAO), estima-se que anualmente 20% a 40% da produção agrícola mundial seja perdida devido a pragas e doenças, o que equivale a aproximadamente US\$ 220 bilhões. Especificamente no Brasil, os prejuízos para os produtores de grãos podem ultrapassar R\$ 55 milhões no ano corrente (Fao, 2019).

Em resposta a essas significativas perdas econômicas, o mercado global de produtos biológicos²⁵ tem reagido, e foi avaliado em cerca de US\$ 12,9 bilhões em 2022. Projeções da *Research and Markets* (2022) indicam que esse mercado deverá crescer a uma taxa composta anual de 13,7% até 2027, atingindo um valor estimado de US\$ 24,6 bilhões. No Brasil, o mercado de produtos biológicos alcançou R\$ 1,8 bilhão em 2021, um aumento de 33% em relação ao ano anterior. Considerando a produção caseira ou *on farm*²⁶, especialmente relevante em culturas como soja, cana-de-açúcar e algodão, o tamanho do mercado pode ser ainda mais significativo, embora dados precisos não estejam disponíveis (Embrapa, 2022).

Dessa forma, fica evidente a importância crescente do mercado de produtos biológicos como resposta estratégica às perdas econômicas causadas por pragas e doenças, bem como uma alternativa sustentável. Avançando, a próxima seção conceitua os tipos de controle biológico no cenário agrícola, explorando terminologias específicas.

2.3.1 Tipos de Controle Biológico - Terminologia

No contexto agrícola, Parra (2014) destaca três principais modalidades do controle biológico: Controle Biológico Clássico, Controle Biológico Natural ou Conservativo, e Controle Biológico Aplicado ou Aumentativo.

Controle Biológico Clássico: baseia-se na importação e colonização de parasitoides ou predadores, visando ao controle de pragas exóticas (eventualmente nativas). De maneira geral, as liberações são realizadas com um pequeno número de insetos (liberações inoculativas), por uma ou mais vezes no mesmo local; por isso, o controle biológico, nesse caso, é visto como uma medida de controle a longo prazo, pois a população dos inimigos naturais tende a aumentar com o passar do tempo e, portanto, somente se aplica a culturas semiperenes ou perenes.

Controle Biológico Natural ou Conservativo: baseia-se no princípio da conservação, onde os inimigos naturais das pragas ocorrem espontaneamente na área, contribuindo para a mortalidade natural e para a manutenção do equilíbrio populacional das pragas. Combina ações entre fatores bióticos²⁷ e abióticos²⁸ para manutenção da densidade populacional das espécies do ecossistema, com o objetivo de atingir o equilíbrio natural entre as espécies; e

Controle Biológico Aplicado ou Aumentativo: é o mais conhecido entre os agri-

²⁵Que inclui agentes de controle biológico, inoculantes, bioestimulantes, e biofertilizantes.

²⁶O termo *OnFarm* refere-se a práticas de produção realizadas dentro da própria fazenda, focando no uso de bioinsumos em substituição a agrotóxicos.

²⁷Os fatores bióticos são o resultado da interação entre os seres vivos em uma determinada região. Juntos, eles formam a biota, ou seja, a comunidade biológica que influencia o ecossistema do qual fazem parte (Parra et al., 2002).

²⁸Os fatores abióticos são todas as influências que os seres vivos possam receber em um ecossistema, derivadas de aspectos físicos, químicos ou físico-químicos do meio ambiente, tais como a luz e a radiação solar, a temperatura, o vento, a água, a composição do solo, a pressão e outros (Parra et al., 2002).

cultores, pois tem como base a aplicação de um agente de biocontrole (fungos, bactérias, oomicetos, vírus, micovírus, bacteriófagos, predadores e parasitoides) disponíveis no mercado (Bettiol, 2021). É um método de ação rápida, muito semelhante à de inseticidas convencionais. Atualmente, também é chamado de controle biológico aumentativo ou de multiplicação (criações massais), que evoluiu muito com o desenvolvimento das dietas artificiais para insetos. Esses “inseticidas biológicos” são mais utilizados para parasitoides ou predadores nativos, embora possam ser aplicados a inimigos naturais exóticos. Nesse tipo de controle não se espera estabelecimento dos indivíduos liberados nas áreas visadas. Existem muitos casos de sucesso de controle aplicado, sendo bastante frequente, por exemplo, a liberação de *Trichogramma spp.*, de forma inundativa, em diversos países do mundo. Detalhes dos conceitos e tipos de controle biológico podem ser obtidos em (Baker; Cook, 1974; Cook; Baker, 1983; Bettiol, 1991; Lenteren et al., 2020).

Tendo conceituado os diferentes tipos de controle biológico no cenário agrícola, é pertinente direcionar o foco para os agentes biológicos específicos que são empregados nessas práticas no Brasil. A próxima subseção abordará os agentes biológicos registrados no Brasil, detalhando o histórico, como eles são regulamentados e quais organismos são legalmente aprovados para uso, fornecendo uma visão sobre a infraestrutura regulatória e as opções disponíveis para os agricultores brasileiros.

2.3.2 Agentes Biológicos Registrados no Brasil

Vários autores, como Bettiol (1991), Alves; Lopes (2008), Parra (2014) e Bettiol; Maffia; Castro (2014), Bueno et al. (2020), fornecem informações sobre as diferentes fases do controle biológico no Brasil. O resumo apresentado aqui abrange quatro fases:

- **Fase 1** - Antes de 2005, quando os agentes de controle biológico eram comercializados sem registro;
- **Fase 2** - Entre 2005 e 2014, período marcado pelo desenvolvimento efervescente do controle biológico e pela explosão da ocorrência de *Helicoverpa armigera*;
- **Fase 3** - Entre 2014 e 2022, caracterizado pela consolidação do controle biológico no país, impulsionado por mudanças regulatórias e pelo crescimento do mercado;
- **Fase 4** - Após 2022, que promete um aumento significativo no mercado e na disponibilidade de produtos, exigindo novos critérios de registro e regulamentação da produção caseira (*OnFarm*).

O registro dos produtos biológicos no Brasil é fundamental para garantir a segurança e eficácia do uso. Embora o atual marco regulatório dos produtos biológicos esteja inserido na mesma legislação dos agrotóxicos convencionais (defensivos químicos)²⁹, algumas diferenciações foram estabelecidas para esses biodefensivos. Desde a publicação do Decreto nº 4.074/2002 e das Instruções Normativas Conjuntas (INC), protocolos diferenciados são adotados para cada grupo de produtos biológicos.

Para obter a aprovação, todo defensivo biológico deve passar por avaliação dos órgãos federais responsáveis pelos setores da agricultura, saúde e meio ambiente: Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA). Na União Européia, um novo biodefensivo pode chegar a levar 7 anos para ser aprovado, na Índia 3 anos e nos Estados Unidos, Brasil e China a aprovação ou registro ocorre dentro de 1 ano e meio a 2 anos (Fontes; Valadares-inglis, 2020).

É relevante destacar que, ao contrário dos defensivos químicos, os produtos biológicos são registrados para um ou mais alvos biológicos, ou seja, pragas e doenças específicas. Isso permite sua utilização em qualquer cultura onde esses alvos estejam presentes, salvo restrições impostas por órgãos estaduais. Esse rigoroso processo de aprovação visa garantir a segurança dos alimentos, a proteção da saúde humana e ambiental, e a eficácia no controle de pragas e doenças nas culturas agrícolas brasileiras (Xavier, 2022).

No Brasil, a EMBRAPA desenvolve diversas pesquisas relacionadas aos insumos biológicos. Essas pesquisas são estrategicamente orientadas pelo Portfólio de Bioinsumos, que engloba os temas controle biológico de pragas, promoção do crescimento de plantas e fitoquímicos. Entre as principais metas das pesquisas desenvolvidas, destacam-se:

- i. Substituir insumos sintéticos por ativos biológicos para controlar limitações produtivas das principais *commodities* agropecuárias (soja, milho, trigo, algodão, açúcar, citros, café, celulose e carnes suína, frango e bovina).
- ii. Substituir ou diminuir o uso de fertilizantes de origem não renovável por insumos de base biológica nas culturas do feijão, feijão-caupi, soja, milho, algodão, pastagens e cana-de-açúcar (Embrapa, 2021).

Os ativos gerados são fundamentais para o desenvolvimento de bioinsumos e tecnologias pela EMBRAPA, com um catálogo extenso disponível para consulta e *download* por meio do aplicativo Bio Insumos. Este aplicativo, acessível através do site da EMBRAPA³⁰, oferece acesso ao Catálogo Nacional de Bioinsumos cadastrados pelo

²⁹Lei 7802-1989 - Lei dos Agrotóxicos.

³⁰Para mais detalhes sobre o aplicativo e os produtos listados, visite o site: <<https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/7227/aplicativo-bioinsumos>>

MAPA, além de prover informações detalhadas sobre o uso na agricultura.

O aplicativo é dividido em duas seções principais: Controle de Pragas e Inoculantes. Na seção de Controle de Pragas, cada praga é detalhadamente descrita com uma lista de bioinsumos recomendados para seu controle. Por outro lado, a seção de Inoculantes apresenta os produtos testados e aprovados para diversas culturas, incluindo informações sobre fornecedores credenciados. Atualmente, o aplicativo contém registros de 617 produtos para controle de pragas e 636 inoculantes, evidenciando a vasta gama de soluções disponíveis para os agricultores.

No Brasil, cerca de 90% das áreas de cultivo de cana-de-açúcar empregam inimigos naturais como microrganismos, macrorganismos, bioquímicos e semioquímicos (Alisson, 2023). Este alto índice de adoção reflete o compromisso com métodos sustentáveis de proteção de culturas. Um exemplo marcante dessa prática é o uso da vespinha *Trichogramma galloi*, um agente biológico eficaz contra a mariposa de *Diatraea saccharalis*. Este método de controle biológico é reforçado pela tecnologia de VANTs, que são empregados para liberar as vespinhas de forma mais eficiente e abrangente nos canaviais. O monitoramento desta praga é realizado com armadilhas de feromônio, e as liberações de *Trichogramma galloi* devem começar quando 10 machos forem detectados em 30% das armadilhas. São realizadas três liberações espaçadas de sete dias, começando cinco dias após a leitura inicial da armadilha, com uma dose de 50.000 indivíduos por hectare (Alves, 2023).

Além disso, há pesquisas em andamento para o controle biológico de mosquitos no ambiente urbano que buscam controlar a população de mosquitos transmissores da dengue, zika, chikungunya e febre amarela. Tem sido produzidos mosquitos machos estéreis de *Aedes aegypti*, para copulação com fêmeas transmissoras dessas doenças, e que aflige grande parte da população brasileira (EMBRAPA, 2017). Em 2015, um projeto piloto foi realizado na cidade de Piracicaba/SP para a liberação de *Aedes aegypti* transgênicos com VANT. Houve uma redução no índice de larvas desse mosquito em quase 82% (Agência Brasil, 2016).

Diante do exposto, evidencia-se a importância de investigar e desenvolver formas eficientes e sustentáveis para a dispersão dos agentes biológicos nas áreas agrícolas. O próximo capítulo apresenta uma revisão de trabalhos relacionados (artigos e patentes) a este estudo, destacando as principais contribuições e síntese de características implementadas nos trabalhos encontrados.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo, serão discutidos os antecedentes e trabalhos relacionados ao problema de planejamento de rotas de cobertura com VANT, que será abordado na Seção 3.1. Também será explorada a utilização de VANT como plataforma para dispersar inimigos naturais no controle biológico de pragas, que também envolve o problema de cobertura, conforme apresentado na Seção 3.2. Por fim, na Seção 3.3, apresenta as considerações relevantes sobre os trabalhos relacionados, encerrando o capítulo. Especialistas na área podem fornecer informações úteis e até mesmo indicar trabalhos a serem incluídos na pesquisa (Kitchenham; Charters, 2007). Nessa pesquisa, a consulta a especialistas foi fundamental para a inclusão de palavras-chave e na seleção de trabalhos relevantes.

Foram definidos três conjuntos de palavras-chave, de acordo com os seguintes termos-chave: 1) Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), 2) Planejamento de Rota de Cobertura (PRC) e 3) Controle Biológico (CB), conforme mostra a Tabela 2. As palavras-chave foram concatenadas em *strings* e ajustadas de acordo com as exigências de cada mecanismo de busca.

O estado atual da técnica descrito nas próximas seções foi elaborado a partir de buscas nas plataformas digitais IEEE Xplore (<https://ieeexplore.ieee.org/>), Elsevier (<https://www.elsevier.com/>), MDPI (<https://www.mdpi.com/>), Google Acadêmico (<http://scholar.google.com.br/>) e a base de dados do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) (<https://www.gov.br/inpi/pt-br/servicos/patentes>).

Tabela 2 – Palavras de busca utilizadas

Termos-Chave	Palavras-chave
1) VANT	<i>Unmanned Aerial Vehicle, UAV, Drone, Multirotor, Multicopter, Quadcopter, Hexacopter, Pilotless Aircraft, Radio-Controlled Aircraft</i>
2) PRC	<i>Coverage Path Planning, CPP, CPP Methods, UAV Coverage, Decomposition Methods, Aerial Coverage, Terrain Coverage</i>
3) CB	<i>Pest control, Natural Enemies, Pest combat</i>

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Soluções de Planejamento de Rotas de Cobertura com VANT

Nos últimos anos, houve um aumento significativo no uso de VANTs em diversas tarefas, como vigilância de alvos, busca e salvamento, levantamento e mapeamento de terrenos e estruturas, e na agricultura de precisão. As metodologias de planejamento de rotas de cobertura estão sendo estudadas devido as melhorias no desempenho do robô e estão se tornando cada vez mais diversificadas e versáteis.

Os trabalhos de Choset (2001); Galceran; Carreras (2013) e Cabreira; Brisolara; Ferreira Jr (2019) revisaram estudos sobre PRC de acordo com vários critérios de classificação, como restrição espacial (2D, 3D, retangulares, polígonos convexos e polígonos côncavos com obstáculos), metodologias de decomposição (celular exata, celular aproximada, diagrama Voronoi ou baseada em Morse), formato da Rol (trapezoidal, *boustrophedon*, retilínea e hexagonal) e padrões de trajetória (vai-e-volta, espiral, curvas de Hilbert, entre outras). A seguir, serão apresentados trabalhos relacionados ao tema abordado por esta tese, agrupados de acordo com as principais estratégias de decomposição ou particionamento da área de interesse.

3.1.1 Métodos Baseados em Decomposição Celular Exata

Métodos exatos de decomposição celular dividem regiões em subregiões não sobrepostas chamadas células, de modo que a união destas resulte na área original. Normalmente o robô pode cobrir cada célula usando movimentos simples de vai-e-volta (Acar et al., 2002). Assim, o planejamento de rotas de cobertura pode ser reduzido a planejar movimentos de uma célula para outra.

Latombe (1991) propôs um método de decomposição trapezoidal, onde dividiu a área de cobertura, com exceção dos obstáculos, em células trapezoidais e cobriu a área com movimentos vai-e-volta. Contudo, quando o robô se move de uma célula para outra, a sobreposição ocorre como resultado da passagem pela mesma área no limite da célula.

Ao verificar que um número elevado de células que compõem a Rol causa ineficiência, Choset; Pignon (1998) propuseram a decomposição celular *boustrophedon* para melhorar a eficiência da cobertura. Este método é capaz de reduzir o número de unidades trapezoidais e minimizar o comprimento do caminho de cobertura, conhecida como varredura em linha. Para definição de um caminho ideal, Huang (2001) afirma que número de voltas deve ser minimizado e, portanto, a direção de voo do caminho de cobertura no padrão vai-e-volta deve ser alinhado a maior aresta. Com isso, determinar a direção de cobertura de forma a reduzir o número de voltas pode levar a um caminho de cobertura mais eficiente, reduzindo o número de voltas da aeronave.

Guastella et al. (2019) utilizou uma estratégia baseada em Decomposição de Morse para gerenciar zonas de exclusão, em um sistema de planejamento de traje-

tória para cobertura de aérea com VANTs atuando de forma cooperativa. Além disso, o gerenciamento para atribuição de sub-regiões aos VANTs é definida levando em consideração a geometria do ambiente e a posição inicial e final desejada para as aeronaves. A partir dos testes simulados realizados, observou-se que o *framework* foi capaz de gerar soluções sub-ótimas que podem servir como base para futuros experimentos práticos.

A metodologia de Huang (2001) foi utilizada por Maza; Ollero (2007) para decompor a RoI em sub-regiões com base nas capacidades relativas e localizações iniciais do VANT. As subáreas resultantes são atribuídas para cada VANT, que podem realizar a cobertura usando o padrão vai-e-volta. Os autores implementaram apenas a parte do algoritmo para polígonos convexos sem prever áreas de voos proibidas. Infelizmente, isso nem sempre é possível na vida real. A Figura 12 ilustra uma RoI decomposta em três subáreas e os respectivos trajetos de cobertura formados por movimentos vai-e-volta.

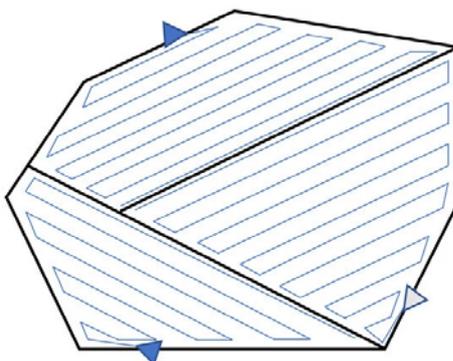


Figura 12 – Polígono convexo com decomposição de área para equipe de VANT

Fonte: Extraído de Cabreira; Brisolara; Ferreira Jr (2019).

Oksanen; Visala (2009) utilizaram dois algoritmos gulosos para tarefas de PRC em campos agrícolas. O primeiro é uma abordagem de cima para baixo que decompõe o campo em trapézios, e a segunda é uma abordagem de baixo para cima para cobrir o campo usando métodos de força bruta.

A decomposição celular exata que explora a cobertura de áreas poligonais côncavas, decompondo-as em subáreas não côncavas e usando movimentos de vai-e-volta é apresentada por Li et al. (2011) e Torres et al. (2016). No primeiro trabalho, os autores apresentam um método aprimorado de decomposição celular exata. Inicialmente, a RoI é decomposta em subáreas não côncavas através de uma abordagem de soma de largura mínima, explorando um método recursivo guloso. Em seguida, movimentos de vai-e-volta perpendiculares à direção de varredura são executados para minimizar as manobras de giro. Duas subáreas inteiramente adjacentes e com a mesma direção de varredura, obtidas a partir da decomposição convexa, conforme ilustra a Figura 13a, são combinados na subárea P4 para evitar movimentos desnecessários,

mostrado na Figura 15b. A direção do movimento de uma subárea para outra também pode mudar para obter uma melhoria de cobertura, conforme Figura 15c. Por fim, a sequência ótima de subáreas é definida para unir a trajetória final, conforme ilustrado na Figura 15d.

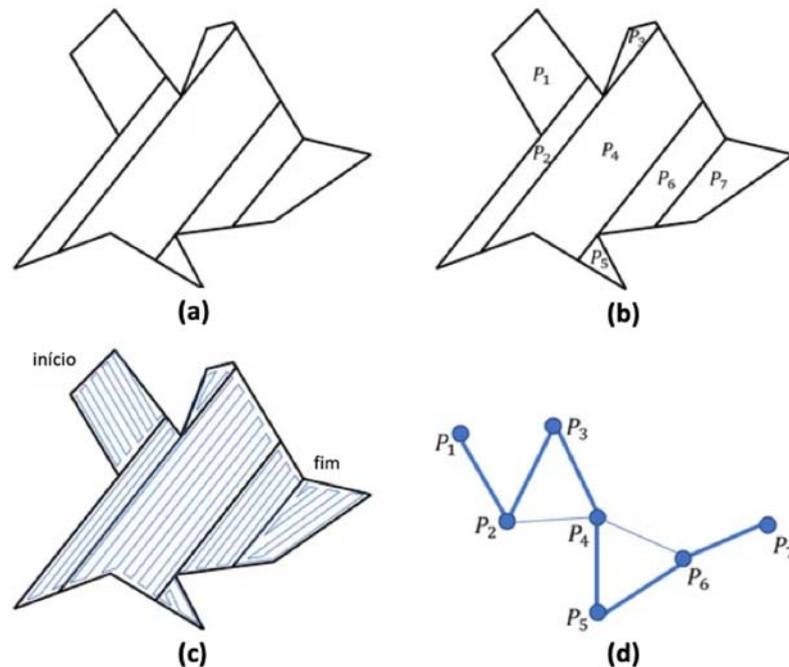


Figura 13 – **Decomposição e cobertura de polígonos côncavos**: (a) Decomposição convexa; (b) Combinação de subáreas; (c) Caminho de cobertura; (d) Grafo não direcionado.

Fonte: Adaptado de Cabreira; Brisolara; Ferreira Jr (2019).

Em Torres et al. (2016), os autores apresentaram um método para resolver o problema cobertura para obter um caminho que reduza o consumo de bateria decompondo polígonos não convexos em áreas convexas. Neste método, o VANT é equipado com uma câmera montada que, em primeiro lugar, captura imagens da região de interesse (RoI). Para realizar a cobertura do polígono, o algoritmo gera um movimento de vai-e-volta, calculando as distâncias entre dois movimentos retos com base na sobreposição das imagens e na área de captura da câmera. O processo culmina com a geração de um caminho que minimiza o número de voltas do VANT, conforme ilustrado na Figura 14a. Quando a trajetória é interrompida (Figura 14b), uma decomposição exata é usada para simplificar a área, criando subáreas.

A proposta de Li et al. (2011) foi comparada por Torres et al. (2016), usando a mesma RoI, como mostrado na Figura 15. Na comparação realizada pelos autores, a abordagem propôs uma decomposição da RoI em apenas quatro subáreas. Como resultado, houve a redução da quantidade de manobras de giro para apenas 80, contra 87 do trabalho original.

Uma técnica de decomposição celular exata com VANTs asa fixa que exploram

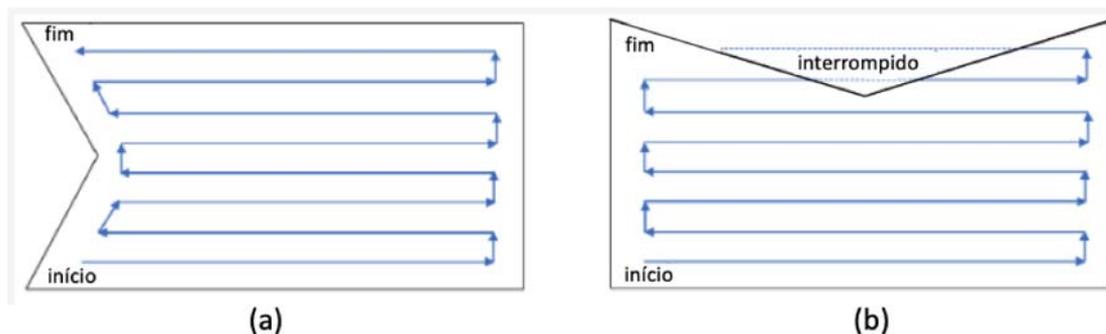


Figura 14 – **Cobertura usando movimentos de vai-e-volta em polígonos côncavos:** (a) Trajeto não interrompido; (b) Trajeto interrompido.

Fonte: Adaptado de Cabreira; Brisolará; Ferreira Jr (2019).

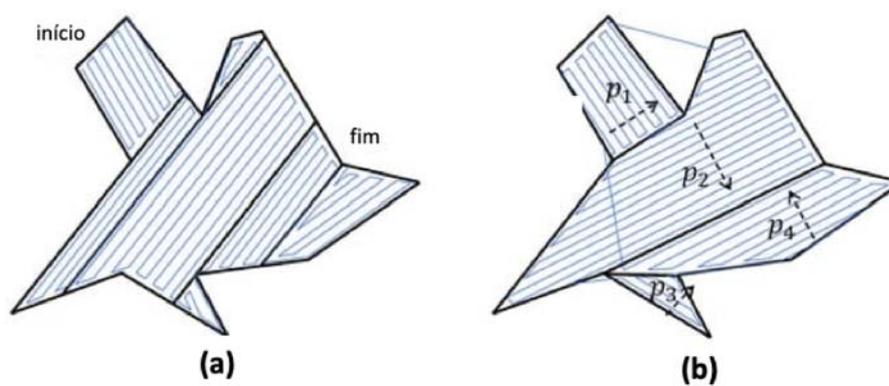


Figura 15 – **Comparação entre as abordagens:** (a) Decomposição convexa (Jiao et al., 2010); (b) Decomposição côncava e convexa (Li et al., 2011).

Fonte: Adaptado de Cabreira; Brisolará; Ferreira Jr (2019).

o vento para diminuir o tempo de voo foi proposta por Coombes et al. (2018). Os autores incorporaram o vento no modelo para calcular os caminhos de cobertura e incorporaram um método de decomposição para dividir a região complexa em polígonos convexos. A RoI é decomposta através da decomposição trapezoidal explorando várias rotações do polígono. A recombinação celular é empregada usando programação dinâmica para mesclar células em polígonos convexos. Este método também considera células opcionais externas à região para encontrar diferentes decomposições com menores tempos de voo. As aeronaves exploram a área usando movimentos de vai-e-volta perpendiculares à direção do vento e podem voar fora da área de interesse.

Abordagens de decomposição celular exata para cobertura ideal para VANTs também foram exploradas em Xu; Viriyasuthee; Rekleitis (2011) e Cabreira et al. (2018a). No primeiro, foi proposto um algoritmo de cobertura ótima para VANTs de asa fixa, capaz de evitar obstáculos com formas arbitrárias e em regiões previamente exploradas. A RoI é decomposta em um conjunto simples de células utilizando a decomposição celular *boustrophedon*, inicialmente proposta por (Choset; Pignon, 1998), em uma fase *off-line* através de uma representação em bitmap. A partir da decomposição, pode-se

construir um grafo de adjacência com os vértices representando as células e as arestas conectando as células adjacentes. Em Cabreira et al. (2018a), foi apresentado um algoritmo que utiliza um padrão de voo em espiral. Este algoritmo foi aplicado para fotogrametria precisa que considera o sensor da câmera e a altitude de voo para aplicar a sobreposição necessária para garantir o sucesso da missão. Também considera um modelo de energia para definir diferentes velocidades ótimas em segmentos retos do caminho, visando a redução do consumo de energia.

Um método de decomposição convexa para dividir formas complexas em formas menores e transformar formas côncavas com bordas afiadas em formas convexas é apresentado por Öst (2012). O autor explora a combinação dos movimentos vai-e-volta e espiral com a técnica de decomposição por ele proposta. Segundo os autores, o padrão vai-e-volta, sem a decomposição de áreas, apresenta resultados confiáveis em diferentes cenários. No entanto, para a geração de caminhos mais curtos, o padrão espiral é mais eficaz, especialmente em áreas com formas arredondadas e grandes ângulos internos. Contudo, esse padrão de cobertura é mais adequado para regiões de interesse (RoI) com formatos regulares, sendo menos eficiente em áreas complexas.

Um algoritmo que explora o movimento espiral para missões em regiões costeiras usando múltiplos VANTs heterogêneos foi proposto por Balampanis; Maza; Ollero (2017a,b). Os autores apresentaram uma estratégia de segmentação triangular (Triangulação de Delaunay) baseada na decomposição exata e cobertura de área com aeronaves heterogêneas, levando em consideração o raio de detecção dos sensores a bordo, para promover a divisão de regiões costeiras. Foram desenvolvidos dois algoritmos com o objetivo de melhorar o particionamento e resolver situações de impasse que resultam em regiões e subáreas não alocadas devido às capacidades relativas dos VANTs. Os resultados obtidos nas simulações destacam que ambos os algoritmos podem ser aplicados em cenários complexos de regiões costeiras com diferentes configurações para os VANTs. No entanto, a abordagem apresenta caminhos de cobertura mais longos e com maior número de voltas em comparação com o padrão vai-e-volta.

Yourdshahi et al. (2018) propôs um método que utiliza detecção de pontos de referência para estimar o mapa de um ambiente desconhecido, com VANTs atuando de forma coordenada. A técnica desenvolvida pelo autor é baseada na estimativa de densidade recursiva (RDE)¹ adaptada para identificar pontos de referência de câmeras com visão superior. Além disso, o estudo investigou como os pontos de referência podem ser filtrados e como os mapas locais de vários VANTs podem ser agregados em um único mapa global. Experimentos de prova de conceito foram realizados em voos reais com um VANT individual equipado apenas com uma câmera simples, ob-

¹Do do inglês: *Recursive Density Estimation*

tendo estimativas de mapas baseados em pontos de referência e agregando-os em um mapa final comum.

Pérez-gonzález et al. (2021) utilizaram a técnica *boustrophedon* para inspeção de usinas fotovoltaicas com VANTs. Foi desenvolvido um algoritmo de voo autônomo com métodos de PRC, apoiado em *Deep Learning*, para segmentar a RoI em imagens pré-definidas da planta fotovoltaica, considerando três técnicas de PRC. O desempenho e o consumo energético do VANT foram avaliados usando dois modelos diferentes de aeronaves (Typhoon e 3DR Iris). Os testes variaram a largura do PRC e as métricas de consumo. Os resultados desses experimentos evidenciaram que a decomposição celular exata de *boustrophedon* e a cobertura *wavefront*² baseada em grade apresentaram boa eficiência quando associadas à largura do PRC e à área da planta fotovoltaica. Por fim, os autores estabeleceram uma relação entre o tamanho da área da usina e o melhor tipo de aeronave para realizar a cobertura. Os resultados obtidos auxiliaram na previsão do consumo de energia e na determinação do VANT adequado para a inspeção.

3.1.2 Métodos Baseados em Decomposição Celular Aproximada

O método de decomposição celular aproximada, ou baseado em grade, decompõe a área de destino em unidades (células) menores. Estas células seguem a mesma proporção, via de regra quadradas, mas podem ser representadas em uma estrutura trigonal ou hexagonal, para que sua união se aproxime da região de interesse. As células variam de acordo com os sensores abordo da aeronave. Nesta revisão, foram consideradas publicações que discutem o PRC com informações completas, quando se tem conhecimento prévio da RoI.

Uma abordagem de cobertura para agricultura de precisão envolvendo uma equipe de quadricópteros heterogêneos é discutida por Barrientos et al. (2011). Uma das principais contribuições deste trabalho é um gerenciador de partição automático de uma fase, que se baseia na negociação entre VANTs levando em consideração suas capacidades. Quando cada VANT recebe sua tarefa, um algoritmo PRC determina o melhor caminho para cada VANT seguir. Neste trabalho, os autores utilizaram a decomposição celular de uma área de interesse e aplicaram um algoritmo *Flood-Fill*³ para obter as subáreas. Esta abordagem tem várias desvantagens. Por exemplo, esta abordagem resultará em células parciais perto das bordas da área. O algoritmo também será reiniciado quando o preenchimento não puder prosseguir. Por outro lado, esse algoritmo pode ser considerado superior aos algoritmos de partição exata, especificamente para tarefas nas quais os VANTs devem visitar cada célula em suas subáreas

²Também chamado de algoritmo térmico, ou algoritmo de expansão de frente de onda, especializado com busca em largura para evitar mínimos locais.

³Algoritmo de preenchimento de inundação, também chamado de preenchimento de semente, é um algoritmo que determina a área conectada a um determinado nó em uma array multidimensional.

e não invadir as subáreas vizinhas. Os autores não forneceram sua implementação, portanto, é difícil avaliar adequadamente essa abordagem.

Já o trabalho de Valente et al. (2013) apresenta um aprimoramento de um algoritmo de busca de harmonia existente, que é um algoritmo baseado em população que busca a melhor configuração quando um critério de parada é atendido. O algoritmo foi testado em uma parcela de vinhedo para três quadricópteros. Este trabalho, semelhante ao anterior, utiliza uma decomposição celular aproximada, conforme mostrado na Figura 16, onde cada célula corresponde a uma amostra de imagem obtida pelo campo de visão da câmera acoplado ao VANT. A área é convertida em um gráfico regular rotulado numericamente pelo algoritmo *wavefront*, que é um algoritmo de inundação que marca a vizinhança adjacente das células.

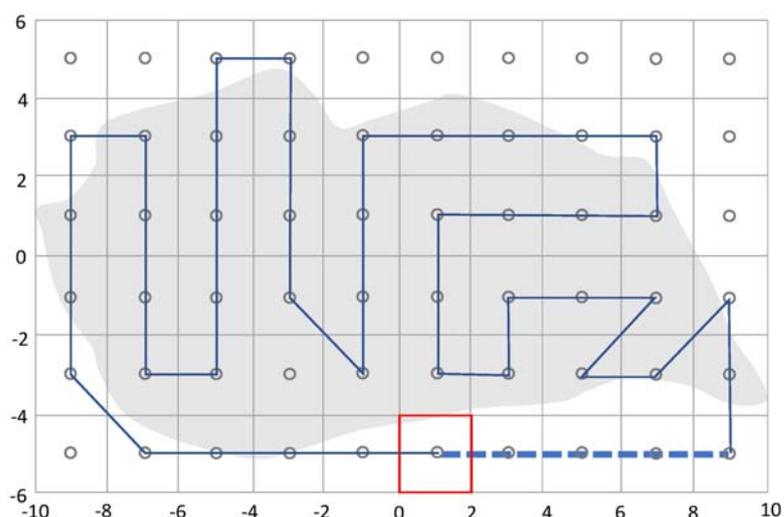


Figura 16 – Método baseado em grade em uma Rol de formato irregular.

Fonte: Extraído de Cabreira; Brisolará; Ferreira Jr (2019).

Outra abordagem que explora o algoritmo *Wavefront* e a decomposição celular aproximada aplicado em áreas agrícolas é apresentada por Nam et al. (2016). O caminho de cobertura é obtido sobre uma Rol rotulada de acordo com o *Wavefront*, conforme mostrado na Figura 17a, e suavizado por meio de um algoritmo de interpolação cúbica, ilustrado na Figura 17b. Diferente de Valente et al. (2013), os autores apresentam um novo critério de otimização para o tempo de execução da missão com base no comprimento do caminho e no número de manobras de conversão.

No trabalho Berger et al. (2016), os autores consideraram o problema de escanear uma área com uma equipe de VANTs. A principal contribuição foi a formulação de um problema de otimização seguindo o requisito estabelecido por um operador, como tempo mínimo de voo ou necessidade de obtenção de alta densidade de pontos dentro de um limite de tempo. Em seu trabalho, o algoritmo executou várias iterações para otimizar o requisito especificado, elevando o tempo de processamento para mapear a área e gerar as trajetórias.

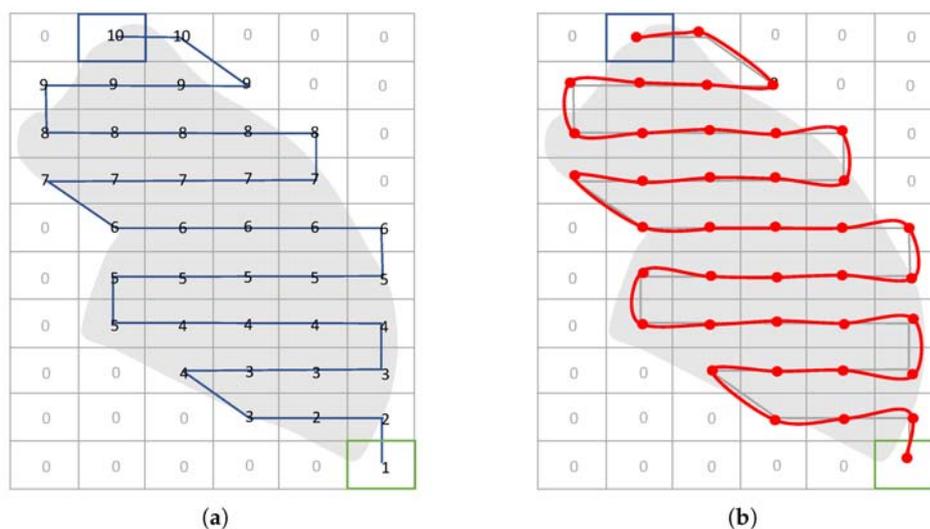


Figura 17 – **Trajétoria ótima**: (a) Wavefront; (b) Interpolação cúbica.

Fonte: Extraído de Cabreira; Brisolara; Ferreira Jr (2019).

No estudo conduzido por Huang et al. (2020), uma estratégia baseada em decomposição celular aproximada sem repetição, suportada por uma estrutura hierárquica, foi apresentada. Foram desenvolvidas funções de custo considerando o campo visual e velocidade de movimento dos VANTs em diferentes tipos de cobertura do solo, levando em conta regiões com superfície irregular. O autor utilizou o aprimorado algoritmo de cobertura *Spanning Tree Coverage* (STC) para concluir o planejamento do caminho de cada VANT. Este algoritmo gera uma árvore de cobertura mínima a partir de um gráfico, que representa o ambiente a ser percorrido, permitindo que um VANT cubra toda a área com o menor caminho possível, garantindo que todos os nós (ou pontos de interesse) sejam visitados sem repetição de trajetórias. Os experimentos foram realizados em simulação e mostraram melhorias na escalabilidade do algoritmo em comparação com os algoritmos de planejamento de rota convencionais de PRC.

3.1.3 Métodos Baseados em Diagrama de Voronoi

O Diagrama de Voronoi é uma técnica versátil de particionamento do espaço entre um conjunto de pontos (Toth; O’rourke; Goodman, 2017). Em sua concepção inicial, é um modelo que divide uma superfície em polígonos, de forma que cada segmento corresponda a uma região específica (Aurenhammer; Klein, 2000). Algumas pesquisas têm aplicado o método do Diagrama de Voronoi na decomposição de áreas em diferentes cenários com a utilização de VANTs. A seguir, são apresentados alguns trabalhos que utilizam essa técnica. A Tabela 3 apresenta um resumo das principais soluções baseadas no Diagrama de Voronoi voltadas para o PRC.

O algoritmo do Diagrama de Voronoi para resolver o problema de planejamento de trajetória de VANT foi introduzido por Bortoff (2000). O autor conduziu avaliações do algoritmo em dois casos, nos quais havia 10 obstáculos conhecidos e 2 radares

Tabela 3 – Contribuições dos Métodos Baseados em Diagrama de Voronoi

Autor	Estratégia
Bortoff (2000)	Introduziu o algoritmo de PRC baseado no Diagrama de Voronoi para VANTs, testado com 10 obstáculos e 2 radares. Demonstrou o caminho ideal e manteve uma distância segura das ameaças.
Chen; Li; Chen (2017)	Desenvolveram um algoritmo aprimorado de Voronoi integrado à teoria da consistência, prevenindo colisões e otimizando os trajetos de múltiplos VANTs em ambientes estáticos.
Srivastava; Pandey; Sharma (2020)	Utilizaram Voronoi para calcular pontos ideais de pulverização em áreas agrícolas, otimizando as rotas via o Problema do Caixeiro Viajante (TSP), considerando restrições operacionais e ajustes em tempo real.
Jensen-nau; Hermans; Leang (2020)	Proposição de um algoritmo de geração de trajetórias com restrições de energia, otimizando caminhos em áreas convexas e não-convexas sob limitações energéticas.
Pehlivanoglu; Pehlivanoglu (2021)	Combinaram Algoritmo Genético, Otimizador de Colônia de Formigas e Voronoi para otimizar o PRC em ambientes tridimensionais, reduzindo significativamente o tempo computacional.
Collins et al. (2021)	Desenvolveram o algoritmo SCoPP, um planejamento de rotas escalável baseado em Voronoi para equipes de VANTs em áreas não convexas, resolvendo conflitos com um método de leilão de células.
Skorobogatov et al. (2021)	Proposição de um método para planejamento de voo multi-VANT, decompondo áreas não convexas e zonas de exclusão aérea usando triangulação de Delaunay adaptada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

aleatórios. Em ambos os casos, os resultados das simulações demonstraram que o algoritmo do Diagrama de Voronoi gerou um comprimento de caminho ideal, mantendo uma distância segura das ameaças.

Em outro trabalho, Chen; Li; Chen (2017) desenvolveram um algoritmo aprimorado do Diagrama de Voronoi integrado à teoria da Consistência (Wei et al., 2015) para resolver o problema de planejamento de caminhos múltiplos de VANTs. Isso permitiu considerar a consistência das trajetórias dos VANTs ao planejar os caminhos, além de evitar colisões entre os VANTs e otimizar os trajetos para minimizar o comprimento total do caminho percorrido. Os experimentos foram realizados em um ambiente estático, o que significa que as condições do ambiente não mudaram durante a simulação. Três VANTs foram usados para testar o desempenho do algoritmo aprimorado do Diagrama de Voronoi. Os resultados da simulação mostraram que o método proposto foi eficaz em prevenir colisões entre os VANTs e otimizar o comprimento do caminho percorrido por eles.

Srivastava; Pandey; Sharma (2020) propõem um método para calcular a posição ideal dos pontos de pulverização em áreas agrícolas estressadas⁴. A rota de cober-

⁴Regiões que estão enfrentando condições adversas ou de estresse, como doenças, pragas, defici-

tura é gerada utilizando algoritmos de otimização e técnicas de segmentação espacial, onde a área de interesse é subdividida em regiões menores por meio do Diagrama de Voronoi. Cada região é tratada como uma célula de cobertura com um ponto central ou centroide, definido como o principal ponto de interesse para a rota. O planejamento de rotas é então abordado como um problema de cobertura, utilizando o problema do caixeiro-viajante (TSP) para otimizar a ordem de visitação das células, minimizando a distância total percorrida pelo VANT. Esse processo considera as limitações operacionais do VANT, como a autonomia da bateria, e permite ajustes em tempo real para lidar com obstáculos ou mudanças nas condições de voo.

Jensen-nau; Hermans; Leang (2020) descrevem um algoritmo de geração de trajetórias baseado em Voronoi para VANTs com restrições de energia. Essa abordagem busca solucionar uma variação do problema de PRC, onde a cobertura completa de uma área não é possível devido a limites de comprimento de caminho impostos pelas restrições de energia. Os autores propõem a utilização das propriedades do Diagrama de Voronoi para gerar um campo potencial que permita ao robô se movimentar entre pontos de interesse, levando em consideração as restrições de comprimento de caminho impostas pela limitação de energia. Os resultados de simulações e experimentos físicos mostraram que o método proposto é capaz de gerar caminhos eficientes em áreas convexas e não-convexas. Comparado com outros métodos, o algoritmo sugerido alcança um bom equilíbrio entre tempo de execução e otimização, apresentando tempos de execução superiores aos da otimização direta, custos de cobertura mais baixos do que os caminhos de cobertura em vai-e-volta, e desempenho moderadamente melhor em ambas as métricas em comparação com o método mais conceitualmente semelhante.

No trabalho de Pehlivanoglu; Pehlivanoglu (2021) é apresentada uma solução para o PRC combinando Algoritmo Genético, Otimizador de Colônia de Formigas e Diagrama de Voronoi. Foram propostas três abordagens visando o aprimoramentos na estrutura básica do algoritmo genético. A primeira inclui os vértices de Voronoi como pontos de interesse adicionais para evitar colisão, a segunda consiste em centros de cluster que formam vértices de Voronoi como pontos de interesse suplementares e a terceira compreende novamente centros de cluster, mas com base em um conjunto de pontos de colisão. Foram realizados experimentos para testar os aprimoramentos em diferentes ambientes tridimensionais, os resultados de desempenho evidenciam que a colisão com a superfície do terreno é um fenômeno local. No contexto apresentado, a utilização do centro do cluster de pontos de colisão tem se mostrado a melhor abordagem para solucionar essa situação. Os resultados preliminares indicam que a terceira proposta oferece caminhos mais eficientes e viáveis para um VANT, além de reduzir significativamente os tempos computacionais.

ências nutricionais, umidade inadequada, entre outros fatores (Srivastava; Pandey; Sharma, 2020).

Collins et al. (2021) apresentam um algoritmo de cobertura chamado de SCoPP (*Scalable Coverage Path Planning*) - que aborda a problemática de planejamento de trajetória para equipes de robôs aéreos em áreas não-convexas. O algoritmo consiste em 5 etapas: seleção de área, discretização, particionamento de área, leilão de células em conflito e planejamento de caminho. Inicialmente, o usuário fornece informações iniciais, o polígono é convertido em um espaço discreto, que é particionado baseado em diagrama Voronoi, células em conflito são leiloadas para distribuir a carga de trabalho, e, finalmente, é feito o planejamento de caminho com pontos de referência otimizados para cada robô. O algoritmo proposto foi avaliado em simulação, demonstrando sua eficácia em termos de cobertura da área, duração da missão e consumo de energia, contudo, o custo computacional aumentou a medida que a área de cobertura e o número de VANTs cresce. Os autores também não consideram explicitamente a dinâmica de colisão entre os robôs, o que pode levar a um planejamento de trajetória sub-ótimo em situações onde há risco de colisão. Além disso, o artigo assume que a trajetória planejada é seguida com precisão pelos robôs, o que pode não ser totalmente viável em cenários reais, cujo trabalho não avaliou.

No trabalho de Skorobogatov et al. (2021) é proposto um método para planejamento de voo em sistemas de múltiplos VANTs que aborda a decomposição de áreas de polígonos não convexas e a atribuição de trajetórias. O algoritmo leva em consideração algumas restrições, como as capacidades de cada VANT, a cobertura do terreno e a distância mínima entre os VANTs. A RoI pode ser convexa ou não convexa e possuir zonas de exclusão aérea. Além disso, o artigo também apresenta um método para atribuir trajetórias aos VANTs, com o objetivo de minimizar o tempo total de voo e evitar colisões entre eles. Esse método leva em consideração a velocidade dos VANTs (que podem variar durante a missão), as zonas de exclusão e as prioridades de cada missão. A altura do voo depende da missão e do terreno a ser coberto. Quatro soluções, baseadas no algoritmo de Hert e Lumelsky (Hert; Lumelsky, 1998), foram testadas com o objetivo de melhorar a compacidade das partições. Para obter partições mais convexas, Skorobogatov et al. (2021) desenvolveram um algoritmo adaptado da triangulação restrita de Delaunay (De berg et al., 1997)⁵. Também demonstraram como a forma das partições (e a sua compacidade) influencia o desempenho do voo em um cenário de caso real. A padrão vai-e-volta é adotado para a cobertura da área por múltiplos VANTs. Os autores não mencionam a distância entre linhas utilizada para gerar as rotas de cobertura e as rotas geradas não levam em consideração as restrições de bordas da lavoura, que são tratadas como partições no artigo. No contexto do controle biológico de pragas, é importante que a trajetória do VANT esteja contida na partição

⁵A triangulação restrita de Delaunay pode ser considerada um tipo de Diagrama de Voronoi. Skorobogatov et al. (2021) utilizaram um biblioteca Python, disponível em: <https://sect.readthedocs.io/> para dividir a área em triângulos

(polígono) para aumentar a eficiência da dispersão.

3.1.4 Métodos Sem Decomposição da Região de Interesse

As estratégias de PRC sem decomposição geralmente são realizadas sobre áreas de interesse de formas regulares e não complexas com um único VANT. Os padrões de voo mais utilizados também são o vai-e-volta e espiral (outros padrões são discutidos em Andersen (2014)). A literatura mais recente que trata o PRC sem decomposição é a seguinte.

Uma análise do efeito do vento no tempo de execução da cobertura por um VANT de asa fixa foi apresentada em Coombes; Chen; Liu (2017). Usando uma RoI circular coberta por movimentos vai-e-volta, os autores exploram diferentes direções de varredura variando de 0 a 360 graus em incrementos de 10 graus com uma direção de vento predefinida com seis velocidades diferentes. De acordo com experimentos simulados, a direção de cobertura deve ser perpendicular à direção do vento para minimizar o tempo de voo. Entretanto, as manobras de giro são diretamente afetadas pela escolha do sentido perpendicular (horário ou anti-horário). Os autores afirmam que em cenários mais complexos decompostos em células, a distância de transição entre essas células tem mais impacto no tempo de voo do que na direção do vento.

Soluções com preocupação energética também foram estudadas, como nos trabalhos de Di Franco; Buttazzo (2016) e Cabreira et al. (2018a) e Cabreira et al. (2019). Ambos derivam do modelo proposto por Di Franco; Buttazzo (2015). Considerando áreas em formato regular, menos complexos, Di Franco; Buttazzo (2016) apresentaram um algoritmo de vai-e-volta consciente de energia (E-BF) para fotogrametria. O algoritmo encontra o primeiro vértice da borda mais longa e calcula a direção da varredura paralela a ele. Em seguida, ele calcula o número de linhas e *waypoints*, a distância entre as linhas e os *waypoints* consecutivos e as taxas de sobreposição. Finalmente, uma linha reta conecta o vértice mais distante ao vértice inicial. Uma melhoria no algoritmo também é apresentada para evitar locais já explorados, conforme mostrado na Figura 18a. Outra opção, é utilizar o caminho de retorno como uma opção cobertura, isso implica em um número de linhas mais uniforme e o aumento da taxa de sobreposição, conforme ilustrado na Figura 18b (Cabreira; Brolara; Ferreira Jr, 2019).

Cabreira et al. (2018a) propuseram um algoritmo voltado para RoI de formato regular, utilizando um padrão de voo em espiral consciente de energia (E-Spiral). Este algoritmo foi aplicado para fotogrametria que considera o sensor da câmera a bordo do VANT e a altitude de voo para aplicar a sobreposição necessária para garantir a cobertura completa. O algoritmo gera a rota passando por cada vértice da área. Depois de percorrer a primeira camada de cobertura, o algoritmo começa a reduzir o raio movendo o veículo em direção ao ponto central. A Figura 19 ilustra o algoritmo proposto,

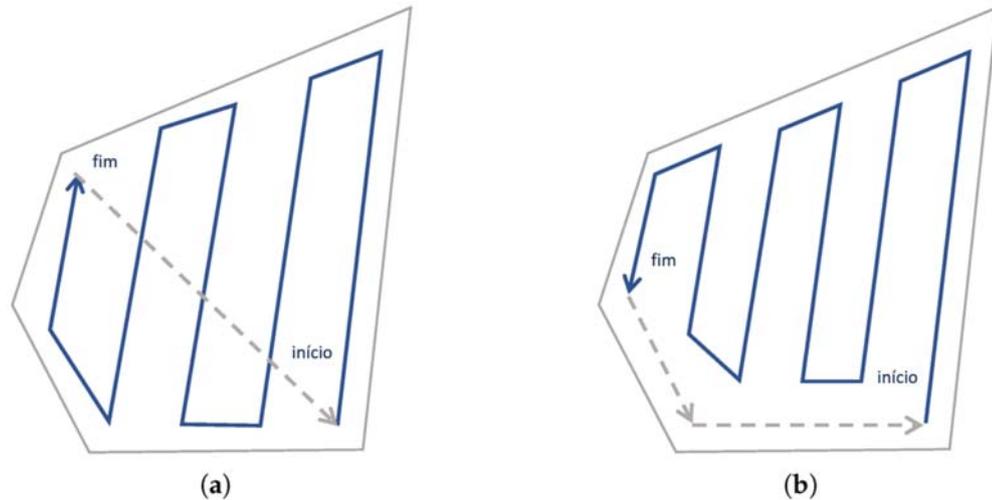


Figura 18 – **Algoritmo de cobertura E-BF**: (a) N.º. ímpar de linhas; (b) N.º. par de linhas.
Fonte: Adaptado de Cabreira; Brisolara; Ferreira Jr (2019).

contendo a Rol (vermelho), a rota planejada (azul), o caminho realizado durante os voos reais (branco), a posição inicial (“x” verde) e a posição final (“x” vermelho) (Cabreira et al., 2018a). Como o algoritmo realiza curvas com ângulos mais amplos, reduz os períodos de aceleração e desaceleração do VANT, proporcionando uma economia de energia mais efetiva do que a proposta por Di Franco; Buttazzo (2016).

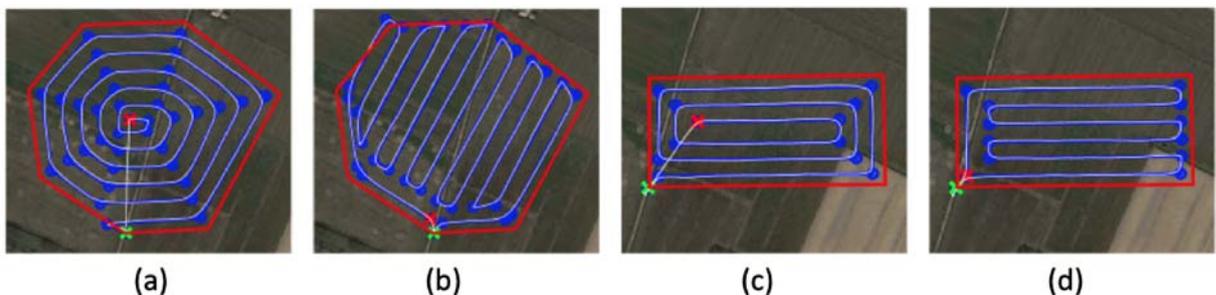


Figura 19 – **Trajetoórias geradas com algoritmos E-Spiral e E-BF para áreas retangulares e poligonais**. (a) Algoritmo E-Spiral em área poligonal. (b) Algoritmo E-BF em área poligonal. (c) Algoritmo E-Spiral em área retangular. (d) Algoritmo E-BF em área retangular.

Fonte: Extraído de Cabreira et al. (2018a).

Um algoritmo planejamento de cobertura baseado em grade consciente de energia para uma área alvo de formato irregular foi proposto por Cabreira et al. (2019). Os autores apresentaram um modelo mais prático, considerando a energia consumida pelos VANTs ao invés de minimizar o número de voltas de estudos anteriores. Resultados experimentais entre 16 a 48 células da grade mostraram que este algoritmo possui um tempo computacional menor em comparação com o algoritmo usado por Valente et al. (2013).

Artemenko et al. (2016) também observaram que um VANT gasta muito tempo e energia fazendo curvas, uma vez que o veículo deve desacelerar, girar e acelerar toda vez que realiza essas manobras. Assim, desenvolveram um algoritmo que modi-

fica trajetórias convencionais usando curvas de Bézier, suavizando as curvas em um determinado caminho para minimizar desaceleração e aceleração antes e depois do ponto de virada. Os autores concluíram que seu algoritmo poderia reduzir o gasto de energia em comparação com os algoritmos convencionais. Restrições, como o movimento do VANT e a localização da câmera, podem ser superadas usando programação linear inteira.

3.2 Avanços Tecnológicos no Controle Biológico com VANT

O uso de VANTs no controle biológico de pragas tem sido explorado em diversas pesquisas, destacando-se tanto pela diversidade de abordagens quanto pelas limitações encontradas. A pesquisa de Rangel (2016a,b), por exemplo, utilizou VANTs de asa fixa e rotativa, em conjunto com uma estação de controle para definir o plano de ação. Embora o estudo tenha demonstrado a viabilidade de VANTs para o controle biológico, ele não apresentou inovações no planejamento de rotas de cobertura. O plano de voo e a escolha dos locais de deposição dos inimigos naturais foram realizados manualmente, o que exigiu mão de obra especializada, elevando o tempo e o custo da missão.

Uma tentativa de otimizar o processo foi proposta por Freitas et al. (2018), que combinaram diferentes algoritmos para ajustar o lançamento de cápsulas contendo *Trichogramma*, um parasitoide amplamente utilizado no controle biológico. Essa proposta se destacou ao modelar a dinâmica do vento lateral, reposicionando automaticamente a aeronave para garantir a precisão na liberação das cápsulas. Essa compensação da força do vento foi um passo importante para melhorar a eficiência das operações com VANTs.

Em um trabalho posterior, Freitas et al. (2020) ampliaram essa abordagem com a introdução de algoritmos genéticos para otimizar a rota dos VANTs, levando em consideração a distribuição uniforme das cápsulas e a minimização do tempo de voo. Nessa proposta, os locais de liberação foram definidos em uma grade hexagonal, o que, embora eficaz para a distribuição, não considerou as limitações energéticas do VANT, resultando em manobras frequentes que comprometem a estabilidade e o consumo de energia.

Outra linha de pesquisa relevante é a de Luo et al. (2017), que abordaram a pulverização de pesticidas por VANTs. Utilizando um algoritmo genético adaptado, os autores otimizaram a alocação de tarefas considerando variáveis como tipo de pesticida, temperatura e janelas de tempo. Este trabalho demonstrou vantagens significativas em relação às abordagens manuais, tanto em termos de eficiência quanto de precisão da pulverização.

Na análise de patentes, vários inventos propuseram soluções inovadoras para o

uso de VANTs na agricultura. A invenção de Desa et al. (2013), por exemplo, descreve um VANT semiautônomo para pulverização e monitoramento agrícola, mas carece de um sistema de cálculo de rota para otimizar a liberação de agentes. De forma semelhante, a patente de Burema; Filin (2016) descreve um sistema autônomo de VANTs para controle químico de pragas, mas sua operação em regiões de geometria variada é limitada, uma vez que segue rotas estáticas predefinidas.

Já Choi; Lee (2017) propuseram um dispositivo de controle químico de pragas, acoplável a um VANT, que utiliza câmeras multiespectrais para identificar áreas infestadas e planejar o voo. No entanto, o foco principal está no dispositivo de dispersão, e não no planejamento de voo em si. Outro trabalho de Wunsche (2019) também apresentou uma solução para dispensar líquidos e sólidos com precisão, mas, novamente, não detalhou explicitamente o algoritmo de planejamento de rota, o que limita a compreensão da eficiência do sistema proposto.

As pesquisas de Nicodemo (2019, 2020) e Machado; Matias (2019) apresentaram sistemas embarcados multiuso para a liberação de agentes biológicos, projetados para diversos meios de transporte, incluindo VANTs. Contudo, ambos os estudos focaram mais na interface de comunicação e no controle da liberação dos agentes, sem abordar inovações no planejamento de rotas de voo para uma cobertura eficiente. Matte; Santos (2019) propõe um equipamento eletromecânico, acoplável em VANT, para liberação de pulpa do agente biológico *Cotésia flavipes*⁶, inimigo natural da lagarta do colmo, praga de plantas da família das *Poaceae*, principalmente a cana-de-açúcar. Novamente, a operação do VANT permanece manual, sem um planejamento de rotas automatizado.

Embora haja várias propostas interessantes envolvendo o uso de VANTs no controle biológico, a maioria das soluções encontradas foca em aspectos específicos como dispositivos de liberação ou melhorias de precisão, sem integrar um planejamento otimizado de rotas que leve em consideração variáveis como energia, eficiência de cobertura e dinâmica de voo. Portanto, há uma lacuna significativa no desenvolvimento de sistemas de planejamento de rotas que possam operar de forma totalmente autônoma, garantindo tanto a eficiência na liberação de agentes biológicos quanto a segurança no retorno do VANT à base.

3.3 Considerações Finais

Neste capítulo, foram abordadas algumas estratégias que se relacionam com o problema de PRC com VANT, e a utilização destes veículos como plataforma para dispersar inimigos naturais no controle biológico de pragas. A análise desses trabalhos permitiu compreender e correlacionar diversas estratégias, enquanto outros foram

⁶Um tipo de parasitoide do tipo ovo-larva (Embrapa, 2023)

úteis para identificar ambivalências e fornecer uma visão abrangente das aplicações.

Os estudos recentes sobre PRC com foco na eficiência energética na agricultura de precisão têm se concentrado no uso da fotogrametria para identificar pragas e doenças. Algoritmos de movimento de vai-e-volta e em espiral foram propostos para melhorar a eficiência energética das missões aéreas. No entanto, essas soluções são limitadas a áreas regulares (retângulos, quadrados ou polígonos simples) e não consideram regiões complexas ou outros fatores relevantes para a dispersão de agentes biológicos.

Para lidar com a cobertura eficiente de áreas agrícolas usando vários VANTs simultaneamente (enxames), alguns estudos dividiram a área de interesse em áreas menores (subáreas), considerando as capacidades relativas dos VANTs para otimizar o consumo de energia. No entanto, essas abordagens não são flexíveis na escolha de locais de decolagem e pouso, nem a geração de rotas com base na distância entre linhas, dificultando sua aplicação em cenários reais. Além disso, o uso de múltiplos VANTs requer tarefas adicionais de controle, organização e coordenação, aumentando os custos e exigindo experiência dos operadores.

As soluções que empregam VANTs para controle biológico apresentam deficiências quanto à geração de trajetórias. Essas propostas estão diretamente relacionadas à tecnologia de criação de dispositivos inteligentes de dispersão, sem apresentar uma solução inteligente integrada aos VANT para melhorar o planejamento de missões. Além disso, também carecem de flexibilidade na escolha dos locais de decolagem e pouso no campo agrícola, que está sujeito a variações climáticas, sazonais, níveis de infestação e outros fatores. Portanto, é possível explorar estratégias que são flexíveis e aprimoradas para o controle biológico no cenário agrícola.

O arcabouço conceitual desta pesquisa permitiu uma análise detalhada dos métodos utilizados, bem como a concepção de experimentos e a avaliação dos resultados. Isso contribuiu para a compreensão das técnicas aplicadas nesta tese. Nesta tese foram admitidos os seguintes métodos: decomposição da rota completa em sub-rotas e a decomposição da área de interesse em subáreas apoiada no diagrama de Voronoi, cobertura utilizando o padrão vai-e-volta de acordo com o tipo de partição gerada. A seguir, no Capítulo 4 é descrita a integração das técnicas referidas.

4 PLANEJAMENTO DE ROTAS DE COBERTURA DE VANTS NO CONTROLE BIOLÓGICO EM GRANDES ÁREAS

Este capítulo aborda o aprimoramento da geração de trajetórias para VANTS na dispersão de agentes biológicos em grandes áreas, com foco no particionamento de rotas em sub-rotas e na segmentação de áreas por meio do diagrama de Voronoi. Essas técnicas são integradas aos requisitos e restrições específicos das missões de controle biológico. A abordagem proposta considera, de maneira integrada, aspectos que anteriormente não foram explorados em conjunto por outras pesquisas, como a flexibilidade no planejamento e replanejamento das rotas, o ajuste da distância entre as linhas de voo, a conformidade com os limites das bordas das lavouras e a geração de rotas que respeitem a capacidade de bateria da aeronave.

A flexibilidade no planejamento (ou replanejamento) das rotas refere-se à capacidade de ajustar e adaptar as rotas de voo para lidar com diferentes formatos de áreas e situações imprevistas no cenário real, como bloqueios de estradas ou eventos naturais (erosão e inundação), levando em conta o local de decolagem e pouso escolhido. Essa capacidade é essencial para garantir as operações em condições variadas e desafiadoras.

Adicionalmente, a solução proposta inclui a capacidade de ajustar a distância entre linhas e respeitar as bordas das lavouras. Isso permite gerar rotas de forma dinâmica e precisa, assegurando que as rotas respeitem rigorosamente os limites das lavouras. Dessa maneira, a solução evita a liberação indesejada de agentes biológicos fora das áreas-alvo, aumentando a eficácia das operações e minimizando desperdícios. Essa precisão é crucial para otimizar a aplicação dos agentes biológicos e garantir a cobertura eficiente das áreas tratadas.

A proposta também abrange a velocidade e altitude de voo para cada missão. Esses parâmetros foram considerados durante a geração dinâmica das rotas, pois estão diretamente relacionados à gestão da capacidade da bateria da aeronave, garantindo um retorno seguro à base e maior controle sobre a duração do voo.

No contexto desta tese, é importante ressaltar que o dispositivo de dispersão fornecido pela empresa parceira foi utilizado para avaliar o impacto do *payload* durante

os voos. Esse dispositivo foi disponibilizado para fins de pesquisa. Uma vez que os experimentos planejados não incluem simulações, todos os detalhes relevantes para as missões foram considerados e serão detalhados no Capítulo 5.

Na sequência, a Seção 4.1 descreve o método (*framework*) proposto, enquanto a Seção 4.2 explora os algoritmos de planejamento de rotas de cobertura desenvolvidos, ambos estabelecidos como hipóteses desta tese. Por fim, a seção 4.3 apresenta as considerações finais do capítulo.

4.1 Framework para Controle Biológico com VANT

Com o intuito de gerenciar as missões em um cenário real, organizá-las e fornecer um melhor planejamento de rotas de cobertura para o VANT, as etapas do *Framework* proposto são resumidos no diagrama da Figura 20.

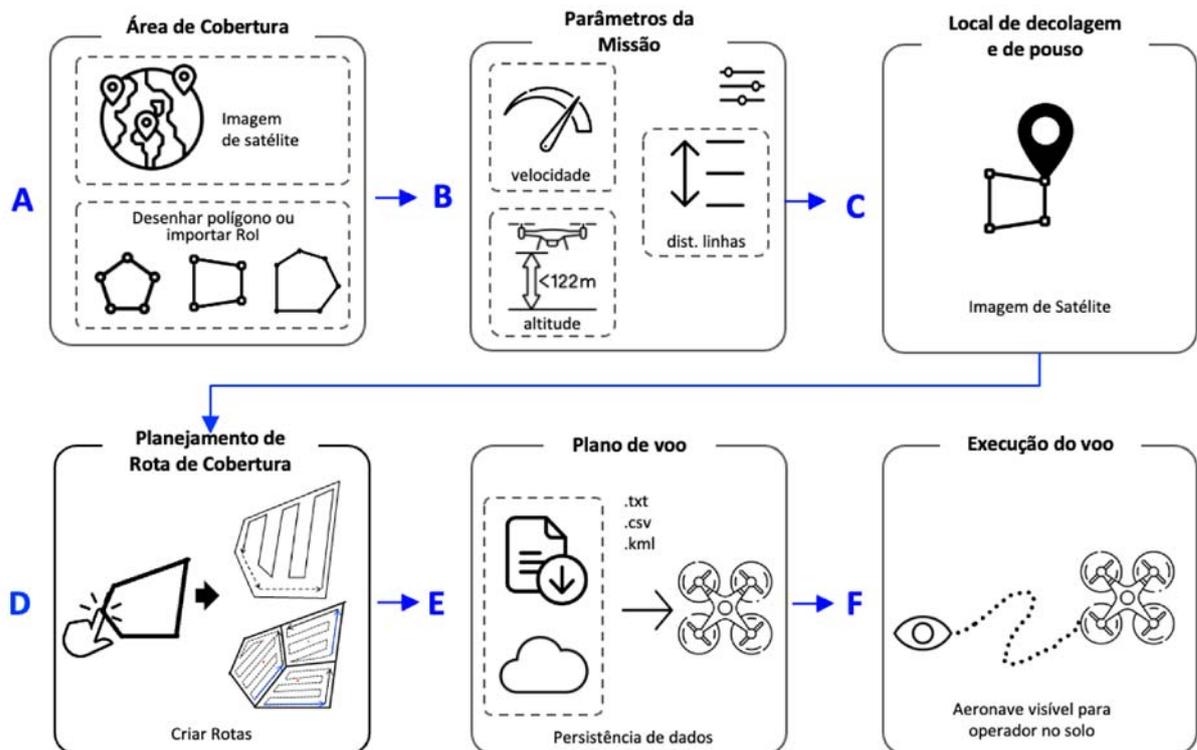


Figura 20 – **Etapas do processo:** (A) Rol, área de atuação, (B) parâmetros da missão, (C) decolagem e pouso, (D) algoritmos de PRC, (E) gera planos de voo, *waypoints* e (F) execução da missão.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na sequência, uma explicação das etapas é apresentada:

A - Área de Cobertura: Nesta etapa, realiza-se a delimitação da Área de Interesse (Rol), na qual será aplicado o controle biológico. Essa delimitação é realizada por meio da utilização de um mapa contendo imagens de satélite e uma ferramenta de desenho de polígonos.

- B - Parâmetros da missão:** Nesta etapa, são estabelecidos os parâmetros da missão, englobando a velocidade, altitude, distância entre linhas e tempo máximo de voo. Essa definição considera os conhecimentos especializados do controle biológico para garantir a eficácia e segurança da operação, os quais podem incluir considerações sobre as necessidades das pragas-alvo, condições ambientais, eficácia do controle biológico e a experiência prática em operações similares. Esses aspectos são cruciais para a elaboração de um plano de voo que atenda aos objetivos específicos de controle de pragas e assegure a efetividade da aplicação dos agentes biológicos.
- C - Local de decolagem e de pouso:** são definidos os pontos de partida e de conclusão da rota de cobertura. Esses pontos podem ser escolhidos arbitrariamente por um operador humano, selecionando qualquer vértice do polígono definido na Etapa (A);
- D - Planejamento de rotas de cobertura:** é realizado o planejamento das rotas de cobertura com base na seleção do ponto de partida e na configuração dos parâmetros da missão. Utilizando um algoritmo específico de PRC, a trajetória é gerada automaticamente. Mais detalhes sobre os algoritmos utilizados são apresentados na Seção 4.2. Além disso, é calculado o tempo total estimado de voo levando em consideração a velocidade adotada e a distância percorrida pelo VANT.
- E - Planos de voo:** a rota de cobertura completa e pronta para o voo é gerada e salva em arquivo no formato compatível (arquivo de *waypoints*) com as controladoras de voo mais comuns no mercado¹. Dependendo da estratégia de cobertura escolhida, o sistema pode gerar uma única rota ou múltiplas rotas. O(s) arquivo(s) contendo o(s) plano(s) de voo pode(m) então ser carregado(s) no VANT, que executará o voo pré-programado de acordo com a rota definida.
- F - Execução do voo:** os voos são realizados para aplicação dos agentes biológicos na área agrícola, seguindo os planos de voo gerados na etapa anterior. É importante destacar que, a cada novo voo, o operador humano deve selecionar e carregar a rota desejada na controladora de voo, garantindo que o VANT siga o trajeto planejado de forma precisa e segura.

As etapas organizam o processo de PRC para controle biológico, antes realizada de forma manual. Assim, o operador humano apenas realiza o pré-planejamento da missão ao definir a área de cobertura, configura os parâmetros e escolhe o local de decolagem/pouso nas etapas (A), (B) e (C) respectivamente. A partir disso, é possível

¹Formatos suportados .txt, .csv, .kml ou kmz

selecionar o algoritmo de cobertura desejado de maneira rápida e intuitiva **(D)**. As etapas **(E)** e **(F)** representam o resultado do processo de planejamento.

4.2 Algoritmos para Divisão de Grandes Áreas

Nesta seção, são abordadas as hipóteses desta tese. Os algoritmos visam otimizar o tempo e os recursos necessários para realizar a cobertura completa de grandes áreas, além de possibilitar a criação de rotas de forma flexível. Para isso, são exploradas a decomposição da rota completa em sub-rotas (Seção 4.2.1) e a decomposição da área de interesse em subáreas (Seção 4.2.2). Os algoritmos correspondem à Etapa **D** do *framework* ilustrado na Figura 20.

4.2.1 Decomposição da Rota Completa em Sub-Rotas

Com o objetivo de decompor eficientemente uma rota de uma grande área de cobertura em sub-rotas, foi proposto um algoritmo de ordem polinomial. A sua complexidade temporal de $O(n^2)$, onde n representa o número de vértices do polígono. Pela mesma razão, sua implementação é agnóstica, assim, pode ser executada em diferentes plataformas. O Algoritmo 1 apresenta o algoritmo vai-e-volta para o controle biológico, que permite a decomposição de uma rota completa em sub-rotas.

A ideia geral da entrada do algoritmo consiste em um polígono representado por um conjunto de vértices v_1, v_2, \dots, v_n e a posição inicial/final definida por P_{start} , indicando o local de decolagem e pouso para a missão. Cada vértice do polígono é representado por dois valores: latitude e longitude.

O primeiro passo do algoritmo (linha 1) é calcular a maior aresta L_{edge} do polígono, que será utilizada como referência para a orientação do movimento de vai-e-volta. Em seguida, o algoritmo calcula o vértice mais distante V_{edge} em relação a essa aresta (linha 2) e determina a distância entre L_{edge} e V_{edge} (linha 3).

Após essa análise inicial, o algoritmo desenha um polígono reduzido dentro do polígono original (linha 4). Esse polígono reduzido é crucial para afastar os limites da rota de planejamento das arestas externas, evitando que a rota se aproxime demais dos limites. A redução é feita considerando metade da distância entre as linhas paralelas que serão geradas posteriormente. Em seguida, o algoritmo desenha e expande as linhas paralelas pl dentro do polígono reduzido (linha 5), alinhando-as de acordo com o ângulo α da maior aresta L_{edge} .

Para gerar os pontos de interseção necessários para o movimento de vai-e-volta, o algoritmo percorre todas as linhas paralelas e os vértices do polígono (linhas 7 a 11), calculando os pontos de interseção i_p entre eles (linha 9). Esses pontos de interseção são fundamentais para formar o padrão de vai-e-volta que cobrirá a área delimitada pelo polígono reduzido.

Algoritmo 1 Algoritmo vai-e-volta para CB

Entrada: Um conjunto de vértices $\{v_1, \dots, v_p\}$ e a posição inicial P_{start}

Saída: Um conjunto de *waypoints* $\{w_1, \dots, w_p\}$

- 1: Calcular a maior aresta L_{edge} do polígono
 - 2: Calcular o vértice mais distante V_{edge} em relação à maior aresta L_{edge}
 - 3: Calcular a distância entre L_{edge} e V_{edge}
 - 4: Desenhar polígono reduzido dentro do polígono original para afastar os limites da rota das arestas, considerando metade da distância entre linhas
 - 5: Desenhar e expandir linhas paralelas pl dentro do polígono reduzido
 - 6: **/* Gerando os pontos de interseção para as pl do vai-e-volta da fase 02 */**
 - 7: **para** $i = 1$ **até** pl **faça**
 - 8: **para** $j = 1$ **até** v_p **faça**
 - 9: Calcular os pontos de interseção i_p de pl para cada v_j
 - 10: **fim para**
 - 11: **fim para**
 - 12: **/* Gerando a rota da fase 01 - teste duplo (sentido horário e anti-horário) */**
 - 13: **para** $i = 1$ **até** 2 **faça**
 - 14: Percorrer as arestas do polígono interno entre o ponto de partida P_{start} e o ppi
 - 15: Calcular a distância percorrida através das arestas entre os dois pontos, P_{start} e ppi
 - 16: **fim para**
 - 17: Gerar a sub-rota da fase 01 SR_{01} com a sequência de vértices contendo a menor distância entre os dois pontos: P_{start} e ppi
 - 18: **/* Gerando a rota da fase 03 - teste duplo (sentido horário e anti-horário) */**
 - 19: **para** $i = 1$ **até** 2 **faça**
 - 20: Percorrer as arestas do polígono interno entre o último ponto de interseção upi até o P_{start}
 - 21: Calcular a distância percorrida através das arestas entre os dois pontos, upi e P_{start}
 - 22: **fim para**
 - 23: Gerar a sub-rota da fase 03 SR_{03} com a sequência de vértices contendo a menor distância entre os dois pontos: upi e P_{start}
 - 24: Deslocar os pontos de interseção que cruzam as fases 01 e 03 em direção ao interior do polígono
 - 25: **/* Gerando o movimento de vai-e-volta da fase 02 com os pontos de interseção */**
 - 26: **para** $i = 1$ **até** i_p **faça**
 - 27: Inverta os pontos de interseção a cada dois pontos
 - 28: **fim para**
 - 29: Gerar a sub-rota da fase 02 SR_{02} com a sequência de pontos de interseção reordenados
 - 30: Combinar P_{start} , SR_{01} , SR_{02} e SR_{03} para gerar a rota de cobertura completa
-

A seguir, o algoritmo gera a rota inicial da fase 01, conectando o ponto de partida P_{start} ao primeiro ponto de interseção ppi (linhas 13 a 16). Esse procedimento é realizado duas vezes, uma no sentido horário e outra no sentido anti-horário (linha 14), para determinar a rota que apresenta a menor distância percorrida (linha 15). A sub-rota resultante é denominada SR_{01} (linha 17).

De forma semelhante, o algoritmo gera a sub-rota final da fase 03, conectando o último ponto de interseção upi ao ponto de partida P_{start} (linhas 19 a 23). Esse procedimento também é testado nos dois sentidos (linhas 20), e a rota com a menor

distância é selecionada (linha 21), resultando na sub-rota SR_{03} (linha 23).

Após gerar as sub-rotas iniciais e finais, os pontos de interseção que cruzam as fases 01 e 03 são deslocados em direção ao interior do polígono, garantindo que a rota se mantenha dentro dos limites do polígono reduzido (linha 24).

Finalmente, o algoritmo gera a sub-rota da fase 02, organizando os pontos de interseção em um padrão de vai-e-volta (linhas 26 a 29). Para evitar a sobreposição de trajetos e melhorar a eficiência da cobertura, o algoritmo inverte a ordem dos pontos a cada dois segmentos (linha 27). A sub-rota resultante, SR_{02} (linha 29), é então combinada com SR_{01} , SR_{03} e o ponto de partida P_{start} para gerar a rota de cobertura completa (linha 30).

Se a rota gerada inicialmente exceder o limite de tempo, o algoritmo divide a rota original em sub-rotas menores, adicionando pontos de quebra estratégicos. Isso permite que o VANT retorne à base para troca de bateria e, em seguida, pode continuar a missão a partir do ponto de quebra anterior. Dessa forma, a soma de todas as sub-rotas equivale à rota completa originalmente gerada, com a exceção dos pontos de quebra que interrompem momentaneamente a missão para um retorno seguro à base.

Na Figura 21, é ilustrada a aplicação do algoritmo de decomposição da rota completa em sub-rotas. Após a seleção da Rol e definição dos parâmetros de voo, como tempo máximo de voo em 15 min, altitude de 30 m, velocidade média da aeronave em 15 m/s (metros por segundo) e distância entre linhas de 40 m, observa-se que a rota original apresenta três pontos de quebra (pontos vermelhos sob a rota em amarelo), resultando na formação de quatro sub-rotas distintas. Essas sub-rotas são representadas pelas Figuras 21B, C, D e E, respectivamente.

A área total abrangida pela rota completa é estimada em 227,41 ha (equivalente a 2.274.100 m²). A distância total percorrida é de 57,35 Km, com um tempo para conclusão da cobertura de 63 min e 44 s. O cálculo do tempo é estimado², com base na distância percorrida e a velocidade média definida na etapa de planejamento da rota. Ressalta-se que essas informações (tempo e distância percorrida) são estimativas baseadas na rota original e estão sujeitas a ajustes durante o voo. Inicialmente não é calculada a distância entre o ponto de quebra e a base, assim como entre a base e o início da sub-rota subsequente, essas informações podem ser visualizadas ao abrir o arquivo de sub-rota no sistema de forma individual ou no software de controle de voo utilizado pelo piloto, que podem resultar em pequenos ajustes na rota antes do início da missão.

Como resultado do planejamento, é possível gerar um arquivo único da rota completa (Figura 21A) contendo as coordenadas do voo, ou quatro arquivos contendo cada

²Tempo de voo estimado (Δt) obtido pela razão entre distância percorrida (Δs) e a velocidade média do voo (V_m). A V_m é definida pelo operador durante o planejamento da missão: $\Delta t = \Delta s / V_m$.



Figura 21 – **Decomposição da rota completa em quatro sub-rotas:** (A) Rota original, (B) 1^a sub-rote; (C) 2^a sub-rote; (D) 3^a sub-rote; (E) 4^a sub-rote. Pontos vermelhos sobre a rota em laranja são os locais de quebra da rota original (3 pontos no total); Seta AZUL em (C) e (D) representa o caminho de ida da base para o local de quebra anterior, início da sub-rote subsequente; Seta VERDE em (B), (C), (D) e (E) representa o retorno à base (RTL).

Fonte: Elaborado pelo autor.

uma das sub-rotas (Figuras 21B, C, D e E). Para cada ponto de quebra adiciona-se uma comando RTL, fazendo com que a aeronave execute um voo em linha reta até a base (*Home*). O voo em linha reta também ocorre da base para o ponto de quebra anterior (*Waypoint 1* da próxima sub-rote).

4.2.2 Decomposição da Área de Interesse em Subáreas

Ao analisar os métodos de decomposição de área, conforme discutido no Capítulo 3, foi escolhida a segmentação baseada no diagrama de Voronoi como estratégia preferencial. Essa decisão foi embasada na escalabilidade comprovada desse método (Maarouf; Ko; Nouh, 2019) e na proporcionalidade das divisões geradas (Wang et al., 2019; Su et al., 2021). Além disso, a segmentação baseada no diagrama de Voronoi, ao considerar as linhas de cada polígono como fronteiras de atuação (Srivastava et al., 2019), permite que a rota do VANT seja delimitada de forma precisa ao longo da borda da área agrícola, garantindo uma cobertura controlada para o controle biológico.

A possibilidade de gerar polígonos internos com ângulos convexos (Srivastava et al., 2019) é um dos aspectos que tornam esse método vantajoso. Ângulos convexos facilitam a geração de trajetórias mais simples, mais suaves e diretas, evitando desvios excessivos e curvas bruscas (Nielsen; Sung; Nielsen, 2019). Isso é benéfico porque reduz o tempo da trajetória e melhora a eficiência energética (Di Franco; Buttazzo, 2016).

Os diagramas de Voronoi são estruturas de particionamento do espaço \mathbb{R}^n geradas

por um conjunto de pontos, onde cada ponto é atribuído à célula de Voronoi correspondente com base na regra adotada. Nesta tese, optou-se por utilizar o Diagrama de Voronoi Ordinário (DVO), o qual emprega a distância euclidiana entre os pontos do conjunto e os pontos geradores como critério de atribuição. Dessa forma, cada ponto do conjunto é associado à célula de Voronoi cujo ponto gerador mais próximo é utilizado como referência. No DVO assume-se que os pontos geradores têm o mesmo peso e sua construção depende apenas da distância entre eles. O Algoritmo 2 apresenta o algoritmo de Voronoi proposto para dividir a área em subáreas.

Algoritmo 2 Diagrama de Voronoi para decomposição em subáreas

Entrada: Conjunto de vértices do polígono v_1, \dots, v_p

Saída: Diagrama de Voronoi com n células

```

1: Função VORONOI(poligono)
2:    $A \leftarrow \text{calcularArea}(\text{poligono})$ 
3:   se  $A < 30$  então
4:     retorne "Área insuficiente para criar o diagrama de Voronoi."
5:   fim se
6:    $n \leftarrow \lfloor \frac{A}{30} \rfloor$  /*  $n$  representa a quantidade de pontos a serem gerados */
7:    $p \leftarrow \text{gerarPontos}(n)$  /* gera  $n$  pontos aleatórios no polígono */
8:    $v \leftarrow \text{criarCelulasVoronoi}(p)$  /* cria as células de Voronoi usando bissetrizes */
9:    $f \leftarrow \text{encontrarFronteiras}(v)$  /* encontra os vértices da fronteira de cada célula */
10:   $d \leftarrow \text{desenharVoronoi}(v, f)$  /* desenha as células de Voronoi no plano */
11:  retorne  $v$ 
12: fim Função

```

O objetivo do algoritmo é gerar um Diagrama de Voronoi utilizando um conjunto de pontos geradores, levando em consideração restrições de área aplicáveis a voos de VANT Classe 3. Para atender a essas restrições, foi estabelecido um parâmetro de área mínima para as células Voronoi de 30 ha. Essa definição baseou-se em recomendações de especialistas da área de controle biológico, levando em conta a capacidade média de cobertura de um VANT Classe 3, que varia entre 30 e 40 ha³.

O algoritmo recebe um conjunto de vértices v_1, \dots, v_p que representa um polígono e o passa como parâmetro para a função $Voronoi(\text{poligono})$. A função $\text{calcularArea}(\text{poligono})$ é usada para calcular a área desse polígono, que é um valor numérico (em ha) representando a extensão da região delimitada. Após calcular a área do polígono, o algoritmo verifica se ela é inferior a 30. Caso seja, uma mensagem é retornada informando que a área é insuficiente para criar o diagrama de Voronoi. Se a área for superior a 30, o algoritmo continua executando e calcula o valor de n , que representa número de pontos a serem gerados para criar o diagrama de Voronoi, obtido pela divisão da área do polígono A por 30.

³Vale ressaltar que esse parâmetro pode ser ajustado de acordo com as necessidades específicas, capacidades relativas do VANT e a distância entre linhas. No algoritmo proposto, o valor de 30 ha foi escolhido para refletir o cenário real de aplicação.

A função $gerarPontos(n)$, presente no Algoritmo 3, tem a responsabilidade de criar n pontos aleatórios no plano. Neste código, os limites do polígono são definidos pelos vértices contidos em $poligono$.

Algoritmo 3 Função para gerar pontos aleatórios no plano

```

1: Função GERARPONTOS( $n$ )
2:   Limites do polígono:  $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}$ 
3:   Inicializar um conjunto vazio de pontos:  $p \leftarrow \{\}$ 
4:   para  $i \leftarrow 1$  até  $n$  faça
5:     repita
6:       Gerar coordenadas:  $x \leftarrow \text{random}(x_{\min}, x_{\max}), y \leftarrow \text{random}(y_{\min}, y_{\max})$ 
7:     até O ponto  $(x, y)$  estiver dentro do polígono
8:     Adicionar o ponto  $(x, y)$  ao conjunto  $p$ 
9:   fim para
10:  retorne  $p$ 
11: fim Função

```

O processo de geração de pontos ocorre por meio de um *loop*. A localização dos pontos é calculada utilizando a distância euclidiana. Dentro desse *loop*, a função *random* é empregada para gerar coordenadas aleatórias que estejam dentro dos limites estabelecidos pelo polígono. Em seguida, é realizada uma verificação para garantir que o ponto gerado esteja dentro do polígono. Caso não esteja, o processo é repetido até que um ponto válido seja obtido. Esse ponto válido é adicionado ao conjunto de pontos p . Ao final da função, o conjunto completo de pontos é retornado.

A Função $criarCelulasVoronoi(p)$, apresentada no Algoritmo 4, é responsável por criar as células de Voronoi, que são as regiões do plano mais próximas de cada ponto gerador. Nesta implementação, o algoritmo calcula as bissetrizes perpendiculares entre cada par de pontos geradores. A equação geral da bissetriz perpendicular entre dois pontos $p_i(x_i, y_i)$ e $p_j(x_j, y_j)$ é dada por:

$$\text{Bissetriz}_{ij} : \left(x - \frac{x_i + x_j}{2} \right) \cdot (x_j - x_i) + \left(y - \frac{y_i + y_j}{2} \right) \cdot (y_j - y_i) = 0$$

Nesta equação, $\left(\frac{x_i + x_j}{2}, \frac{y_i + y_j}{2} \right)$ representa o ponto médio do segmento que une os pontos p_i e p_j , e a bissetriz é a linha que passa por esse ponto médio e é perpendicular ao segmento que conecta os dois pontos geradores. A bissetriz perpendicular é utilizada para dividir o espaço de forma que cada célula de Voronoi contenha todos os pontos que estão mais próximos de um determinado ponto gerador do que de qualquer outro.

A implementação da bissetriz perpendicular, apresentada no Algoritmo 5, é calculada como a linha que divide o espaço de forma equidistante entre dois pontos geradores p_i e p_j , passando pelo ponto médio entre eles, determinando as áreas de influência de cada ponto gerador. As interseções das bissetrizes com outras bissetri-

Algoritmo 4 Função para criar Células Voronoi

```

1: Função CRIARCELULASVORONOI( $p$ )
2:   Inicializar um conjunto vazio de células de Voronoi  $v$ 
3:   para cada ponto  $p_i$  em  $p$  faça
4:     Inicializar uma célula de Voronoi vazia  $v_i$ 
5:     para cada ponto vizinho  $p_j$  em  $p$ , exceto  $p_i$  faça
6:       Calcular a bissetriz perpendicular entre  $p_i$  e  $p_j$ 
7:       Adicionar as arestas da bissetriz à fronteira da célula  $v_i$ 
8:     fim para
9:     Adicionar a célula de Voronoi  $v_i$  ao conjunto  $v$ 
10:  fim para
11:  retorne  $v$ 
12: fim Função

```

zes ou com as bordas do polígono formam as arestas das células de Voronoi, que são então utilizadas pelo Algoritmo 4 para construir as fronteiras das células.

Algoritmo 5 Função para Calcular a Bissetriz Perpendicular

```

1: Função CALCULARBISSETRIZ( $p_i, p_j$ )
2:   Entrada: Coordenadas dos pontos geradores  $p_i(x_i, y_i)$  e  $p_j(x_j, y_j)$ 
3:   Saída: Arestas da bissetriz perpendicular entre  $p_i$  e  $p_j$ 
4:   /* Passo 1: Calcular o ponto médio  $M$  entre  $p_i$  e  $p_j$  */
5:    $M_x \leftarrow \frac{x_i + x_j}{2}$ 
6:    $M_y \leftarrow \frac{y_i + y_j}{2}$ 
7:   /* Passo 2: Calcular os coeficientes da equação da bissetriz */
8:    $A \leftarrow x_j - x_i$ 
9:    $B \leftarrow y_j - y_i$ 
10:  /* Passo 3: Formar a equação da bissetriz perpendicular
11:  Bissetriz $_{ij} \leftarrow (x - M_x) \cdot A + (y - M_y) \cdot B = 0$ 
12:  /* Passo 4: Determinar as interseções da bissetriz com outras bissetrizes ou com as
    bordas do polígono */
13:  Calcular as coordenadas dos pontos de interseção
14:  Passo 5: Retornar as arestas da bissetriz para o Algoritmo 4 */
15:  retorne Lista de segmentos de linha representando as arestas da bissetriz
16: fim Função

```

A função *encontrarFronteiras*(v), apresentada no Algoritmo 6, é responsável por delimitar os vértices de cada célula Voronoi. Essa implementação itera sobre cada célula de Voronoi v_i no conjunto v . Para cada célula v_i , o algoritmo percorre todas as arestas que compõem sua fronteira e adiciona os vértices correspondentes ao conjunto de vértices da fronteira da célula f_i . Esse processo é repetido para todas as células de Voronoi, resultando em um conjunto de vértices de fronteira f que contém todos os vértices que formam a fronteira de cada célula de Voronoi.

Por fim, o Algoritmo 7 exibe uma função para desenhar o diagrama Voronoi *desenharVoronoi*(v, f), delimitado para área do polígono. A implementação itera sobre

Algoritmo 6 Função para encontrar Fronteiras

```

1: Função ENCONTRARFRONTEIRAS( $v$ )
2:   Inicializar um conjunto vazio de vértices de fronteira  $f$ 
3:   para cada célula de Voronoi  $v_i$  em  $v$  faça
4:     Inicializar um conjunto vazio de vértices da fronteira da célula  $f_i$ 
5:     para cada aresta  $e$  na fronteira da célula  $v_i$  faça
6:       Adicionar os vértices de  $e$  ao conjunto de vértices da fronteira  $f_i$ 
7:     fim para
8:     Adicionar conjunto de vértices da fronteira  $f_i$  ao conjunto de vértices de
       fronteira  $f$ 
9:   fim para
10:  retorne  $f$ 
11: fim Função

```

cada célula de Voronoi v_i no conjunto v . Para cada célula v_i , a função obtém os vértices da fronteira f_i correspondentes àquela célula. Em seguida, ela desenha a região delimitada pelos vértices de f_i na figura. O resultado final é uma figura que mostra as células de Voronoi, ou seja, a decomposição da área, visualmente representada no plano.

Algoritmo 7 Função para desenhar Voronoi

```

1: Função DESENHARVORONOI( $v, f$ )
2:   Inicializar uma figura vazia
3:   para cada célula de Voronoi  $v_i$  em  $v$  faça
4:     Obter os vértices da fronteira  $f_i$  correspondentes à célula  $v_i$ 
5:     Desenhar a região delimitada pelos vértices de  $f_i$  na figura
6:   fim para
7:   Exibir a figura
8: fim Função

```

A figura 22 apresenta uma representação visual das etapas de criação das subáreas utilizando o algoritmo de Voronoi Ordinário. Em (A), ocorre a geração dos pontos aleatórios; em (B), é feita a distribuição dos pontos com base na bissetriz perpendicular; em (C), o centroide de cada subárea é identificado; em (D), as fronteiras de cada célula são criadas, e, finalmente, em (E), as células de Voronoi são desenhadas no plano.

A Figura 23 exibe o resultado da aplicação do diagrama de Voronoi na área de interesse, que possui uma extensão total de 227,41 ha. As ilustrações apresentam cinco variações na geração de pontos aleatórios, demonstrando a capacidade do algoritmo de ajustar as áreas em cada nova iteração.

O algoritmo primeiro verifica se a área do polígono é suficiente para criar o diagrama de Voronoi. Em seguida, determina o número de pontos a serem gerados com base na área do polígono (entre 30 e 40 hectares por polígono). Os pontos são gera-

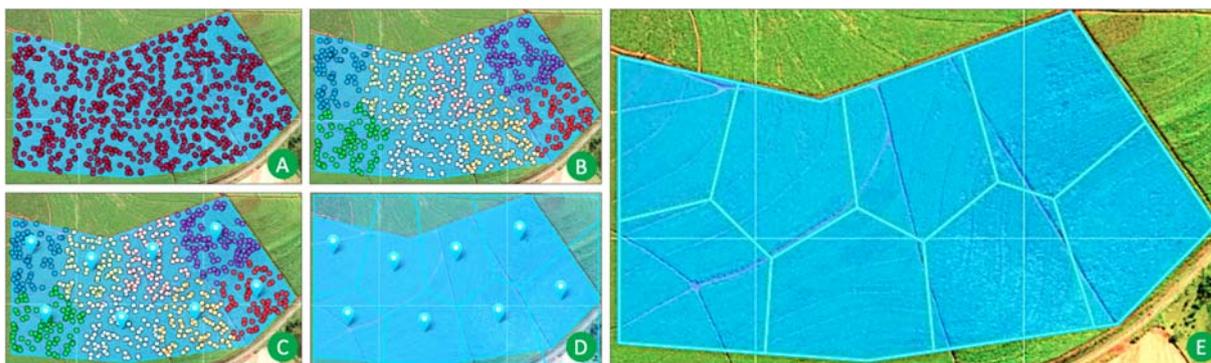


Figura 22 – Representação visual das etapas de criação das subáreas utilizando o algoritmo de Voronoi Ordinário.

Fonte: Elaborado pelo autor.

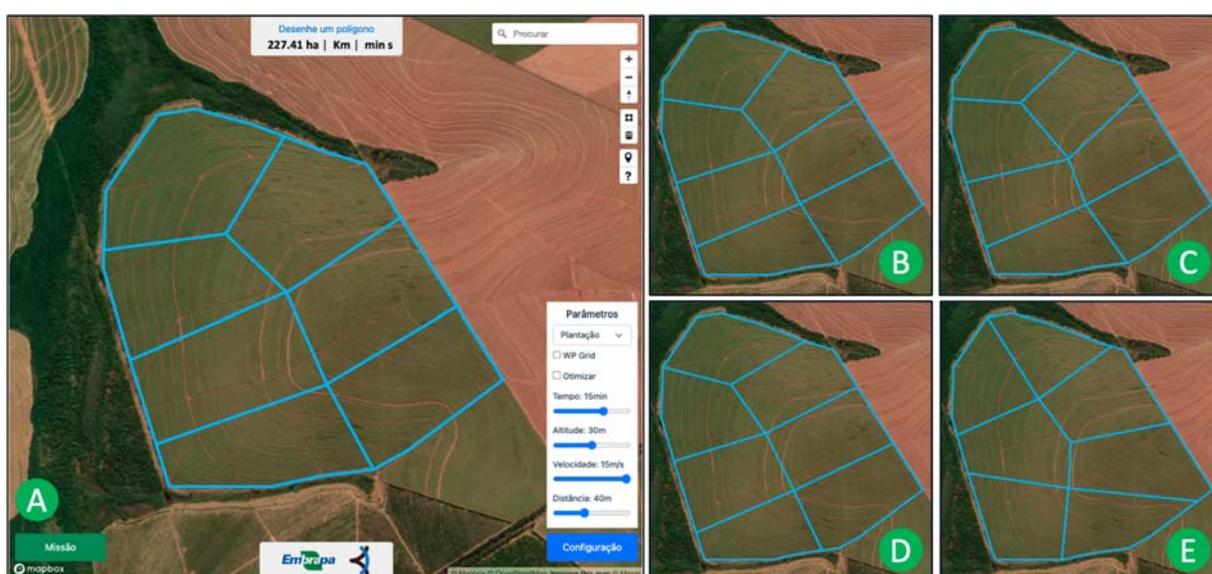


Figura 23 – **Área completa dividida em sete subáreas**: Figuras de A até E representam variações do diagrama Voronoi, geradas a partir de novos pontos aleatórios.

Fonte: Elaborado pelo autor.

dos aleatoriamente, e as células de Voronoi são construídas com base nas bissetrizes perpendiculares entre os pontos geradores. Os vértices que formam as fronteiras de cada célula são identificados e, por fim, as células de Voronoi são desenhadas no plano.

Na Figura 24, aplicou-se o diagrama de Voronoi à mesma área de interesse anterior (Figura 23), mas desta vez reduzindo arbitrariamente o número de pontos aleatórios gerados de 7 para 4⁴. O resultado demonstra a flexibilidade do algoritmo, que se adaptou à nova configuração. A adaptabilidade e escalabilidade do algoritmo também podem ser observadas ao aplicá-lo em um polígono mais complexo, que contém ângulos internos côncavos, conforme exemplificado na Figura 25.

⁴Esse ajuste foi realizado diretamente no algoritmo, sem levar em consideração o limite recomendado pelos especialistas da área, que é de 30 e 40 ha. Isso foi feito com o objetivo de observar o comportamento do algoritmo ao dividir a área em um número igual ao de sub-rotas da Figura 21.

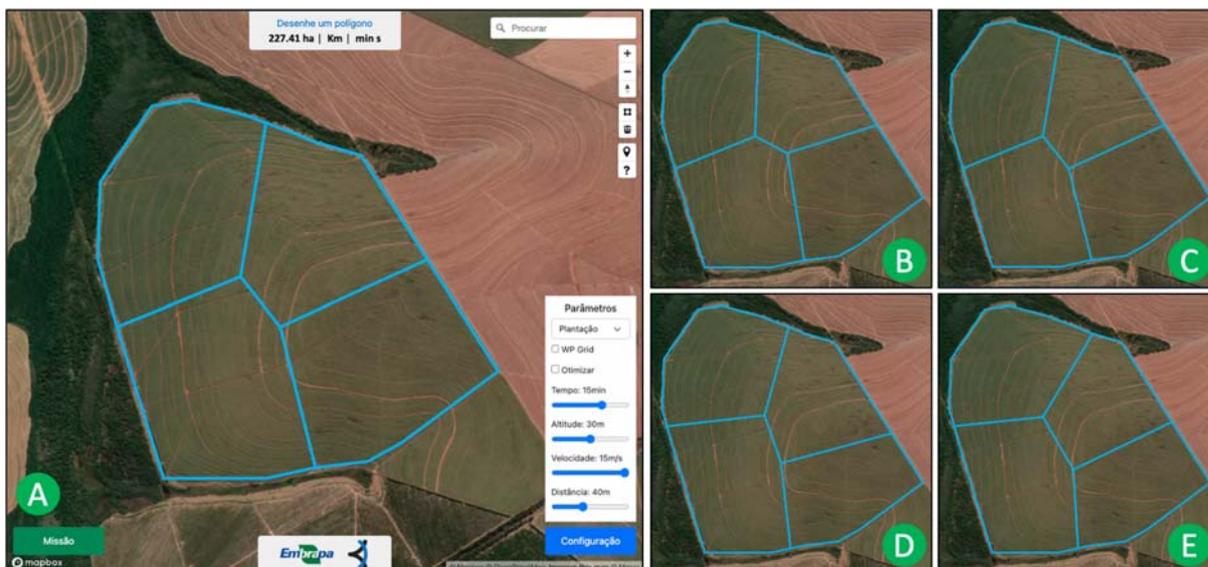


Figura 24 – **Área completa dividida em quatro subáreas**: Figuras de A até E mostram variações do diagrama Voronoi, geradas a partir de quatro pontos aleatórios.

Fonte: Elaborado pelo autor.

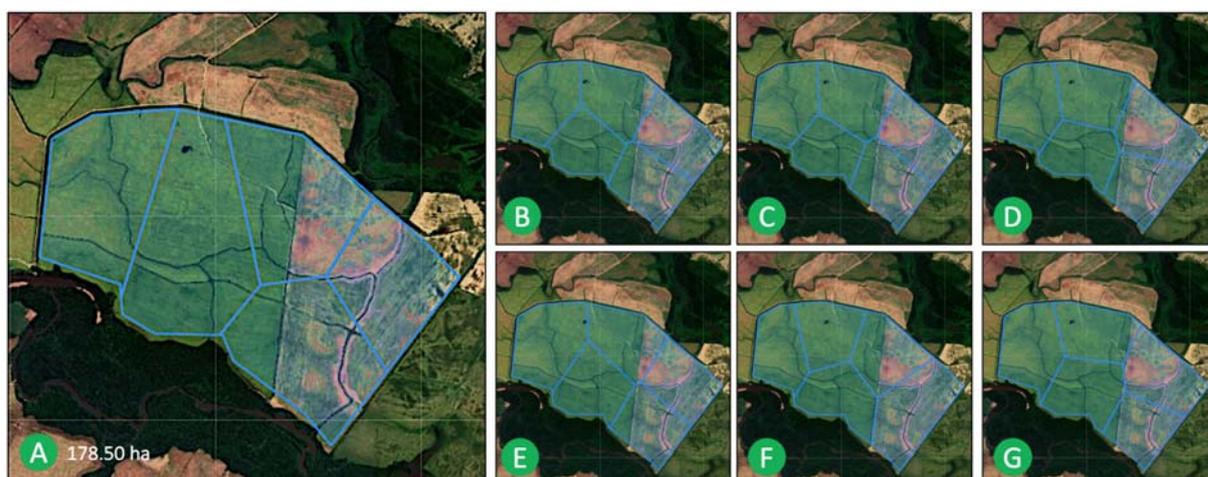


Figura 25 – **Área completa contendo 178,5 ha dividida em cinco subáreas**: A sequência de imagens de A a G mostra as variações das células a partir da geração de novos pontos aleatórios.

Nesta seção, foi apresentada uma estratégia de divisão de uma área de interesse utilizando diagrama de Voronoi. Para explorar cada subárea resultante, foi adotado como estratégia para gerar trajetórias o algoritmo de vai-e-volta (Algoritmo 1), integrado à solução do diagrama de Voronoi (Algoritmo 2). Essa abordagem tem como objetivo aproveitar as vantagens combinadas das duas soluções.

4.3 Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentadas estratégias de geração de trajetórias para VANTs utilizados na dispersão de agentes biológicos em grandes áreas. A solução

proposta incluiu o desenvolvimento de um *Framework* para Controle Biológico com VANT, que organiza as etapas de planejamento de missões, desde a delimitação da área de interesse até a execução das rotas de cobertura. Esse *Framework* oferece uma abordagem estruturada e flexível, permitindo ajustes dinâmicos conforme as necessidades das operações, como a seleção de pontos de decolagem e pouso, o ajuste de parâmetros da missão e a geração de rotas de voo.

Além disso, foram introduzidos dois algoritmos principais que desempenham um papel crucial na estratégia de planejamento de rotas. O primeiro, o algoritmo de vai-e-volta (Algoritmo 1), otimiza a geração de trajetórias dentro das sub-rotas, garantindo cobertura eficiente e respeitando os limites operacionais dos VANTs. O segundo, o diagrama de Voronoi (Algoritmo 2), é responsável pela segmentação das grandes áreas agrícolas em subáreas, facilitando a divisão da missão em partes menores e mais gerenciáveis, sem comprometer a eficácia da aplicação dos agentes biológicos.

É importante ressaltar que a integração dos Algoritmos 1 e 2 representa uma contribuição original para o planejamento de rotas de cobertura no contexto específico estudado. Essa combinação de soluções inovadoras foi utilizada para validar as hipóteses formuladas nesta tese, proporcionando uma abordagem robusta e flexível para o controle biológico em larga escala.

No próximo capítulo, os resultados experimentais serão discutidos, avaliando a eficiência e a aplicabilidade prática dessas estratégias em operações reais.

5 RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo oferece uma análise detalhada dos resultados obtidos a partir da implementação e validação do *framework* proposto na Seção 5.1, seguido pela Seção 5.2, que descreve as tecnologias empregadas e o cenário dos experimentos realizados com os algoritmos de planejamento de rotas de cobertura desenvolvidos nesta tese. As Seções 5.3 e 5.4 apresentam os experimentos e resultados relacionados aos dois principais algoritmos: o Algoritmo 1, que divide a rota completa em sub-rotas, e o Algoritmo 2, que utiliza a decomposição por meio do diagrama de Voronoi. Por fim, na Seção 5.5, são discutidas as considerações finais, analisando os resultados obtidos e as possíveis aplicações das duas abordagens de planejamento de cobertura. Esses resultados são essenciais para corroborar as hipóteses estabelecidas ao longo da tese, demonstrando a contribuição significativa do *framework* e dos algoritmos propostos na otimização das operações de controle biológico utilizando VANTs.

5.1 *Framework*: Implementação e Validação

5.1.1 Implementação

Para verificar a proposta de uso das técnicas de planejamento de rotas de cobertura em casos confirmados de uso do controle biológico, o *framework* foi materializado como um sistema web. Foi desenvolvido com a capacidade de operar *off-line*, considerando que as fazendas brasileiras possuem duas grandes restrições principais: (1) a ausência de conexão com a internet durante a missão, cujo plano de voo pode necessitar de ajustes *in loco*, dependendo das condições do ambiente; (2) a necessidade do uso de computadores ou tablets de baixo custo que dificilmente teriam a alta capacidade computacional para processar tarefas de otimização.

O sistema foi desenvolvido como uma aplicação web baseada em JavaScript utilizando API¹ Mapbox GL² e a biblioteca Turf.js³. A API Mapbox GL oferece recursos avançados de visualização de mapas, permitindo a exibição e interação com dados

¹Do inglês: *Application Programming Interface* (API).

²Documentação: <https://www.mapbox.com>

³Documentação: <https://turfjs.org>

geoespaciais. A integração com a biblioteca Turf.js complementa esses recursos, fornecendo funcionalidades de análise geoespacial, como cálculos de áreas, distâncias e interseções de geometrias (Meier; Tost; Heidmann, 2019; Nguyen; Jung; Dang, 2019). Essa combinação permite explorar e analisar os dados geoespaciais relacionados ao planejamento de rotas de cobertura no controle biológico.

A API Mapbox GL também facilita a integração de ferramentas de desenho de polígonos, o que é essencial para definir a área de cobertura. Essa funcionalidade simplifica a interação do usuário ao delimitar a região onde o controle biológico será aplicado. Ao oferecer suporte embutido de geoprocessamento e análise espacial, possibilita a geração automática da trajetória de cobertura com base nos parâmetros definidos pelo usuário, bem como a realização de cálculos relacionados à área total de campo agrícola cobertura (em hectares - ha), à distância percorrida (em quilômetros - km) e o tempo de voo estimado (em minutos e segundos - min e s) da missão. Ter acesso a essas informações auxiliam em ajustes ou melhorias no planejamento, conseqüentemente, na otimização do tempo de voo e na eficiência da cobertura.

A Figura 26 apresenta a interface do sistema, exibindo o conjunto de funcionalidades e uma rota de cobertura gerada de forma automatizada (implementação do Algoritmo 1) após o desenho do polígono (RoI) e a seleção do local de decolagem/pouso pelo usuário. O manual do sistema descreve as principais funções e instruções de uso e está disponível no Github: <<https://github.com/Orbio-web/doc>>.



Figura 26 – **Interface do sistema**: (1) Menu salvar e importar; (2) Rota gerada pelo sistema, a partir da delimitação da área manualmente; (3) Informação da missão (área, distância percorrida e tempo); (4) Campo de busca; (5) Parâmetros da missão (distância entre linhas, velocidade, altitude, tempo de missão); e (6) Ferramentas de desenho, lixeira e zoom.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na delimitação da área de cobertura (**Etapa A**), primeira etapa do processo para gerar as rotas, o sistema exibe uma interface de mapa de satélite com a mensagem “Desenhe um polígono” na parte central/superior da tela e um campo de formulário de busca para selecionar um local específico para redirecionar o mapa no canto superior/direito. Botões de controle para *zoom* (*zoom in* e *zoom out*) estão disponíveis abaixo do campo de busca, assim como os botões de desenhar polígono e botão da lixeira. O usuário pode selecionar o botão desenhar polígono e determinar a área de corte clicando diretamente no mapa. Cada clique no mapa representa um vértice da área poligonal. Um duplo clique no último vértice finaliza o desenho do polígono. A linha tracejada laranja representa a área de cultivo (Rol) a ser coberta pelo VANT. Uma vez terminada a área poligonal, é possível selecionar e apagar vértices específicos usando o botão da lixeira.

O sistema contém quatro parâmetros de configuração da missão (**Etapa B**): altitude, velocidade, distância e tempo. O parâmetro “altitude” define a distância entre o VANT e o solo, e seu valor varia entre 5 m e 50 m. O parâmetro de “velocidade” configura a velocidade de voo do VANT para realizar a cobertura, variando de 1 m/s a 20 m/s. O parâmetro “distância” representa a distância entre as linhas paralelas do movimento de vai-e-volta, e seu valor pode variar de 1 m a 100 m. Por fim, o parâmetro “tempo” representa o tempo máximo permitido para cada voo individual. O valor varia entre 5 e 50 min. Os parâmetros de configuração da missão foram definidos com base no conhecimento de especialistas em controle biológico e nas características operacionais de aeronaves Classe 3⁴. Esses valores visam otimizar a eficiência e precisão do VANT, levando em consideração tanto a experiência prática quanto a adaptação às demandas específicas da operação.

A altitude foi ajustada para oferecer maior precisão em áreas menores ou mais complexas, quando operando em altitudes mais baixas, e maior cobertura em altitudes mais elevadas, otimizando o consumo de bateria e o tempo de voo. A velocidade permite que o ritmo do voo seja adaptado de acordo com as condições de vento, tipo de terreno e a necessidade de precisão, garantindo eficiência e segurança. O parâmetro de distância entre as linhas de voo foi estabelecido para maximizar a cobertura da área, permitindo ajustes no espaçamento conforme o tamanho da área e a sensibilidade da aplicação. Por fim, o tempo máximo de voo considera a autonomia da bateria do VANT, assegurando que as operações sejam realizadas dentro dos limites operacionais da aeronave, garantindo o retorno seguro à base.

Esses parâmetros foram selecionados de forma a garantir que as missões sejam conduzidas com a máxima eficiência, precisão e segurança, respeitando tanto as ca-

⁴Os valores foram personalizados para atender às necessidades específicas do cenário de controle biológico. No entanto, é importante destacar que são ajustáveis e podem ser modificados diretamente no código-fonte da aplicação, conforme necessário.

racterísticas do ambiente quanto as limitações técnicas das aeronaves envolvidas.

O usuário deve configurar previamente os parâmetros de acordo com o tipo de missão. O sistema é flexível e permite alterar os parâmetros após a geração da trajetória. Nesse caso, o caminho de cobertura é renderizado novamente de acordo com os novos valores. Além disso, há uma opção chamada “*WP Grid*” (abreviação de *Waypoint Grid*) para gerar Pontos de Rota Intermediários (PRI) ao longo do caminho. A distância entre os PRI é igual à distância entre as linhas. Os PRI podem ser usados para ativar um comando específico na controladora do VANT, tal como abrir ou fechar um dispensador para espalhar agentes biológicos.

A posição de decolagem e de pouso (**Etapa C**) é configurada selecionando um dos vértices do polígono. A Figura 26 apresenta o vértice selecionado destacado pelo círculo laranja maior no canto superior/direito da área. Esta etapa é realizada manualmente pelo usuário, considerando o seu conhecimento prévio sobre o campo de cultivo e seu entorno, como estradas, lagos e locais inacessíveis. Nem sempre estas informações encontram-se disponíveis e/ou atualizadas nos mapas obtidos através de imagens de satélite. Nestas circunstâncias, faz-se necessário um reconhecimento do campo para o planejamento da missão antes da geração da rota através da aplicação.

Após a seleção do vértice do polígono, a rota é gerada automaticamente (**Etapa D**) pelo sistema, com base nos parâmetros definidos anteriormente. A abordagem vai-e-volta foi escolhida por ser amplamente reconhecida na literatura de PRC e recomendada por especialistas em controle biológico que colaboraram com esta investigação. Este padrão de movimento é projetado para reduzir a sobreposição (Li et al., 2021), uma preocupação significativa em operações agrícolas que pode levar a desperdício de insumos e ineficiência na operação. Além disso, é adequada tanto para cenários teóricos quanto para operações práticas em larga escala (Luna et al., 2022; Vazquez-carmona et al., 2022; Qi et al., 2022).

A trajetória gerada pelo sistema consiste em três fases, ilustradas na Figura 26 por cores diferentes, que são:

- **Azul:** representa a fase inicial, onde o VANT se desloca da posição de decolagem até o início do movimento de vai-e-volta;
- **Amarela:** representa a fase intermediária composta por movimentos de vai-e-volta alinhados à maior aresta do polígono. Essa estratégia reduz o tempo de cobertura, que está diretamente relacionado ao número mínimo de manobras de virada.
- **Verde:** indica o subcaminho que liga o ponto final do movimento de vai-e-volta e o ponto de aterrissagem.

As partes da trajetória de cobertura próximas aos limites externos da área (borda

da área de cultivo) não são colocadas sobre as arestas do polígono, mas posicionadas considerando a metade da distância entre as linhas para melhorar o desempenho da cobertura e a correta aplicação do material biológico.

O botão da Missão (cor verde), localizado no canto inferior esquerdo, oferece várias opções. A opção “Novo” redefine os parâmetros e limpa o mapa. A opção “Abrir” permite carregar um plano de voo salvo anteriormente. Há três opções para salvar os arquivos de voo: “Salvar Rota Multi”, “Salvar Rota Única” e “Salvar Rota CSV”. A primeira gera arquivos de coordenadas separados, de acordo com o número de quebras da rota original; a segunda opção permite gerar um único arquivo contendo a rota completa, sem pontos de quebra; e a terceira opção gera um arquivo de coordenadas no formato .csv, garantindo maior compatibilidade com diferentes softwares de GCS (**Etapa E**) que utilizam esta extensão. Após salvar a rota, o arquivo de *waypoints* é carregado no VANT para execução do voo (**Etapa F**).

Os dados de cobertura ficam disponíveis na parte superior/central do mapa, e são atualizados dinamicamente à medida que a área do cultivo e a rota de cobertura é gerada ou modificada pela interação do usuário com a aplicação. A Figura 26 apresenta dados relacionados ao tamanho da área (51.41 ha), comprimento total do caminho (11.66 Km) e tempo de voo (24 min 17 s). É possível aumentar ou reduzir o parâmetro de distância entre linhas, o que resulta em um aumento ou redução no número de linhas paralelas do movimento de vai-e-volta. Essa modificação também altera o comprimento total do caminho e o tempo de voo para realizar a cobertura.

Levando em consideração o Algoritmo 1, se o tempo de voo estimado for menor que o limite definido pelo usuário, apenas um arquivo de rota é salvo. No entanto, se o tempo de voo exceder esse limite, é necessário realizar voos adicionais para cobrir toda a área sem correr o risco de ficar sem energia. Nesses casos, é gerado um arquivo de rota para cada voo, e cada voo abrange apenas uma parte da área de cultivo. O último ponto de rota de cada arquivo indica o ponto em que a cobertura é interrompida e o VANT retorna à base para a troca de bateria.

Também está disponível a opção “Salvar Rota Única”, que salva em um único arquivo todos os pontos de rota, mesmo em coberturas que demandam vários voos. Esta opção é interessante para armazenar a rota completa original, que pode ser posteriormente carregada através da opção de “Abrir” da aplicação.

A opção “Abrir” seleciona e abre um arquivo previamente salvo, permitindo modificações na área e na trajetória original. Todos os arquivos de rota são compatíveis com a maioria das controladoras de voo do mercado e contém comandos como decolagem (código 22), mudança de velocidade (código 178) e movimentação para um determinado ponto de rota (código 16). Os arquivos também possuem informações relacionadas à latitude, longitude, altitude e velocidade.

A opção “Importar Ponto” abre um arquivo .kml e redireciona o mapa para o

local, enquanto a opção “Importar Poly” desenha um polígono de acordo com as coordenadas existentes. Este formato de arquivo geralmente criado em softwares de geolocalização, como o Google Earth e Google Maps. A opção “Importar MP” permite importar um arquivo criado no Mission Planner. As demais opções de importação permitem carregar arquivos com as extensões *.csv*, *.kml* ou *.kmz*, visando a maior compatibilidade com outros softwares de planejamento. Por fim, o sistema inclui uma “Central de Ajuda” que pode ser acessada pelo ícone de sinal de interrogação no canto direito, onde todas as opções da aplicação são explicadas para facilitar o uso.

5.1.2 Validação

Após a implementação do software, sua executabilidade foi verificada e, em seguida, foram conduzidos experimentos para validar o *framework* proposto. Planos de voo contendo rotas de cobertura foram elaborados, e voos reais foram realizados sobre um campo de cultivo utilizando um VANT⁵ equipado com um dispensador acoplado ao seu *frame*. O modelo de VANT empregado nos testes foi um multirrotor personalizado com quatro motores (um quadricóptero), pesando 1,9 kg, controladora de voo Ardupilot, quatro motores de 140 W, hélices de 9 polegadas e uma bateria de quatro células de 5000 mAh (14,8 V). O equipamento é semelhante ao DJI Phantom 3.

As características do VANT utilizado permitem a cobertura de uma área de até 30 hectares. O tempo de voo considerado para o VANT foi de aproximadamente 20 min, com uma velocidade normal de voo de 10 m/s. As condições ambientais durante os experimentos foram satisfatórias, com céu claro, sem nuvens e sem chuva. A temperatura ambiente foi de 26 °C, a velocidade do vento de 9 km/h, a umidade relativa do ar de 60%, boa visibilidade a longa distância e pressão atmosférica de 1015 hPa⁶.

A Tabela 4 apresenta os resultados dos experimentos com áreas que são retângulos quase regulares para mostrar o melhor caso para o ser humano, mas são minimamente realistas. Estas áreas são de aproximadamente 25 ha. A distância entre as linhas para o controle biológico foi de 30 m e a velocidade de voo de 10 m/s.

⁵Vídeo demonstrativo: <https://www.youtube.com/watch?v=8u5Wiejwc1g&t=13s>

⁶hPa - hectopascal

Tabela 4 – **Resultados do experimento para voos reais**: comparação entre o planejamento manual e o uso da aplicação (*Framework*)

Comparação	Manual	<i>Framework</i>
Confecção do plano de voo	de ω (5 min)	até O (10 seg)
Alteração do vértice do polígono	de ω (1 min)	até O (5 seg)
Alteração do local de decolagem/pouso	de ω (5 min)	até O (1 seg)
Tempo de voo	cerca de 15 min	cerca de 19 min
Distância entre linhas (30 m)	acerto aprox. ω (16%)	acerto a partir ω (99%)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A metodologia envolveu a comparação entre o planejamento manual, realizado por um operador humano, e o uso do *framework* automatizado. As áreas de teste, com cerca de 25 hectares, foram escolhidas para simular um cenário semi-realista com retângulos quase regulares, permitindo uma comparação mais clara entre a intervenção manual e a automatizada. Os resultados, apresentados na Tabela 4, foram obtidos a partir de ensaios práticos, monitorando o desempenho do VANT em termos de tempo de configuração e voo, bem como a precisão no espaçamento entre as linhas de voo.

O tempo de confecção do plano de voo, as alterações nos vértices do polígono, a escolha dos pontos de decolagem e pouso, além do tempo total de voo, foram registrados e comparados diretamente. A precisão na distância entre as linhas de voo foi avaliada tanto manualmente quanto pelo *framework*, com base em dados de telemetria, garantindo a cobertura adequada da área de interesse.

Além disso, foram comparados os planos de voo gerados automaticamente pelo sistema com aqueles elaborados por profissionais experientes, com mais de cinco anos de atuação no uso de VANTs para controle biológico. As Figuras 27 e 28 são dois exemplos de planos de voos elaborados nos dois contextos. A Figura 27 mostra um plano de voo gerado de acordo com o método de trabalho atual, ou seja, um plano elaborado de forma manual utilizando as ferramentas disponíveis em software de estação de controle. A Figura 28, por sua vez, apresenta um plano de voo automatizado criado a partir da solução proposta. Diferentes formatos de áreas foram testados, e observou-se que, quanto mais irregulares as áreas, maior foi a diferença no tempo de execução entre o planejamento manual e o automatizado.

Ao reproduzir a Área de Interesse (RoI), a restrição de distância entre linhas e os dois planos de voo em um gráfico, conforme ilustrado pela Figura 29, observa-se que alguns pontos do plano manual, em vermelho, ficaram fora da margem pontilhada em azul, que representa a restrição de 30m entre linhas a partir da borda da RoI (polígono com linha preta). Em contraste, o plano automatizado gerado pelo sistema, em verde, obedece a margem definida. O gráfico da Figura 30 oferece uma visualização complementar, exibindo os *waypoints* no plano. Conforme esperado, o plano gerado



Figura 27 – **Voo real realizado**: Plano de voo elaborado manualmente.

Fonte: Elaborado pelo autor.

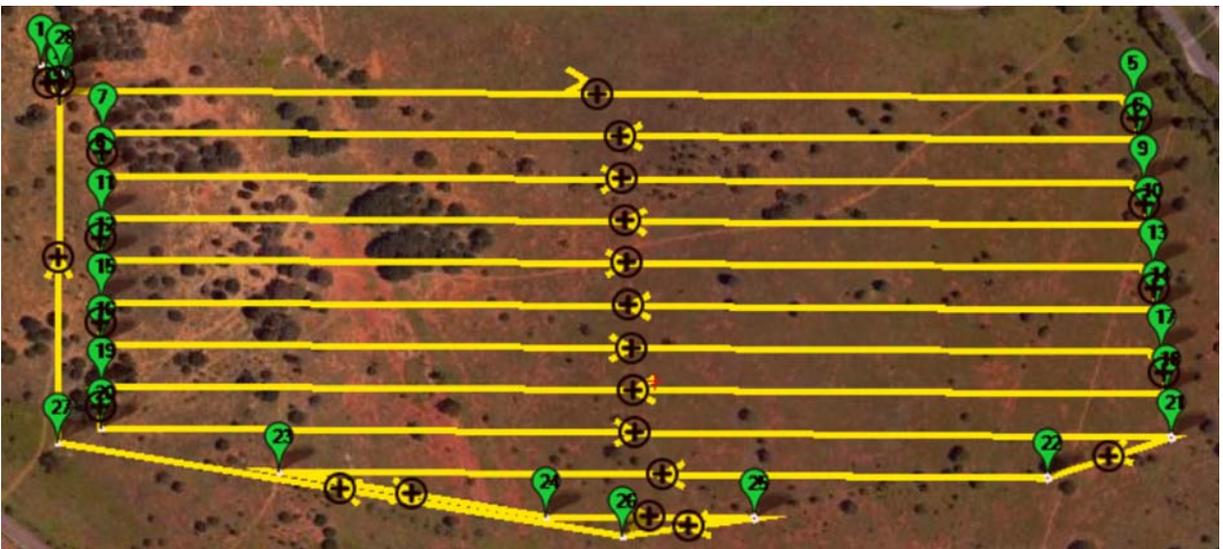


Figura 28 – **Voo real realizado**: Plano de voo automatizado gerado pela aplicação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

pelo sistema demonstra uma maior precisão às restrições de planejamento.

Na Tabela 4, os três primeiros resultados apresentados referem-se ao tempo de preparação ou adequação de um plano de voo a partir das informações das coordenadas GPS dos vértices das áreas, tais como confecção do plano de voo, alteração do vértice do polígono e alteração da posição de decolagem e de pouso. Como esperado, o tempo desta etapa de preparação apresenta uma diferença significativa entre as duas abordagens - manual e automatizada. É importante ressaltar que os polígonos envolvidos são simples, e o operador em questão possui muita experiência na tarefa. Além disso, a operação de mudança de ponto de decolagem e pouso, que é muito frequente neste tipo de operação, exige a criação de um novo plano, aumentando o tempo de preparação quando realizado de forma manual.

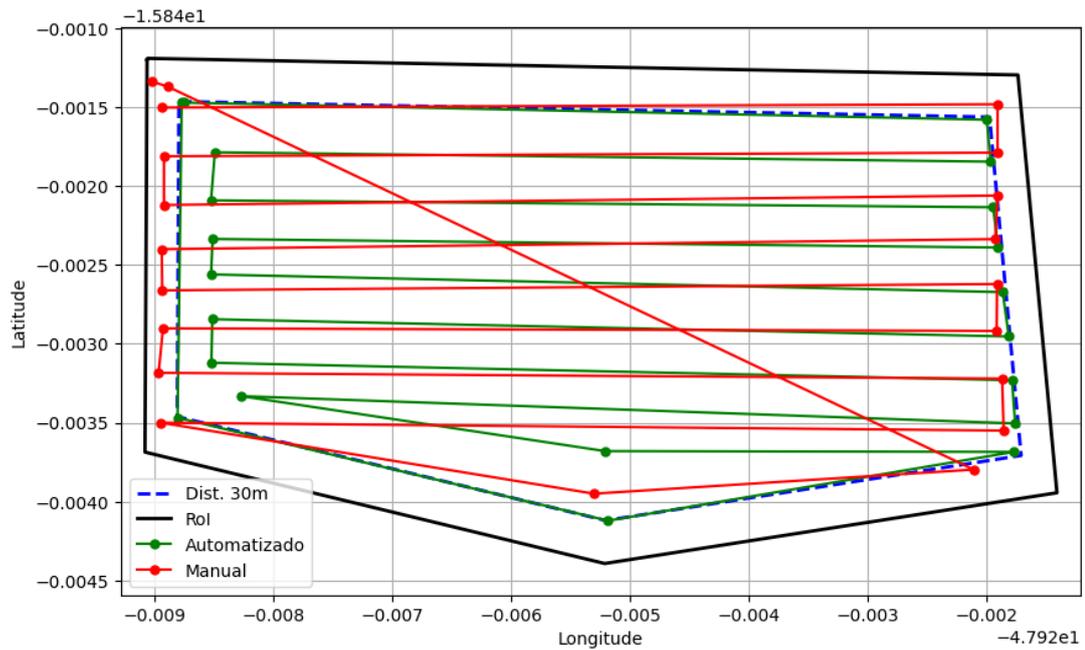


Figura 29 – **Gráfico de projeção**: Rol, distância entre linhas e planos manual e automatizado.
Fonte: Elaborado pelo autor.

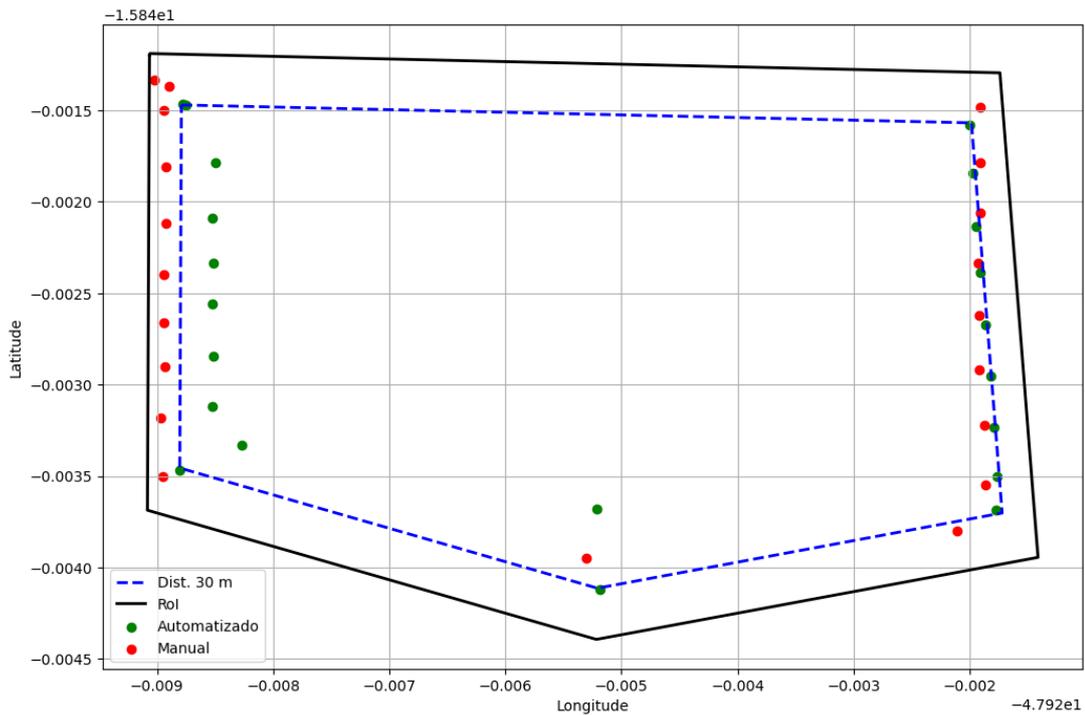


Figura 30 – **Gráfico de projeção dos waypoints**: waypoints dos planos manual e automatizado em relação a Rol e distância entre linhas.
Fonte: Elaborado pelo autor.

No experimento realizado, foi obtido um resultado inesperado na quarta linha da Tabela 4. O tempo de voo que culmina na utilização da bateria é normalmente mais curto nos planos manuais. No entanto, analisando os planos apresentados, foi possível detectar uma dificuldade dos operadores humanos em fixar a distância entre as

linhas em um valor constante.

A última linha da Tabela 4 indica que, no parâmetro referente à distância entre linhas de 30 metros, os operadores humanos não alcançaram a precisão desejada, resultando em uma assertividade aproximada de apenas 16%. Este dado foi obtido através de uma análise comparativa entre os planos de voo manual e automatizado, com os resultados coletados dos *logs* e dados de telemetria de quatro missões executadas em condições reais. Essa comparação inicial entre os métodos mostrou-se fundamental para compreender as limitações da operação humana e a eficácia da automação.

É importante destacar que este resultado preliminar serviu como motivação para a continuidade da pesquisa e o aperfeiçoamento dos algoritmos presentes na aplicação proposta. Embora o processo manual agilize a cobertura da área devido ao menor tempo de planejamento, ele compromete a precisão necessária para o controle biológico. A identificação da baixa assertividade de aproximadamente 16% foi crucial para o desenvolvimento subsequente da tese, sinalizando a necessidade de um planejamento mais rigoroso e de uma ferramenta automatizada para o gerenciamento das trajetórias.

Adicionalmente, embora a redução no tempo total de voo, obtida pelo aumento do espaçamento entre as linhas, possa ser vista como uma vantagem em termos de eficiência, essa prática compromete a precisão exigida em aplicações de controle biológico. A variação nos espaçamentos pode resultar em uma distribuição inconsistente dos agentes biológicos. Dessa forma, os resultados preliminares destacam a importância de aprimorar a precisão na execução dos planos de voo, assegurando uma dispersão eficiente e uniforme dos agentes biológicos.

Nessa seção, apresentamos os resultados que demonstram a implementação e validação do *framework*. O sistema web desenvolvido representa um avanço significativo para o planejamento de rotas de VANTs no controle biológico. A capacidade de realizar ajustes rápidos e precisos representa uma grande vantagem sobre os métodos manuais. Esses achados foram essenciais para direcionar a continuidade da pesquisa. Nas próximas seções, serão apresentados as tecnologias utilizadas nos experimentos e resultados obtidos em diferentes cenários de voo reais em grandes áreas, para cada um dos algoritmos propostos.

5.2 Tecnologias Utilizadas nos Experimentos

As tecnologias utilizadas para avaliar a efetividade dos algoritmos foram: um o VANT comercial DJI Phantom 3 *Advanced*⁷; e um dispersador modular (Patente

⁷<https://www.dji.com/br/phantom-3-adv/info>

BR1020210086122)⁸, conforme mostrado na Figura 31. O VANT possui aproximadamente 1.3 Kg, que incluem quatro motores de 140 W, hélices de 13 polegadas e uma bateria LiPo com quatro células e 4480 mAh. Com essas características, o VANT é capaz de cobrir uma área de até 30 a 40 ha. O dispersador modular acoplado ao VANT acrescenta uma carga útil (*payload*) de 300 g.



Figura 31 – **Equipamentos utilizados:** (A) DJI Phantom 3 Adv. com dispersador modular acoplado; e (B) Dispersador modular.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O dispersador utilizado é composto por dois módulos: um módulo eletrônico de acionamento e um box/cassete que armazena o material biológico, projetado em diferentes formatos. O modelo indicado pela seta verde na Figura 32 é o mais adequado para o tipo de vespa usada nos experimentos, *Trichogramma galloi*⁹. O conteúdo do dispensador corresponde a aproximadamente 3.600.000 unidades de vespa, totalizando 30 g por aplicação.

A Tabela 4 mostra o peso em gramas das tecnologias e material biológico utilizados. A soma do peso do dispersador e do agente biológico utilizado representa um *payload* de 330 gramas.

⁸Vídeo instrutivo detalhado: <https://www.youtube.com/watch?v=XNs0LCDD120>

⁹Em geral, esse tipo de vespa é multiplicada em laboratórios especializados usando ovos de um hospedeiro alternativo. Para transporte, as vespas foram acondicionadas no box/cassete. O material utilizado nos experimentos foi cedido pela EMBRAPA Instrumentação, São Carlos/SP.

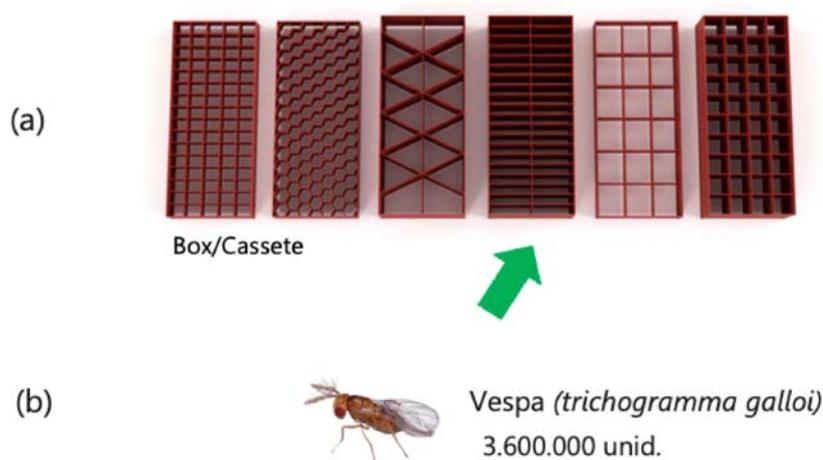


Figura 32 – **Material biológico utilizado:** (A) Box/Cassete do dispersador (B) imagem ilustrativa do (*trichogramma galloi*).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Peso das tecnologias e material utilizados durante os experimentos

Objeto	Peso (g)
DJI Phantom 3 ADV	1.300
Dispersador	300
Vespa (<i>trichogramma galloi</i>)	30
Total Payload	330
Total	1.630

Fonte: Elaborado pelo autor.

A adoção de drones menores, como o DJI Phantom 3 ADV, proporciona facilidade de transporte, pois podem ser movidos sem a necessidade de veículos grandes, como carros ou pick-ups. Eles podem ser transportados em mochilas por motocicletas e operados por uma única pessoa, representando um custo operacional menor. O peso reduzido desses drones facilita o manuseio e a operação, permitindo uma implantação rápida. Em relação ao dispensador modular, possui dimensões compatíveis com drones de baixo custo, como a linha DJI Phantom e Mavic, garantindo que equipamentos acessíveis, classe 3, possam ser adotados em operações de controle biológico. Esses aspectos são particularmente relevantes para o cenário real, onde a mobilidade e a eficiência operacional são cruciais.

5.3 Algoritmo de Decomposição em Sub-Rotas: Experimentos e Resultados

Com o objetivo de validar a primeira hipótese desta tese, foi conduzido um experimento em uma extensa área territorial, em colaboração com especialistas em controle biológico de pragas. Primeiramente, o software web proposto foi utilizado para definir as rotas de cobertura, seguindo todas as etapas do *framework*. Na sequência, foram realizados voos reais para coletar e analisar os dados, completando assim o processo de validação da hipótese.

Seguindo as etapas do *framework*, foi selecionada uma área de interesse (Etapa A) com mais de 100 hectares. Os parâmetros de voo (Etapa B) para a missão foram definidos conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Especificação dos parâmetros de voo (Etapa B)

Característica	Valor
Tempo máximo de voo	15 minutos
Altitude	10 metros
Velocidade média	12 m/s
Distância entre linhas	45 metros

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a seleção de um vértice da área de interesse (Etapa C), seguindo as sugestões dos pilotos familiarizados com o local de aplicação, o plano de voo foi gerado automaticamente (Etapa D). A estratégia adotada para a configuração dos parâmetros da missão foi baseada em práticas de controle biológico definidas por especialistas e comumente utilizadas em plantações de cana-de-açúcar, especialmente com o uso do parasitoide *Trichogramma galloi*, uma vespa amplamente empregada no manejo de pragas, como a broca-da-cana (*Diatraea saccharalis*) (Taguti et al., 2022).

A Figura 33 ilustra essas duas etapas, mostrando a área selecionada e as rotas geradas pelo algoritmo de decomposição da rota completa em sub-rotas (Algoritmo 1). Na imagem, observa-se que a rota original apresentou dois pontos de quebra ao longo da rota completa. A área total de cobertura abrange 114,61 hectares (1.146.100,00 m²). Para a rota completa (sem decomposição), os valores estimados para a distância total percorrida foram de 27,8 km, e o tempo necessário para concluir a cobertura foi de 38 minutos.

Na sequência (Etapa E), foi salvo o único arquivo contendo as coordenadas da rota completa (Figura 33A) e os três arquivos de cada sub-rota (Figuras 33B, C e D, respectivamente). Esses planos de voo foram carregados em um software compatível com o modelo de VANT utilizado para a execução dos voos reais na área selecionada (Etapa F).

Para avaliar a eficiência do planejamento de rotas e a influência do *payload* foram estabelecidos três cenários distintos, conforme detalhados abaixo:

- **Cenário 1** - o VANT realizou voos com o dispensador vazio, acrescentando apenas o peso do dispensador de 300 g (melhor caso).
- **Cenário 2** - o VANT realizou voos com o dispensador cheio, sem realizar a liberação dos agentes biológicos, resultando em um *payload* total de 330 g (pior caso).
- **Cenário 3** - O VANT voou com o dispensador cheio e foi configurado para liberar os agentes biológicos de forma progressiva durante o percurso. A missão começou com uma carga útil de 330 g e diminuiu à medida que a aplicação avançava (caso real).

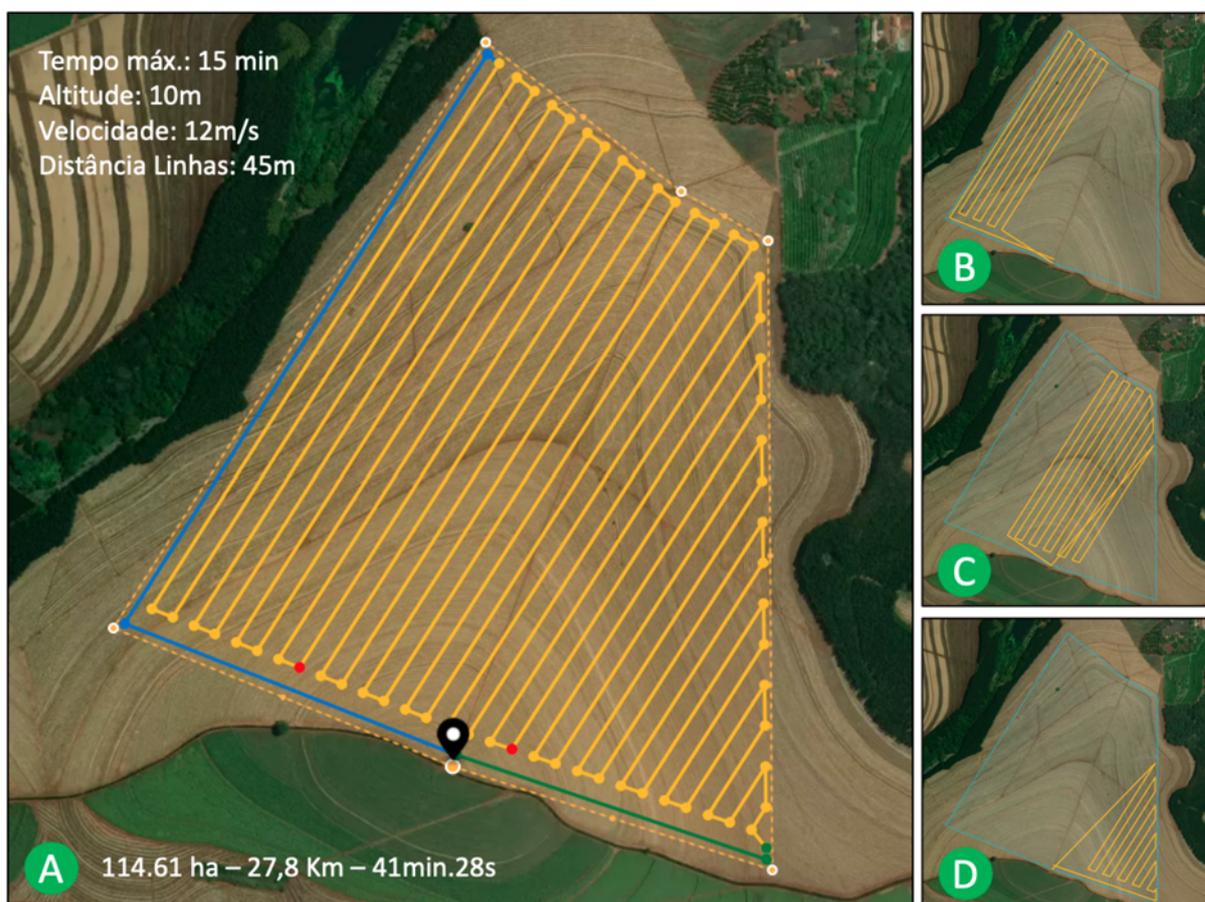


Figura 33 – **Rota completa dividida em três sub-rotas:** (A) Rota original, (B) 1ª sub-rota; (C) 2ª sub-rota; (D) 3ª sub-rota. Pontos vermelhos da rota original (A) são os locais de quebra.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.1 Resultados dos Voos com Algoritmo de Sub-Rotas

Os voos foram realizados sobre uma plantação de cana-de-açúcar (Figura 33), nas proximidades do município de São Manuel, SP, no dia 18 de outubro de 2023,

das 09:00h às 12:40h. As condições ambientais durante os voos foram satisfatórias, conforme detalhado na Tabela 7.

Tabela 7 – **Condições Ambientais:** voos com algoritmo de sub-rotas

Condição	Situação
Céu	Claro, sem nuvens e sem chuva.
Temperatura	25°C
Velocidade do vento	9,2 km/h
Umidade relativa do ar	60%
Visibilidade	Excelente, com boa visibilidade a longa distância
Pressão atmosférica	1015 hPa

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme descrito acima, no **Cenário 1**, o VANT realizou três voos com o dispensador vazio. Os resultados da cobertura realizada nas três sub-rotas (Figuras 33B, 33C e 33D) estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – **Resultado voos com dispersador vazio:** cobertura com 3 sub-rotas.

Voos	Tempo de Voo (hh:mm:ss)			Distância Percorrida (Km)			Bateria	
	Nº.	Estim.	Real	Estim.–Real	Dist.	WP1	RTL	Extra
Voo 1	00:15:14	00:16:24	00:01:10	11,6	-	0,202	0,202	85
Voo 2	00:15:35	00:16:52	00:01:17	12,8	0,202	0,780	0,982	89
Voo 3	00:10:33	00:11:32	00:00:59	5,3	0,780	-	0,780	64
Total	00:41:22	00:44:48	00:03:26	29,7	0,982	0,982	1,964	

Legenda: **Estim.:** tempo estimado; **Real:** tempo real realizado; **Estim.–Real:** diferença dos tempos; **Dist.:** distância percorrida; **WP1:** distância do *waypoint* inicial da rota (RTL anterior); **RTL:** distância até a base; **Extra:** soma WP1 e RTL.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 8, cada voo realizado está identificado na primeira coluna. Os valores da coluna “*Estim.*” representam os tempos de voo estimados após a importação dos arquivos *waypoint* para o software utilizado pelo piloto no campo (Litchi)¹⁰. É possível observar que os voos gerados estão em conformidade com o planejamento realizado pelo algoritmo, um comportamento que corrobora a eficácia do algoritmo.

A coluna “*Real*” mostra os valores dos tempos de voo reais em cada sub-rota. A quarta coluna “*Estim.–Real*”, exibe a diferença entre os tempos estimado e real em cada voo. Observa-se a efetividade do algoritmo levando em consideração que diferença entre os tempos ficou muito próxima de 1 min, essa margem pode ser considerada aceitável no cenário real, onde as condições ambientais podem influenciar na dinâmica de voo.

Em relação as distâncias percorridas, a coluna “*Dist.*” exibe o total percorrido em cada voo em quilômetros (Km). A soma das distâncias percorridas (29,7 km) é maior

¹⁰O software Litchi é voltado para diversos modelos de VANTs, incluindo drones da marca DJI, como o Phantom, Mavic, Inspire e Spark.

em comparação à rota completa, que foi estimada em 27,8 km. Isso ocorre devido à adição de pontos de quebra na rota completa, resultando nas três sub-rotas. A primeira sub-rota (Voo 1) teve um acréscimo de 0,202 km ao seu trajeto, referente à distância do primeiro ponto de quebra até o base (coluna “RTL”). A segunda sub-rota (Voo 2), sendo uma rota intermediária entre o primeiro ponto de quebra e o segundo, acrescenta o trecho até o RTL anterior, caracterizando o início da segunda sub-rota (“WP1”) e o RTL a partir do segundo ponto de quebra da rota completa, equivalente a 0,780 Km. A terceira sub-rota (Voo 3) representa o trajeto final da cobertura, acrescentando apenas o percurso até o último ponto de quebra (0,780 Km). A coluna “Extra” apresenta as somas entre “WP1” e o “RTL”, representando a distância adicional percorrida aos voos para cobrir os pontos de quebra. O resultado mostra a efetividade do algoritmo em gerar sub-rotas, pois a diferença entre a rota completa de 27,8 Km comparado a distância efetiva das sub-rotas de 29,7 Km, correspondente ao trajeto realizado no cenário real, com uma diferença de 1,9 km.

Outro aspecto que destaca a solução proposta é a reserva de bateria mantida durante os voos. Através da análise dos valores apresentados na coluna “% *Uso*”, observa-se que os voos realizados consumiram 85%, 89% e 64% da capacidade total da bateria, respectivamente. Esses valores demonstram que a solução gerou rotas que preservaram a autonomia da aeronave, garantindo uma margem de segurança suficiente para o retorno seguro à base nos três voos.

Os resultados do desempenho da cobertura com o dispersor carregado de material biológico nos **Cenário 2** e **Cenário 3** previamente descritos foram tabulados e são apresentados nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 – **Resultado voos com dispersador cheio:** cobertura com 3 sub-rotas.

Voos Nº.	Tempo de Voo (hh:mm:ss)			Distância Percorrida (Km)			Bateria	
	Estim.	Real	Estim.–Real	Dist.	WP1	RTL	Extra	% Uso
Voo 1	00:15:14	00:16:46	00:01:32	11,6	-	0,202	0,202	90
Voo 2	00:15:35	00:17:03	00:01:28	12,8	0,202	0,780	0,982	95
Voo 3	00:10:33	00:11:41	00:01:08	5,3	0,780	-	0,780	70
Total	00:41:22	00:45:30	00:04:08	29,7	0,982	0,982	1,964	

Legenda: **Estim.**: tempo estimado; **Real**: tempo real realizado; **Estim.–Real**: diferença dos tempos; **Dist.**: distância percorrida; **WP1**: distância do *waypoint* inicial da rota (RTL anterior); **RTL**: distância até a base; **Extra**: soma WP1 e RTL.
Fonte: Elaborado pelo autor.

O **Cenário 2**, cujos dados são apresentados na Tabela 9, mostram um acréscimo de apenas 42s no tempo total de voo comparado ao **Cenário 1**, conforme dados da coluna “*Real*”. Embora este aumento seja pequeno, ele indica que o peso adicional do dispensador teve um impacto marginal no tempo de voo e não afetou as distâncias percorridas. A variação no consumo de bateria foi igualmente modesta.

Esses resultados sugerem que, apesar das condições de carga máxima, o planejamento de rotas proposto manteve a eficiência. A pequena variação observada

nas métricas de desempenho reforça a solidez do algoritmo e do software proposto, embora seja importante reconhecer que as diferenças são estatisticamente pouco significativas. Portanto, o impacto do *payload* adicional no **Cenário 2** foi mínimo e não comprometeu a efetividade do planejamento de rotas.

Tabela 10 – **Resultado voos com dispersador cheio com soltura**: cobertura com 3 sub-rotas.

Voos N°.	Tempo de Voo (hh:mm:ss)			Distância Percorrida (Km)				Bateria % Uso
	Estim.	Real	Estim.–Real	Dist.	WP1	RTL	Extra	
Voo 1	00:15:14	00:16:40	00:01:26	11,6	-	0,202	0,202	90
Voo 2	00:15:35	00:17:00	00:01:25	12,8	0,202	0,780	0,982	94
Voo 3	00:10:33	00:11:37	00:01:04	5,3	0,780	-	0,780	68
Total	00:41:22	00:45:17	00:03:55	29,7	0,982	0,982	1,964	

Legenda: **Estim.**: tempo estimado; **Real**: tempo real realizado; **Estim.–Real**: diferença dos tempos; **Dist.**: distância percorrida; **WP1**: distância do *waypoint* inicial da rota (RTL anterior); **RTL**: distância até a base; **Extra**: soma WP1 e RTL.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados dos voos realizados no **Cenário 3**, conforme mostrado na Tabela 10, indicam um acréscimo de 29s no tempo total de voo comparado ao **Cenário 1**. Esse aumento é menor em relação ao acréscimo observado no **Cenário 2**, que foi de 42s. Por representar um cenário mais próximo do real, onde há liberação do material biológico ao longo da missão, o **Cenário 3** demonstra uma pequena melhoria em relação ao **Cenário 2** e se aproxima dos resultados do **Cenário 1**. A exemplo dos **Cenários 1** e **2**, o consumo de bateria no **Cenário 3** manteve-se dentro de uma margem segura para o retorno à base.

Nos três cenários avaliados, o algoritmo que gerou as três sub-rotas garantiu a execução dos voos de forma satisfatória e respeitando a distância entre linhas. No entanto, observou-se que, à medida que a carga extra (*payload*) aumentava, a margem de segurança da bateria diminuía, reduzindo a reserva de energia disponível para imprevistos.

5.4 Algoritmo de Decomposição em Subáreas: Experimentos e Resultados

Esta seção tem como objetivo apresentar os experimentos realizados e avaliar a estratégia de divisão da área de interesse utilizando o diagrama de Voronoi para gerar as subáreas de cobertura. Nessa etapa, manteve-se o uso do sistema web, seguindo as etapas do *framework* proposto.

A área de interesse, os parâmetros de voo e o local de pouso e decolagem (Etapas A, B e C, respectivamente) foram mantidos os mesmos do experimento anterior, com a diferença de que o algoritmo empregado para gerar as rotas (Etapa D) foi o de decomposição da área em subáreas. A Figura 34 ilustra o resultado da aplicação do

Algoritmo de Voronoi na área de interesse.

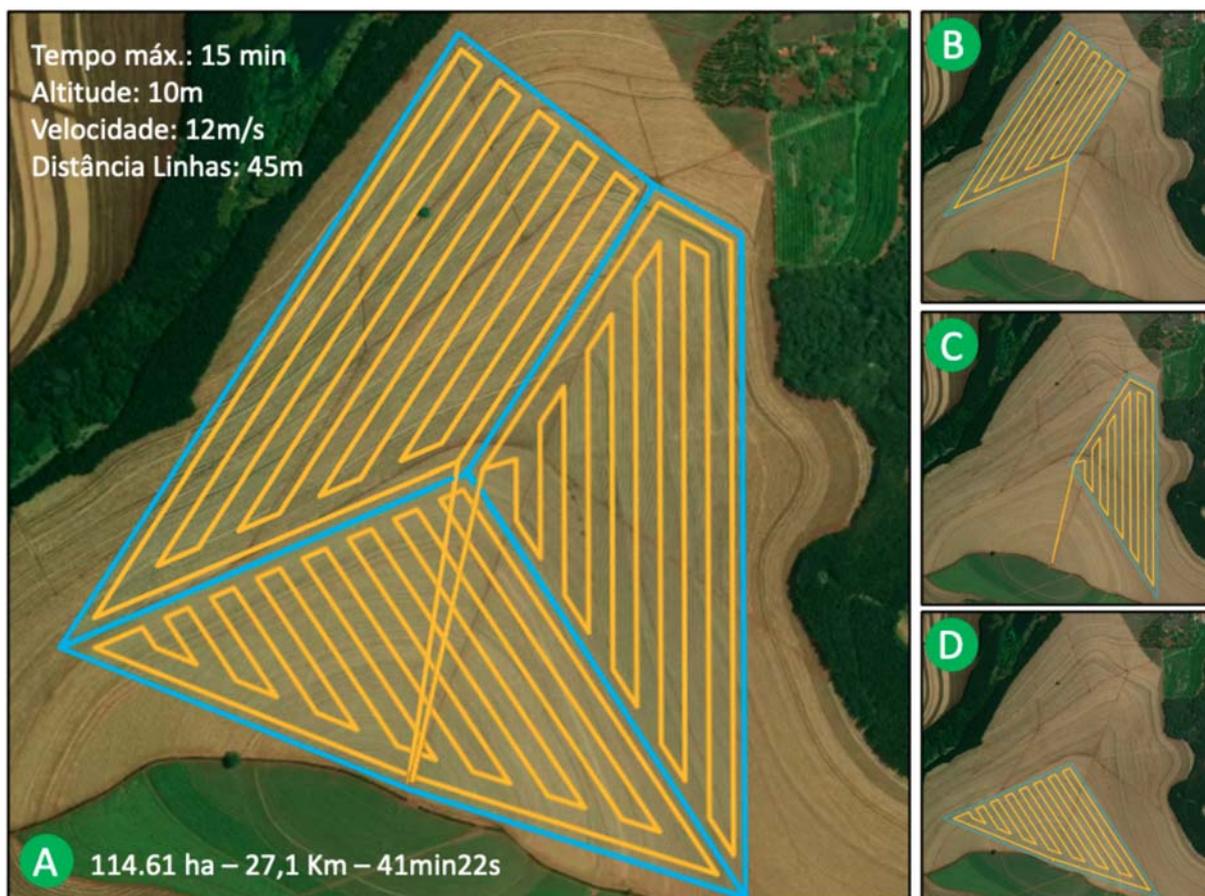


Figura 34 – **Área completa dividida em três subáreas**: área equivalente utilizada no experimento com o algoritmo de vai-e-volta para CB. (A) Área original com divisão por Voronoi, (B) 1ª subárea; (C) 2ª subárea; (D) 3ª subárea.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Optou-se por manter a mesma base de pouso e decolagem utilizada no experimento anterior para garantir uma comparação direta. A intersecção das três subáreas, localizada no centro do mapa, foi escolhida como ponto de início e término das rotas de vai-e-volta para as subáreas mais afastadas da base. Este ponto também representa a menor distância entre os vértices das subáreas mais distantes e a base, reduzindo as distâncias de deslocamento necessárias para cobrir cada subárea de maneira eficiente.

Os mesmos três cenários utilizados no experimento anterior foram adotados para avaliar a eficiência do planejamento de rotas e a influência do *payload*. Para diferenciar os cenários aplicados com o algoritmo de subáreas, foi acrescentado um asterisco (*) às suas denominações, resultando em **Cenário 1***, **Cenário 2*** e **Cenário 3***. Esses cenários, que variam o peso do dispensador e a liberação dos agentes biológicos, têm seus resultados apresentados na próxima seção.

5.4.1 Resultados dos Voos com Algoritmo de Subáreas

Os voos foram realizados sobre a mesma plantação de cana-de-açúcar, localizada no interior de São Manuel, SP, no dia 30 de janeiro de 2024, entre as 08:30h e 12:20h. Embora tenham sido realizados em dias distintos dos voos com a abordagem de decomposição de sub-rotas, as condições ambientais foram muito semelhantes. As condições para os voos também foram satisfatórias, conforme mostra a Tabela 11.

Tabela 11 – **Condições Ambientais:** voos com algoritmo de subáreas

Condição	Situação
Céu	Claro, sem nuvens e sem chuva.
Temperatura	24°C
Velocidade do vento	9 km/h
Umidade relativa do ar	60%
Visibilidade	Excelente, com boa visibilidade a longa distância
Pressão atmosférica	1015 hPa

Fonte: Elaborado pelo autor.

A cobertura foi realizada nas três subáreas mostradas nas Figuras 34B, 34C e 34D. É importante observar que, na rota ilustrada na Figura 34D, o RTL está contido na própria rota, evitando sobreposição do caminho. Da mesma forma, não há a necessidade de percorrer distâncias extras entre o RTL e o trajeto da base até o WP1 (início do trajeto de uma nova rota), como acontece nas rotas outras duas subáreas (Figuras 34B e 34C).

Os resultados da cobertura realizada no **Cenário 1*** utilizando as rotas geradas pelo algoritmo de subáreas são apresentados na Tabela 12. Em relação aos tempos de voo reais, todos ficaram próximos ou ligeiramente superiores aos tempos estimados. Todos os voos ficaram dentro da restrição de 15 min, sugerindo que o planejamento foi adaptado às condições de voo. A diferença acumulada entre os tempos estimados e reais para todos os voos foi de 1 min 53 s, demonstrando boa estimativa temporal durante o planejamento.

Tabela 12 – **Resultado voos com dispersador vazio:** cobertura com 3 subáreas

Voos Nº.	Tempo de Voo (hh:mm:ss)			Distância Percorrida (Km)				Bateria Usada
	Estim.	Real	Estim. x Real	Estim.	RTL	WP 1	Extra	
Voo1	00:14:44	00:15:06	00:00:22	9,9	0,401	0,401	0,802	80
Voo2	00:13:00	00:14:00	00:01:00	8,8	0,532	0,532	1,064	81
Voo3	00:13:20	00:13:51	00:00:31	8,4	0,000	0,000	0,000	80
Total	00:41:04	00:42:57	00:01:53	27,1	0,933	0,933	1,866	

Legenda: **Estim.:** tempo estimado; **Real:** tempo real realizado; **Estim. – Real:** diferença entre os tempos estimado e real; **Estim.:** distância estimada; **RTL:** Return to Launch; **WP1:** distância até o primeiro *waypoint*; **Extra:** distância adicional percorrida.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao comparar as duas estratégias de decomposição, observa-se que a decomposição em subáreas (Algoritmo 2) gerou trajetos de forma mais equilibrada. Essa distribuição mais uniforme resultou em tempos de voo, distâncias percorridas e consumo de bateria mais homogêneos entre as subáreas. No **Cenário 1***, observa-se uma redução no tempo “*Real*” de quase 2 min (1 min 51 s) comparado ao **Cenário 1**. Essa redução também foi observada na distância percorrida, com uma redução de 2,6 km, e na distância “*Extra*” de quase 1 Km (980m). Lembrando que na subárea da Figura 34D, não houve distância “*Extra*” pois o trajeto estava contido na própria rota.

Os resultados dos voos nos **Cenários 2*** e **3*** são apresentados nas Tabelas 13 e 14. Em ambos os cenários, os resultados seguiram a tendência observada nos **Cenários 2** e **3** do primeiro experimento de sub-rotas. No pior caso (**Cenários 2***), quando não houve a liberação do material biológico durante o voo (*payload* de 360g), houve um leve aumento no tempo de voo e no consumo de bateria. No cenário mais próximo do real (**Cenários 3***), com a liberação progressiva do material biológico durante o voo, observou-se uma pequena melhoria em relação ao pior caso (**Cenários 2***), aproximando-se dos resultados do melhor caso (**Cenários 1***) em termos de tempo de voo e consumo de bateria. Esses resultados reforçam a tendência de que a carga útil adicional (*payload*) não influenciou significativamente a dinâmica dos voos nos experimentos realizados, tanto na estratégia de decomposição em sub-rotas quanto na de subáreas.

Tabela 13 – **Resultado voos com dispersador cheio, sem soltura**: cobertura com 3 subáreas.

Voos N°.	Tempo de Voo (hh:mm:ss)			Distância Percorrida (Km)				Bateria
	Estim.	Real	Estim. x Real	Estim.	RTL	WP 1	Extra	Usada
Voo1	00:14:44	00:15:26	00:00:42	9,9	0,401	0,401	0,802	87
Voo2	00:13:00	00:14:01	00:01:01	8,8	0,532	0,532	1,064	90
Voo3	00:13:20	00:14:19	00:00:59	8,4	0,000	0,000	0,000	86
Total	00:41:04	00:43:46	00:02:42	27,1	0,933	0,933	1,866	

Legenda: **Estim.**: tempo estimado; **Real**: tempo real realizado; **Estim. x Real**: diferença entre os tempos estimado e real; **Estim.**: distância estimada; **RTL**: Return to Launch; **WP1**: distância até o primeiro *waypoint*; **Extra**: distância adicional percorrida. **Usada**: porcentagem da bateria utilizada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5 Considerações Finais

Após a coleta e análise dos dados, foi possível avaliar as duas hipóteses propostas. Esses resultados servem para análise e comparação entre os algoritmos, destacando as contribuições específicas de cada abordagem no contexto do planejamento de rotas de cobertura de VANTs no controle biológico de pragas em cenários reais de grandes áreas.

Ao observar as Figuras 33 e 34, resultados da aplicação dos algoritmos de de-

Tabela 14 – **Resultado voos com dispersador cheio, com soltura:** cobertura com 3 subáreas.

Voos	Tempo de Voo (hh:mm:ss)			Distância Percorrida (Km)				Bateria
	Nº.	Estim.	Real	Estim. x Real	Estim.	RTL	WP 1	Extra
Voo1	00:14:44	00:15:14	00:00:30	9,9	0,401	0,401	0,802	84
Voo2	00:13:00	00:13:50	00:00:50	8,8	0,532	0,532	1,064	87
Voo3	00:13:20	00:14:00	00:00:40	8,4	0,000	0,000	0,000	82
Total	00:41:04	00:43:04	00:02:00	27,1	0,933	0,933	1,866	

Legenda: **Estim.**: tempo estimado; **Real**: tempo real realizado; **Estim. x Real**: diferença entre os tempos estimado e real; **Estim.**: distância estimada; **RTL**: Return to Launch; **WP1**: distância até o primeiro *waypoint*; **Extra**: distância adicional percorrida. **Usada**: porcentagem da bateria utilizada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

composição, é possível observar que existem algumas diferenças entre as duas abordagens. Na Figura 33, que representa a aplicação do Algoritmo 1 (sub-rotas), a rota original, que continha dois pontos de quebra, foi subdividida em três sub-rotas. A área total coberta foi de 114,61 ha, com uma distância total percorrida de 29,7 km em 44 min 48 s. No entanto, a divisão das sub-rotas parece menos uniforme, o que pode resultar em uma distribuição de trabalho desigual e possíveis ineficiências. Isso pode ser percebido no Voo 3, que registrou a menor distância percorrida, cobrindo apenas 18% da missão total, enquanto os Voos 1 e 2 representaram 39% e 43%, respectivamente.

Por outro lado, a Figura 34, que ilustra a aplicação do Algoritmo 2 (subáreas), mostra uma divisão mais uniforme das subáreas. Para cobrir a mesma área, a distância total percorrida e o tempo total foi um pouco menor em relação ao Algoritmo 1, com 28,9 km em 42 min 57 s. Esse resultado representa uma redução de 2,6 km na distância percorrida (diferença de aproximadamente 2,8%) e 1 min 51 s no tempo de voo (diferença de 4,1%). Além disso, a distribuição de trabalho entre os voos foi mais equilibrada com o Algoritmo 2, onde os Voos 1, 2 e 3 cobriram aproximadamente 36,5%, 32,5% e 31,0% da área total, respectivamente. Essa distribuição mais uniforme sugere uma eficiência operacional aumentada, minimizando a sobrecarga em qualquer uma das subáreas e maximizando a utilização do VANT. Essa análise sugere que o Algoritmo 2 pode oferecer vantagens significativas em termos de uniformidade e eficiência na distribuição das rotas de cobertura. Esse comportamento é especialmente relevante em cenários que exigem uma gestão equilibrada do tempo e da distância percorrida, como em grandes áreas irregulares ou quando se utiliza um único VANT para cobrir uma extensa área. Nessas situações, o equilíbrio é desejável para maximizar a autonomia do VANT, evitando a necessidade de retornos frequentes para troca de baterias ou replanejamento de rotas, garantindo que o trabalho seja concluído com o mínimo de interrupções e maior eficiência operacional.

Os resultados dos voos realizados nos três cenários distintos (Cenário 1, 2 e 3) para cada algoritmo indicam que o peso adicional do dispersador (*payload*) não influenciou significativamente a dinâmica dos voos. No pior caso, quando não houve a

liberação do material biológico durante o voo (*payload* de 360g), houve um leve aumento no tempo de voo e no consumo de bateria. No cenário mais próximo do real, com a liberação progressiva do material biológico durante o voo, observou-se uma pequena melhoria em relação ao Cenário 2, aproximando-se dos resultados do Cenário 1, em termos de tempo de voo e consumo de bateria. Esses resultados reforçam a tendência de que o (*payload*) não impacta de forma significativa a operação, tanto na estratégia de decomposição em sub-rotas quanto na de subáreas.

Além dessas considerações, outras duas situações relacionadas à redução da distância extra podem ser hipoteticamente avaliadas. Embora não tenham sido objeto de experimentação nesta tese, essas situações diminuem os trajetos e, conseqüentemente, o tempo de voo. Primeiro, o Algoritmo 1 torna-se vantajoso quando os pontos de quebra entre as sub-rotas estão próximos do ponto de pouso e decolagem. No entanto, prever essa proximidade é difícil, pois depende de fatores como o tamanho da Rol, a quantidade e homogeneidade das sub-rotas geradas e a capacidade de bateria do VANT. Em tais situações, sempre haverá alguma distância extra percorrida.

Segundo, o Algoritmo 2 pode eliminar ou reduzir a distância extra se o ponto de decolagem for centralizado na divisão entre as subáreas. Por exemplo, na Figura 34, que resultou em três subáreas, se o ponto de decolagem e pouso fosse atribuído no ponto de interseção das três subáreas, isso possibilitaria a geração de rotas sem a necessidade de percorrer distâncias extras para recarga de bateria e sem sobreposição. Nesse caso, o Algoritmo 2 é mais adequado, pois facilita uma distribuição uniforme das operações e otimiza a cobertura sem exigir deslocamentos desnecessários.

Esses resultados e análises fornecem uma base para seleção da estratégia de planejamento de rotas de cobertura mais adequada para operações de controle biológico utilizando VANTs, contribuindo significativamente para liberação de agentes biológicos em grandes áreas.

6 CONCLUSÃO

Neste capítulo, é apresentada uma visão geral da pesquisa, abordando suas principais contribuições, dificuldades e limitações. Também são listadas algumas perspectivas para trabalhos futuros.

Os objetivos estabelecidos no início desta tese foram plenamente alcançados. Inicialmente, foi realizada uma revisão abrangente sobre o planejamento de rotas de cobertura com VANTs no contexto do controle biológico de pragas, atendendo ao objetivo de revisar os conceitos fundamentais para o entendimento da área. Em seguida, foi proposto e desenvolvido um *framework* específico, que integrou diversas variáveis operacionais, como a altitude, a velocidade, o tempo de voo, a distância entre linhas do trajeto e a adequação às bordas das áreas de cultivo, com validação prática em áreas de grande extensão. Esse *framework* cumpre o objetivo de propor um método para realizar operações de liberação de agentes biológicos sem embalagem, integrando todos os parâmetros necessários à missão.

Os algoritmos de decomposição de rotas em sub-rotas e de decomposição da área em subáreas, ajustadas pelo diagrama de Voronoi, atingiram plenamente o objetivo de propor algoritmos que geram trajetórias de forma automatizada e com flexibilidade. Eles demonstraram eficácia e flexibilidade na geração de trajetórias, ajustando-se de forma eficiente às posições de decolagem e pouso. Esses algoritmos foram testados em cenários reais, com a condução de voos práticos que validaram os resultados teóricos, cumprindo também o objetivo de quantificar e validar as contribuições propostas.

Além disso, a criação de uma aplicação web capaz de operar em cenários reais destacou-se como uma contribuição prática e tecnológica deste trabalho, alinhando-se ao objetivo de desenvolver uma solução prática para planejamento de rotas de VANTs em áreas de grande extensão. Os resultados dessa aplicação foram amplamente divulgados na comunidade científica por meio de publicações em conferências e periódicos, atendendo ao objetivo de disseminar o conhecimento gerado.

Esta tese vai além dos estudos tradicionais que se limitam a áreas regulares simples e simulações teóricas. A pesquisa validou suas hipóteses através de experimentos em condições ambientais reais, utilizando diferentes cenários de carga (*payload*).

Os algoritmos desenvolvidos – decomposição da rota completa em sub-rotas e decomposição da área de interesse em subáreas utilizando o diagrama de Voronoi – foram testados em três cenários distintos, confirmando sua eficácia e adaptabilidade.

Os resultados mostram que os algoritmos oferecem benefícios substanciais, sendo sua aplicabilidade condicionada pelas características específicas da área de interesse e dos requisitos operacionais. Diferentemente de estudos anteriores, este trabalho incorpora um tratamento minucioso das bordas das lavouras e respeita as distâncias entre as linhas de voo, garantindo não apenas a cobertura eficaz, mas também a eficiência na utilização dos recursos do VANT. Essas melhorias foram implementadas por meio de uma abordagem sistematizada e automatizada, destacando-se da literatura existente.

Em particular, o algoritmo de decomposição em sub-rotas mostrou-se eficaz para trajetos mais simples e regulares, aprimorando as rotas por meio da definição de pontos de quebra. Esses pontos são essenciais para minimizar deslocamentos que poderiam esgotar a bateria da aeronave e comprometer a conclusão efetiva da missão. Adicionalmente, a integração do retorno ao local de decolagem e pouso (RTL) na sequência da rota, especialmente em cenários sem pontos de quebra, evitou a sobreposição na cobertura de áreas previamente tratadas, um detalhe frequentemente omitido em pesquisas anteriores e ausente nos softwares comerciais atualmente disponíveis.

Por outro lado, a decomposição em subáreas utilizando o diagrama de Voronoi destacou-se pela sua eficácia em contextos de maior complexidade geométrica. Este algoritmo demonstrou uma capacidade única de se adaptar a configurações de terreno com contornos irregulares e ângulos internos côncavos, oferecendo uma cobertura mais uniforme e contínua. Isso não apenas atende às necessidades práticas do controle biológico de pragas, mas também fundamenta futuras investigações sobre sua aplicabilidade em condições ainda mais variadas.

As principais dificuldades enfrentadas durante a condução desta investigação incluíram garantir a compatibilidade dos arquivos de *waypoints*, essenciais para a geração das rotas dos VANTs. Isso exigiu um entendimento detalhado dos sistemas de controle de voo e a adaptação aos diversos formatos de arquivo para garantir a funcionalidade com diferentes modelos de VANT. Outro desafio significativo foi a interpretação dos dados pós-voo, complicada pela dificuldade de acessar e integrar esses dados com as ferramentas de análise disponíveis. Outra barreira importante foi a logística de assegurar a disponibilidade dos pilotos para executar os voos sob condições ambientais que se alinhassem aos parâmetros dos experimentos, o que foi superado permitindo a condução dos voos conforme o previsto. Ademais, a obtenção de material biológico necessário para avaliação do impacto do *payload* se mostrou um ponto crítico, introduzindo uma camada adicional de complexidade à pesquisa.

As contribuições desta pesquisa são enfatizadas pelos seguintes pontos: *(i)* a concepção, desenvolvimento e validação de um *framework* focado no controle biológico de pragas utilizando VANTs como plataformas de dispersão, com potencial de extensão para outras aplicações que envolvam problemas de PRC; *(ii)* a criação de algoritmos detalhados de planejamento de rotas de cobertura, ajustados para operações em grandes áreas, levando em consideração variáveis operacionais críticas, como a distância entre as linhas de voo, a aderência aos contornos das áreas de cultivo, além de proporcionar flexibilidade na trajetória que se adapta dinamicamente de acordo com o ponto de decolagem e pouso, e outros fatores operacionais como velocidade, altitude e duração estimada dos voos; *(iii)* a implementação de uma aplicação web que materializa a solução de PRC, abordando aspectos críticos de cenários reais como a indisponibilidade de internet, a possibilidade de ajustes *in loco* das missões, e o uso de computadores de baixo custo com capacidade computacional limitada, o que culminou no registro de um software. O registro deste software valida a sua conformidade técnica com as controladoras de voo do mercado, assegurando uma integração eficaz e ampla aplicabilidade no planejamento de rotas para VANTs; *(iv)* a realização de testes práticos por meio de voos reais para a validação completa das teorias propostas, destacando-se dos estudos anteriores que não exploraram tais condições práticas. Além disso, os resultados e métodos desta pesquisa foram divulgados na comunidade científica, contribuindo para o avanço do conhecimento nos temas tratados na tese.

Como trabalhos futuros, além de experimentos em terrenos variados e da integração com APIs de mapas 3D para melhorar os planos de voo, podem ser investigados os efeitos da ação do vento na dispersão dos agentes biológicos, sua influência no tempo de voo e no consumo de bateria. Também é possível explorar o uso de estratégias de suavização de curvas nas rotas, visando reduzir desacelerações bruscas e aumentar a eficiência operacional. Outra linha de estudo envolve o desenvolvimento de soluções embarcadas que integrem VANTs com dispositivos de liberação, agregando inteligência e otimização em tempo real às operações de controle biológico. A integração dessas tecnologias permitiria ajustes automáticos das rotas e das quantidades de agentes aplicados, resultando em um sistema mais eficiente e autônomo.

REFERÊNCIAS

ACAR, E. U. et al. Morse decompositions for coverage tasks. **The international journal of robotics research**, [S.l.], v.21, n.4, p.331–344, 2002.

Agência Brasil. **Aedes aegypti do Bem reduz em 82% as larvas selvagens do mosquito no Cecap/Eldorado**. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/educacao/noticia/2016-01/aedes-aegypti-do-bem-reduz-em-82-incidencia-do-mosquito-em-bairro-de>>. Acesso em: 16 Dez. 2022.

ALISSON, E. **Registro de produtos para controle biológico de pragas ultrapassa o de agroquímicos no Brasil**. Disp. em: <<https://agencia.fapesp.br/registro-de-produtos-para-controle-biologico-de-pragas-ultrapassa-o-de-agroquimicos-no-brasil/51431>> Acesso em: 08 maio 2024, Agência FAPESP.

ALMADHOUN, R.; TAHA, T.; SENEVIRATNE, L.; ZWEIRI, Y. A survey on multi-robot coverage path planning for model reconstruction and mapping. **SN Applied Sciences**, [S.l.], v.1, n.8, p.1–24, 2019.

ALMEIDA, M. D. et al. A flexibilização da legislação brasileira de agrotóxicos e os riscos à saúde humana: análise do Projeto de Lei nº 3.200/2015. **Cadernos de Saúde Pública**, [S.l.], v.33, 2017.

ALVES, R. T. **Bioinsumos para controle biológico de insetos-praga da cana-de-açúcar**. Disp. em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/83695100/artigo---bioinsumos-para-controle-biologico-de-insetos-praga-da-cana-de-acucar>> Acesso em: 15 mai. 2024, Embrapa.

ALVES, S. B.; LOPES, R. B. **Controle Microbiano de pragas na América Latina**. Piracicaba, São Paulo, Brasil: FAPESP/FEALQ, 2008.

AMANOR-BOADU, J.; GUISEPPI-ELIE, A.; SÁNCHEZ-SINENCIO, E. The impact of pulse charging parameters on the life cycle of lithium-ion polymer batteries. **Energies**, [S.l.], v.11, n.8, p.2162, 2018.

ANAC. **Regras da Anac para uso de Drones entram em vigor.** 1–7p. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2017/regras-da-anac-para-uso-de-drones-entram-em-vigor/release_drone.pdf>. Acesso em: 10 Mar. 2022.

ANAC. **Requisitos Gerais para Aeronaves Não Tripuladas de Uso Civil - RBAC-E nº 94.** Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94/@@display-file/arquivo_norma/RBACE94EMD00.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2022.

ANDERSEN, H. L. **Path planning for search and rescue mission using multicopters.** 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Institutt for teknisk kybernetikk. Disp. em <<https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/261317>>. Acesso em: 02 mai. 2021.

ANNAMALAI, L.; VIGNESHWAR, S.; SUBASHINI, G. et al. Grid Traversal Path Planning for Robot Foraging. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN COMPUTING, COMMUNICATION CONTROL AND NETWORKING (ICACCCN), 2020., 2020. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2020. p.940–945.

APOSTOLIDIS, S. D.; KAPOUTSIS, P. C.; KAPOUTSIS, A. C.; KOSMATOPOULOS, E. B. Cooperative multi-UAV coverage mission planning platform for remote sensing applications. **Autonomous Robots**, [S.l.], v.46, n.2, p.373–400, 2022.

ARDUPILOT. **ArduPilot Docs.** Disponível em: <<https://ardupilot.org/dev/#welcome-to-the-ardupilot-development-site>>. Acesso em: 24 dez. 2022.

ARDUPILOT. **Planning a Mission with Waypoints and Events — Mission Planner documentation.** Disponível em: <<https://ardupilot.org/planner/docs/common-planning-a-mission-with-waypoints-and-events.html>>. Acesso em: 24 Mai. 2022.

ARTEMENKO, O.; DOMINIC, O. J.; ANDRYEYEV, O.; MITSCHLE-THIEL, A. Energy-aware trajectory planning for the localization of mobile devices using an unmanned aerial vehicle. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATION AND NETWORKS (ICCCN), 2016., 2016. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2016. p.1–9.

AURENHAMMER, F.; KLEIN, R. Voronoi Diagrams. **Handbook of computational geometry**, [S.l.], v.5, n.10, p.201–290, 2000.

BAI, S.; LI, M.; MIAO, J. Path Planning for Large-Scale Data Collection in UAV-Assisted IoT System. In: IEEE 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AND COMMUNICATIONS (ICCC), 2022., 2022. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2022. p.817–822.

BAKER, K. F.; COOK, R. J. **Biological control of plant pathogens**. San Francisco: Freeman, 1974. 433p.

BALAMPANIS, F.; MAZA, I.; OLLERO, A. Coastal areas division and coverage with multiple UAVs for remote sensing. **Sensors**, [S.l.], v.17, n.4, p.808, 2017.

BALAMPANIS, F.; MAZA, I.; OLLERO, A. Spiral-like coverage path planning for multiple heterogeneous UAS operating in coastal regions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS (ICUAS), 2017., 2017. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017. p.617–624.

BANSAL, G.; SIKDAR, B. S-MAPS: Scalable mutual authentication protocol for dynamic UAV swarms. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, [S.l.], v.70, n.11, p.12088–12100, 2021.

BARRIENTOS, A. et al. Aerial remote sensing in agriculture: A practical approach to area coverage and path planning for fleets of mini aerial robots. **Journal of Field Robotics**, [S.l.], v.28, n.5, p.667–689, 2011.

BERGER, C. et al. Area coverage with heterogeneous UAVs using scan patterns. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SAFETY, SECURITY, AND RESCUE ROBOTICS (SSRR), 2016., 2016. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2016. p.342–349.

BERTI FILHO, E.; MACEDO, L. P. M. Fundamentos de controle biológico de insetos-praga. , [S.l.], 2011.

BETTIOL, W. **Controle biológico de doenças de plantas**. Brasília: Embrapa, 1991. 388p.

BETTIOL, W. Visão macro do mundo dos biológicos. **Campo & Negócios HF**, [S.l.], v.193, p.53–55, 2021.

BETTIOL, W.; MAFFIA, L. A.; CASTRO, M. L. M. P. Control biológico de enfermedades de plantas en Brasil. In: BETTIOL, W. et al. (Ed.). **Control biológico de enfermedades de planta en América Latina y el Caribe**. Montevideo: Universidad de la República, 2014. p.91–137.

BETTIOL, W.; SILVA, J.; CASTRO, M. Uso atual e perspectivas do Trichoderma no Brasil. **Trichoderma: uso na agricultura**, [S.l.], p.21–43, 2019. Brasília: Embrapa, 2019.

BORTOFF, S. Path planning for UAVs. **Proceedings of the 2000 American Control Conference. ACC (IEEE Cat. No.00CH36334)**, [S.l.], v.1, p.364–368 vol.1, 2000.

BRITO, R. C. **Um modelo de otimização para planejamento dinâmico de voo para grupos de drones por meio de sistema multiagente e leilões recursivos**. 2020. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — Universidade Federal do Paraná, 2020, Curitiba. Disp. em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/69128>>. Acesso em: 12 abr. 2021.

BUENO, V. H. P.; PARRA, J. R. P.; BETTIOL, W.; LENTEREN, J. C. van. Biological control in Brazil. In: LENTEREN, J. C. van; BUENO, V. H. P.; LUNA, M. G.; COLME-NAREZ, Y. C. (Ed.). **Biological control in Latin America and the Caribbean: its rich history and bright future**. Wallingford: CABI, 2020. p.78–107.

BUREMA, H.; FILIN, A. **Aerial farm robot system for crop dusting, planting, fertili-zing and other field jobs**. [S.l.]: Google Patents, 2016. n.US Patent 9,382,003.

CABREIRA, T. M.; BRISOLARA, L. B.; FERREIRA Jr, P. R. Survey on coverage path planning with unmanned aerial vehicles. **Drones**, [S.l.], v.3, n.1, p.4, 2019.

CABREIRA, T. M.; DI FRANCO, C.; FERREIRA, P. R.; BUTTAZZO, G. C. Energy-aware spiral coverage path planning for uav photogrammetric applications. **IEEE Robotics and Automation Letters**, [S.l.], v.3, n.4, p.3662–3668, 2018.

CABREIRA, T. M.; DI FRANCO, C.; FERREIRA, P. R.; BUTTAZZO, G. C. Energy-aware spiral coverage path planning for uav photogrammetric applications. **IEEE Robotics and automation letters**, [S.l.], v.3, n.4, p.3662–3668, 2018.

CABREIRA, T. M.; FERREIRA, P. R.; DI FRANCO, C.; BUTTAZZO, G. C. Grid-based coverage path planning with minimum energy over irregular-shaped areas with UAVs. In: ICUAS), 2019., 2019. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2019. p.758–767.

CHEN, S.; LI, C.; ZHUO, S. A distributed coverage algorithm for multi-UAV with average voronoi partition. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL, AUTOMATION AND SYSTEMS (ICCAS), 2017., 2017. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017. p.1083–1086.

CHEN, X.; LI, G.-y.; CHEN, X.-m. Path planning and cooperative control for multiple UAVs based on consistency theory and Voronoi diagram. In: CHINESE CONTROL AND DECISION CONFERENCE (CCDC), 2017., 2017. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017. p.881–886.

CHEN, Y.; ZHANG, H.; XU, M. The coverage problem in UAV network: A survey. In: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING, COMMUNICATIONS AND NETWORKING TECHNOLOGIES (ICCCNT), 2014. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2014. p.1–5.

CHENG, K. P.; MOHAN, R. E.; NHAN, N. H. K.; LE, A. V. Graph theory-based approach to accomplish complete coverage path planning tasks for reconfigurable robots. **IEEE Access**, [S.l.], v.7, p.94642–94657, 2019.

CHO, S. W. et al. Coverage path planning for multiple unmanned aerial vehicles in maritime search and rescue operations. **Computers & Industrial Engineering**, [S.l.], v.161, p.107612, 2021.

CHOI, H.-M.; LEE, J.-Y. **A Drone for biological control and environmental monitoring**. n.KR101801746B1. Accessed: 30-09-2024. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/KR101801746B1/en?q=KR101801746>>.

CHOSSET, H. Coverage of known spaces: The boustrophedon cellular decomposition. **Autonomous Robots**, [S.l.], v.9, p.247–253, 2000.

CHOSSET, H. Coverage for robotics - A survey of recent results. **Annals of Mathematics and Artificial Intelligence**, [S.l.], v.31, n.1-4, p.113–126, 2001.

CHOSSET, H.; PIGNON, P. Coverage path planning: The boustrophedon cellular decomposition. In: FIELD AND SERVICE ROBOTICS, 1998. **Anais...** [S.l.: s.n.], 1998. p.203–209.

COLLINS, L. et al. Scalable coverage path planning of multi-robot teams for monitoring non-convex areas. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA), 2021., 2021. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2021. p.7393–7399.

COOK, R.; BAKER, K. **The nature and practice of biological control of plant pathogens**. St. Paul: APS Press, 1983. 539p.

COOMBES, M.; CHEN, W.-H.; LIU, C. Boustrophedon coverage path planning for UAV aerial surveys in wind. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS (ICUAS), 2017., 2017. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017. p.1563–1571.

COOMBES, M.; FLETCHER, T.; CHEN, W.-H.; LIU, C. Optimal polygon decomposition for UAV survey coverage path planning in wind. **Sensors**, [S.l.], v.18, n.7, p.2132, 2018.

DAI, H.; SU, H.-C. On the locality properties of space-filling curves. In: ALGORITHMS AND COMPUTATION: 14TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM, ISAAC 2003, KYOTO, JAPAN, DECEMBER 15-17, 2003. PROCEEDINGS 14, 2003. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2003. p.385–394.

DAS, J.; MAJUMDER, S.; GUPTA, P.; DATTA, S. Scalable recommendations using decomposition techniques based on Voronoi diagrams. **Information Processing & Management**, [S.l.], v.58, n.4, p.102566, 2021.

DAVIS, J.; PERHINSCHI, M.; WILBURN, B.; KARAS, O. Development of a modified Voronoi algorithm for UAV path planning and obstacle avoidance. In: AIAA GUIDANCE, NAVIGATION, AND CONTROL CONFERENCE, 2012. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2012. p.4904.

DE BERG, M. et al. **Computational Geometry**: Introduction. [S.l.]: Springer, 1997.

DELAVARPOUR, N. et al. A technical study on UAV characteristics for precision agriculture applications and associated practical challenges. **Remote Sensing**, [S.l.], v.13, n.6, p.1204, 2021.

DESA, H. B.; DALI, M. F. B. M.; DZULKIFLI, M. Z. B.; AHMAM, Z. A. B. **Flying apparatus for aerial agricultural application**. n.US Patent App. 13/701,503. Retrieved from Google Patents.

DI FRANCO, C.; BUTAZZO, G. Energy-aware coverage path planning of UAVs. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTONOMOUS ROBOT SYSTEMS AND COMPETITIONS, 2015., 2015. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2015. p.111–117.

DI FRANCO, C.; BUTTAZZO, G. Energy-aware coverage path planning of UAVs. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTONOMOUS ROBOT SYSTEMS AND COMPETITIONS, 2015., 2015. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2015. p.111–117.

DI FRANCO, C.; BUTTAZZO, G. Coverage path planning for UAVs photogrammetry with energy and resolution constraints. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, [S.l.], v.83, n.3, p.445–462, 2016.

DRONENG. **Baterias LiPo**: tudo o que você precisa saber. Acesso em: 02 mai. 2023, <https://blog.droneng.com.br/baterias-lipo/>.

ELMESEIRY, N.; ALSHAER, N.; ISMAIL, T. A detailed survey and future directions of unmanned aerial vehicles (UAVs) with potential applications. **Aerospace**, [S.l.], v.8, n.12, p.363, 2021.

EMBRAPA. **Mosquito modificado geneticamente é nova arma de combate ao Aedes**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/30525791/mosquito-modificado-geneticamente-e-nova-arma-de-combate-ao-aedes>. Acesso em: 12 Dez. 2022.

EMBRAPA. **Controle Biológico**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-controle-biologico/sobre-o-tema>. Acesso em: 04 Mai. 2022.

EMBRAPA. **Embrapa divulga recomendações técnicas sobre a produção de bioinsumos on-farm.** Acesso em: 23 mar. 2024, <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/66275700/embrapa-divulga-recomendacoes-tecnicas-sobre-a-producao-de-bioinsumos-on-farm>.

Embrapa. **Panorama - Insetos Praga - Inimigos Naturais - Parasitoides de Lagartas - Vespa Cotesia flavipes Cameron (Hymenoptera: Braconidae).** Acesso em: 21 de abril de 2023, <http://panorama.cnpm.embrapa.br/insetos-praga/inimigos-naturais/parasitoides-de-lagartas/vespa-cotesia-flavipes-cameron-hymenoptera-braconidae>.

FAO. **New standards to curb the global spread of plant pests and diseases.** Disponível em: <<https://www.fao.org/news/story/en/item/1187738/icode/>>. Acesso em: 10 Jun. 2022.

FEVGAS, G.; LAGKAS, T.; ARGYRIOU, V.; SARIGIANNIDIS, P. Coverage path planning methods focusing on energy efficient and cooperative strategies for unmanned aerial vehicles. **Sensors**, [S.l.], v.22, n.3, p.1235, 2022.

FONTES, E. M. G.; VALADARES-INGLIS, M. C. Controle biológico de pragas da agricultura. **Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia-Livro técnico (INFOTECA-E)**, [S.l.], 2020.

FORNARI, M.; AMADO, T. J. C.; MOGORRÓN, H. C.; CHIOMENTO, J. L. T. Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) sobre o campo. **Sistema plantio direto no Brasil**, Passo Fundo, RS, Brasil, n.177, p.35–40, 2020.

FREITAS, H.; FAIÇAL, B. S.; SILVA, A. V. C. e; UEYAMA, J. Use of UAVs for an efficient capsule distribution and smart path planning for biological pest control. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S.l.], v.173, p.105387, 2020.

FREITAS, H.; TOMAZELA, L.; Cardoso E Silva, A. V.; UEYAMA, J. Using unmanned aerial vehicle to spread natural enemies for biological control in dynamic environments. **Proceedings - 2018 44th Latin American Computing Conference, CLEI 2018**, [S.l.], p.299–308, oct 2018.

GALCERAN, E.; CARRERAS, M. A survey on coverage path planning for robotics. **Robotics and Autonomous Systems**, [S.l.], v.61, n.12, p.1258–1276, dec 2013.

GREGO, C. et al. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar.** [S.l.]: Cap 5: Geoestatística aplicada a agricultura de precisão, 2014. Brasília, DF: Embrapa, 2014.

GUASTELLA, D. C. et al. Complete coverage path planning for aerial vehicle flocks deployed in outdoor environments. **Computers & Electrical Engineering**, [S.l.], v.75, p.189–201, 2019.

HASSAN, M. **Enabling Methodologies for Optimal Coverage by Multiple Autonomous Industrial Robots**. 2018. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — University of Technology Sydney, Sydney, Australia.

HERT, S.; LUMELSKY, V. Polygon area decomposition for multiple-robot workspace division. **International Journal of Computational Geometry & Applications**, [S.l.], v.8, n.04, p.437–466, 1998.

HERT, S.; TIWARI, S.; LUMELSKY, V. A terrain-covering algorithm for an AUV. **Autonomous Robots**, [S.l.], v.3, p.91–119, 1996.

HU, S.; XU, T.; WANG, B. Route-planning method for plant protection rotor drones in convex polygon regions. **Sensors**, [S.l.], v.21, n.6, p.2221, 2021.

HUANG, W. H. Optimal line-sweep-based decompositions for coverage algorithms. In: ICRA. IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (CAT. NO. 01CH37164), 2001., 2001. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2001. v.1, p.27–32.

HUANG, X.; SUN, M.; ZHOU, H.; LIU, S. A multi-robot coverage path planning algorithm for the environment with multiple land cover types. **IEEE Access**, [S.l.], v.8, p.198101–198117, 2020.

HUFFAKER, C. B. **Theory and practice of biological control**. [S.l.]: Elsevier, 2012.

JENSEN-NAU, K. R.; HERMANS, T.; LEANG, K. K. Near-optimal area-coverage path planning of energy-constrained aerial robots with application in autonomous environmental monitoring. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, [S.l.], v.18, n.3, p.1453–1468, 2020.

JENSEN-NAU, K. R.; HERMANS, T.; LEANG, K. K. Near-Optimal Area-Coverage Path Planning of Energy-Constrained Aerial Robots With Application in Autonomous Environmental Monitoring. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, [S.l.], v.18, n.3, p.1453–1468, 2021.

JIAO, Y.-S.; WANG, X.-M.; CHEN, H.; LI, Y. Research on the coverage path planning of uavs for polygon areas. In: IEEE CONFERENCE ON INDUSTRIAL ELECTRONICS AND APPLICATIONS, 2010., 2010. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2010. p.1467–1472.

KANELLAKIS, C.; NIKOLAKOPOULOS, G. Survey on computer vision for UAVs: Current developments and trends. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, [S.l.], v.87, n.1, p.141–168, 2017.

KEANE, J. F.; CARR, S. S. A brief history of early unmanned aircraft. **Johns Hopkins APL Technical Digest**, [S.l.], v.32, n.3, p.558–571, 2013.

KITCHENHAM, B.; CHARTERS, S. Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. , [S.l.], 2007.

LATOMBE, J.-C. Exact cell decomposition. **Robot Motion Planning**, [S.l.], p.200–247, 1991.

LENTEREN, J. C. van; BUENO, V. H. P.; LUNA, M. G.; COLMENAREZ, Y. C. (Ed.). **Biological Control in Latin America and the Caribbean: Its Rich History and Bright Future**. Boston: CABI, 2020. 550p.

LI, D.; WANG, X.; SUN, T. Energy-optimal coverage path planning on topographic map for environment survey with unmanned aerial vehicles. **Electronics Letters**, [S.l.], v.52, n.9, p.699–701, 2016.

LI, X. et al. Comparison of UAV and fixed-wing aerial application for alfalfa insect pest control: evaluating efficacy, residues, and spray quality. **Pest Management Science**, [S.l.], v.77, n.11, p.4980–4992, 2021.

LI, Y.; CHEN, H.; ER, M. J.; WANG, X. Coverage path planning for UAVs based on enhanced exact cellular decomposition method. **Mechatronics**, [S.l.], v.21, n.5, p.876–885, 2011.

LUNA, M. A. et al. Fast Multi-UAV Path Planning for Optimal Area Coverage in Aerial Sensing Applications. **Sensors**, [S.l.], v.22, n.6, p.2297, 2022.

LUO, H. et al. Optimization of pesticide spraying tasks via multi-uavs using genetic algorithm. **Mathematical Problems in Engineering**, [S.l.], v.2017, 2017.

MAAROUF, A.; KO, W.; NOUH, A. S. A recursive optimization algorithm for a surveillance of a convex area. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODELING SIMULATION AND APPLIED OPTIMIZATION (ICMSAO), 2019., 2019. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2019. p.1–4.

MACHADO, R. A. O.; MATIAS, N. R. **Sistema e método para liberação de produtos sólidos, a granel ou com invólucro, para controle biológico de pragas na agricultura usando dispensadores acoplados ou incorporados a VANTs**. Patent BR 10 2019 014753 9 A2.

MANYA, D. **Tudo sobre baterias LiPo para drones FPV**. Acesso em: 02 mai. 2023, <https://dronemanya.com/pt/post/tudo-sobre-baterias-lipo-para-drones-fpv>.

MATTE, I. I.; SANTOS, M. R. F. dos. **Equipamento Automático, Acoplável em VANT, para Liberação de Pulpa de Agentes Biológicos em Áreas Agrícolas**. Patent BR 20 2019 008594 6 U2.

MAZA, I.; OLLERO, A. Multiple UAV cooperative searching operation using polygon area decomposition and efficient coverage algorithms. In: **Distributed Autonomous Robotic Systems 6**. [S.l.]: Springer, 2007. p.221–230.

MEIER, S.; TOST, J.; HEIDMANN, F. On the relevance of cartography—An interaction design perspective. In: ICA, 2019. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2019. v.2, p.NA–NA.

NAKASHIMA, R. T. et al. **Mecanismo de leilão descentralizado para atribuição de tarefas colaborativas em um sistemas multirrobo**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

NAM, L.; HUANG, L.; LI, X. J.; XU, J. An approach for coverage path planning for UAVs. In: IEEE 14TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON ADVANCED MOTION CONTROL (AMC), 2016., 2016. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2016. p.411–416.

NASIRIAN, B.; MEHRANDEZH, M.; JANABI-SHARIFI, F. Efficient coverage path planning for mobile disinfecting robots using graph-based representation of environment. **Frontiers in Robotics and AI**, [S.l.], v.8, p.624333, 2021.

NGUYEN, V. T.; JUNG, K.; DANG, T. Dronevr: A web virtual reality simulator for drone operator. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND VIRTUAL REALITY (AIVR), 2019., 2019. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2019. p.257–2575.

NICODEMO, F. G. **Sistema Embarcado Multiuso para Liberação Autônoma de Agentes Biológicos no Controle Biológico de Pragas de Precisão**. Patent BR 10 2019 003863 2.

NICODEMO, F. G. **Sistema para Liberação de Agentes Biológicos no Controle Biológico de Pragas**. Patent BR 11 2020 008560 0.

NIELSEN, L. D.; SUNG, I.; NIELSEN, P. Convex decomposition for a coverage path planning for autonomous vehicles: Interior extension of edges. **Sensors**, [S.l.], v.19, n.19, p.4165, 2019.

OKSANEN, T.; VISALA, A. Coverage path planning algorithms for agricultural field machines. **Journal of field robotics**, [S.l.], v.26, n.8, p.651–668, 2009.

OLIVEIRA, A. J. de et al. Potencialidades da utilização de drones na agricultura de precisão. **Brazilian Journal of Development**, [S.l.], v.6, n.9, p.64140–64149, 2020.

ÖST, G. **Search path generation with UAV applications using approximate convex decomposition**. 2012. Independent thesis Advanced level (degree of Master — Linköping University, The Institute of Technology, Linköping, Sweden.

PARRA, J. R. P. Biological control in Brazil: an overview. **Scientia Agricola**, [S.l.], v.71, p.345–355, 2014.

PARRA, J. R. P.; BOTELHO, P. S. M.; CORRÊA-FERREIRA, B. S.; BENTO, J. M. S. Controle biológico: terminologia. **Controle Biológico no Brasil: parasitóides e predadores**. São Paulo. Manole editora, [S.l.], p.1–16, 2002.

PASTORI, P.; MONTEIRO, L.; BOTTON, M.; PRATISSOLI, D. Efeito da idade do parasitoide e do hospedeiro na reprodução de *Trichogramma pretiosum* Riley (Hymenoptera: Trichogrammatidae) em ovos de *Bonagota salubricola* (Meyrick) (Lepidoptera: Tortricidae). **Arquivos do Instituto Biológico**, [S.l.], v.77, p.349–353, 2020.

PAULL, L. et al. Sensor-driven area coverage for an autonomous fixed-wing unmanned aerial vehicle. **IEEE transactions on cybernetics**, [S.l.], v.44, n.9, p.1605–1618, 2013.

PEHLIVANOGLU, Y. V.; PEHLIVANOGLU, P. An enhanced genetic algorithm for path planning of autonomous UAV in target coverage problems. **Applied Soft Computing**, [S.l.], v.112, p.107796, 2021.

PEREIRA NETO, J. L. d. A.; ZEBENDO, L. F. S. **Aplicação WEB para controle de VANTs**: utilização da plataforma Raspberry Pi como computador de bordo. 2022. 76p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Telecomunicações) — Universidade Federal Fluminense, Niterói.

PÉREZ-GONZÁLEZ, A.; BENÍTEZ-MONTOYA, N.; JARAMILLO-DUQUE, Á.; CANO-QUINTERO, J. B. Coverage path planning with semantic segmentation for UAV in PV plants. **Applied Sciences**, [S.l.], v.11, n.24, p.12093, 2021.

QI, P. et al. Design and test of target-oriented profile modeling of unmanned aerial vehicle spraying. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, [S.l.], v.15, n.3, p.85–91, 2022.

RANGEL, R. K. Development of an UAVS distribution tools for pest's biological control "Bug Bombs!". In: AEROSPACE CONFERENCE, 2016. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2016. p.1–8.

RANGEL, R. K. Development of pest's biological control tool using VTOL UAV Systems. In: ICAS CONGRESS, 2016. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2016.

SADAT, S. A.; WAWERLA, J.; VAUGHAN, R. Fractal trajectories for online non-uniform aerial coverage. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA), 2015., 2015. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2015. p.2971–2976.

SALGADO, R. R.; LIBÓRIO, M. P.; SILVA MARTIN, C. A. P. da; BERNARDES, P. WebGIS de geomarketing: solução de dois estágios para um problema de localização do varejo. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, [S.l.], v.46, n.1, p.75–89, 2019.

SANNA, G.; GODIO, S.; GUGLIERI, G. Neural network based algorithm for multi-UAV coverage path planning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS (ICUAS), 2021., 2021. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2021. p.1210–1217.

SANTOS, M. A. et al. A discrete robust adaptive control of a tilt-rotor UAV for an enlarged flight envelope. In: IEEE 56TH ANNUAL CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL (CDC), 2017., 2017. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017. p.5208–5214.

SANTOS, R. S.; MARTINELLI, P. R. P. Controle biológico de *Meloidogyne* spp. com fungos nematófagos em cultivo de cenoura. **Research, Society and Development**, [S.l.], v.11, n.12, p.e157111234301–e157111234301, 2022.

SERÔDIO, P. M. S. B. **Desenvolvimento de um conversor CC-CC bidirecional interleaved para testes de baterias de lítio ferro fosfato (LiFePO₄)**. 2018. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — .

SHAIKH, S.; KUMAR, N.; JAIN, P. K.; TANDON, P. Hilbert curve based toolpath for FDM process. In: CAD/CAM, ROBOTICS AND FACTORIES OF THE FUTURE: PROCEEDINGS OF THE 28TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CARS & FOF 2016, 2016. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2016. p.751–759.

SHAKHATREH, H. et al. Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges. **Ieee Access**, [S.l.], v.7, p.48572–48634, 2019.

SKOROBOGATOV, G.; BARRADO, C.; SALAMÍ, E. Multiple UAV systems: A survey. **Unmanned Systems**, [S.l.], v.8, n.02, p.149–169, 2020.

SKOROBOGATOV, G.; BARRADO, C.; SALAMÍ, E.; PASTOR, E. Flight planning in multi-unmanned aerial vehicle systems: Nonconvex polygon area decomposition and trajectory assignment. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, [S.l.], v.18, n.1, p.1729881421989551, 2021.

SOUSA, D. S. de et al. Knowing Robotox: A profile of monitoring and releasing pesticides in Brazil. **Research, Society and Development**, [S.l.], v.11, n.6, p.e43511629226–e43511629226, 2022.

SRIVASTAVA, D.; PAKKAR, R.; LANGREHR, A.; YAMANE, C. Adaptable UAV swarm autonomy and formation platform. In: IEEE AEROSPACE CONFERENCE, 2019., 2019. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2019. p.1–6.

SRIVASTAVA, K.; PANDEY, P. C.; SHARMA, J. K. An approach for route optimization in applications of precision agriculture using UAVs. **Drones**, [S.l.], v.4, n.3, p.58, 2020.

SU, Y.; WU, Y.; JI, W.; SUN, X. Computational morphogenesis of free-form grid structures with Voronoi diagram. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, [S.l.], v.36, n.3, p.318–330, 2021.

TAGUTI, É. A.; MONTEIRO, G. G.; SOUZA, I. L.; MARTINELLI, N. M. SELECTIVITY OF INSECTICIDES AND BIOINSECTICIDES TO COMMERCIALY USED PARASITICIDS OF *Diatraea saccharalis* ON SUGARCANE. **Editora chefe Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira Editora executiva Natalia Oliveira Assistente editorial**, [S.l.], p.97, 2022.

TEAL GROUP, . **2022/2023 World Civil Unmanned Aerial Systems Market Profile and Forecast**. Disponível em: <<https://www.researchandmarkets.com/reports/5685194/20222023-world-civil-unmanned-aerial-systems>>. Acesso em: 10 dez. 2022.

TORRES, M.; PELTA, D. A.; VERDEGAY, J. L.; TORRES, J. C. Coverage path planning with unmanned aerial vehicles for 3D terrain reconstruction. **Expert Systems with Applications**, [S.l.], v.55, p.441–451, 2016.

TOTH, C. D.; O'ROURKE, J.; GOODMAN, J. E. **Handbook of discrete and computational geometry**. [S.l.]: CRC press, 2017.

TRINDADE, E. G. B. **Baterias de Drones (LiPo): Tudo o Que Você Precisa Saber**. GeoSense. Disponível em: <<https://geosense.net.br/2022/02/21/baterias-de-drones-lipo-tudo-o-que-voce-precisa-saber/>>. Acesso em: 04 dez. 2022.

VALENTE, J.; BARRIENTOS, A.; DEL CERRO, J. Coverage path planning to survey large outdoor areas with aerial robots: A comprehensive analysis. **Introduction to Modern Robotics**, [S.l.], v.11, 2011.

VALENTE, J.; DEL CERRO, J.; BARRIENTOS, A.; SANZ, D. Aerial coverage optimization in precision agriculture management: A musical harmony inspired approach. **Computers and electronics in agriculture**, [S.l.], v.99, p.153–159, 2013.

VAZQUEZ-CARMONA, E. V.; VASQUEZ-GOMEZ, J. I.; HERRERA-LOZADA, J. C.; ANTONIO-CRUZ, M. Coverage path planning for spraying drones. **Computers & Industrial Engineering**, [S.l.], v.168, p.108125, 2022.

VIEIRA, H. d. F. **Um modelo multiobjetivo para controle biológico de pragas por meio de VANT**: distribuição eficiente de cápsulas. 2020. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — Universidade de São Paulo.

WANG, X. et al. Random generation of convex granule packing based on weighted Voronoi tessellation and cubic-polynomial-curve fitting. **Computers and Geotechnics**, [S.l.], v.113, p.103088, 2019.

WEI, X. et al. A new fast consensus algorithm applied in rendezvous of multi-UAV. In: THE 27TH CHINESE CONTROL AND DECISION CONFERENCE (2015 CCDC), 2015. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2015. p.55–60.

WONG, S. **Qualitative topological coverage of unknown environments by mobile robots**. 2006. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — ResearchSpace Auckland, Auckland, New Zealand.

WONG, S. C.; MACDONALD, B. A. Complete coverage by mobile robots using slice decomposition based on natural landmarks. In: PRICAI 2004: TRENDS IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE: 8TH PACIFIC RIM INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, AUCKLAND, NEW ZEALAND, AUGUST 9-13, 2004. PROCEEDINGS 8, 2004. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2004. p.683–692.

WUNSCHE, T. **System and Method for Locally Precise Application of Solids and Liquids and Mixtures Thereof in Agriculture and Forestry**. US Patent App. 16/075,362.

XAVIER, V. L. Programa Nacional de Bioinsumos: proposição de um sistema de monitoramento de biofábricas. , [S.l.], 2022.

XU, A.; VIRIYASUTHEE, C.; REKLEITIS, I. Optimal complete terrain coverage using an unmanned aerial vehicle. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2011., 2011. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2011. p.2513–2519.

XU, D.; BAI, Y.; GONG, X.; XU, Z. Design of Trichogramma delivering system based on hex-rotor UAV. **Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery**, [S.l.], v.47, n.1, p.1–7, 2016.

YOURDSHAHI, E. S.; ANGELOV, P.; MARCOLINO, L. S.; TSIANAKAS, G. Towards evolving cooperative mapping for large-scale UAV Teams. In: IEEE SYMPOSIUM

SERIES ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE (SSCI), 2018., 2018. **Anais...**
[S.l.: s.n.], 2018. p.2262–2269.

ZHAN, Y. et al. Biological control technology and application based on agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) intelligent delivery of insect natural enemies (Trichogramma) carrier. **Pest Management Science**, [S.l.], 2021.

Anexos

ANEXO A – REGRAS DA ANAC PARA USO DE DRONES

Regras da ANAC para uso de drones entram em vigor

Norma cria condições para operações mais seguras

Brasília, 2 de maio de 2017 – A Diretoria Colegiada da ANAC aprovou, nesta terça-feira (02/05), o regulamento especial para utilização de aeronaves não tripuladas, popularmente chamadas de drones. A norma (Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial – RBAC – E nº 94) estará publicada no Diário Oficial da União desta quarta-feira (03/05).

O objetivo é tornar viáveis as operações desses equipamentos, preservando-se a segurança das pessoas. A instituição das regras também contribuirá para promover o desenvolvimento sustentável e seguro para o setor.

O normativo foi elaborado levando-se em conta o nível de complexidade e de risco envolvido nas operações e nos tipos de equipamentos. Alguns limites estabelecidos no novo regulamento seguem definições de outras autoridades de aviação civil como [Federal Aviation Administration \(FAA\)](#), [Civil Aviation Safety Authority \(CASA\)](#) e [European Aviation Safety Agency \(EASA\)](#), reguladores dos Estados Unidos, Austrália e da União Europeia, respectivamente.

A partir de agora, as operações de aeronaves não tripuladas (de uso recreativo, corporativo, comercial ou experimental) devem seguir as novas regras da ANAC, que são complementares aos normativos de outros órgãos públicos como o [Departamento de Controle do Espaço Aéreo \(DECEA\)](#) e da [Agência Nacional de Telecomunicações \(ANATEL\)](#).

O regulamento sobre aeronaves não tripuladas foi amplamente discutido com a sociedade, associações e empresas interessadas, bem como com outros órgãos públicos. Foram realizados dois workshops e técnicos da Agência participaram de diversos eventos. A proposta ficou em audiência pública (AP nº 13/2015) por 60 dias, com sessão presencial. Foram recebidas 277 contribuições.

Assessoria de Comunicação Social da ANAC

Gerência Técnica de Relações com a Imprensa

Telefones: (61) 3314-4491 / 4493 / 4494 / 4496 / 4498 / 4642

Plantão de Imprensa: (61) 99112-8099

E-mail: jornalismo@anac.gov.br

www.anac.gov.br

REGRAS SOBRE DRONES



O novo regulamento da ANAC dividiu as aeronaves não tripuladas em aeromodelos, drones usados para fins recreativos, e aeronaves remotamente pilotadas (RPA), drones utilizados para operações comerciais, corporativas ou experimentais.

DRONES

O termo "drone" é utilizado popularmente para descrever qualquer aeronave (ou mesmo outro tipo de veículo) que possua alto grau de automatismo. No entanto, como não há uma definição formal para o termo, a regulamentação da Agência não utiliza essa nomenclatura, mas sim "aeromodelos" e "aeronaves remotamente pilotadas" (RPA). O que diferencia essas duas categorias de drones é a sua finalidade:



Aeromodelo

É toda aeronave não tripulada com finalidade de recreação.

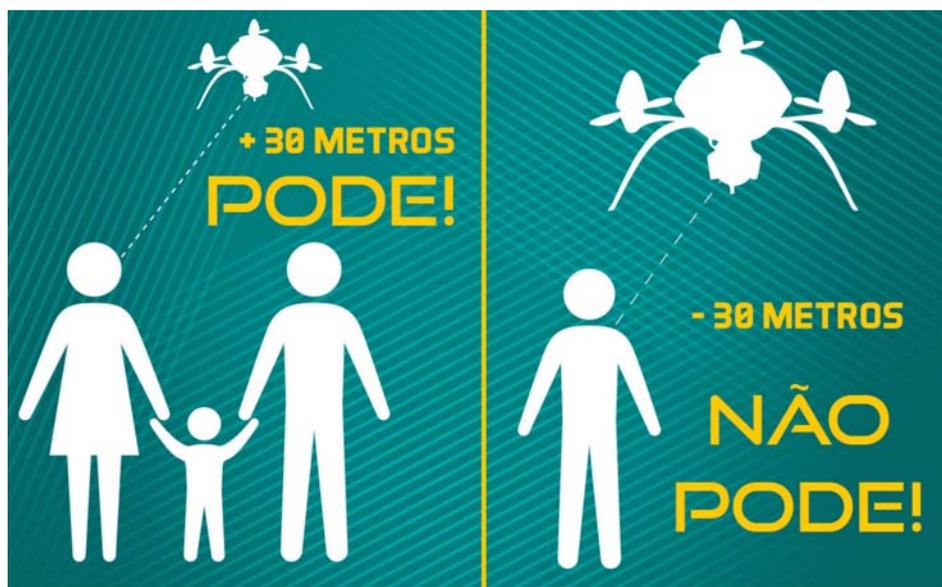
Aeronave Remotamente Pilotada (RPA)

É uma aeronave não tripulada pilotada a partir de uma estação de pilotagem remota que tenha qualquer outra finalidade que não seja recreativa, tais como comercial, corporativa e experimental.



Pela regra geral, os drones com mais de 250g só poderão voar em áreas distantes de terceiros (no mínimo 30 metros horizontais), sob total responsabilidade do piloto operador e conforme regras de utilização do espaço aéreo do DECEA. Caso exista uma barreira de proteção entre o equipamento e as pessoas a distância especificada não precisa ser observada.

Para voar com drones com mais de 250g perto de pessoas é necessário que elas concordem previamente com a operação, ou seja, a pessoa precisa saber e concordar com o voo daquele equipamento nas proximidades onde se encontra.



IMPORTANTE!

As operações totalmente autônomas desses equipamentos, ou seja, naquelas onde o piloto remoto não é capaz de intervir, continuam proibidas no país. Essas operações diferem-se das automatizadas, nas quais o piloto remoto pode interferir em qualquer ponto.

Classificação de drones

Os drones de uso comercial, corporativo ou experimental (RPA) foram categorizadas em três classes, de acordo com o peso máximo de decolagem do equipamento.

Classe	Peso Máximo de Decolagem	Exigências de Aeronavegabilidade
Classe 1	Acima de 150kg	A regulamentação prevê que equipamentos desse porte sejam submetidos a processo de certificação similar ao existente para as aeronaves tripuladas, promovendo ajustes dos requisitos de certificação ao caso concreto. Esses drones devem ser registrados no Registro Aeronáutico Brasileiro e identificados com suas marcas de nacionalidade e matrícula.
Classe 2	Acima de 25 kg e abaixo ou igual a 150 kg	O regulamento estabelece os requisitos técnicos que devem ser observados pelos fabricantes e determina que a aprovação de projeto ocorrerá apenas uma vez. Além disso, esses drones também devem ser registrados no Registro Aeronáutico Brasileiro e identificados com suas marcas de nacionalidade e matrícula.
Classe 3	Abaixo ou igual a 25 kg	<p>A norma determina que as RPA Classe 3 que operem além da linha de visada visual (BVLOS) ou acima de 400 pés (120m) deverão ser de um projeto autorizado pela ANAC e precisam ser registradas e identificadas com suas marcas de nacionalidade e matrícula.</p> <p>Drones dessa classe que operarem em até 400 pés (120m) acima da linha do solo e em linha de visada visual (operação VLOS) não precisarão ser de projeto autorizado, mas deverão ser cadastradas na ANAC por meio do sistema SISANT, apresentando informações sobre o operador e sobre o equipamento.</p> <p>Os drones com até 250g não precisam ser cadastrados ou registrados, independentemente de sua finalidade (uso recreativo ou não).</p>

Idade mínima para pilotagem

Para pilotar aeronaves não tripuladas RPA, os pilotos remotos e observadores (que auxiliam o piloto remoto sem operar o equipamento) devem ter no mínimo 18 anos. Para pilotar aeromodelos não há limite mínimo de idade.

Cadastro

O cadastro dos drones (aeromodelos ou RPA Classe 3) com peso máximo de decolagem superior a 250g é obrigatório e deve ser feito pelo Sistema de Aeronaves Não Tripuladas (SISANT) da ANAC pelo endereço sistemas.anac.gov.br/sisant. O número de identificação gerado na certidão de cadastro deve estar acessível na aeronave ou em local que possa ser facilmente acessado, de forma legível e produzido em material não inflamável.



Registro de voos

Os voos com aeromodelo e RPA Classe 3 não precisam ser registrados. O voos com as demais aeronaves não tripuladas devem ser registrados.

Licença, Habilitação e Certificado Médico Aeronáutico

Operadores de aeromodelos e de aeronaves RPA de até 250g são considerados licenciados, sem necessidade de possuir documento emitido pela ANAC desde que não pretendam usar equipamento para voos acima de 400 pés.

Serão obrigatórias licença e habilitação emitidas pela ANAC apenas para pilotos de operações com aeronaves não tripuladas RPA das classes 1 (peso máximo de decolagem de mais de 150 kg) ou 2 (mais de 25 kg e até 150 kg) ou da classe 3 (até 25 Kg) que pretendam voar acima de 400 pés.

Pilotos remotos de aeronaves não tripuladas RPA das classes 1 (mais de 150 kg) e 2 (mais de 25 kg e até 150 kg) deverão possuir ainda o Certificado Médico Aeronáutico (CMA) emitido pela ANAC ou o CMA de terceira classe do DECEA.

Saiba mais

Operação BVLOS – Operação na qual o piloto não consegue manter o drone dentro de seu alcance visual, mesmo com a ajuda de um observador.

Operação VLOS – Operação na qual o piloto mantém o contato visual direto com o drone (sem auxílio de lentes ou outros equipamentos).

Operação EVLOS – Operação na qual o piloto remoto só é capaz de manter contato visual direto com o drone com auxílio de lentes ou de outros equipamentos e precisa do auxílio de observadores de drone.





Documentos obrigatórios durante as operações

Nas operações realizadas com aeronaves não tripuladas (aeromodelos e RPA) com peso máximo de decolagem superior a 250g, os operadores deverão portar documentos obrigatórios. Dentre eles estão o manual de voo, documento de avaliação de risco e apólice de seguro. Leia mais sobre os documentos exigidos pela ANAC para cada uma das classes no guia de Perguntas frequentes.

IMPORTANTE!

Mais documentos poderão ser necessários de acordo com outros órgãos competentes. Consulte as normas do DECEA e da ANATEL sobre o assunto.

Seguro

É obrigatório possuir seguro com cobertura contra danos a terceiros nas operações de aeronaves não tripuladas de uso não recreativo acima de 250g (exceto as operações de aeronaves pertencentes a entidades controladas pelo Estado).



Transporte de cargas

Não podem ser transportados pessoas, animais, artigos perigosos ([RBAC nº 175/2009](#)) e outras cargas proibidas por autoridades competentes. Artigos perigosos poderão ser transportados quando destinados a lançamentos relacionados a atividades de agricultura, horticultura, florestais ou outras definidas pelo novo regulamento.

Poderão ser transportados equipamentos eletrônicos que contenham baterias de lítio necessárias para seu funcionamento, desde que sejam destinadas para uso durante o voo, tais como câmeras fotográficas, filmadoras, computadores etc. Artigos perigosos requeridos para operação do equipamento também poderão ser transportados. As regras referentes aos artigos perigosos não se aplicam aos drones controlados pelo Estado (sob total responsabilidade das entidades e em cumprimento ao [RBAC nº 175/2009](#)).



Uso de drones por órgãos de segurança pública

As operações de drone por órgãos de segurança pública, de polícia, de fiscalização tributária e aduaneira, de combate a vetores de transmissão de doenças de defesa civil e do corpo de bombeiros, ou de operador a serviço de um desses, são permitidas pela ANAC sem observar os critérios de distanciamento das áreas distantes de terceiros. Essas operações devem ocorrer sob total responsabilidade do órgão ou operador e possuir avaliação de risco operacional. Devem também obedecer as regras de utilização do espaço aéreo estabelecidas pelo DECEA.



Locais de pousos e decolagens de drones

Pousos e decolagens também podem ser feitos em áreas distantes de terceiros e desde que não haja proibição de operação no local escolhido. A operação de aeronaves não tripuladas em aeródromos só pode ocorrer se for expressamente autorizada pelo operador aeroportuário, podendo a ANAC estabelecer condições específicas.



Fiscalização

Os órgãos de segurança pública farão a fiscalização de drones no dia-a-dia. Casos de infrações configuradas como contravenção penal ou crime serão tratados por esses órgãos. Por parte da ANAC, a fiscalização será incluída no programa de vigilância continuada e as denúncias recebidas serão apuradas administrativamente de acordo com as sanções previstas no Código Brasileiro de Aeronáutica (Lei nº 7.565/86).

Outros órgãos farão a fiscalização de acordo com os aspectos relacionados às suas competências, como utilização do espaço aéreo (DECEA) e de radiofrequência (ANATEL).

Penalidades previstas pela ANAC

Irregularidades em relação ao cumprimento da norma são passíveis de sanções previstas no Código Brasileiro de Aeronáutica (Lei nº 7.565/86). A descrição das infrações e das penalidades pode ser consultada na Resolução nº 25/2008. Cautelarmente, a ANAC poderá suspender temporariamente as operações nos casos de suspeita ou evidência de descumprimento do regulamento que impactem o nível de risco da operação.

Penalidades previstas por outros órgãos

Outras sanções também estão previstas nas legislações referentes às responsabilizações nas esferas civil, administrativa e penal, com destaque à inviolabilidade da intimidade, da vida privada, da honra e da imagem das pessoas.

O Código Penal prevê, em seu Art. 261, prevê pena de reclusão de dois a cinco anos para quem expuser a perigo embarcação ou aeronave, própria ou alheia, ou praticar qualquer ato tendente a impedir ou dificultar navegação marítima, fluvial ou aérea.

O Código Penal também tipifica a exposição de pessoas a risco, em seu Art. 132, que prevê pena de detenção de três meses a um ano (ou mais se o crime for considerado mais grave) nos casos em que se coloquem em perigo direto ou iminente a vida ou à saúde terceiros.

Pela Lei das Contravenções Penais, dirigir aeronave sem estar devidamente licenciado pode gerar pena de prisão simples (quinze dias a três meses) e pagamento de multa. Pelo Art. 35 da mesma lei, praticar acrobacias ou fazer voos baixos, fora da zona permitida em lei, bem como fazer descer a aeronave fora de lugares destinados a essa finalidade, também pode gerar prisão simples (15 dias a três meses) e multa.

Outras penalidades poderão ser aplicadas conforme regras de outros órgãos públicos como a ANATEL, o DECEA e o Ministério da Defesa.

Resumo da regulamentação da ANAC

	RPAS Classe 1	RPAS Classe 2	RPAS Classe 3	Aeromodelos
Registro da aeronave?	Sim	Sim	BVLOS: Sim VLOS: Sim ¹	Sim ¹
Aprovação ou autorização do projeto?	Sim	Sim ²	Apenas BVLOS ou acima de 400 pés ²	Não
Limite de idade para operação?	Sim	Sim	Sim	Não
Certificado médico?	Sim	Sim	Não	Não
Licença e habilitação?	Sim	Sim	Apenas para operações acima de 400 pés	Apenas para operações acima de 400 pés
Local de operação	A distância da aeronave não tripulada NÃO poderá ser inferior a 30 metros horizontais de pessoas não envolvidas e não anuentes com a operação. O limite de 30 metros não precisa ser observado caso haja uma barreira mecânica suficientemente forte para isolar e proteger as pessoas não envolvidas e não anuentes. Esse limite não é aplicável para operações por órgão de segurança pública, de polícia, de fiscalização tributária e aduaneira, de combate a vetores de transmissão de doenças, de defesa civil e/ou do corpo de bombeiros, ou operador a serviço de um destes.			

¹ Todos os aeromodelos acima de 250 gramas e RPA entre 250 gramas e 25 kg que se destinem a operações na linha de visada visual (VLOS) até 400 pés acima do nível do solo, devem ser cadastrados por meio de ferramenta online disponível no endereço <https://sistemas.anac.gov.br/sisant>.

² Para todos os RPAS Classe 2 e os RPAS Classe 3 que se destinam a operações além da linha de visada visual (BVLOS) ou acima de 400 pés, o fabricante pode optar pelo processo de certificação de tipo estabelecido no RBAC nº 21 ou pela autorização de projeto na Subparte E do RBAC-E nº 94.

Mais informações

[Perguntas Frequentes](#)

www.anac.gov.br/drones

[Orientações para Usuários de Drones](#)

[Página sobre drones do Ministério de Transportes, Portos e Aviação Civil](#)

ANEXO B – CARTA DE ACEITE

www.siconbiol.com.br

23 a 27 de julho de 2023 | Juazeiro - BA



Siconbiol

17º Simpósio de Controle Biológico
&
2º Simpósio Latino-Americano de Controle Biológico



Carta de Aceite

A comissão científica do SICONBIOL informa que o trabalho intitulado **ORBIO - Plataforma para Gerenciamento e Automatização de Rotas de VANTs para Controle Biológico de Pragas**, de autoria de *Bruno Siqueira da Silva; Tauã Milech Cabreira; Bruno José Olivieri de Souza; Lucio André de Castro Jorge; Nicholas Matias; Ricardo Antônio de Oliveira Machado; Marcelo de Souza Moreira; Paulo Roberto Ferreira Jr* foi **APROVADO** para apresentação no referido evento. Caso o revisor tenha solicitado correções, mesmo com trabalho aceito, o autor poderá efetuar pela Área do Participante, opção Submissões, no mesmo espaço onde efetuou a submissão inicial.

O formato de apresentação, Pôster ou Oral, será informado posteriormente no site do evento.

Documento assinado eletronicamente: 3035e8f4aa6648519ea4df420327bd31

ANEXO C – CARTA DE ACEITE

www.siconbiol.com.br

23 a 27 de julho de 2023 | Juazeiro - BA



Siconbiol

17º Simpósio de Controle Biológico
&
2º Simpósio Latino-Americano de Controle Biológico



Carta de Aceite

A comissão científica do SICONBIOL informa que o trabalho intitulado **ORBIO Drone - VANT de baixo custo e alta resistência para emprego de Controle Biológico de Pragas**, de autoria de *Bruno José Olivieri de Souza; Bruno Siqueira da Silva; Tauã Milech Cabreira; Marcelo de Souza Moreira; Nicholas Matias; Ricardo Antônio de Oliveira Machado; Lucio André de Castro Jorge* foi **APROVADO** para apresentação no referido evento. Caso o revisor tenha solicitado correções, mesmo com trabalho aceito, o autor poderá efetuar pela Área do Participante, opção Submissões, no mesmo espaço onde efetuou a submissão inicial.

O formato de apresentação, Pôster ou Oral, será informado posteriormente no site do evento.

Documento assinado eletronicamente: 56887f90d2dfd58685a4d969734fc59a