

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Análise de Desempenho de Missões Multi-Veículo

Diogo André Barbosa Nunes



Mestrado em Engenharia Informática e Computação

Orientador: Daniel Augusto Gama de Castro Silva

25 de julho de 2023

Análise de Desempenho de Missões Multi-Veículo

Diogo André Barbosa Nunes

Mestrado em Engenharia Informática e Computação

25 de julho de 2023

Resumo

Atualmente, os veículos autônomos têm vindo a substituir veículos tripulados para realizar vários tipos de tarefas, entre as quais tarefas de transporte, de salvamento e tarefas perigosas para o ser humano. Assim sendo, o uso de ambientes simulados para testar, avaliar e analisar o desempenho destes veículos torna-se crucial para o seu sucesso nessas tarefas.

Tendo isso em conta, o LIACC possui uma Plataforma capaz de configurar e visualizar simulações de missões, onde estas podem ser parametrizadas para diferentes tipos de missão, padrões de pesquisa e métricas de avaliação. Contudo, estes padrões de pesquisa e métricas de avaliação encontram-se apenas implementados para equipas com um único veículo por missão.

Desta forma, os objetivos deste trabalho passam por adaptar A Plataforma a poder ser configurada com um qualquer número de veículos numa missão e fazer uma análise de desempenho destas, verificando quais as parametrizações (padrões de pesquisa e métricas de avaliação) que maximizam esse desempenho - menores valores de tempo gasto e distância percorrida, e maiores percentagens de área coberta e de coordenadas dentro da área pretendida. Para atingir estes objetivos, foi feita uma revisão da literatura sobre este tópico e foram encontrados novos padrões de pesquisa, assim como novas estratégias de voo em formação e de divisão de área.

De um ponto de vista mais conceptual, foi ainda realizado um agrupamento de tipos de missões (em grupos de missões) e de métricas de avaliação (em perfis de métricas), de forma a poder fazer uma associação direta entre estes conjuntos de características e os padrões de pesquisa.

No desenvolvimento prático, foi implementado o padrão de pesquisa de Zamboni, que pode ser usado da mesma forma que os restantes padrões já implementados na Plataforma. Para além disso, foram realizadas 48 simulações de forma a poder dar resposta ao problema apresentado e foram registados resultados sobre as métricas da área coberta, do tempo gasto e da distância percorrida pela equipa de UAVs.

Pelos resultados obtidos, podemos concluir que a utilização de múltiplos veículos numa missão de medição apresenta melhores resultados quando é configurada com um maior número de UAVs. As simulações efetuadas testaram o uso desde um a quatro UAVs para quatro padrões de pesquisa analisados e para áreas triangulares, retangulares e pentagonais convexas. Entende-se por melhores resultados uma missão que tenha valores mais reduzidos de tempo gasto e distância percorrida e maior percentagem de de área coberta e de coordenadas dentro da área pretendida.

Abstract

Nowadays, autonomous vehicles have been replacing manned vehicles to perform various types of tasks, including transportation, rescue and human-hazardous tasks. Therefore, using simulated environments to test, evaluate and analyze the performance of these vehicles becomes crucial for their success in these tasks.

With this in mind, LIACC has a platform capable of configuring and visualizing mission simulations, which can be parameterized for different mission types, search patterns and evaluation metrics. However, these search patterns and evaluation metrics are only implemented for teams with a single vehicle per mission.

Thus, the objectives of this work are to adapt The Platform to be configured with any number of vehicles in a mission and to make a performance analysis of these missions, checking which parameterizations (search patterns and evaluation metrics) maximize this performance - lower values of time spent and distance travelled, and higher percentages of area covered and coordinates within the desired area. To achieve these goals, a literature review on this topic was performed, and new search patterns and strategies for formation flight and area division were found.

From a more conceptual point of view, a grouping of mission types (into mission groups) and evaluation metrics (into metric profiles) was also performed in order to be able to make a direct association between these feature sets and search patterns.

On practical development, the Zamboni search pattern was implemented, which can be used in the same way as the other patterns already implemented in The Platform. In addition, 48 simulations were performed in order to be able to answer the problem presented and results were recorded on the metrics of the area covered, the time spent and the distance travelled by the UAV team.

From the results obtained, we can conclude that the use of multiple vehicles in a measurement mission presents better results when it is configured with a larger number of UAVs. The simulations tested the use of one to four UAVs for four search patterns analyzed and for triangular, rectangular and pentagonal convex areas. Better results are understood as a mission that has lower values of time spent and distance traveled and a higher percentage of area covered and coordinates within the intended area.

Agradecimentos

A realização desta dissertação só se tornou possível graças a um conjunto de pessoas que se mostraram disponíveis e que me apoiaram em tudo o que precisei durante este ano, e às quais não posso deixar de expressar os meus sinceros e profundos agradecimentos.

Ao Professor Daniel Castro Silva, por todo o suporte que me deu durante estes últimos meses e por sempre procurar ajudar-me e desafiar-me a pensar "fora da caixa" e com base na literatura já existente.

A todos os restantes professores que tive durante o curso, que contribuíram para que hoje eu seja uma pessoa mais culta e preparada para agarrar a vida profissional.

Aos meus pais, pelo apoio e acompanhamento que me deram desde que nasci. Obrigado pela educação que me deram, por tudo o que fizeram por mim e por todos os momentos que vivemos e todos aqueles que ainda estão por vir.

À minha irmã, por todo o tempo que passamos juntos e por partilharmos quase tudo. Sempre foi assim e sempre assim será. Tens um futuro promissor pela frente, segue os teus sonhos e sê feliz!

Ao meu avô, pelo carinho e por todas as "mesadas". Não vou ser o médico que querias que fosse, mas prometo ser um excelente engenheiro!

Ao Vítor, Jéssica, Inês e Alexandra, pelo sofrimento e apoio mútuo durante este ano e por termos chegado até aqui vivos e prontos para enfrentar os próximos desafios.

Ao Benny, Vasco e Tiago, por terem acreditado nas minhas capacidades e me terem dado sempre o conforto e as oportunidades que precisava durante estes últimos anos. Sem vocês não seria a mesma coisa.

A todos estes e aos restantes que não mencionei e que de alguma forma contribuíram para o Diogo que sou hoje, o meu muito obrigado!

Diogo André Barbosa Nunes

*“The time will come,
When you will have to rise
Above the rest and prove yourself
Your spirit never dies”*

Imagine Dragons, 2015

Conteúdo

Resumo	i
Abstract	ii
Agradecimentos	iii
Abreviaturas	x
1 Introdução	1
1.1 Contexto e Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Metodologia e Contribuições	2
1.4 Estrutura da Dissertação	3
2 Contextualização	5
2.1 Tipos de Missão	5
2.2 Padrões de Pesquisa e Manobras	9
2.2.1 Manobras	9
2.2.2 Padrões de Pesquisa	10
2.3 Métricas de Avaliação	13
3 Estado da Arte	18
3.1 Plataformas de Simulação	18
3.1.1 AGENTFLY	19
3.1.2 MOOS-IvP	20
3.1.3 AirSim	22
3.1.4 Comparação de Plataformas	22
3.2 Ferramentas de Simulação	24
3.3 Trabalhos Relacionados	25
3.4 Divisão de Área	29
3.5 Voo em Formação	37
4 Problema e Proposta de Solução	48
4.1 Trabalho Prévio	48
4.1.1 Arquitetura da Plataforma	48
4.1.2 Linguagem de Descrição de Missão	49
4.1.3 Diferenciação do Trabalho	50
4.2 Proposta da Solução	51
4.3 Análise de Risco	52

5	Trabalho Desenvolvido	54
5.1	Grupos de Missões	54
5.1.1	Objetivo	54
5.1.2	Nível de Risco	55
5.1.3	Nível de Complexidade	56
5.1.4	Duração	56
5.1.5	Localização Alvo	57
5.1.6	Hipótese Escolhida	57
5.2	Perfis de Métricas	58
5.3	Associação de missões, padrões e métricas	59
5.3.1	Missões de entrega e/ou movimento de mercadorias/pessoas	59
5.3.2	Missões de identificação ou localização	59
5.3.3	Missões de recolha de informação	60
5.4	Padrão de Zamboni	60
5.5	Divisão de Área na Plataforma	62
5.5.1	Simulações	65
5.5.2	Análise de Resultados	66
6	Conclusão	76
6.1	Dificuldades Enfrentadas	77
6.2	Trabalho Futuro	78
	Referências	80

Lista de Figuras

2.1	Taxonomia de UAVs adaptada de [36]	6
2.2	Ilustração gráfica de possíveis classificações de sistemas multi-UAV	9
2.3	Movimentos em espiral e de varrimento	10
2.4	Movimentos de seguimento da forma e busca por setor	11
2.5	Algoritmo de pesquisa cruzada-diamante-hexagonal	12
2.6	Algoritmo de pesquisa Zamboni	12
2.7	Diagrama de fluxo do processo de derivação, simulação e validação de métricas sistemáticas	17
2.8	Primeiros dois níveis de decomposição de uma missão numa estrutura de árvore pelos SMEs	17
3.1	Zonas de interdição de voo num sistema para missões de entrega de mercadorias	19
3.2	Arquitetura do MOOS-IvP	21
3.3	Padrões de Pesquisa de AUVs	21
3.4	Captura de ecrã do MOOS-IvP Marine Viewer	22
3.5	Captura de ecrã de uma simulação no AirSim	23
3.6	Visualização de um simulador SLAM cooperativo multi-UAV	26
3.7	Arquitetura do sistema proposto por [4]	27
3.8	Aplicação de sensores remotos na agricultura	28
3.9	Resultados da simulação de divisão de área	29
3.10	Reestruturação da divisão de área e direções de varrimento ótimas de 3 para 2 UAVs, depois da perda do terceiro UAV	30
3.11	Comparação entre dois métodos de planeamento de caminhos de cobertura (CPP)	30
3.12	Divisão de uma área poligonal	31
3.13	Duas soluções triviais para o problema de otimização de divisão de área pelos UAVs disponíveis	32
3.14	Decomposição de um polígono e correspondente caminho de cobertura	33
3.15	Procedimento de construção de trajetórias de cobertura de área	34
3.16	Procedimento de atribuição de tarefas à configuração escolhida	34
3.17	Resultados da atribuição de pontos de referência num quadrilátero	35
3.18	Divisão de área por dois UAVs	35
3.19	Trajetórias geradas para a formação com a evasão de obstáculos	37
3.20	Definição de formação num sistema de coordenadas de pontos de referência	39
3.21	Trajetória de referência e trajetória efetuada por cada UAV na simulação	40
3.22	Método de controlo de voo em formação baseado no comportamento e estrutura virtual	40
3.23	Trajetória e formação de UAVs após evasão de obstáculos	41
3.24	Quatro cenários diferentes de evasão de obstáculos e reagrupamento da formação	41

3.25	Resultados de uma simulação de líder e seguidor	42
3.26	Diagrama do corpo rígido de velocidade virtual e campo de força repulsivo entre UAVs	42
3.27	Planeamento de uma formação multi-UAV numa simulação complexa	43
3.28	Evasão de colisões com múltiplos obstáculos	44
3.29	Evasão de colisões de 3 UAVs numa formação triangular	44
3.30	Diagrama de evasão de obstáculos estáticos e móveis	45
3.31	Fluxograma de diferentes fases num voo em formação	45
4.1	Arquitetura da Plataforma proposta por [52]	49
4.2	Caraterização de uma Missão e de uma Fase de Missão	50
4.3	Arquitetura de missões multi-UAV do ponto de vista funcional e hierárquico	51
5.1	Representações dos padrões de varrimento e de Zamboni	62
5.2	Representações dos trajetos efetuados por cada UAV num padrão em espiral	63
5.3	Representações dos trajetos efetuados por cada UAV num padrão de varrimento .	65
5.4	Padrão de Zamboni numa área triangular dividida por 3 UAVs	68
5.5	Coordenadas do padrão de seguimento de forma para 1 UAV em áreas triangulares, retangulares e pentagonais	69
5.6	Aproximação das primeiras 2 linhas de varrimento do teste "Triangle_1_Lawnmower"	72

Lista de Tabelas

2.1	Tipos de Missão	6
2.2	Métricas Absolutas	13
2.3	Métricas Relativas	14
3.1	Comparação de Plataformas	23
3.2	Comparação de métodos de divisão de área	36
3.3	Comparação de métodos de voo em formação	46
5.1	Resultados obtidos numa área triangular	66
5.2	Resultados obtidos numa área retangular	67
5.3	Resultados obtidos numa área pentagonal	67
5.4	Relação do tempo gasto por cada teste em relação ao tempo gasto por 1 UAV na mesma área e usando o mesmo padrão	71

Abreviaturas e Símbolos

ABM	Modelo Baseado em Agente (<i>Agent-Based Model</i>)
AHP	Processo de Hierarquia Analítica (<i>Analytic Hierarchy Process</i>)
ATM	Gestão de Tráfego Aéreo (<i>Air Traffic Management</i>)
AUV	Veículo Submarino Autônomo (<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>)
CPP	Planeamento de Trajetória de Cobertura (<i>Coverage Path Planning</i>)
DDD	Sujo, Perigoso e Monótono (<i>Dirty, Dangerous and Dull</i>)
EUROCAE	Organização Europeia para o Equipamento da Aviação Civil (<i>The European Organisation for Civil Aviation Equipment</i>)
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FSX	<i>Flight Simulator X</i>
GNN	Rede Neuronal de Grossberg (<i>Grossberg Neural Network</i>)
LIACC	Laboratório de Inteligência Artificial e Ciência de Computadores
MDL	Linguagem de Descrição de Missão (<i>Mission Description Language</i>)
MDP	Processos de Decisão de Markov (<i>Markov Decision Processes</i>)
MILP	Programação Linear Inteira Mista (<i>Mixed-Integer Linear Programming</i>)
MOOS-IvP	Conjunto Operacional Orientado para a Missão - Programação de Intervalos (<i>Mission Oriented Operating Suite - Interval Programming</i>)
MPC	Controlo Preditivo de Modelos (<i>Model Predictive Control</i>)
MST	Árvore Mínima de Varrimento (<i>Minimum Spanning Tree</i>)
NATO	Organização do Tratado do Atlântico Norte (<i>North Atlantic Treaty Organization</i>)
NBC	Nuclear, Biológico ou Químico
NLP	Programação Não Linear (<i>Nonlinear Programming</i>)
NIAG	Grupo Consultivo Industrial da NATO (<i>NATO Industrial Advisory Group</i>)
PID	Proporcional-Integral-Derivado
PFEE	Eficiência Energética de Combustível de Carga Útil (<i>Payload Fuel Energy Efficiency</i>)
RMUS	Simulador Multi-UAV em Tempo Real (<i>Real Time Multi-UAV Simulator</i>)
RSH	Heurística de Pesquisa Aleatória (<i>Random Search Heuristic</i>)
SAR	Busca e Salvamento (<i>Search and Rescue</i>)
SLAM	Localização e Mapeamento Simultâneos (<i>Simultaneous Localization and Mapping</i>)
SME	Especialista no assunto (<i>Subject-Matter Expert</i>)
SQP	Programa Quadrático Sequencial (<i>Sequential Quadratic Program</i>)
SMC	Controlo de Modo Deslizante (<i>Sliding Mode Control</i>)
UAS	Sistema de Aeronaves Não Tripuladas (<i>Unmanned Aircraft System</i>)
UAV	Veículo Aéreo Não Tripulado (<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>)
UTM	Gestão do Tráfego de UASs (<i>UAS Traffic Management</i>)

Capítulo 1

Introdução

Os veículos autônomos têm tido um crescimento exponencial nestes últimos anos [47] para substituir os veículos tripulados e/ou que precisam de ajuda humana para percorrer um determinado caminho. Estes veículos podem fazer vários tipos de tarefas, mas há claramente um conjunto de tarefas cuja eficiência é potenciada ao máximo usando estes veículos [53], como é o caso de missões repetitivas ou perigosas para o ser humano [42]. Na área da Robótica, diz-se ainda que robôs em geral são objetos frequentemente utilizados em trabalhos sujos, perigosos e monótonos (em inglês: *Dirty, Dangerous and Dull* - DDD) [54].

1.1 Contexto e Motivação

São diversos os estudos que procuram implementar lógicas para estes veículos da forma mais eficiente possível, sendo alguns deles baseados numa Plataforma desenvolvida pelo LIACC [52], capaz de realizar simulações de missões (desde missões de procura a missões de patrulhamento) com bastante detalhe, tal como vai ser descrito mais adiante. Alguns trabalhos já foram feitos nesta plataforma de forma a suportar múltiplos veículos, como [38], [2] e [18], e a MDL da Plataforma já está implementada para ter esse suporte. Contudo, nenhum faz uma análise de performance sobre o uso destes e qual a melhor estratégia a utilizar dependendo da situação.

Os conceitos de coordenação e cooperação têm um papel importante em plataformas multi-veículo [33]. Enquanto a coordenação envolve a partilha de recursos no tempo e no espaço, enquanto a cooperação procura atingir um determinado objetivo ou recompensa [6]. A comunicação entre os agentes em missão é também um ponto crucial para o sucesso destas, uma vez que sem comunicação fica muito difícil transmitir informação e tirar partido das vantagens que isso pode trazer (como ter múltiplos pontos de ação e múltiplos pontos de medição/extração que podem ser partilhados entre os agentes para atingir um determinado objetivo).

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo adaptar a Plataforma já existente do LIACC, a fim de parametrizar missões com múltiplos veículos de forma mais eficiente e organizada. Pretende-se que seja possível planejar uma missão usando um determinado número de veículos, onde cada um utiliza um determinado padrão de pesquisa, em vez de cada veículo ter a sua missão independente mas que se complementa com as missões restantes. Para isto, pretende-se que no fim haja a possibilidade de comparar simulações com diferentes parâmetros usados e avaliar qual (ou quais) o(s) padrão(ões) de pesquisa que melhor se adequam a um determinado tipo de missões e qual o conjunto de métricas que melhor se ajustam para avaliar esse mesmo tipo de missões. Vai ser dado um maior foco no Voo em Formação, onde os UAVs em missão formarão uma determinada estrutura e a vão procurar manter durante a rota planeada, e na Divisão de Área, onde uma determinada área irá ser dividida em subáreas e cada UAV vai atuar na que lhe corresponde.

Com isto, pretende-se responder às seguintes questões:

- Q1: Uma determinada missão tem melhores resultados quando é configurada com um ou com mais veículos?
- Q2: Quais as métricas de avaliação que melhor se adequam a um determinado tipo de missão?
- Q3: Quais os padrões de pesquisa que fornecem melhores resultados para uma determinada área?
- Q4: A avaliação de desempenho de missões de um único veículo e de múltiplos veículos é justa e equilibrada? Ou poderá acontecer estarmos a dar um peso desajustado a uma determinada métrica e a adulterar os resultados obtidos?

Estas questões permitem guiar todo o processo de implementação do projeto, de forma a auxiliar e a progressivamente estar mais perto de atingir o objetivo final. Pretende-se agrupar tipos de missões, padrões de pesquisa e métricas de avaliação de forma a agregar situações semelhantes e que podem ser testadas e avaliadas consoante um mesmo padrão de pesquisa e/ou mesmas métricas de avaliação, não só para facilitar a sua configuração, mas também para facilitar a sua comparação.

Em suma, a Plataforma já existente, à qual me proponho a adicionar novas funcionalidades, nomeadamente no que toca a missões multi-veículo, pode ser vista como uma plataforma de experimentação. Desta forma, para além das melhorias adicionadas à Plataforma, a realização de simulações permite uma análise de desempenho de missões de um único veículo e de múltiplos veículos, onde resultará num conjunto de conclusões que permitam identificar quais os padrões de pesquisa e as métricas de avaliação que mais se adequam a cada tipo de missão.

1.3 Metodologia e Contribuições

A metodologia deste trabalho passa por seguir uma linha de raciocínio que vá dando resposta às perguntas de investigação apresentadas na secção anterior, indo ao encontro do nosso objetivo final.

Desta forma, pretende-se fazer uma revisão da literatura sobre este tópico, procurando plataformas e trabalhos nesta área que explorem aspetos similares aos que me proponho a realizar, de forma a poder clarificar a diferenciação deste trabalho em relação ao que já existe e tornar a plataforma já existente mais completa e adaptada a simulações que procuram emular o mundo real. Servirá também para procurar possíveis contribuições para a Plataforma, desde novos padrões de pesquisa, novas métricas de avaliação e formas diferentes de fazer a descrição de uma missão, de forma a alterar a linguagem de descrição das mesmas, caso seja encontrada uma melhor forma de as representar.

Para além da revisão do estado de arte de plataformas e trabalhos semelhantes, também foi feita uma análise concreta dos estudos já efetuados no âmbito do voo em formação e da divisão de área para missões de múltiplos veículos, de forma a saber de que forma adaptar a Plataforma para permitir missões deste tipo.

A implementação das melhorias encontradas e a adaptação da Plataforma para missões de múltiplos veículos contribuirá para a realização de simulações de missões com parâmetros variados, de forma a fazer uma análise de desempenho de cada uma utilizando um determinado conjunto de métricas adaptadas a cada tipo de missão. Desta forma, esperamos obter dados suficientes e concretos para poder concluir qual as melhores configurações de um determinado tipo ou grupo de missões, desde padrão de pesquisa utilizado, métricas aplicadas, número de veículos em missão, entre outras.

1.4 Estrutura da Dissertação

Este documento encontra-se dividido em seis capítulos, estando este parágrafo já incluído no Capítulo 1, onde se pretende mostrar o contexto do trabalho, motivação e objetivos, assim como a metodologia planeada e resultados esperados.

No capítulo 2, pretende-se contextualizar o problema assim como introduzir conceitos e termos relacionados com o contexto em que o trabalho se insere. É feita uma breve descrição do uso atual de veículos autónomos em substituição de veículos reais em missões, assim como uma enumeração dos diferentes tipos de missão, padrões de pesquisa e métricas utilizadas e/ou a utilizar na plataforma desenhada por [52].

No capítulo 3, é descrito o estado atual dos veículos autónomos no desenvolvimento tecnológico, assim como uma descrição das plataformas já existentes que de certa forma se relacionam com a Plataforma que irá ser utilizada no desenvolvimento deste trabalho. São ainda enumerados e comparados diferentes métodos de voo em formação e divisão de área, de forma a entender de que forma é que estes algoritmos podem ser implementados na Plataforma do LIACC.

No capítulo 4, é apresentada uma arquitetura de solução deste trabalho, assim como o respetivo plano de trabalhos que permite visualizar por etapas o que é proposto ser feito. Esta secção possui ainda uma análise de risco que foi prevista no início deste trabalho, assim como uma breve explicação dos riscos que realmente foram um problema ao longo da elaboração desta dissertação.

No capítulo 5, é descrito tudo o que foi acrescentado à Plataforma em termos teóricos (agrupamento de parâmetros, de forma a individualizar cada tipo de missões e facilitar a sua análise e comparação) e em termos práticos (toda a implementação de código de forma a ser possível realizar missões multi-veículo).

No capítulo 6 conclui-se todo o processo descrito nos capítulos anteriores, apresentando conclusões sobre o trabalho desenvolvido e referindo tópicos que poderiam ser considerados no futuro para aprofundar ainda mais estes conhecimentos e para adicionar ainda mais funcionalidades à Plataforma.

Capítulo 2

Contextualização

O uso de veículos reais para efetuar um estudo de território para variadas missões está a ser substituído progressivamente pelo uso de experiências simuladas, por estas serem menos dispendiosas e menos suscetíveis de erros humanos [19].

Uma dada missão pode ser caracterizada, entre outras, pelo seu tipo, pelas manobras e/ou padrões de pesquisa a utilizar pelos seus agentes e pelas métricas que avaliam o sucesso da missão, tendo em conta os parâmetros considerados (que dependem do tipo de missão).

Dependendo do tipo de missão, também podem ser considerados diferentes tipos de veículos, por se adequarem melhor a estas. Vamos considerar que um drone é uma aeronave não tripulada de pequena dimensão (quando comparada com os restantes veículos aéreos existentes) e um helicóptero uma aeronave de maior dimensão e que pode ou não ser tripulada. Assim sendo, um drone é capaz de sobrevoar com mais proximidade uma área com mais obstáculos, enquanto um helicóptero tem maior capacidade de sobrevoar uma determinada localização com condições adversas (quando comparado com drones), dada a sua dimensão e estabilidade. No mesmo raciocínio, também as aeronaves conseguem percorrer distâncias maiores num menor intervalo de tempo e, dependendo das características destas, realizar com maior ou menor eficiência um determinado percurso. Um drone não é capaz de suportar cargas elevadas (acima dos 4Kg) para entregas de longa distância [46], pelo que acima dessa carga o uso de helicópteros é mais aconselhável.

Neste capítulo vão ser descritos vários tipos de missões, manobras, padrões de pesquisa para um único veículo e para múltiplos veículos e métricas de avaliação, tanto para missões de um único veículo como também a sua adaptação para missões multi-veículo.

2.1 Tipos de Missão

As missões podem ser classificadas por imensas variáveis. Uma possível abordagem podia ser a apresentada por [36] para uma taxonomia de UAVs (Figura 2.1), onde a especificidade vai aumentando com o aumento de níveis na árvore. Este estudo pretende compreender quais as funções comuns em diferentes missões, com o objetivo de construir sistemas de apoio à decisão, incluindo planeamento e gestão de missões.

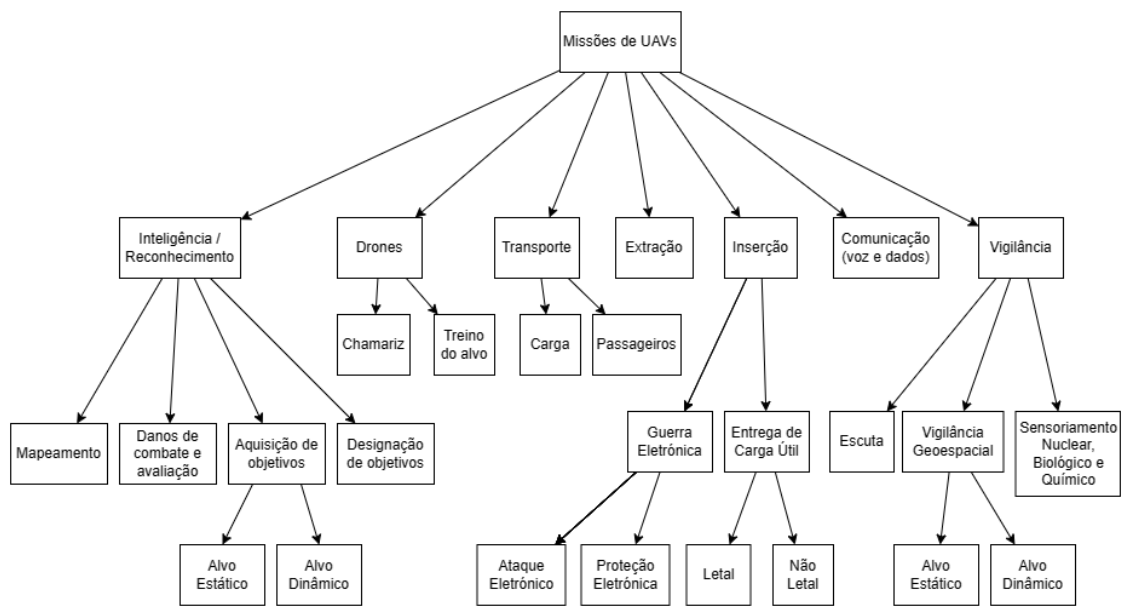


Figura 2.1: Taxonomia de UAVs adaptada de [36]

Há ainda estudos que descrevem em pormenor o caso particular de missões de ataque [28], onde incluem tarefas de pesquisa (do suspeito alvo), de identificação, de seguimento (monitorização da sua localização) e do verdadeiro ataque em si (missão de lançamento). Considerando que este caso em específico envolve um conjunto de tipos de missões para atingir um determinado fim, optei por fazer uma clara distinção de cada um desses tipos, assim como também adicionando outros tipos de missão não abordados nestes casos e que devem também ser tidos em conta.

Para esta dissertação, procurou-se fazer uma simplificação da taxonomia de [36], focado no principal objetivo de cada missão, para ser mais fácil a sua identificação, simulação e análise. Desta forma, na Tabela 2.1 estão identificados seis tipos de missões que podem (ou não) partilhar características entre elas, mas todas elas têm características que as distinguem e o objetivo final de cada uma também é característico de cada tipo [12].

Tabela 2.1: Tipos de Missão

Tipo de Missão	Descrição
Transporte	Missões cujo objetivo passa por transportar pessoas ou objetos de uma dada localização para outra (conhecida). Podem passar por uma simples tarefa de transporte de algo, como também de uma complexa ação de resgate ou salvamento.
Lançamento	Missões de transporte com a realização de uma dada ação momentânea (isto é, em andamento) no local de destino. Pode ser uma simples descarga de água de combate a um incêndio, como também pode ser o lançamento de um míssil em andamento sobre um determinado alvo.

Tabela 2.1: Tipos de Missão (Continuação)

Tipo de Missão	Descrição
Procura ou Detecção	Missões de pesquisa, sem qualquer tipo de auxílio externo. Podem ter em conta (ou não) variáveis de tempo, dependendo do contexto da missão.
Medição	Missões de pesquisa com o objetivo de realizar mapas evolutivos. Os agentes têm a habilidade de realizar medições ao longo do trajeto, de forma a extrair informação, a fim de construir os mapas evolutivos que se pretendem.
Detecção de Origem	Missões de pesquisa, com o auxílio do gradiente de determinadas variáveis. Um exemplo destas missões é uma missão de pesquisa que utilize um mapa evolutivo obtido numa missão de medição (referida anteriormente).
Seguimento	Missões de patrulhamento, cujo objetivo passa por monitorizar o movimento de uma dada pessoa ou veículo. Normalmente relacionam-se com ações infratoras da lei, onde as autoridades pretendem fiscalizar as ações de um determinado alvo, de forma a evitar consequências graves.

As missões de transporte incluem as missões de transporte de carga e passageiros da taxonomia de [36], sendo esta categoria retirada integralmente dessa classificação, pelo que esta associação é direta. As missões de extração também se podem incluir nesta categoria, porque apesar de mais complexas do que uma simples missão de transporte, o objetivo principal é o mesmo: deslocar-se a um determinado ponto e realizar uma extração de algo. É importante realçar que esta categoria implica comunicação entre UAVs, alocação de recursos e uma análise de imagens e identificação do alvo (que se pretende extrair).

As missões de lançamento incluem as missões de entrega de carga útil, e distinguem-se da categoria anterior no sentido que estas ações podem ser "lançadas" para o solo. O exemplo mais fácil de imaginar neste tipo de missão são missões de ataque, onde são enviadas bombas e outros objetos com o objetivo de atingir uma determinada localização, mas sem a necessidade de ir ao ponto exato no solo "pousar" o objeto em questão.

As missões de procura ou deteção podem ser vistas como uma mistura das missões de comunicação e de vigilância, uma vez que se pretende realizar uma busca de algo com uma organização necessária entre UAVs, para que a missão seja dividida por estes e para que não sejam realizadas ações que não ajudam, ou que não acrescentam nada, ao sucesso da missão.

As missões de medição também têm uma associação direta com as missões de inteligência e reconhecimento: tendo como funções de operação a monitorização de UAVs, a supervisão da posição e trajetória destes e a análise de imagens e/ou resultados, estas missões são capazes de construir mapas evolutivos de uma área, dada a informação que vão obtendo através das medições obtidas.

As missões de detecção de origem podem ser vistas como uma mistura de três tipos de missões da taxonomia apresentada: missões de comunicação, vigilância e de inteligência e reconhecimento: tal como nas missões de procura ou detecção, também aqui podemos conectar a comunicação e a vigilância para efetuar uma busca responsável por um ou mais pontos, mas desta vez com a ajuda de mapas e gradientes que são resultado das missões de inteligência e de reconhecimento.

As missões de seguimento também têm uma associação direta, desta vez com as missões de vigilância, visto que estas possuem uma componente de análise de imagens (geoespacial) e uma componente de análise de informações de outros sensores e identificação de alvos (audição e sensores nucleares, biológicos ou químicos - NBC).

As missões de chamariz (*Decoy*) e de guerra eletrónica (*Electronic Warfare*) descritas na Figura 2.1 podem ser vistas como missões mais orientadas para um contexto militar, mas podem também ser incluídas na classificação apresentada: as missões de chamariz, com o objetivo de chamar a atenção de algo (como um isco), não têm como objetivo ajudar ao sucesso na missão de forma direta, mas sim ajudar na distração de algo ou alguém para ter um maior rendimento numa missão paralela, pelo que podem ser incluídas nas missões de transporte (associado a uma carga "falsa", que apenas serve de distração). No caso das missões de guerra eletrónica, podem ser vistas como missões de seguimento, com vista a impedir que outros veículos e/ou outros objetos sejam usados para ganhar vantagem para uma outra missão (um equivalente civil desta missão pode ser a filmagem de uma determinada área).

Foi feita uma proposta de uma outra possível classificação de sistemas multi-UAV [3] baseada na forma como estes agentes se posicionam e atuam (como se pode verificar na Figura 2.2), sendo possível também considerar estes sistemas como diferentes formas de implementação de padrões de pesquisa para múltiplos veículos:

- acoplamento físico, onde um conjunto de UAVs têm ligações físicas e o seu movimento depende também do movimento dos restantes. Esta coordenação é o maior problema desta arquitetura, porque todas as forças efetuadas pelos agentes em missão têm de ser tidas em conta, de forma a ter sempre um equilíbrio e prevenir colisões ou descompensações durante o voo.
- formações, onde não existem ligações físicas como no acoplamento físico, mas existe a intenção de manter as distâncias entre os agentes como se realmente existissem essas ligações, de forma a manter a formação.
- enxames (*swarms*), compostos por equipas homogéneas que geram comportamentos coletivos emergentes.
- cooperação intencional, onde a missão global é decomposta e é feita uma atribuição de tarefas a cada UAV em missão, de forma a cada um desempenhar as suas tarefas individuais e contribuir para a missão global.

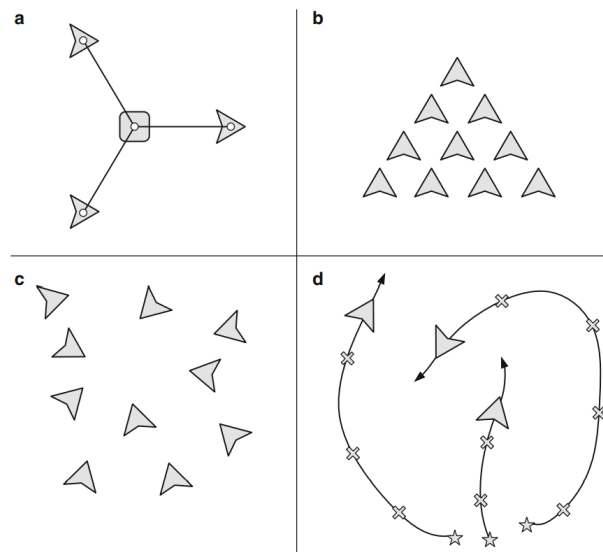


Figura 2.2: Ilustração gráfica de possíveis classificações de sistemas multi-UAV
 a) Acoplamento físico, b) Formações, c) Enxames, d) Cooperação intencional
 Retirado de [33]

2.2 Padrões de Pesquisa e Manobras

O trajeto de voo também pode ser caracterizado por um padrão de pesquisa, dependendo do tipo de missão associada. Podemos ainda dividir esta secção em manobras básicas, manobras complexas e padrões de pesquisa para um único agente ou múltiplos agentes, uma vez que dependendo se a localização de um alvo é conhecida ou não, temos ou não a necessidade de utilizar padrões de pesquisa para a identificar.

2.2.1 Manobras

Algumas das manobras simples mais utilizadas quando temos apenas um único agente em ação numa missão são [12]:

- Movimento “ir para o ponto”, que simplesmente se caracteriza por uma deslocação do veículo para esse ponto de destino, sem qualquer necessidade de realizar manobras sofisticadas;
- Movimento em círculo, onde dadas as coordenadas de um ponto, a dimensão do raio, o sentido de movimento e o número de voltas a efetuar, o agente irá cumprir o número de voltas em volta do ponto, com o raio indicado e sentido de movimento indicado.

Como manobras complexas, para além da composição de manobras simples, temos ainda outras, descritas de seguida [12]:

- Movimento “muitos pontos”, que consiste em múltiplos movimentos “ir para o ponto”;
- Movimento helicoidal, que consiste num movimento em círculo, mas onde a altitude inicial e final é variável;

- Padrões de espera, onde um determinado veículo pretende aterrizar, mas as pistas de aterrager estão ocupadas, tendo o agente que ficar em espera no ar;
- Descolagem, manobra de saída do aeroporto que depende das características da pista de descolagem e da aeronave;
- Aterrager, manobra equivalente à anterior, mas de entrada no aeroporto;
- Interseção, onde um dado ponto é calculado periodicamente a fim de uma aeronave se cruzar na mesma posição de outra num dado instante (a diferentes altitudes).
- Manobras de evasão de colisões [40], que podem ser bastante diferentes entre elas, mas todas têm como objetivo evitar o cruzamento de aeronaves e consequentes colisões.

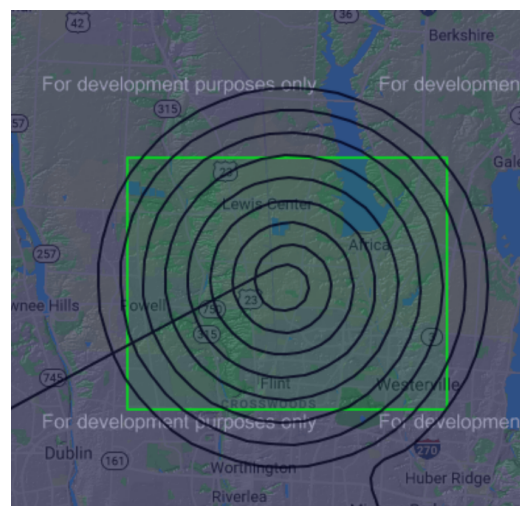
2.2.2 Padrões de Pesquisa

Considerando em específico missões de pesquisa (ou missões que incluem uma fase de pesquisa), enumera-se de seguida alguns padrões de pesquisa implementados para um único agente [12]:

- Movimento de “cortador de relva” (lawnmower) ou varrimento paralelo, caracterizado sucessivas mudanças de direção de 180° com uma dada distância entre a área sobrevoada, de modo a percorrer toda a área pretendida (Figura 2.3a);
- Movimento em espiral para dentro ou para fora, consistindo em diminuir ou aumentar, respetivamente, a dimensão do raio das semicircunferências efetuadas (Figura 2.3b);



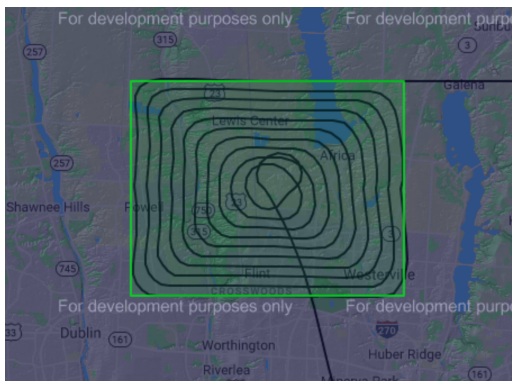
(a) Movimento de varrimento
Retirado de [12]



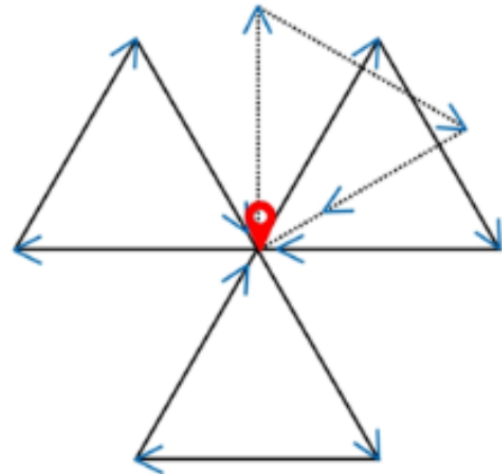
(b) Movimento em espiral
Retirado de [12]

Figura 2.3: Movimentos em espiral e de varrimento

- Movimento seguindo a forma da área pretendida para dentro ou para fora. O movimento em espiral é um caso específico deste movimento, onde a área que se pretende cobrir assemelha-se a um círculo (Figura 2.4a)
- Busca por setor: padrão utilizado para um único veículo que descreve triângulos em torno de um ponto central (Figura 2.4b).



(a) Movimento seguindo a forma da área pretendida
Retirado de [12]



(b) Busca por setor
Retirado de [35]

Figura 2.4: Movimentos de seguimento da forma e busca por setor

- Pesquisa adaptativa: adaptação de um determinado padrão de pesquisa baseado em informação em tempo real, isto é, um padrão que ao longo da missão vai analisando a informação proveniente das medições que realiza e dos sensores que possa ter, e que com isso adapta o percurso e/ou o padrão de pesquisa que está a utilizar;
- Localização Monte Carlo [41]: uso de técnicas de probabilidade para estimar a localização do alvo com base em medições de sensores e dados conhecidos. Padrão com potencial para ser usado em missões de detecção de origem e em missões de procura. No artigo referenciado, esta técnica é usada para procurar sobreviventes através da análise de imagens aéreas do terreno, onde é simulada a posição de cada sobrevivente, a direção de movimento inicial de cada um e a posição dos observadores no terreno.
- Algoritmos de pesquisa cruzada-diamante-hexagonal [17]: algoritmos que juntam padrões de pesquisa em forma de cruz e em forma de diamante com padrões de pesquisa hexagonais (Figura 2.5).
- Zamboni [4]: o nome surgiu de das máquinas de recobrir gelo em arenas de hóquei, em alternativa ao padrão de varrimento paralelo. Esta manobra tem como principal vantagem em

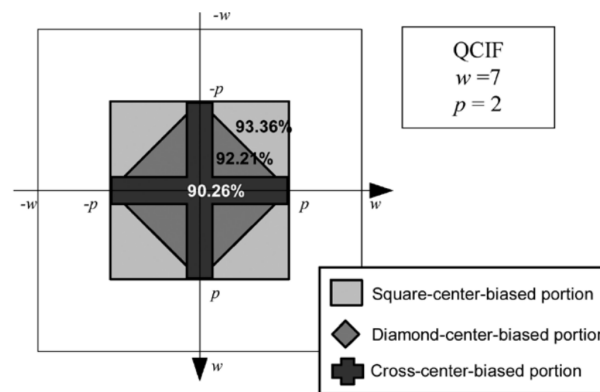


Figura 2.5: Algoritmo de pesquisa cruzada-diamante-hexagonal
Retirado de [17]

relação ao varrimento paralelo a remoção da necessidade de manobras mais apertadas para mudanças de direção, contudo passa por algumas zonas dentro da área pretendida múltiplas vezes, o que poderá não ser um aspeto positivo em relação ao consumo de combustível, por exemplo. Um esboço deste padrão de pesquisa encontra-se na Figura 2.6

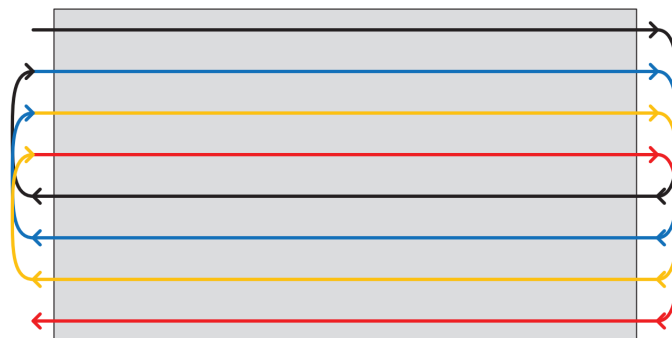


Figura 2.6: Algoritmo de pesquisa Zamboni
Retirado de [4]

No caso específico de sistemas multi-agente existem outros padrões de pesquisa associados (serão analisados em detalhe no capítulo 3):

- Divisão do espaço por setores, com movimentos vários: padrão de pesquisa que faz a divisão da área de pesquisa e permite que em cada subárea (resultante da divisão) seja realizado um padrão de pesquisa por cada UAV [30];
- Voo em formação: padrão de pesquisa que consiste numa adaptação do movimento “ir para um ponto” ou “muitos pontos”, onde os UAVs procuram manter uma formação específica durante a maior parte da missão. Essa formação pode ter vários formatos, estando aqui enumerados apenas alguns exemplos:

Fila única: agentes em linha reta;

Formação em escalão (echelon): semelhante à fila única, mas a equipa de agentes posiciona-se em linha diagonal;

Formação em diamante: quatro agentes posicionam-se num formato de losango: um agente na frente, outro atrás e dois agentes paralelos entre estes;

Formação em V: o agente líder posiciona-se na frente da formação (a ponta do “V”), enquanto os seguintes completam o formato do “V”;

Formação em caixa: agentes em forma retangular.

Líder e perseguidores [58]: um agente lidera a formação de voo, enquanto os restantes agentes posicionam-se na sua retaguarda, utilizando uma formação como as apresentadas anteriormente.

2.3 Métricas de Avaliação

Quanto às métricas de avaliação de missões, estas variam conforme o tipo de missão e padrão de pesquisa utilizado, visto que há padrões que não se adequam a determinados tipos de missões, de forma a representar a eficiência destas.

Estas métricas podem ser categorizadas em [12]:

- Métricas Absolutas: métricas que representam algo absoluto, usadas para comparar com outras métricas absolutas de diferentes simulações (Tabela 2.2).
- Métricas Relativas: métricas que representam uma medida de eficiência sem necessidade de comparar com outras métricas (Tabela 2.3).

As tabelas 2.2 e 2.3 possuem uma breve descrição da métrica aplicada a um agente único e a sua adaptação a um contexto multi-veículo.

Tabela 2.2: Métricas Absolutas

Métrica	Aplicação a um agente único	Adaptação multi-veículo
Tempo Gasto	Tempo necessário para completar uma missão desde a descolagem de um agente até à sua aterragem.	Soma dos tempos gastos
Área Coberta	Área sobrevoada pelo agente em questão em que foi possível aferir o que era necessário para essa zona.	União das áreas cobertas
Área Sobreposta	Área sobrevoada pelo agente em questão múltiplas vezes numa determinada missão.	União das áreas sobrepostas

Tabela 2.2: Métricas Absolutas (Continuação)

Métrica	Aplicação a um agente único	Adaptação multi-veículo
Distância Percorrida	Distância percorrida por um agente na missão, desde a decolagem até à sua aterragem.	Soma das distâncias percorridas
Tempo entre Medições	Intervalo de tempo mínimo entre medições numa missão (em particular, em missões de medição).	Média de tempo entre medições
Velocidade Média	Velocidade média de voo, desde a decolagem até à aterragem de um determinado agente.	Média das velocidades médias
Combustível Gasto	Quantidade de combustível gasto por um agente durante todo o voo.	Soma do combustível gasto
Distância do agente para com um alvo	Distância entre um agente em missão e um determinado objeto no terreno (em particular, em missões de patrulhamento)	Média de distância
Eficiência energética de carga útil e combustível	Produto da carga útil total transportada e da distância entre a origem e os locais de destino, por energia de combustível consumida [10] - PFEE (<i>Payload Fuel Energy Efficiency</i>)	Média de eficiência

Tabela 2.3: Métricas Relativas

Métrica	Aplicação a um agente único	Adaptação multi-veículo
Eficiência de Tempo	Tempo utilizado a fim de completar com sucesso uma missão sobre o tempo total de voo de um agente. Prevê-se que um agente que parta e que pouse num local mais perto da localização alvo que tenha uma maior eficiência de tempo.	Média de eficiências de tempo
Eficiência de Distância	Distância mínima necessária para completar uma missão sobre a distância percorrida na missão. Prevê-se que quanto menor for o desvio da rota esperada, maior seja a eficiência de distância.	Média de eficiências de distância
Eficiência de Velocidade	As aeronaves têm um menor consumo de combustível a uma determinada velocidade (velocidade de cruzeiro ideal). Assim sendo, prevê-se que uma missão tenha maior eficiência de velocidade caso o agente consiga manter uma velocidade muito próxima dessa determinada velocidade.	Média de eficiências de velocidade

Tabela 2.3: Métricas Relativas (Continuação)

Métrica	Aplicação a um agente único	Adaptação multi-veículo
Área Coberta em relação à Área Total	Percentagem de área sobrevoada por um agente em relação à área total que se pretende avaliar.	Percentagem da união das áreas cobertas
Área Sobreposta em relação à Área Total	Percentagem de área sobrevoada múltiplas vezes por um agente em relação à área total que se pretende avaliar.	Percentagem da união das áreas sobrepostas
Combustível Gasto por Unidade de Tempo	Velocidade média de voo, desde a descolagem até à aterragem de um determinado agente.	Média de combustível gasto
Combustível Gasto por Unidade de Área	Quantidade de combustível gasto por um agente durante todo o voo.	Média de combustível gasto
Desvio da Rota Esperada	Percentagem de tempo em que o percurso efetuado por um agente não é o esperado (nomeadamente por motivos externos como eventos meteorológicos). Existe uma linha ideal de trajetória planeada e caso o agente não circule por essa linha imaginária, está a fazer um desvio não planeado que afeta negativamente esta métrica.	Média de desvios
Desvio da localização de queda de objeto	Distância da localização onde cai o objeto lançado em relação à localização pretendida (métrica aplicada a missões com localização alvo conhecida).	Média de desvios
Desvio da origem identificada da origem real	Distância da origem identificada por um agente em relação à localização pretendida (métrica aplicada a missões com localização alvo desconhecida).	Média de desvios
Desvio de distância entre veículos	Maior diferença entre a distância entre veículos pretendida e a distância num determinado instante durante todo o voo (métrica aplicada a dois ou mais veículos).	Média de desvios entre pares de veículos
Distância mínima entre veículos	Valor de distância mínima entre agentes durante uma missão.	Mínimo das distâncias mínimas entre veículos

Tabela 2.3: Métricas Relativas (Continuação)

Métrica	Aplicação a um agente único	Adaptação multi-veículo
Distância mínima para o terreno	Valor de distância mínima alguma vez atingido durante a missão entre um agente e um ponto no solo.	Mínimo das distâncias mínimas para o terreno
Relação da velocidade de um agente em missão com a de um agente no terreno	Diferença da velocidade de um agente presente na missão com a velocidade de uma pessoa ou objeto no terreno (métrica aplicada a missões de monitorização).	Média das relações
Relação entre alvos detetados e alvos existentes	Percentagem de alvos detetados por um agente em relação ao número de alvos existentes numa determinada área.	Soma dos alvos detetados sobre a soma de alvos existentes
Percentagem de coordenadas dentro da área pretendida	Percentagem do número de coordenadas que realmente se encontram dentro da área pretendida a dividir pelo número total de coordenadas de cada UAV.	Média das percentagens

A adaptação destas missões a múltiplos veículos implica também uma adaptação do método de avaliação destas. Desta forma, para quantificar a eficiência da missão, é aconselhado o uso de diferentes métricas (dependendo do tipo de missão) e diferentes pesos para cada uma delas. O artigo de [48] sugere uma decomposição hierárquica de missões concretas por especialistas no assunto (*subject-matter experts* - SMEs) para encontrar características mensuráveis, sendo que os pesos são determinados por um processo de hierarquia analítica difusa (AHP) usando variáveis linguísticas. A Figura 2.7 apresenta um diagrama de todo o processo de derivação, simulação e validação de métricas, enquanto que a Figura 2.8 mostra, numa estrutura de árvore, os dois primeiros níveis de decomposição de uma missão feita por SMEs.

Num outro artigo do mesmo autor [49] é feita uma extensa análise de resultados, usando parâmetros como o estado dos UAVs, os tempos gastos nas diferentes fases de voo, o estado de combustível, entre outros.

O artigo de [56] sugere uma estrutura de planeamento consciente da saúde (*Health Aware Planning* - HAP) para missões complexas de longa duração. Esta estrutura permite obter feedback entre o planeamento de alto nível baseado em processos de decisão de Markov (MDP) e os controladores adaptativos focados na aprendizagem de níveis de execução, permitindo que esta antecipe falhas e planeie eficientemente o comportamento pro-ativo, tendo em conta a mudança de recursos.

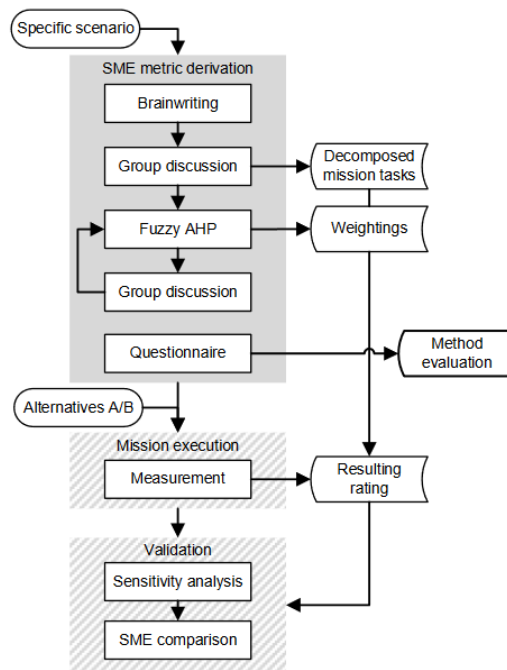


Figura 2.7: Diagrama de fluxo do processo de derivação, simulação e validação de métricas sistemáticas
Retirado de [48]

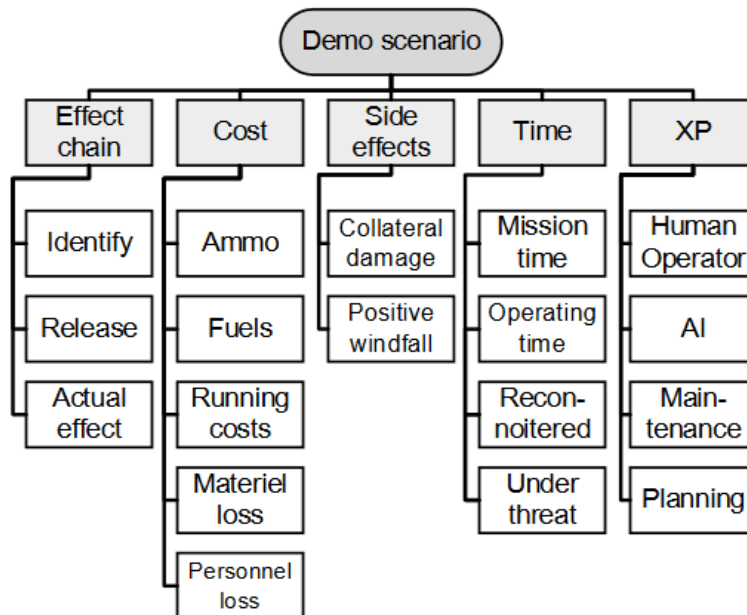


Figura 2.8: Primeiros dois níveis de decomposição de uma missão numa estrutura de árvore pelos SMEs
Retirado de [48]

Capítulo 3

Estado da Arte

Tal como já foi dito na contextualização, estamos perante um tema que tem tido avanços importantes recentemente: para além da eficiência e segurança que o uso de automóveis não tripulados asseguram em comparação com outros meios em vários tipos de missões, a evolução tecnológica e a investigação neste ramo oferecem muito material necessário para o seu estudo, implementação e análise [47].

A melhor forma de saber que abordagem ter numa dada missão e que meios utilizar e de que forma é saber do que esses meios são capazes de fazer e conhecer as capacidades e limitações associadas. Uma solução para esse problema é a utilização de simuladores que permitem a parametrização total da capacidade de um agente e permitem toda uma virtualização num “mundo” que seja o mais semelhante possível àquele em que vivemos, sem correr o risco de se perderem vidas ou ter custos desnecessários durante o processo de análise desse território e/ou ação sobre o mesmo.

Este capítulo pretende fazer uma revisão da literatura sobre plataformas de simulação que se assemelhem à que vai ser usada neste trabalho, uma breve descrição sobre ferramentas de simulação existentes e a descrição de trabalhos relacionados com a comparação de padrões de pesquisa, análise de desempenho de missões e/ou com a comparação de missões de um único veículo com missões multi-veículo. Para além disto, uma revisão sobre estudos importantes na área de voo em formação e de divisão de área também será feita, de forma a procurar um método compatível com a Plataforma existente e que possa ser implementada.

3.1 Plataformas de Simulação

Para que a simulação destas missões seja possível, é necessário ter uma plataforma flexível e capaz de avaliar o desempenho de cada agente (aeronave, no caso específico deste trabalho) numa determinada missão a efetuar. Para melhor compreensão das simulações, as visualizações das mesmas revelam-se cruciais para mais rapidamente identificar possíveis erros que dificilmente seriam detetados caso não fosse possível ter uma representação visual da evolução da missão.

Assim sendo, a plataforma a ser usada neste trabalho (FSX) assemelha-se com algumas plataformas já existentes, que são orientadas a missões e possuem capacidades semelhantes. Esta secção vai permitir conhecer algumas dessas plataformas e perceber em que é que se distinguem do FSX.

3.1.1 AGENTFLY

A AgentFly Technologies é uma equipa criada em 2010 que tem estado a trabalhar em projetos de investigação e comerciais em cooperação com empresas líderes mundiais. É membro da NATO NIAG SG-205 desde 2016 e é membro da EUROCAE desde 2017. Esta equipa tem quatro áreas de foco: Modelação e simulação de gestão de espaço aéreo (ATM), Integração do sistema de aeronaves não tripuladas no espaço aéreo partilhado, Operações táticas: militares e de segurança e Automatização do trabalho aéreo.

O seu foco mais próximo deste trabalho é a simulação ATM, sendo um sistema multi-agente de tráfego aéreo focado na emulação do comportamento humano e na interação humano-sistema [62]. Este projeto usou quatro métricas para avaliar o desempenho das missões: o número de agentes em cada estado durante a missão, a percentagem de tempo utilizada pelo controlador para tarefas com intervalos de quinze minutos e o número de transferências não aceites e colisões não resolvidas em intervalos de quinze minutos. Estas métricas podem ser úteis para os tipos de missões acima mencionados.

Este projeto tem vindo a crescer, sendo neste momento um ABM que inicialmente era focado apenas no domínio ATM e tem evoluído para permitir simulações também no domínio UTM [21] e a integração do espaço aéreo destes sistemas [44], suportando simulações rápidas e em larga escala, assim como simulações em tempo real com diferentes níveis de virtualização. Na Figura 3.1 é apresentada uma captura de ecrã com zonas de interdição de voo num sistema para missões de entrega de mercadorias.



Figura 3.1: Zonas de interdição de voo num sistema para missões de entrega de mercadorias
Retirado de [1]

Comparando esta plataforma de simulação com a que está a ser usada (FSX), a AGENTFLY foi desenhada para testes e simulações de veículos não tripulados (UAVs), enquanto que o FSX foi inicialmente projetado para aeronaves tripuladas e simulação do voo destas. O FSX tem vários modelos de aeronaves e aeroportos, enquanto que o AGENTFLY possui uma capacidade de simulação mais avançada capaz de uma modelação mais realista de dinâmicas de voo de UAVs. O AGENTFLY possui ainda ferramentas integradas para planeamento de missões (tais como definição de pontos de referência e visualização de dados em tempo real de UAVs) e pode ser executado em qualquer sistema operativo, enquanto que o FSX não possui essas ferramentas integradas e é apenas suportado (oficialmente) em Windows. Por outro lado, o FSX possui uma maior comunidade de utilizadores e uma maior variedade de complementos e conexões (*plugins*) disponíveis para a plataforma.

3.1.2 MOOS-IvP

MOOS-IvP é um simulador focado em ambientes marinhos, composto por um conjunto de módulos de software acessíveis ao público, que se dividem em dois domínios e consequentemente em dois pacotes de software que se conectam intrinsecamente [24]:

- o domínio no campo das plataformas robóticas marinhas, fornecendo uma robusta camada de comunicação inter-processo - MOOS. O MOOS trata-se de um conjunto de bibliotecas em C++ desenvolvidas pelo grupo de Robótica Móvel da Universidade de Oxford que suporta a troca de mensagens entre processos através de uma arquitetura de *publish-subscribe*;
- o domínio num conjunto de ferramentas de autonomia construído em torno de um motor de otimização - IvP-Helm. O IvP-Helm trata-se de um conjunto de aplicações baseadas em MOOS e bibliotecas que acrescentam capacidades autónomas de tomada de decisão aos sistemas, juntamente com ferramentas de monitorização.

Na Figura 3.2 é apresentada a arquitetura geral deste simulador, onde podemos ver que MOOS é responsável pela autonomia do sistema (e consequentemente da simulação) e o IvP Helm responsável pela tomada de decisão no sistema. Esta conexão está ligada a um sistema de navegação e controlo, sistema essa com quem vai trocar informação e com quem vai enviar tomadas de decisão.

A maior disparidade entre esta plataforma e a que vai ser utilizada é o ambiente em que estas vão ser usadas: enquanto a MOOS-IvP é um simulador de veículos marinhos, a plataforma a usar é um simulador focado em veículos aéreos. Contudo, a forma como as duas plataformas funcionam não é assim tão diferente. A forma como o planeamento da rota a efetuar é feita é muito semelhante à da plataforma que vai ser utilizada, onde a área de pesquisa pretendida e o percurso a efetuar até lá é assinalado com pontos de referência (*waypoints*).

A Figura 3.3 mostra que os padrões de pesquisa que podem ser utilizados nesta plataforma são similares aos evidenciados no Capítulo 2, sendo este mais um fator de aproximação destes trabalhos.

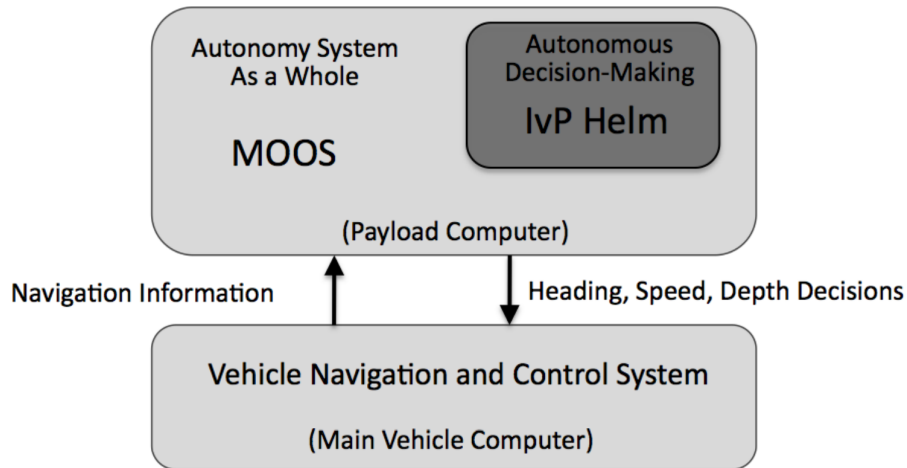


Figura 3.2: Arquitetura do MOOS-IvP
Retirado de [7]

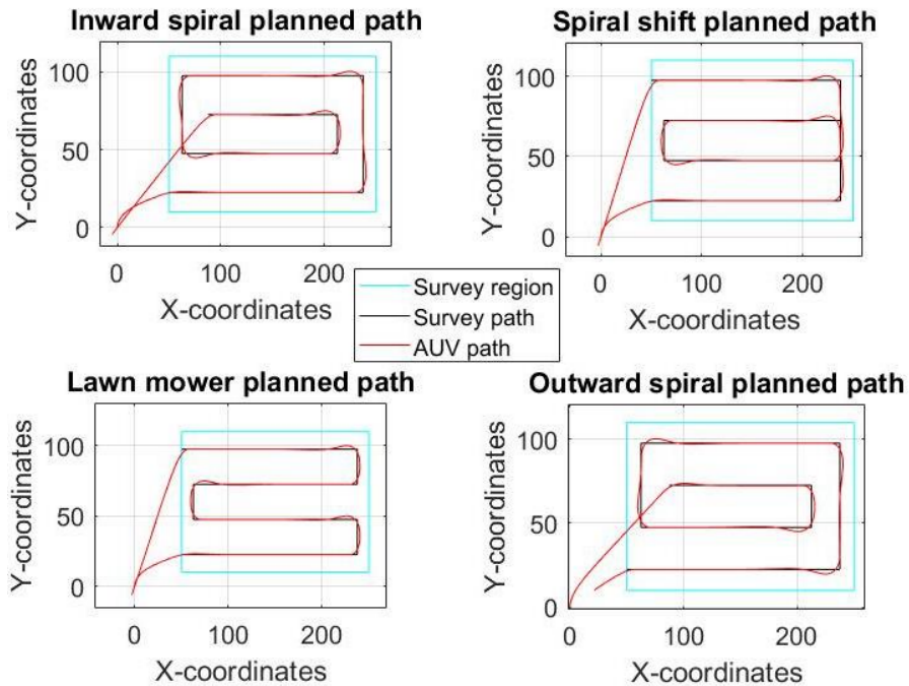


Figura 3.3: Padrões de Pesquisa de AUVs
Retirado de [22]

Neste estudo foi feita uma comparação destes padrões de pesquisa e o padrão de varrimento paralelo foi identificado como o padrão que evidenciava melhores resultados, sendo também o padrão com menor número de curvas e com caminhos retílineos mais longos. Estas medições foram efetuadas com altitude constante, de forma a reduzir distorções nas imagens produzidas pelos sonares. Este fator pode também ser tido em conta em missões aéreas, assim como também pode evoluir no sentido deste fator deixar de produzir essas distorções.

Outro estudo nesta plataforma procurou utilizar *deep reinforcement learning* para otimizar tarefas de *capture the flag* [25]. Não sendo esse um objetivo do nosso trabalho, este procura transformar as métricas utilizadas numa função de recompensa, de forma a otimizar esta implementação. Na Figura 3.4 é apresentada uma captura de ecrã desta plataforma.



Figura 3.4: Captura de ecrã do MOOS-IvP Marine Viewer

3.1.3 AirSim

AirSim [51] é uma plataforma de fonte aberta feita pela Microsoft com o objetivo de aproximar a simulação a realidade, a fim de ajudar no desenvolvimento de veículos autónomos. Para isso, a plataforma utiliza estratégias de *machine learning* para treinar os agentes em missão e esta tem foco em veículos aéreos não tripulados e carros.

Durante uma simulação, o AirSim gera dados para que mais tarde possam ser utilizados pelos agentes para avaliação do seu comportamento, assim como uma alimentação da profundidade de visão, segmentação de objetos e câmara do veículo (como se pode ver na Figura 3.5).

Esta plataforma pode ser considerada numa potencial visualização do que se pretende obter de cada um dos agentes em missão, onde é possível visualizar todo o seu percurso e ter um grafismo sobre os dados que este vai obtendo ao longo da simulação.

3.1.4 Comparação de Plataformas

A AGENTFLY é uma plataforma de simulação ATM complexa e de alta fidelidade que pode ser integrada com outros sistemas, possui uma vasta rede de métricas a aplicar a diferentes missões, permite a configuração de vários cenários de forma simples e permite o desenvolvimento rápido e flexível de funcionalidades novas e personalizadas. Esta plataforma pode ser usada em simulações para validação, otimização ou melhoramento da gestão de tráfego aéreo atual e, numa perspetiva



Figura 3.5: Captura de ecrã de uma simulação no AirSim
Retirado de [51]

mais próxima deste trabalho, pode também ser usada para o estudo da integração de um sistema de UAVs num espaço aéreo partilhado.

A MOOS-IvP, por sua vez, é uma plataforma desenhada para veículos marinhos, mas que se assemelha em grande parte a este trabalho, apesar da aplicação em diferentes meios. Tal como foi dito na subsecção desta plataforma, os padrões utilizados são os mesmos apresentados no Capítulo 2. Esta plataforma possui um módulo inteiramente dedicado a simulações - *Simulation Toolbox* -, que inclui várias ferramentas com suporte para missões de múltiplos veículos, o que também aproxima esta plataforma ao FSX.

O AirSim é uma plataforma de simulação mais direcionada à visualização e geração de dados de treino para a construção de modelos de *machine learning* [51]. Contudo, é possível utilizá-la para fazer uma análise pormenorizada de um UAV numa dada missão, e foi construída com o objetivo de ser uma plataforma o mais independente possível, de forma a poder ser integrada noutros projetos com maior facilidade.

Na Tabela 3.1 é feita uma comparação destas três plataformas e da plataforma utilizada (FSX), de forma a analisar algumas características que facilmente permitem distingui-las.

Tabela 3.1: Comparação de Plataformas

Plataforma	Foco	Sistemas Operativos	Código aberto	Funcionalidades
A Plataforma (FSX)	UAVs	Windows	Não (Software proprietário: Microsoft)	Simulação de voo, Telemetria em tempo real, Planeamento de missões, Controlo de agentes.

Tabela 3.1: Comparação de Plataformas (Continuação)

Plataforma	Foco	Sistemas Operativos	Código aberto	Funcionalidades
AGENTFLY	UAVs	Windows e Linux	Sim	Telemetria em tempo real, Planeamento de missões, Controlo de agentes.
MOOS-IvP	AUVs	Unix (Linux, MacOS)	Sim	Planeamento de missões, Controlo de agentes.
AirSim	UAVs e veículos terrestres	Windows e Linux	Sim	Telemetria em tempo real, Controlo de agentes.

A análise destas plataformas não tinha como objetivo procurar uma alternativa à escolhida, contudo é importante perceber que outras plataformas existem que se aproximem da nossa, de forma a avaliar a possibilidade de, no futuro, adaptar o trabalho a uma plataforma mais capaz e que facilite a implementação de novas funcionalidades. Para além disso, não tendo a possibilidade de testar as plataformas com os mesmos objetivos da nossa nesta fase do trabalho, é difícil dizer com alto grau de certeza que A Plataforma é a melhor plataforma a utilizar neste contexto.

3.2 Ferramentas de Simulação

Para além das plataformas de simulação mencionadas acima, existe ainda uma variedade de ferramentas que também podem ser utilizadas para simulações deste género, podendo ou não ser mais direcionadas a outros tipos de veículos, ou até mesmo a outros tipos de objetos. Desde RotorS, jMAVSim e Hector, que são ferramentas com maior foco em veículos multirotores, até Gazebo, MORSE, Webots, CoppeliaSim, ARGoS, MRDS e USARSim, que são ferramentas mais abrangentes e que podem ser adaptadas a uma maior variedade de conceitos e especificidades.

No caso específico de ferramentas de simulação para veículos aéreos, existe uma variedade enorme de simuladores de voo, seja para fins educativos ou de lazer. Para além do FSX, simulador de voo escolhido para A Plataforma, existem outros como FlightGear [39], AeroFly FS, X-Plane, Infinite Flight, FlyInside, Prepar3D, DCS World, entre muitos outros que se focam nessa simulação.

Estas plataformas poderiam ser soluções para substituir o simulador da Plataforma (FSX) caso se justificasse essa mudança, mas essa análise não é alvo deste trabalho e está fora desse contexto, sendo ainda assim uma hipótese de trabalho futuro para, caso exista, substituir o FSX por uma plataforma de simulação com melhores funcionalidades e que acrescentam valor a esta Plataforma.

Existem estudos que procuram constantemente inovar e acrescentar algo a estas ferramentas [20], e existem algumas plataformas capazes de simular vários ambientes focadas na simulação de missões, algumas já implementadas, como é o caso da plataforma apresentada por [61], e muitas

outras experiências que têm vindo a ser feitas, quer em cenários maiores, quer em espaços mais reduzidos. Existem ainda plataformas semelhantes, mas que se focam na gestão do espaço aéreo, como é o exemplo de [38].

3.3 Trabalhos Relacionados

Esta secção pretende mostrar alguns estudos e trabalhos realizados até então em diferentes partes deste trabalho, nomeadamente da comparação de padrões de pesquisa, da forma como a análise de desempenho de missões é efetuada e da comparação de missões multi-veículo com missões de um único veículo, assim como uma descrição mais detalhada das possibilidades de arquitetura de missões multi-veículo.

Sobre padrões de pesquisa, há um estudo que avalia o desempenho de uma missão com diferentes padrões de pesquisa e determinadas métricas, de forma a indicar qual o melhor para um determinado problema [13]. Este estudo foi realizado numa plataforma de simulação, e foram tiradas algumas conclusões sobre quais os padrões mais eficientes a usar, dependendo da área a explorar e a sua forma (assim como as características dos agentes em missão). Uma das conclusões é que o padrão de movimento de seguir a forma pretendida procura maximizar a área coberta, abdicando do tempo despendido nesta tarefa. Se o objetivo passar por minimizar o tempo de pesquisa, é necessário avaliar outros padrões de pesquisa, não esquecendo que este depende da área de procura. A configuração desta análise pode ser melhorada, com o objetivo de criar modelos de previsão, dependendo do local e das configurações do utilizador (entre elas, do(s) tipo(s) de veículo(s) em missão). Contudo, os resultados deste estudo podem ser tidos em conta já para a análise deste trabalho, tendo já um ponto de partida sobre o que se está à espera.

Sobre análise de desempenho, foram encontrados estudos que procuram fazê-lo tendo em conta alguns aspetos do modelo das aeronaves [3], e outros tendo em conta dados de propulsão, aerodinâmica, peso [29], controlo da execução e desempenho detalhado da missão [34], mas não foram encontrados trabalhos que façam esta análise de desempenho com um conjunto específico de métricas como acontece na Plataforma.

Existem algumas vantagens do uso de múltiplos veículos em qualquer tipo de missão quando comparada com o uso de um único veículo [33]. A possibilidade de fazer múltiplas intervenções simultâneas é uma das vantagens, uma vez que um único veículo apenas pode realizar uma medição e uma ação de cada vez, enquanto múltiplos veículos podem trocar informação e atuar de forma mais eficiente, reduzindo também o tempo despendido na missão. A possibilidade de utilização de diferentes tipos de veículos para uma mesma missão também pode ser uma vantagem, no sentido em que cada um pode ser adaptado a uma tarefa que lhe seja mais fácil e económica do que se esta fosse atribuída a outro agente. Este ponto também pode ser justificado com a análise de desempenho de cada aeronave dependendo do seu modelo [3].

A evolução tecnológica tem sido também um passo importante para a utilização de múltiplos veículos, uma vez que as tecnologias de comunicação entre agentes têm tido progressos interessantes e que nos permitem partilhar informação de forma a tornar a missão multi-veículo mais fiável do

que missões de um único veículo. Este estudo é um passo importante na tarefa de comparar missões de um único veículo e missões multi-veículo, uma vez que é possível ter uma ideia geral sobre quais as configurações que, em princípio, vão permitir obter melhores resultados de análise de desempenho.

Em 2003, foi apresentada uma arquitetura de um sistema de um simulador multi-UAV em tempo real (RMUS) [23], com o objetivo de estudar o comportamento de vários UAVs que trabalham em conjunto. Este simulador cria um ambiente virtual com diferentes níveis de complexidade e permite que os utilizadores avaliem o desempenho e as capacidades dos agentes em diferentes cenários. Para além disto, o simulador também fornece ferramentas para efetuar testes de localização e mapeamento cooperativos para UAVs em ambientes desconhecidos. Este sistema vai de encontro ao que se pretende fazer neste projeto numa fase mais avançada, onde vão ser feitas simulações de missões com o objetivo de analisar o desempenho destas, consoante as configurações usadas.

Em 2007, foi apresentado um algoritmo que analisa sistemas de UAVs em ambientes desconhecidos, incluindo SLAM, avaliação de desempenho, planeamento de rotas e decomposição e cobertura de áreas [8]. Um simulador multi-UAV foi também desenvolvido a fim de testar e avaliar os conceitos de cooperação de veículos, pelo que a Figura 3.6 ilustra as principais componentes dessa simulação. Estas abordagens têm sido fundamentais para melhorar a eficiência e robustez dos sistemas de UAVs na execução de missões multi-veículo e, tal como se pretende neste trabalho, é feita uma análise de missões multi-veículo com o intuito de perceber quais as melhores parametrizações para tal e como fazer a divisão de áreas para maximizar esse desempenho.

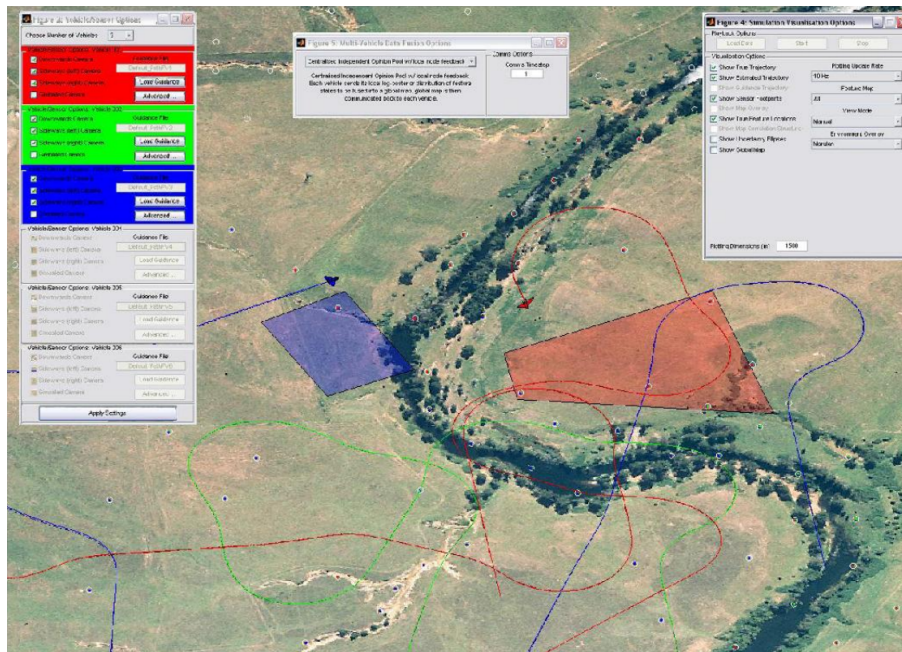


Figura 3.6: Visualização de um simulador SLAM cooperativo multi-UAV
Retirado de [8]

Um outro estudo procurou uma abordagem robusta para resolver o problema da localização simultânea e mapeamento aéreo cooperativo (C-VSLAM), baseado num sistema de câmaras

incorporado em cada UAV [37]. A adaptação de um filtro não linear a sistemas multi-veículo teve resultados positivos quando comparados com sistemas de um único veículo. Este é mais um estudo que permite ter uma ideia do potencial de missões multi-veículo, quando comparadas com missões de veículo único.

Em 2013, um estudo abordou a decomposição e cobertura de áreas por múltiplos UAVs, especificamente para missões de monitorização e vigilância [4]. A cobertura de áreas envolve a decomposição em subáreas e o planeamento de rotas dentro de cada uma delas. Na Figura 3.7 é apresentada a arquitetura do sistema que permite efetuar esta cobertura e permite ter uma ideia de padrões de pesquisa possíveis para missões de monitorização, nomeadamente da forma como a área é dividida para cada agente ou grupo de agentes.

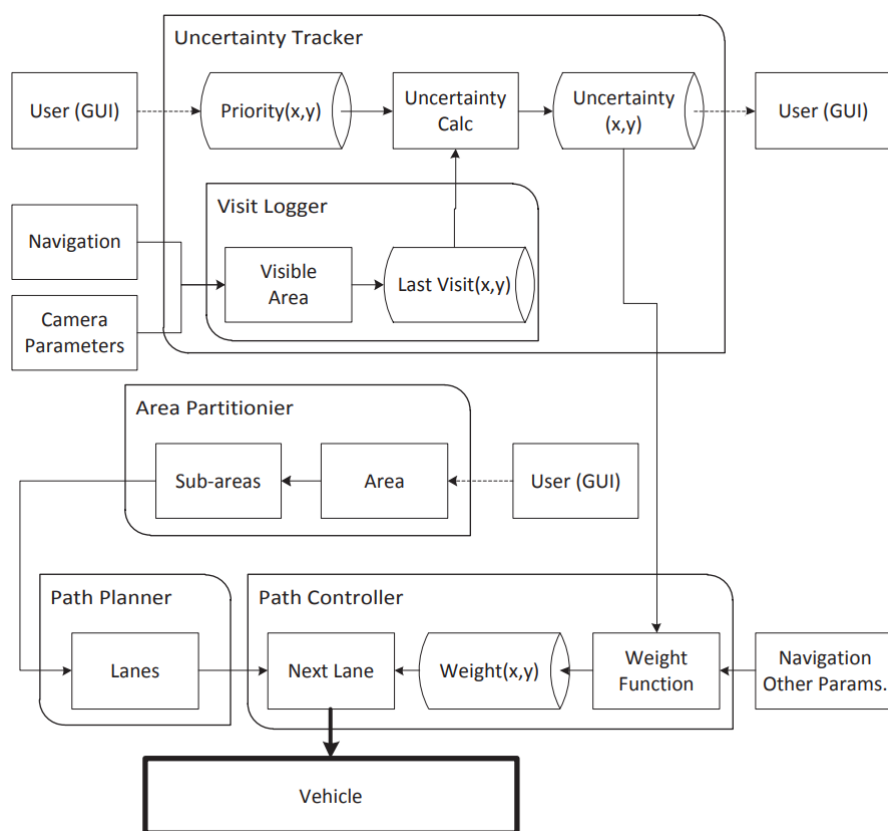


Figura 3.7: Arquitetura do sistema proposto por [4]

Em 2015, um artigo descreveu o planeamento de rotas para a formação de múltiplos UAVs num ambiente realístico e conhecido e explora técnicas de SLAM para cada UAV para garantir que são capazes de se mover em tempo real e em conjunto [15]. Além disso, aborda o uso de múltiplos UAVs para detetar alvos únicos ou múltiplos e para decompor áreas. Este artigo vai também de encontro ao que se pretende neste trabalho, com foco nas missões de procura e deteção que foram caracterizadas na Contextualização, uma vez que nestas missões o número de alvos a procurar não é conhecido à partida.

Em 2018, foi publicado um artigo que discute a avaliação de desempenho de sistemas multi-UAV para aplicações de sensores remotos na agricultura [27]. É apresentada uma abordagem para a decomposição de áreas e cobertura múltipla, assim como várias arquiteturas multi-UAV (como planeamento de rotas para formações multi-veículo, a sua cooperação, SLAM e simulações em tempo real. Na Figura 3.8 é apresentada uma comparação do uso de um único veículo (a) e o uso de múltiplos veículos (b) desta abordagem, comparação esta que também se pretende fazer neste trabalho.

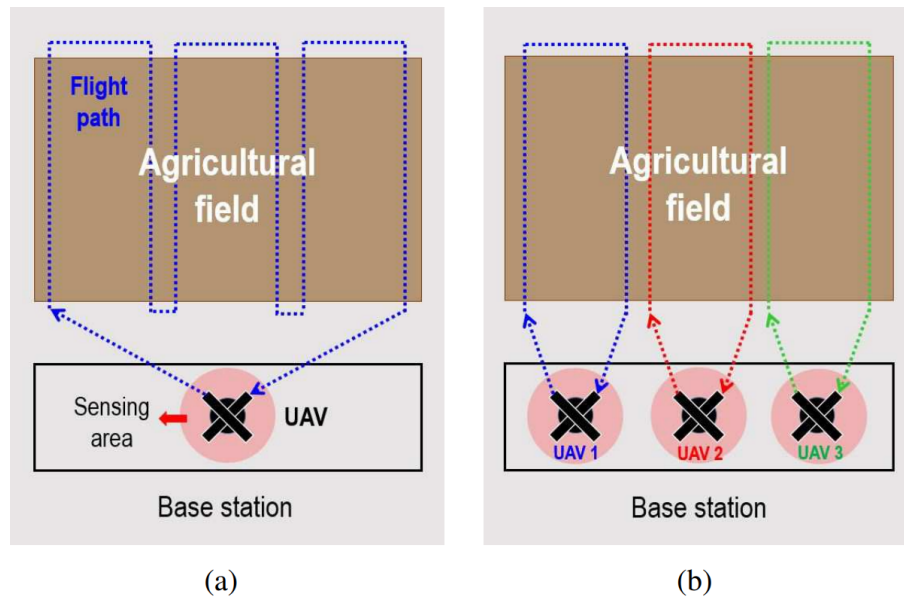


Figura 3.8: Aplicação de sensores remotos na agricultura
(a) Caso de um único UAV, (b) Caso multi-UAV
Retirado de [27]

Todos os trabalhos demonstram uma variedade imensa de abordagens para um mesmo problema, e todos permitem afirmar que o uso de múltiplos UAVs em missões pode ser vantajoso em comparação com um único veículo. Foram encontrados estudos que avaliam o desempenho de diferentes padrões de pesquisa e os que serão abordados neste trabalho são também os que demonstram maiores taxas de sucesso. Os avanços na tecnologia permitem realizar simulações para todas estas situações e tornar as missões reais mais eficientes e melhor planeadas. Além disso, foram encontrados estudos que propõem arquiteturas e simuladores para análise de missões multi-veículo. Essas abordagens simulam o comportamento de vários veículos em diferentes cenários, permitindo a avaliação do desempenho da missão e das capacidades dos agentes nela inseridos. Estas simulações são fundamentais para melhorar a eficiência e a robustez dos sistemas de UAVs em missões multi-veículo.

Em suma, os estudos e trabalhos relacionados fornecem percepções valiosas sobre padrões de pesquisa, análise de desempenho e missões multi-veículo, contribuindo para a compreensão das melhores práticas na seleção de padrões de pesquisa, avaliação de desempenho e utilização de múltiplos veículos em missões, além de destacar os avanços tecnológicos e as simulações como

ferramentas essenciais nesse contexto.

Nas secções seguintes deste capítulo vai ser feita uma revisão do estado de arte atual sobre voo em formação e divisão de área, de forma a perceber o que já existe sobre estes tópicos e procurar uma possível solução a implementar na Plataforma.

3.4 Divisão de Área

O artigo de [32] propõe um método para realização de operações de busca cooperativa numa determinada área usando múltiplos UAVs. O método proposto é composto por duas fases: decomposição da área de busca em polígonos de menores dimensões e atribuição de cada polígono decomposto a um UAV. Os UAVs voam sobre a área que lhe foi atribuída num padrão de varrimento, usando uma direção de varredura que minimiza o número de voltas necessárias. Para otimizar a cobertura de cada polígono, é utilizado um algoritmo que leva em consideração a geometria do polígono e a posição do UAV. Na Figura 3.9 podemos ver os resultados da simulação da divisão de área utilizando este método, onde as direções de varrimento ótimas estão representadas por setas.

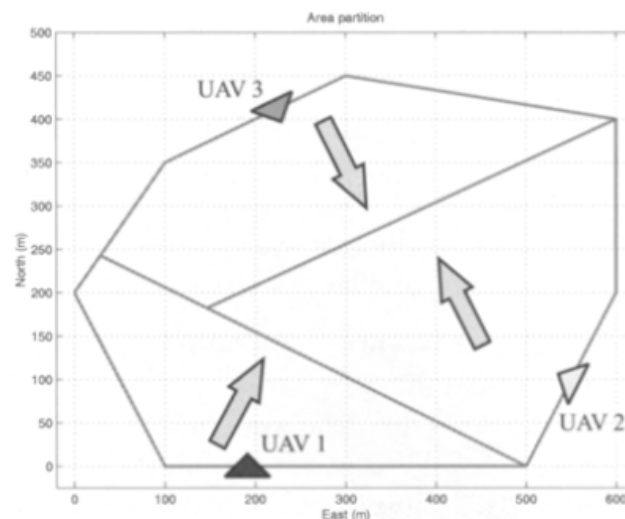
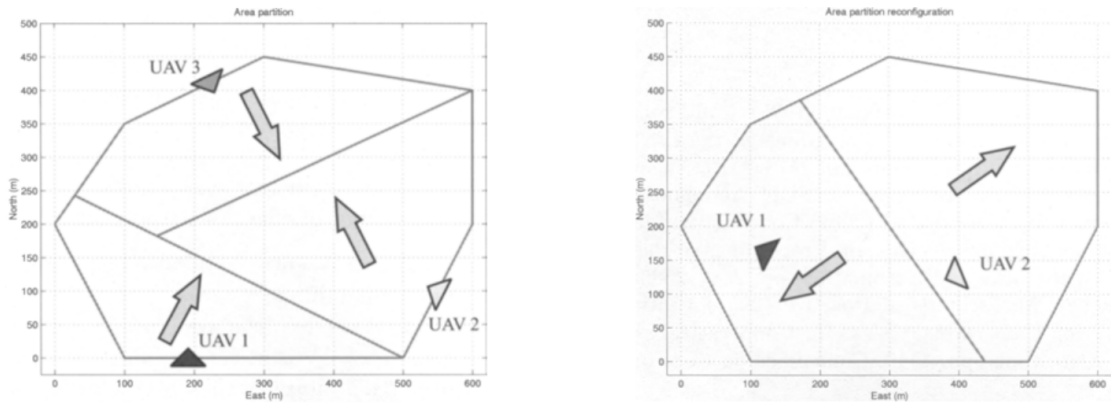


Figura 3.9: Resultados da simulação de divisão de área
Retirado de [32]

Este artigo apresenta resultados de uma simulação efetuada com três UAVs num polígono convexo com sete arestas. O polígono total é dividido em subpolígonos convexos e cada UAV é atribuído a cada uma delas, de acordo com as suas capacidades relativas. Após a divisão, cada UAV é responsável por encontrar a direção ótima de varrimento que minimiza a altitude do subpolígono atribuído. Esta simulação inclui ainda um processo de reconfiguração, no caso de se perder um UAV. Quando isto acontece, os restantes UAVs na missão têm que cobrir a área que o UAV perdido deveria cobrir, pelo que um novo processo de divisão de área tem de ser lançado e, consequentemente, novos subpolígonos e novas direções de varrimento vão ser escolhidas. Nas Figuras 3.10a e 3.10b

podemos ver a configuração do algoritmo para três UAVs e a reestruturação para dois UAVs, no caso, por se ter perdido o terceiro UAV.



(a) Reestruturação da divisão de área e direções de varrimento ótimas para 3 UAVs

(b) Reestruturação da divisão de área e direções de varrimento ótimas para 2 UAVs

Figura 3.10: Reestruturação da divisão de área e direções de varrimento ótimas
Retirado de [32]

O artigo de [30] propõe um método de planeamento de trajetórias de cobertura (Coverage Path Planning - CPP) para UAVs numa área poligonal. O método é baseado no conceito de decomposição celular, que divide a área do polígono num conjunto de células menores. O método proposto é capaz de lidar com ambientes dinâmicos, adaptando-se em tempo real às alterações do ambiente, é capaz de encontrar trajetórias ótimas para múltiplos UAVs e é mais eficiente em termos de tempo e consumo de energia do que os métodos até então existentes. Na Figura 3.11 é clara a distinção entre dois métodos de planeamento de trajetórias e onde se pode ver que a escolha da direção de varrimento é crucial para encontrar a trajetória ótima de cobertura.

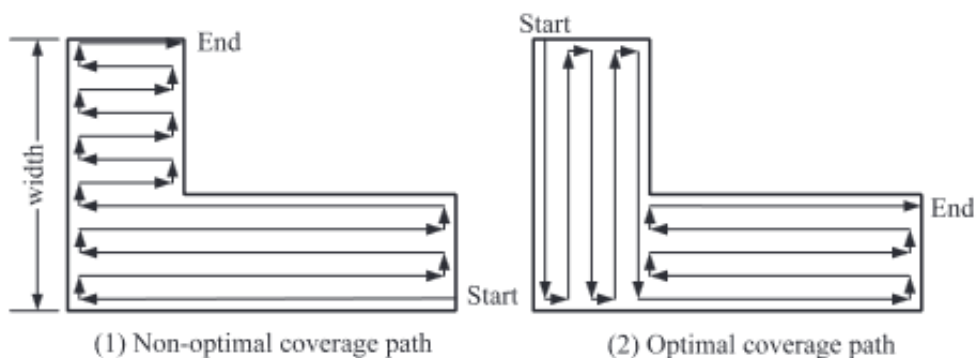


Figura 3.11: Comparação entre dois métodos de planeamento de caminhos de cobertura (CPP)
Retirado de [30]

Este artigo apresenta um conjunto de vértices que forma uma área poligonal complexa com o objetivo de a decompor e realizar eficientemente a cobertura de trajetória na área total. Esta

simulação passa por 6 passos, com o objetivo de obter o resultado da simulação final da cobertura de trajetória. Depois de encontrar os vértices côncavos da região, decompor a área poligonal em subáreas com o algoritmo de soma de largura mínima baseado no método recursivo *greedy*, conectar as regiões num grafo com base no percurso mínimo e planejar o caminho de convergência entre subáreas, obtemos o resultado pretendido.

O artigo de [4] propõe um método de decomposição de uma área de cobertura em subáreas e planejamento de trajetórias de uma equipa de UAVs cobrir cada subárea. O método é baseado no conceito de técnica de varredura, que facilita a decomposição de área e, conseqüentemente, as trajetórias dos UAVs. O desempenho do algoritmo é avaliado em diferentes cenários, demonstrando a sua eficácia na decomposição de áreas de cobertura complexas em subáreas viáveis para os UAVs. O artigo conclui que o algoritmo é capaz de lidar com diferentes configurações de área de cobertura e diferentes números de UAVs e é uma solução viável para a cobertura eficiente de grandes áreas por múltiplos UAVs. Na Figura 3.12 é apresentada a forma como é encontrada a direção de varredura ótima, passo importante para o sucesso do método.

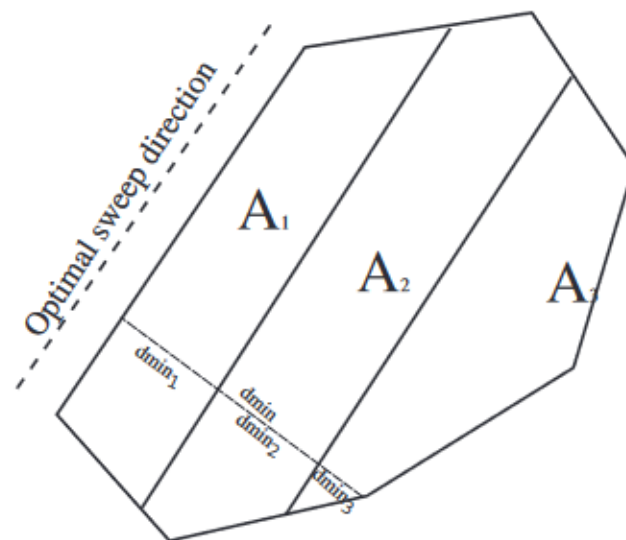


Figura 3.12: Divisão de uma área poligonal
Retirado de [4]

Neste artigo propôs-se um método de decomposição de área e geração de linhas para planejamento de trajetórias e a validação deste foi feita através de simulações e experiências reais (estas para 1 UAV apenas). Os resultados mostram a incerteza (em segundos desde a última visita) ao longo do tempo (em segundos), podendo concluir que nas simulações a incerteza máxima estabiliza por volta dos 180 segundos (3 minutos), enquanto que em experiências reais essa estabilização só acontece por volta dos 800 segundos (13 minutos), uma vez que o vento foi uma variável que dificultou a obtenção destes resultados.

O artigo de [5] apresenta um método para o roteamento de múltiplos UAVs para cobrir uma determinada área a realizar sensoriamento remoto, e é baseado no conceito de árvore geradora

mínima (Minimum Spanning Tree - MST). O método começa por construir uma árvore que conecta todos os pontos da área a ser coberta com o menor número possível de arestas (MST), atribuindo de seguida UAVs às arestas da árvore, de forma a que cada UAV seja responsável por uma subárea. Por fim, o planeamento de trajetórias de voo é calculado para que cada UAV consiga cobrir a subárea que lhe corresponde no menor tempo possível. O modelo é avaliado em simulações para diferentes situações, desde a consideração ou não de restrições e de tempo de preparação, do número de UAVs disponíveis e do número de operadores para cada formação, e os resultados demonstram a eficiência em termos de tempo total de voo da abordagem proposta e que pode ser aplicada em diferentes contextos de sensoriamento remoto e vigilância de áreas. A Figura 3.13 mostra apenas um caso específico dos resultados obtidos, onde no primeiro caso (a) apenas um UAV estava disponível e no segundo caso (b) estavam quatro UAVs disponíveis, o tempo de preparação não era considerado e cada UAV tinha o seu operador (isto é, o tempo de preparação não era cumulativo).

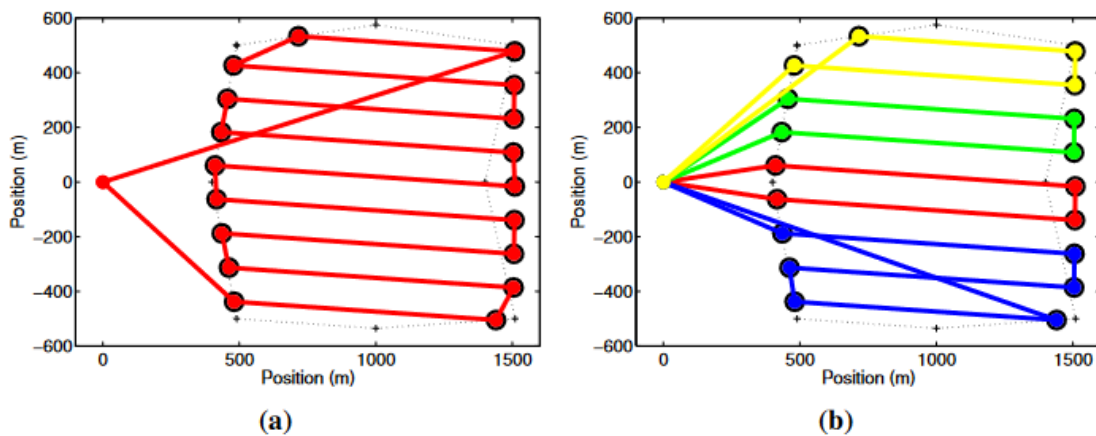


Figura 3.13: Duas soluções triviais para o problema de otimização de divisão de área pelos UAVs disponíveis
Retirado de [5]

Os autores deste artigo realizaram simulações e experiências reais para ilustração e avaliação do método proposto. Para as simulações, foram feitos testes usando diferentes números de UAVs, diferentes áreas poligonais e, para uma mesma parametrização destas variáveis já mencionadas, uma comparação do efeito de algumas restrições apresentadas. As experiências reais usaram 1 UAV para ter dados de referência sobre a cobertura de uma área de dimensões 900m x 1600m, tendo completado a missão em 27.7 minutos e com um tempo de preparação de 8 minutos. Numa segunda fase destas experiências, foram usados 2 UAVs. Depois de uma diminuição de 3 minutos no tempo de missão total mantendo o tempo de preparação desta, foi possível diminuir o tempo total de missão para 18.4 minutos, tendo diminuído o tempo de preparação para 2 minutos e aumentando o número de operadores humanos para cada UAV. Este aumento de operadores permitiu uma melhor distribuição de linhas de varrimento para cada UAV e, conseqüentemente, uma diminuição no tempo de missão total.

O artigo de [55] apresenta um método para planeamento de trajetórias de cobertura para UAVs

para reconstruir um terreno tridimensional. O método proposto combina a cobertura completa de uma região de interesse com a reconstrução 3D da sua superfície através de UAVs equipados com sensores de altitude e câmaras. Na Figura 3.14 podemos ver a forma como um polígono é decomposto segundo este método e a forma como a trajetória de cobertura é feita.

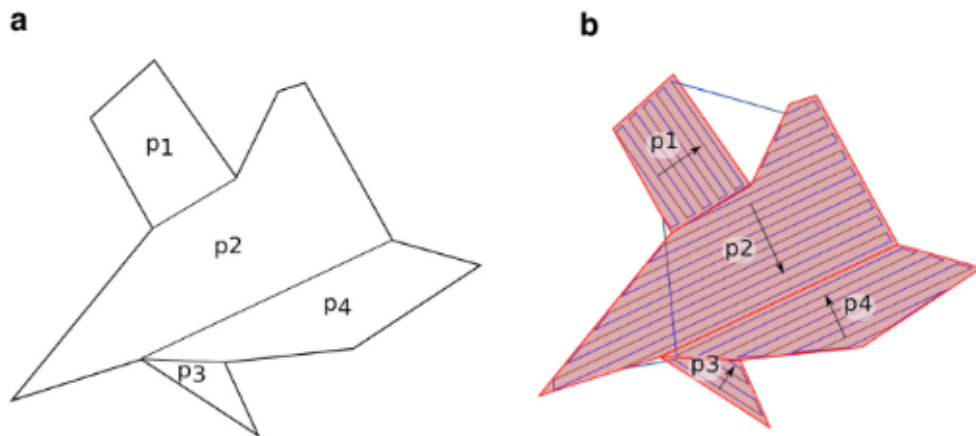


Figura 3.14: Decomposição de um polígono e correspondente caminho de cobertura

Retirado de [55]

Este artigo apresenta 2 resultados ilustrativos da aplicação do algoritmo proposto. No primeiro, sendo o polígono escolhido não convexo, foi preciso decompô-lo. Apesar do resultado da decomposição continuar a apresentar subpolígonos não convexos, estes já não geram caminhos não interrompidos, pelo que podem ser cobertos sem processamento adicional. No segundo exemplo, é feita uma comparação com a solução proposta por [30]. Usando a mesma área, o método de [30] fez 87 curvas, enquanto que o de [55] pode ser concluído fazendo apenas 80 curvas, ainda com a vantagem de poder ter o ponto de controlo no solo em qualquer lugar próximo desta área sem afetar o número de curvas.

O artigo de [26] apresenta um método para planeamento de trajetórias de múltiplos UAVs com objetivo de alcançar a cobertura ótima de uma área. O método proposto inclui um problema de otimização que aloca pontos de passagem para UAVs de forma que cada UAV cubra uma subárea da forma mais eficiente possível. Ainda neste artigo são referenciadas algumas limitações dos atuais sistemas de UAVs, como a baixa autonomia de decisão e a necessidade de operadores existentes, afirmando que o artigo anteriormente referenciado de [5] que visava rever essas limitações. Na Figura 3.15 temos três representações sequenciais de como construir a trajetória ideal para a cobertura de uma determinada área, onde se começa por identificar os vértices e os segmentos de reta da área pretendida, encontra-se as direções de cobertura e de varrimento ótimas e por fim calcula-se os pontos de passagem e linhas virtuais que ligam esses pontos. Na Figura 3.16 aplica-se esse método e faz-se a atribuição de cada fragmento de área a cada UAV disponível.

Neste artigo foram realizadas 2 simulações para validação do método proposto: um subsistema de atribuição de tarefas aplicado a várias áreas poligonais e diferente número de UAVs e o sistema

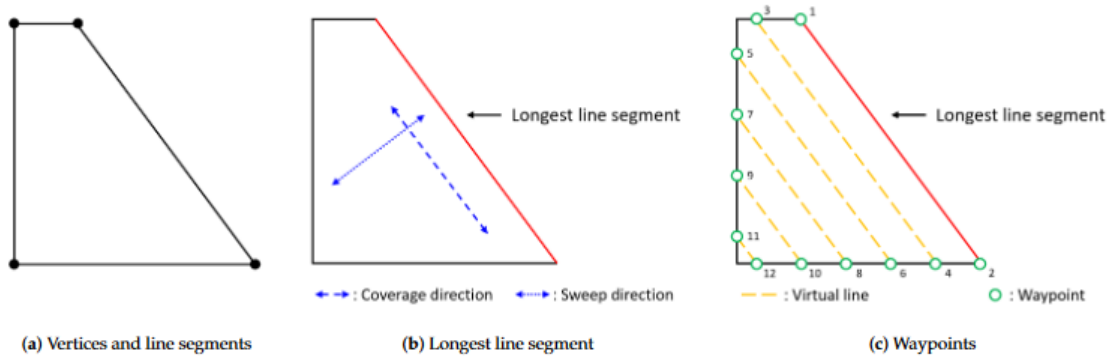


Figura 3.15: Procedimento de construção de trajetórias de cobertura de área
Retirado de [26]

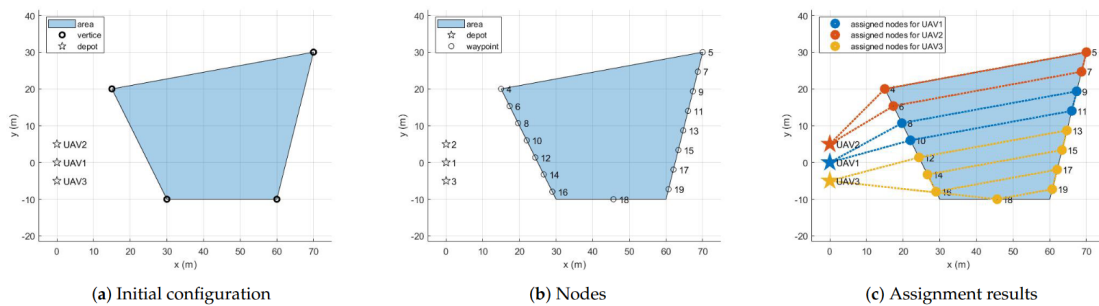


Figura 3.16: Procedimento de atribuição de tarefas à configuração escolhida
Retirado de [26]

como um todo assumindo que a área poligonal é fornecida pelo operador. Na Figura 3.17 podemos ver os resultados da atribuição de pontos de referência num quadrilátero para dois, três, quatro e cinco veículos, sendo que foram realizados testes também para áreas triangulares, pentagonais e hexagonais, onde foram calculadas as distâncias máximas e médias de cada equipa em cada experiência. Foram ainda realizadas experiências reais usando 2 hexacópteros, sendo que nestas a área a percorrer era definida pelo operador e os resultados destas foram ao encontro dos resultados obtidos nas experiências anteriores.

O artigo de [16] apresenta um novo algoritmo de planeamento de trajetórias de cobertura para múltiplos UAVs em operações marítimas de busca e salvamento (Search and Rescue - SAR). Este algoritmo divide-se em duas fases, de forma a resolver o problema de planeamento de trajetórias (CPP) de áreas de múltiplos UAV em resgates e salvamentos marítimos. Na primeira fase, a área de busca é decomposta num grafo, enquanto que na segunda fase é formulado um modelo de programação linear inteira mista (MILP) para derivar um caminho de cobertura ótimo que minimiza o tempo da missão. Na Figura 3.18 é possível ver o resultado da aplicação do método proposto numa divisão de área por dois UAVs.

Neste artigo fizeram-se experiências com dois tipos de UAVs a uma altitude constante durante a missão. O desempenho de cada experiência foi avaliado com um conjunto de 12 casos de teste, sendo que progressivamente nesses casos o tamanho da área era maior. Para além disso, todos

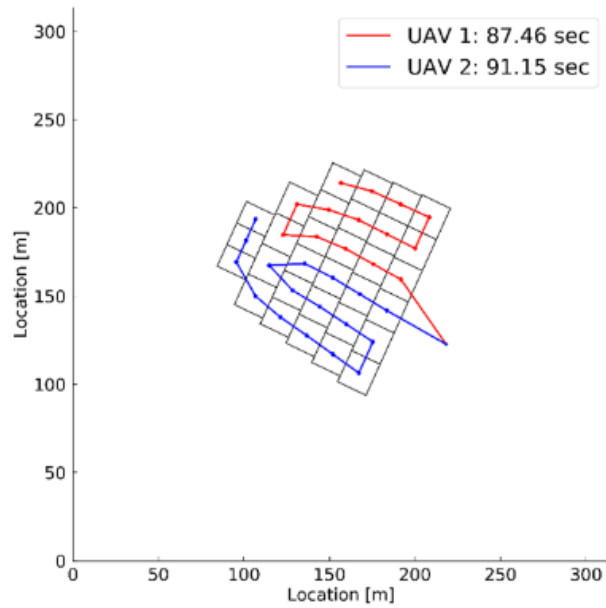


Figura 3.17: Resultados da atribuição de pontos de referência num quadrilátero
Retirado de [26]

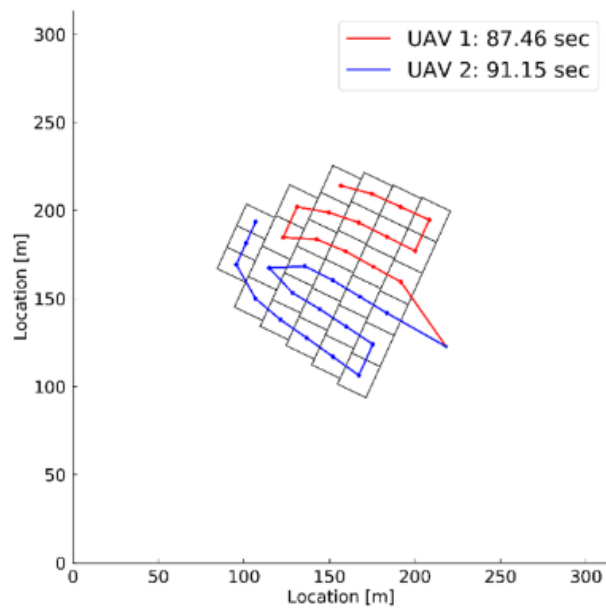


Figura 3.18: Divisão de área por dois UAVs
Retirado de [16]

os casos de teste foram gerados aleatoriamente, com exceção do caso de teste 10, que foi obtido através de um ambiente do mundo real. O algoritmo de decomposição da área baseado em grade teve como resultados uma separação média de 1.313 metros quadrados e em todos os testes este processo não ultrapassou os 5 segundos. O desempenho do algoritmo de RSH diminuiu com o

tamanho do problema. O algoritmo reduz em 87% o tempo de computação do processo mas em casos de maior dimensão (como os casos de teste 11 a 15) o modelo já não é capaz de dar uma solução exata. Foram realizados testes para a divisão em 2 e 3 UAVs, e os resultados mostram que a adição do terceiro UAV diminui o tempo de conclusão em 56.29 segundos (em média). O próprio artigo faz uma comparação desta abordagem com a de [32] e admite que esta melhora a solução para o problema em 7.9%, uma vez que o artigo de Maza não decompõe áreas considerando os caminhos gerados por completo.

Na Tabela 3.2 enumera-se cada artigo descrito nesta secção seguida de uma coluna de prós e uma coluna de contras sobre as metodologias utilizadas em cada um deles.

Tabela 3.2: Comparação de métodos de divisão de área

Artigo	Prós	Contras
[32]	Algoritmos podem ser alargados a problemas mais complexos com uma carga computacional limitada (e relativamente baixa); soluções úteis para a aplicação em tempo real; simulações com 3 UAVs e reconfiguração após perda de 1.	Solução adaptada apenas a polígonos convexos e a ambientes sem obstáculos.
[30]	Algoritmo adaptado a polígonos não convexos; descrição pormenorizada de cada passo deste algoritmo; Trajeto ótimo para 1 UAV.	Algoritmo de complexidade temporal polinomial; Solução adaptada apenas a ambientes sem obstáculos.
[4]	Simulações realizadas com 1 e múltiplos equipas de UAVs; evasão de colisões entre os UAVs.	Solução adaptada apenas a polígonos convexos e a ambientes sem obstáculos; resultados experimentais alterados devido a fatores externos.
[5]	Número de UAVs para cobrir a área é automaticamente selecionado ao resolver o problema de otimização; método capaz de resolver problemas práticos que só aparecem com a utilização de UAVs reais; consideração do tempo de preparação no tempo total de missão.	Método pode não encontrar solução em casos em que o número de UAVs e a duração das suas baterias são reduzidas, tendo em conta a área a cobrir; evasão de colisões entre UAVs não considerada.
[55]	Solução adaptada a área convexas e não convexas; lista de coordenadas GPS dos pontos de viragem que pode ser usada por qualquer UAV que suporte navegação por pontos de referência	Problemas relacionados com a complexidade computacional (algoritmo de ordem $O(n!)$).

Tabela 3.2: Comparação de métodos de divisão de área (Continuação)

Artigo	Prós	Contras
[26]	Problema de otimização para alocar pontos de referência a UAVs, diminuindo o tempo de missão e a área coberta sobreposta; configuração completa do sistema de missão para cobrir uma área com múltiplos UAVs.	Uso apenas do padrão de varrimento para simulações e experiências reais; evasão de obstáculos e ambientes dinâmicos não considerados.
[16]	Decomposição de área baseada em grelha; minimização do tempo total usando um modelo MILP; algoritmo de RSH pode produzir soluções quase ótimas em tempo reduzido.	Evasão de obstáculos não considerada.

3.5 Voo em Formação

Um artigo de [57] apresenta uma abordagem ao problema de voo em formação cooperativo, e possui uma estratégia de controlo dupla, sendo capaz de realizar voo em formação multi-UAV em modo seguro (sem obstáculos) e em modo perigoso (com evasão de colisões e obstáculos). No modo seguro é usado um controlo preditivo de modelo (MPC), enquanto que no modo perigoso é usada uma rede neuronal Grossberg (GNN) modificada. O objetivo é permitir que os UAVs voem em formação de forma precisa e eficiente em ambos os modos, mantendo uma distância segura dos obstáculos e entre veículos durante o voo. Na Figura 3.19 podemos ver as trajetórias geradas para os quatro agentes na simulação com a presença de quatro obstáculos. Este artigo conclui que esta abordagem pode ser implementada para ambientes com vários obstáculos e pode ser também testado para aplicações em tempo real para UAVs de pequenas dimensões.

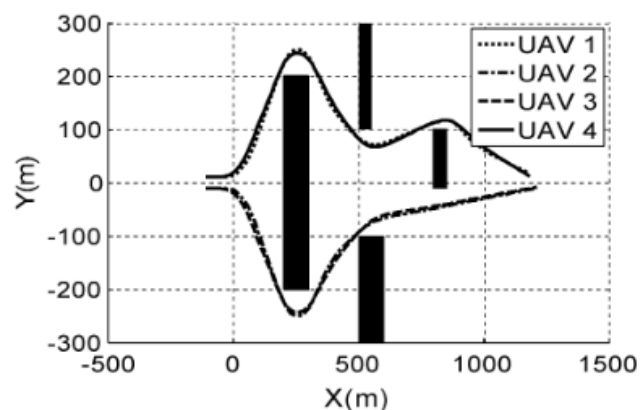


Figura 3.19: Trajetórias geradas para a formação com a evasão de obstáculos

Retirado de [57]

Neste artigo efetuaram-se simulações que procuraram corroborar a eficiência dos métodos de configuração e reconfiguração da formação após a evasão a um conjunto de obstáculos: os UAVs agruparam-se num quadrado com lado de 20m; quando estes encontraram obstáculos, a formação foi separada para evitá-los, voltando a reagrupar-se depois dessa evasão. A velocidade desejada dos UAVs era de 25 metros por segundo, sendo que os valores mínimos e máximos foram de 17.9 e 35.7, respetivamente. Quando uma passagem entre obstáculos é estreita, cada UAV espera um tempo proporcional à distância dessa passagem para assegurar que não há colisões entre UAVs e que todos passam em linha reta. O tempo de computação das simulações foi de ordem $O(N)$ e cada UAV na simulação estava equipado com um GPS, uma câmara e uma unidade de processamento de imagem (para identificação de obstáculos).

Um artigo de [14] propõe um controlador de voo de formação com evasão de colisões para UAVs baseado em controlo preditivo de modelo não linear (MPC). O controlador leva em consideração a saturação da entrada de controlo e as restrições de estado e é projetado de forma distribuída. A configuração da formação é determinada com base no método do ponto de referência virtual (na Figura 3.20 podemos ver essa formação num sistema de coordenadas de pontos de referência), que garante que não haja propagação de erros na formação. A função-objetivo para cada UAV é projetada na estrutura MPC não linear. Um novo tipo de função de custo, baseado na orientação da velocidade do UAV e na distância relativa entre o UAV e um obstáculo, é adicionado à função-objetivo para garantir a prevenção de obstáculos. A prevenção de colisões entre veículos também é assegurada pela função de custo combinada com uma estratégia de prioridade. O problema de otimização não linear é resolvido pelo método de filtro SQP, que possui melhor convergência e propriedades numéricas e é um dos métodos mais eficazes para resolver problemas de programação não linear (NLP).

Os resultados da simulação deste artigo são fornecidos para avaliar o desempenho do controlador da evasão de obstáculos pela função de custo baseada na orientação da velocidade do UAV e na distância relativa aos obstáculos. A simulação usou seis UAVs e um tempo total de simulação de 400 segundos, e tinha como objetivo manter a formação desejada, usando uma estrutura virtual, enquanto realizava as manobras, ao mesmo tempo que garantia a evasão de colisões e obstáculos. Na Figura 3.21 podemos ver o resultado da simulação, comprovando o sucesso na evasão de obstáculos, de colisões entre UAVs e de configuração da formação desejada.

Um artigo de [9] propõe um novo método de controlo de voo em formação de UAVs baseado no conceito de comportamento e estrutura virtual. O comportamento de um UAV é definido como o seu padrão de movimento desejado, como seguir um líder, manter uma distância desejada de outros UAVs ou evitar obstáculos. A estrutura virtual é uma representação virtual da formação, que é usada para calcular o movimento desejado de cada UAV. O método proposto divide-se em duas etapas: na primeira, o movimento desejado de cada UAV é calculado com base no seu comportamento e estrutura virtual; na segunda, as entradas de controlo são calculadas para acompanhar o movimento desejado. Este método está descrito graficamente na Figura 3.22.

As simulações realizadas mostram que o método utilizado de comportamento e estrutura virtual, juntamente com a evasão de obstáculos, pode efetivamente controlar o voo em formação de UAVs,

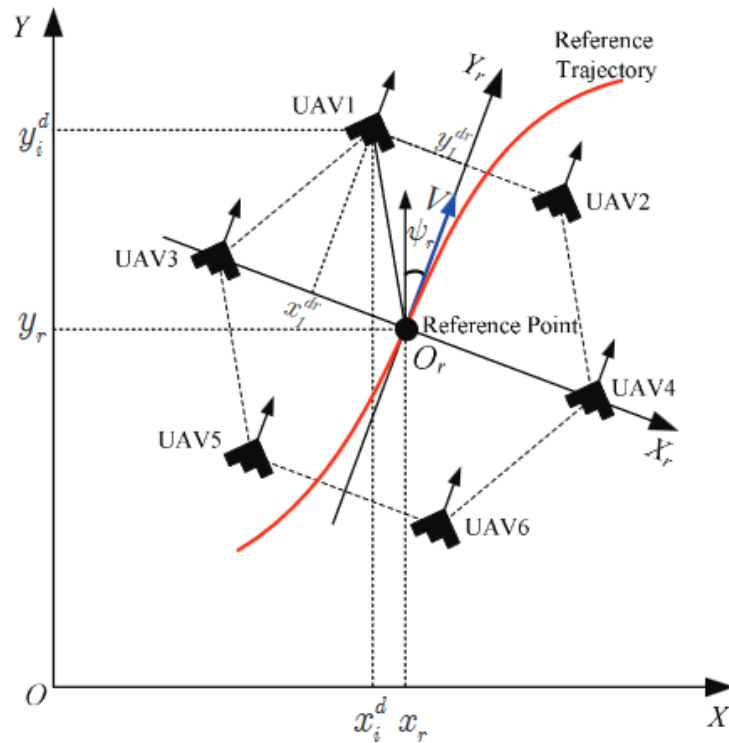


Figura 3.20: Definição de formação num sistema de coordenadas de pontos de referência
Retirado de [14]

como podemos ver pela Figura 3.23.

Um artigo de [31] propõe um novo método para controlar o voo em formação de UAVs na presença de obstáculos. O método proposto consiste em duas etapas: na primeira, um campo potencial é usado para detetar obstáculos e calcular o movimento desejado de cada UAV para os evitar; na segunda, é usada uma estratégia de reagrupamento de formação para manter a forma e o tamanho de formação desejados, usando um método de controlo proporcional-integral-derivativo (PID). Na Figura 3.24 podemos ver quatro cenários da aplicação deste método para a evasão de obstáculos e reagrupamento de uma formação de 2 UAVs (líder e seguidor).

Este artigo descreve em pormenor todas as simulações efetuadas para as estratégias apresentadas de evasão de obstáculos e de reagrupamento de formação, apenas para o UAV líder da formação e para líder e seguidores da formação (em separado). Na Figura 3.25 podemos ver o exemplo de uma simulação deste artigo, onde um obstáculo se encontra à direita na direção seguida pela formação, e onde é possível perceber as trajetórias de evasão desse obstáculo (a) e controlar a distância entre o UAV líder e o UAV seguidor (b).

Um artigo de [15] propõe um método de planeamento de trajetória para UAVs em formação, baseado no conceito de estrutura virtual. Após a criação da estrutura virtual, os UAVs são controlados de forma a acompanharem essa estrutura. É utilizada uma técnica de caminho global para

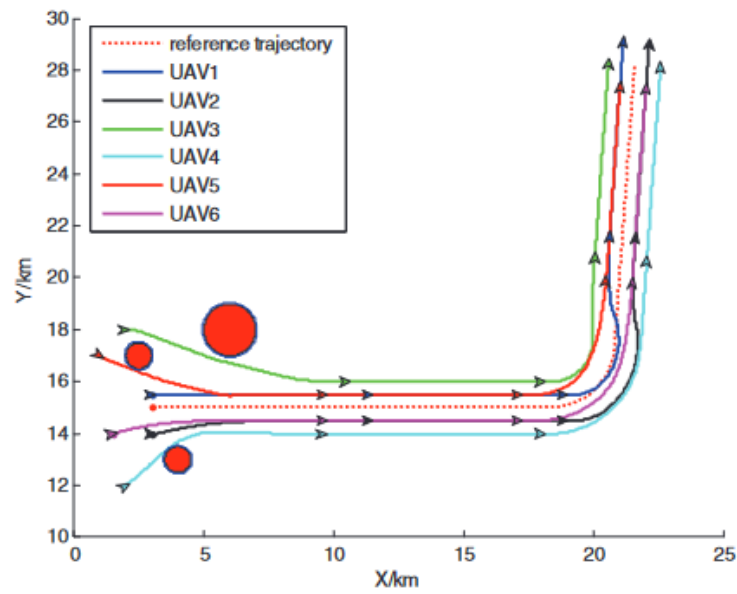


Figura 3.21: Trajetória de referência e trajetória efetuada por cada UAV na simulação
Retirado de [14]

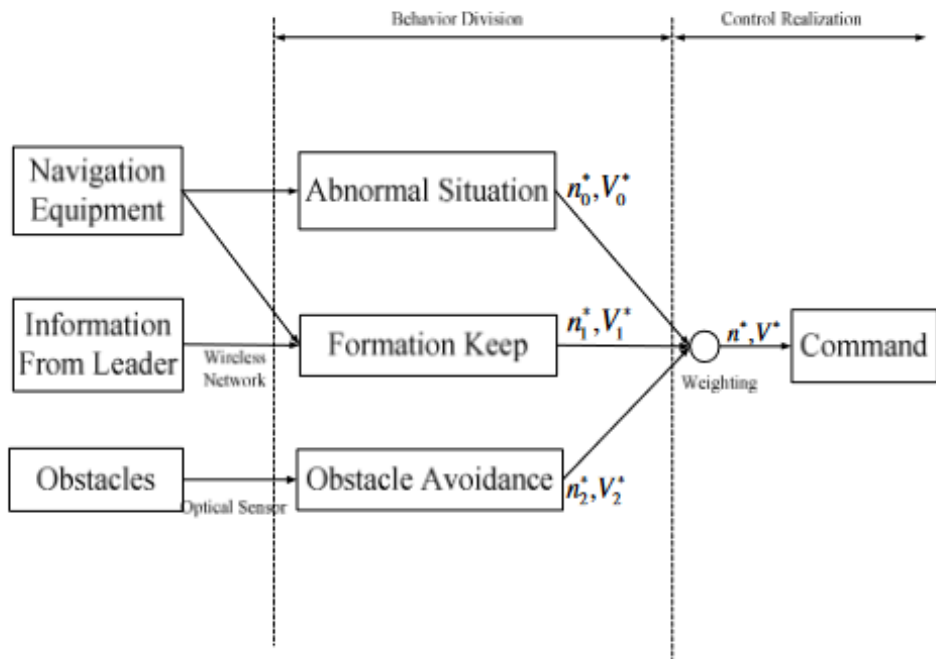


Figura 3.22: Método de controlo de voo em formação baseado no comportamento e estrutura virtual
Retirado de [9]

definir a trajetória para cada agente em formação e uma técnica de caminho local para otimizar a

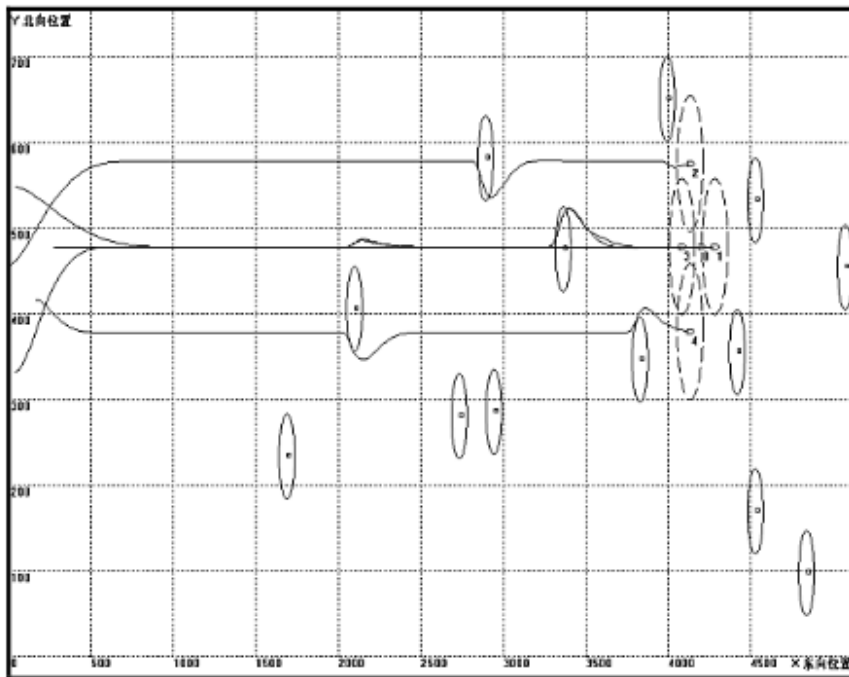


Figura 3.23: Trajetória e formação de UAVs após evasão de obstáculos
Retirado de [9]

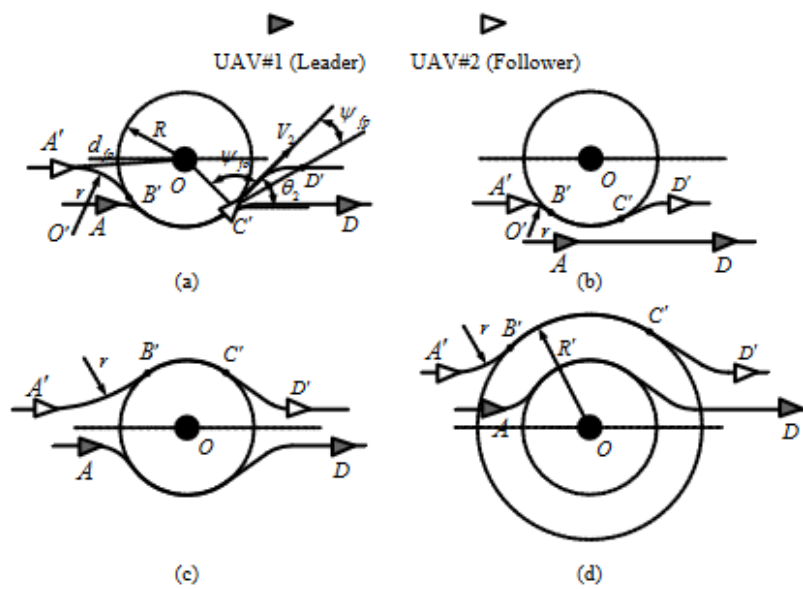


Figura 3.24: Quatro cenários diferentes de evasão de obstáculos e reagrupamento da formação
Retirado de [31]

trajetória de cada agente em tempo real para evitar colisões e melhorar a eficiência da formação. Através de simulações, os resultados deste artigo mostram que a abordagem pode gerar trajetórias

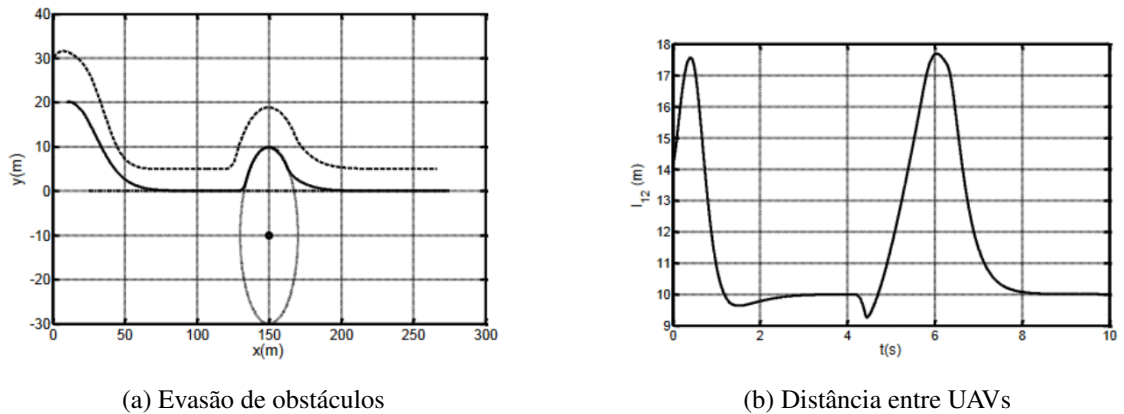


Figura 3.25: Resultados de uma simulação de líder e seguidor.
Retirado de [31]

suaves e seguras para estas formações, além de aumentar a eficiência da formação. Na Figura 3.26a temos um diagrama do corpo rígido de velocidade virtual da formação e na Figura 3.26b temos uma melhor percepção de como é assegurada a distância de segurança entre UAVs.

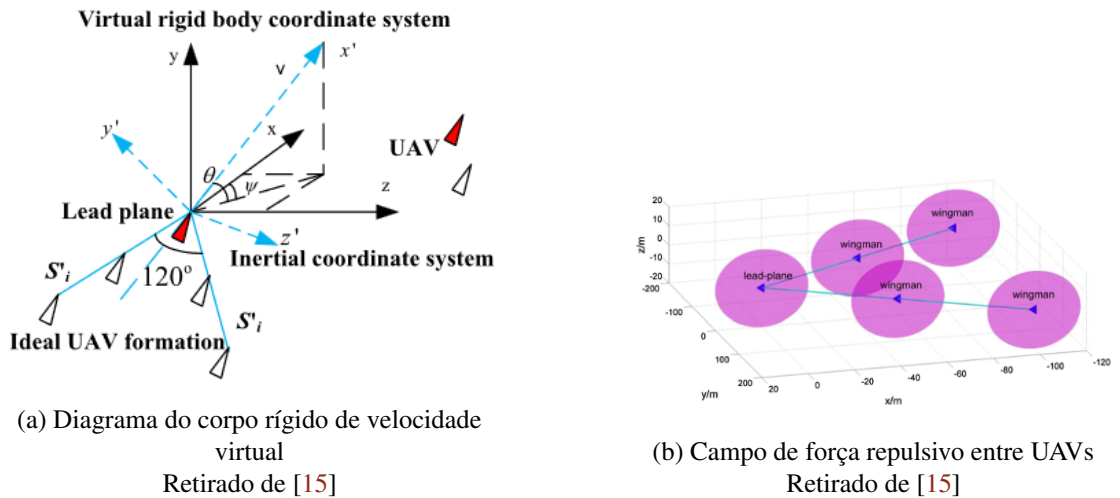


Figura 3.26: Diagrama do corpo rígido de velocidade virtual e campo de força repulsivo entre UAVs

Os resultados deste artigo dividem-se em simulações simples e complexas de planeamento de trajetórias e evasão de obstáculos. O objetivo das simulações simples é avaliar o desempenho de uma equipa de cinco UAVs (um líder e quatro seguidores) num cenário sem obstáculos. No caso das simulações complexas, estas já têm obstáculos como montanhas, zonas de radares e zonas de mau tempo (a evitar). O estado de cada UAV é o mesmo do UAV líder, por isso é necessário assegurar que o UAV líder consegue realizar o percurso que se pretende. Assegurando isso, é então possível adicionar os UAVs seguidores à missão e assegurar que a estrutura da formação é mantida até à chegada ao destino. Na Figura 3.27 podemos ver um exemplo de uma simulação complexa

utilizando a abordagem proposta neste artigo, onde as montanhas, zonas de radares e de mau tempo são contornadas pelos UAVs.

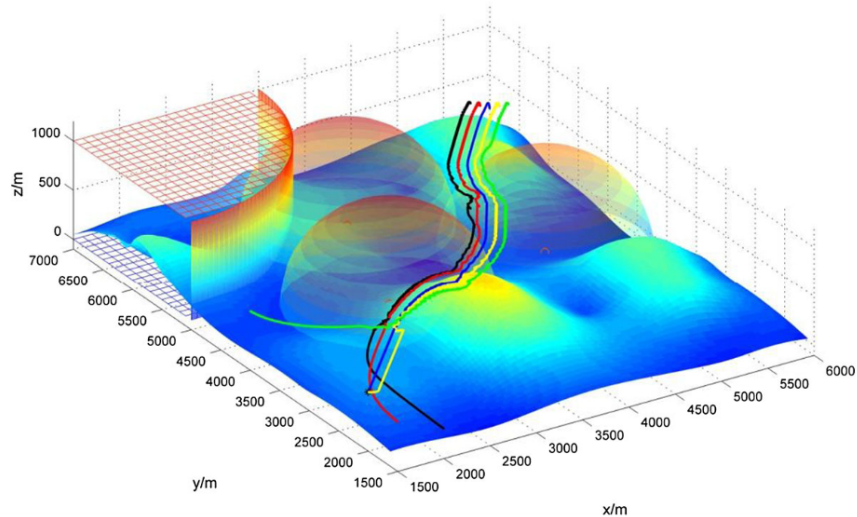


Figura 3.27: Planeamento de uma formação multi-UAV numa simulação complexa
Retirado de [15]

Um artigo de [50] propõe duas estratégias de prevenção de colisões para UAVs em formação. A primeira estratégia é baseada em regras, onde é usada uma matriz de distância para evitar a colisão entre UAVs adjacentes e uma força repulsiva para afastar os UAVs dos obstáculos que estes encontram. A segunda estratégia é baseada num modelo preditivo, uma vez que utiliza modelos de previsão de trajetória para antecipar a possibilidade de colisões e evitá-las. Nesta estratégia, os UAVs partilham informações sobre as suas posições e velocidades, de forma a cooperar entre eles para evitar colisões (entre eles e com obstáculos). Na Figura 3.28 podemos ver como é feita a identificação dos obstáculos e quais os pontos necessários para os cálculos das trajetórias, enquanto que na Figura 3.29 temos a aplicação desse método para duas posições diferentes da formação em relação ao obstáculo encontrado.

Os resultados do artigo dividem-se na validação da estratégia de criação e manutenção da formação de voo, na influência do atraso de tempo durante uma evasão de colisões e num caso particular de um problema de divisão da formação que contém 2 obstáculos.

Um artigo de [60] propõe um algoritmo de prevenção de colisão para UAVs de asa fixa em voo em formação, baseado num algoritmo de controlo de consenso. Este algoritmo permite que os UAVs ajustem as suas posições de forma a não colidirem entre si. Além disso, o algoritmo de controlo de consenso usa informações de distância e velocidade relativas para evitar colisões em tempo real. O algoritmo é testado em simulações e os resultados mostram que pode evitar eficazmente colisões em formações de UAVs com asa fixa, mantendo a formação estável e robusta mesmo em situações de falha de comunicação. Na Figuras 3.30a e 3.30b temos, respetivamente,

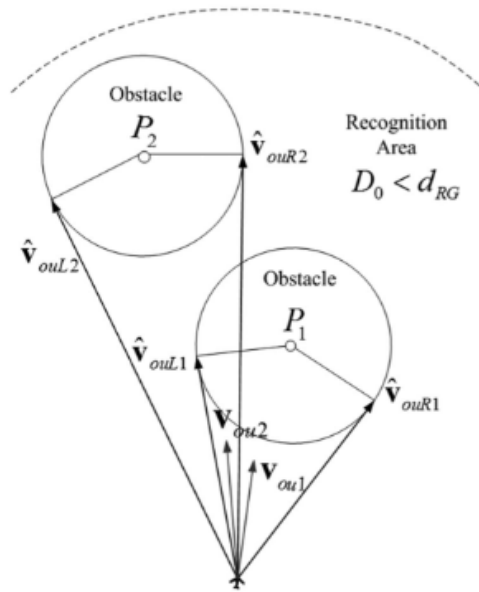


Figura 3.28: Evasão de colisões com múltiplos obstáculos
Retirado de [50]

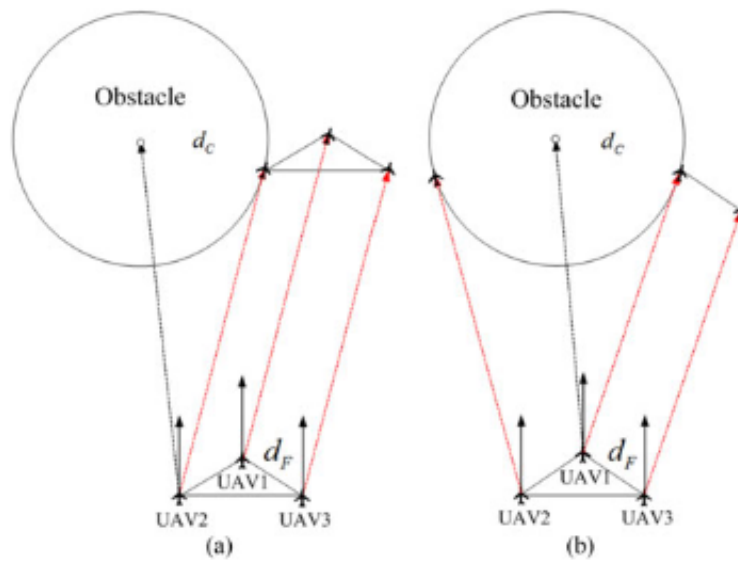
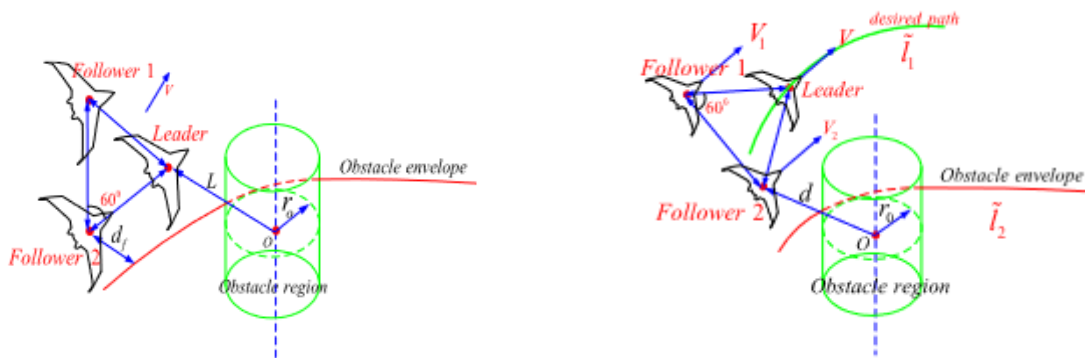


Figura 3.29: Evasão de colisões de 3 UAVs numa formação triangular
Retirado de [50]

representações de evasão de colisões de um obstáculo estático e móvel por parte de uma formação de líder e seguidor que utilizam a abordagem proposta.

O algoritmo de prevenção de colisões passou também por simulações de teste e posterior análise das mesmas. A formação escolhida para as simulações foi uma formação triangular (e UAVs), sendo um deles o líder e os restantes os seguidores. O artigo apresenta figuras para a distância relativa de um sistema de UAVs em formação e um obstáculo, sobre os diagramas de trajetórias de



(a) Diagrama de evasão de um obstáculo estático por uma formação de UAVs Retirado de [60]

(b) Diagrama de evasão de um obstáculo móvel por uma formação de UAVs Retirado de [60]

Figura 3.30: Diagrama de evasão de obstáculos estáticos e móveis

evasão de colisões de UAVs controlados por diferentes algoritmos e um diagrama de uma estratégia de controlo de uma formação líder-seguidor num espaço tridimensional.

Um artigo de [59] propõe uma nova estratégia de controlo para formação de UAVs, com base no método de retrocesso. O objetivo é alcançar um controlo preciso da posição e da formação entre os UAVs, garantindo uma distância segura entre eles e evitando colisões. O método de retrocesso é utilizado para o controlo individual de cada UAV e é desenvolvido um controlador de formação para manter a formação desejada. A abordagem proposta é comparada com outras técnicas de controlo em simulações, demonstrando bons resultados em termos de desempenho e estabilidade. A Figura 3.31 representa diferentes fases num voo em formação, desde a fase inicial onde não estão ainda em formação, passando pela fase de construção da mesma e terminando na fase de manutenção desta.

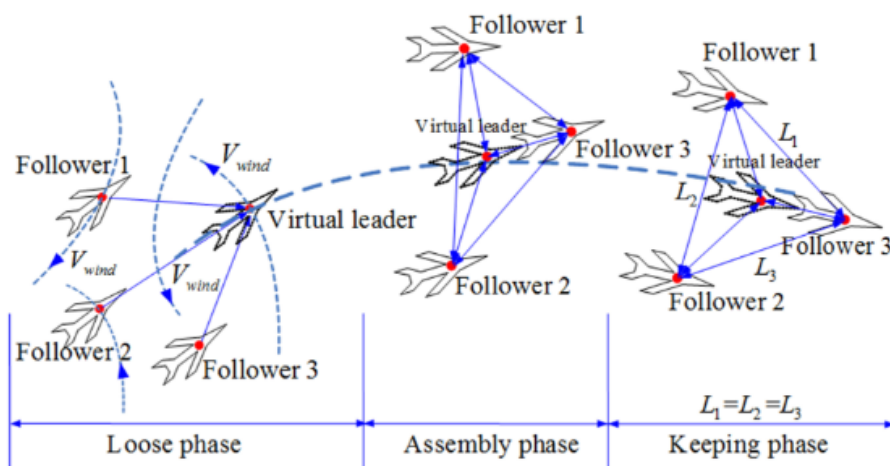


Figura 3.31: Fluxograma de diferentes fases num voo em formação Retirado de [59]

O artigo está muito completo, descrevendo todos os passos matemáticos percorridos para entender como este método funciona. Com os resultados das simulações, foi feita uma análise de características cinemáticas (curvas de velocidades de UAVs e de raios de viragem da formação de UAVs), uma análise de convergência (curvas de seguimento de uma formação e curvas de erro) e uma análise de robustez (curvas de ângulos durante um voo em formação para diferentes métodos usados).

Na Tabela 3.3 enumera-se cada artigo descrito nesta secção com uma descrição breve dos pontos-chave de cada um, de forma a ter uma noção mais direta das diferenças entre eles.

Tabela 3.3: Comparação de métodos de voo em formação

Artigo	Pontos-chave
[57]	Modo seguro (livre de obstáculos) e modo perigoso (presença e evasão de obstáculos); GNN modificado para evasão de obstáculos e colisões entre UAVs; configuração, separação e reagrupamento da formação; usável em ambientes cheios de obstáculos e deve ser possível implementar em pequenos UAVs em aplicações de tempo real.
[14]	Método de ponto de referência virtual; controlo preditivo de modelos não lineares; evasão de obstáculos concretizada por uma função de custo baseada na orientação da velocidade do UAV e na distância relativa entre o UAV e o obstáculo; evasão de colisões entre UAVs usando a mesma função de custo mas com uma estratégia de prioridade; problema de otimização não linear resolvido pelo método do filtro-SQP.
[9]	Método de controlo de voo em formação baseado no comportamento para resolver o problema de requisitos de qualidade de comunicação do controlo de voo em formação tradicional baseado na estrutura virtual, diminuindo o número de requisitos e facilitando a evasão de obstáculos dos agentes; estrutura virtual como referência para melhorar a rigidez do controlo com base no comportamento.
[31]	Estratégias de evasão de obstáculos (para o líder e para os seguidores separadamente) e de reagrupamento da formação; 4 cenários de evasão de obstáculos e reagrupamento da formação são investigados.
[15]	Planeamento de trajetória para UAVs baseado na estrutura virtual; técnica de caminho global para definição da trajetória de cada agente e técnica de caminho local para otimizar a mesma em tempo real a fim de evitar colisões (campo de forças repulsivas entre UAVs).
[50]	Duas estratégias de prevenção de colisões para UAVs em formação: uma baseada em regras (matriz de distância para evasão de colisões entre UAVs e força repulsiva para evasão de obstáculos) e uma baseada num modelo preditivo (modelos de previsão de trajetórias para antecipar possíveis colisões).

Tabela 3.3: Comparação de métodos de voo em formação (Continuação)

Artigo	Pontos-chave
[60]	Prevenção de colisões em tempo real baseado num algoritmo de controlo de consenso que utiliza informações de distância e velocidade relativas para uma formação líder-seguidores; evasão de obstáculos estáticos e móveis.
[59]	Estratégia de controlo de formação de UAVs baseado no método de retrocesso; controlo da posição dos UAVs, mantendo uma distância segura entre eles; método de retrocesso para controlo de cada UAV; fase de pré-formação, fase de construção e fase de manutenção.

Capítulo 4

Problema e Proposta de Solução

Neste capítulo vai ser feita uma descrição do trabalho prévio feito até então na Plataforma a utilizar, evidenciando a diferenciação da solução proposta em relação ao que já existe. De seguida, faz-se uma descrição mais detalhada do problema e da respetiva solução a implementar; dá-se uma visão geral de como se pretende atingir os objetivos propostos e as atividades e desenvolvimentos necessários para isso, assim como uma análise de risco pormenorizada sobre alguns tópicos que é preciso ter em conta num trabalho desta dimensão, para evitar comprometer o sucesso deste trabalho durante a sua realização.

4.1 Trabalho Prévio

Para além destas acima mencionadas, existe também uma plataforma inicialmente desenhada com o objetivo de possibilitar a simulação de missões realizadas por um conjunto de veículos autónomos heterogéneos [52].

Esta plataforma, intitulada de “A Plataforma” (ou "*The Platform*"), tem tido desenvolvimentos nos últimos anos, desde a adaptação de novos veículos ao simulador usado e respetiva análise de desempenho [45] até à possibilidade de avaliação da performance de uma missão com o objetivo de descobrir a melhor abordagem para diferentes missões que pudessem ser simuladas através da plataforma [12], onde foram também criadas métricas para avaliação e comparação de missões. Outros trabalhos relacionados envolvem deteção de incêndios em meio florestal [11] e distúrbios ambientais [18].

4.1.1 Arquitetura da Plataforma

O simulador da plataforma descrita segue uma arquitetura geral como demonstrada na Figura 4.1, onde se destacam algumas componentes com mais ênfase para este trabalho:

- *Control Panel*: interface onde é possível parametrizar todas as configurações a usar numa simulação de missão;

- *Simulator (FSX)*: componente responsável pela simulação de agentes num ambiente realístico. Neste caso, a simulação é feita pelo Flight Simulator X e a conexão com a restante plataforma é feita através da sua API;
- *Performance Analysis*: componente que processa a informação dos ficheiros de registo (*Log files*) e permite que o utilizador consiga facilmente compreendê-la;
- *Vehicle Agent*: componente responsável pela inteligência de cada aeronave, onde cada uma destas recebe informação do simulador e retorna ações resultantes dessa informação.

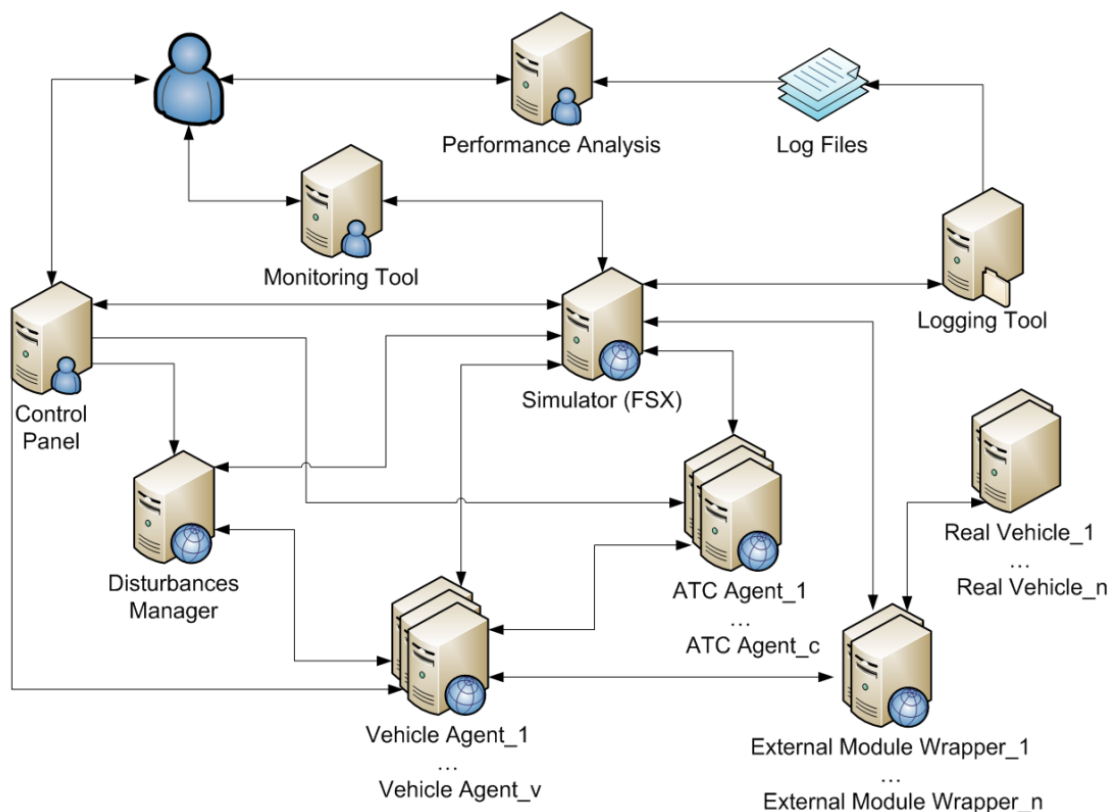


Figura 4.1: Arquitetura da Plataforma proposta por [52]

4.1.2 Linguagem de Descrição de Missão

Toda a configuração desta plataforma é obtida através de quatro ficheiros de configuração, que descrevem a configuração do ambiente, das equipas, dos distúrbios e das missões.

Sendo este trabalho inteiramente relacionado com especificação e avaliação de missões, apenas é descrita nesta secção a linguagem de descrição de missões (MDL), referindo a estrutura das mesmas e alguns termos utilizados para a sua parametrização.

Uma missão é caracterizada por um conjunto de tarefas que uma determinada equipa se compromete a realizar. Cada missão é composta por uma denominação, descrição e conjunto de fases e é atribuída a uma equipa (Figura 4.2a).

Por sua vez, cada fase é constituída por uma denominação, descrição, áreas (onde a fase irá atuar), requisitos (restrições rígidas, que têm de ser cumpridas para que a missão seja bem-sucedida), dicas (restrições menos rígidas, que devem ser cumpridas, mas não é necessário que o sejam) e conjunto de alvos, onde a cada um se associa um objetivo específico. Para identificação de uma fase, temos um identificador da missão associada (para saber em que missão aquela fase se inclui) e o tipo de fase (base - de alta prioridade -, condicional, ou extra) (Figura 4.2b).

Estas fases podem ter ligações entre elas, a fim de configurar missões mais complexas como as descritas na secção de Contextualização deste trabalho, desde questões de divisão de área, padrões de pesquisa, formações de voo, multiplicidade de alvos, ordenação de objetivos, entre outras.

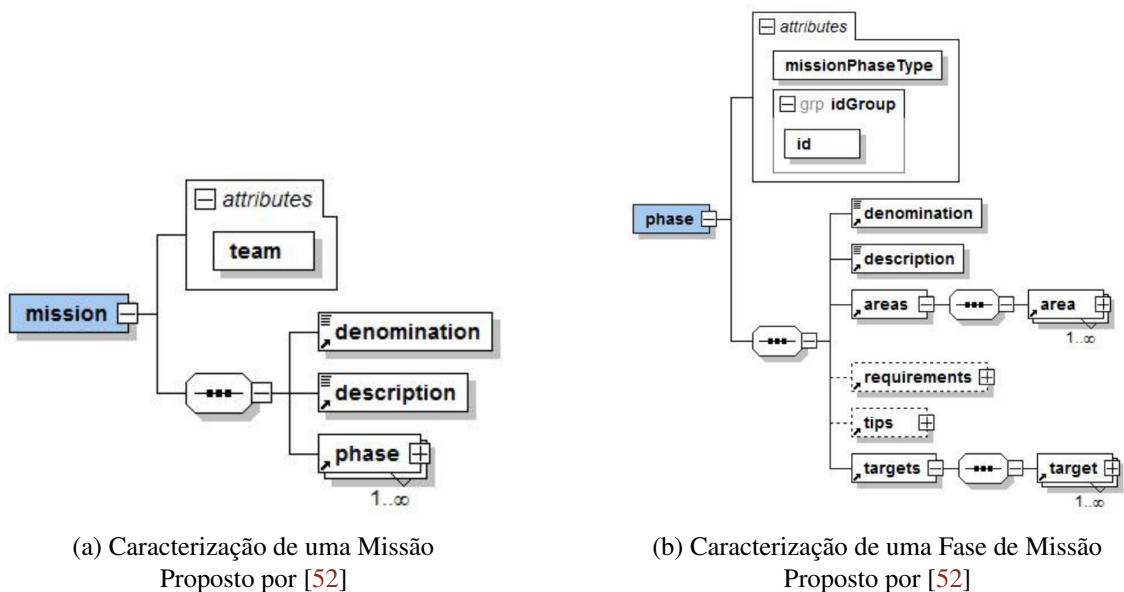


Figura 4.2: Caraterização de uma Missão e de uma Fase de Missão

Uma arquitetura de caracterização de missões foi proposta do ponto de vista funcional (Figura 4.3 (a)) e do ponto de vista hierárquico (Figura 4.3 (b)) [43]. Esta arquitetura permite abordar estas missões em problemas ao nível de missões (do ponto de vista de um sistema complexo - funcional), gerindo recursos para atingir objetivos, e em problemas ao nível de tarefas (ponto de vista hierárquico), onde cada tarefa é vista como uma sequência de ações de um veículo. Esta é uma possível alternativa à arquitetura da plataforma, onde podemos tirar ideias para reformular a MDL e torná-la mais completa.

4.1.3 Diferenciação do Trabalho

Esta plataforma permite já uma simulação detalhada de agentes de forma individual e posterior análise dos dados obtidos através da mesma.

O que diferencia o trabalho desenvolvido nesta dissertação da Plataforma é a adaptação desta de forma a ser possível realizar simulações por vários agentes de forma cooperativa e não focadas num único tipo de missão. Esta distinção implica a adaptação das métricas já existentes e utilizadas

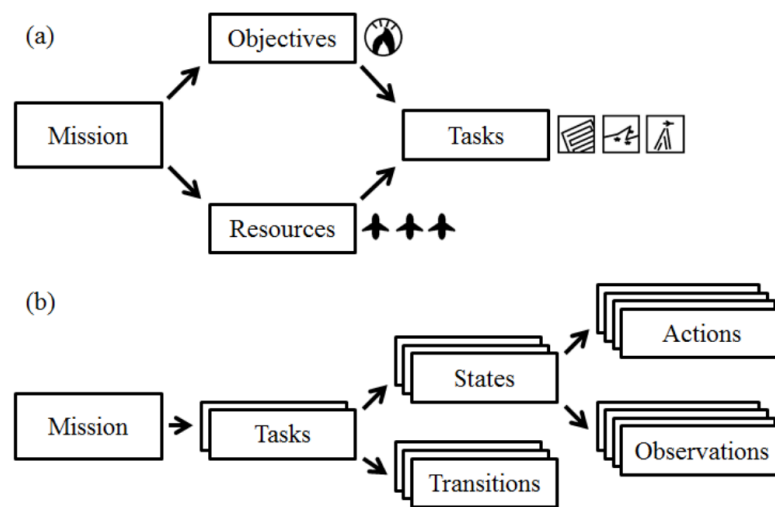


Figura 4.3: Arquitetura de missões multi-UAV do ponto de vista funcional (a) e hierárquico (b)
Retirado de [43]

para os veículos individualmente, para que seja possível avaliar diferentes missões (isto é, com diferentes parametrizações - padrões de pesquisa, número de veículos utilizados, etc.) de forma a ser a mais económica, segura e eficiente possível.

Para além das métricas, também os padrões de pesquisa sofrem alterações, uma vez que dependendo do número de agentes, todos os trajetos de voos planeados podem sofrer mudanças, nomeadamente por questões de segurança das aeronaves, mas também porque a possibilidade de usar múltiplos agentes permite uma parametrização mais complexa e eficaz.

Todas estas diferenciações que caracterizam este trabalho podem contribuir para um melhoramento ou adição de pormenores importantes à MDL, dando ênfase à possibilidade de transpor a associação de tipos de missões aos respetivos padrões de pesquisa e métricas de avaliação associadas (que mais valor e peso têm nessas missões), de forma a ter uma parametrização específica para cada tipo de missão, e até para uma descrição mais intuitiva da missão em si.

4.2 Proposta da Solução

A solução proposta para este trabalho passa por adaptar a plataforma desenvolvida pelo LIACC de forma a permitir a configuração, análise e avaliação de missões realizadas por múltiplos agentes (ou veículos). Sendo possível realizar missões na vida real constituídas por diferentes veículos, também deveria ser possível realizar simulações das mesmas utilizando igualmente múltiplos veículos, de forma a analisar a eficiência destas e comparar o uso de um número variado de agentes (e de outras configurações, consequentemente).

Relembrando a Figura 4.1 da arquitetura da Plataforma, este projeto focar-se-á exatamente nas componentes que foram descritas com mais pormenor: no painel de controlo, no simulador (FSX), na componente de análise de desempenho e na componente de inteligência de cada veículo.

Por este trabalho estar integrado numa plataforma já existente, a tecnologia a ser usada não foi uma opção de escolha, sendo C# a linguagem de programação que predomina e na qual irá incidir a maioria do código desenvolvido.

As questões-objetivo propostas no Capítulo 1 pretendem ser respondidas depois da adaptação da Plataforma a missões multi-veículo, onde poderão ser comparadas missões com diferente número de veículos e diferentes padrões de pesquisa. Para isto, pretende-se implementar o padrão de Zamboni na Plataforma para um único veículo, assim como adaptar todos os padrões e métricas para uma missão com múltiplos agentes. Depois da implementação, pretende-se fazer uma análise de desempenho dos diferentes padrões e avaliá-los consoante as parametrizações das missões efetuadas.

4.3 Análise de Risco

Num trabalho desta dimensão, há alguns riscos associados que devemos ter em conta desde o início, tal como a correspondente probabilidade de acontecerem, as respetivas consequências e possíveis soluções para mitigar esses riscos.

Sendo este um trabalho já com vários avanços ao longo dos anos e em que já um conjunto vasto de pessoas fez contribuições para o mesmo, é preciso estar preparado para lidar com código legado, antigo, reutilizado, readaptado e possivelmente desorganizado. Isto deve-se precisamente à necessidade, ao longo do tempo, de fazer evoluir A Plataforma, de reestruturar algumas secções de código e adaptar ao que se pretendia naquele momento. Assim sendo, estar consciente deste risco é crucial e uma possível solução para amenizar o mesmo é fazer uma revisão de código ao longo do estudo do código já implementado, se assim o for permitido e aprovado (sem promover alterações das funcionalidades da plataforma, nesta altura).

O facto das escolhas tecnológicas neste projeto serem, na verdade, imposições, corre-se sempre o risco de não estar devidamente familiarizado com esta. A probabilidade de correr este risco é média/baixa, uma vez que já tenho algumas bases na linguagem de programação utilizada na plataforma e, mesmo que isso não acontecesse, é uma linguagem que não difere muito, em termos de funcionalidades e estruturação de código, da maioria das linguagens utilizadas e que nos foram ensinadas ao longo de todo o curso. Uma possível solução passaria por reservar atempadamente tempo para aprender e/ou rever a tecnologia, a fim de estar preparado para a sua leitura e escrita.

Não tendo ainda trabalhado com a plataforma e não conhecer o funcionamento da mesma pode levar a uma previsão errada do tempo disponibilizado para cada incremento, pelo que é necessário ter isso em conta desde o planeamento inicial, de forma a não atrasar todo o resto do processo.

O risco mais preocupante e menos previsível é o possível surgimento de um trabalho realizado por outra pessoa, que realiza exatamente o que é proposto neste trabalho. Caso isso aconteça, o plano de trabalho e todos os objetivos deste trabalho teriam de ser reformulados.

Pode-se considerar um risco o facto de todas as experiências aqui realizadas não acrescentem valor ao que já é conhecido, isto é, que acaba por se encontrar simulações que não devem ser

adaptadas em contexto de vida real, ao invés de encontrar simulações que podiam e deviam ser tidas em conta nesse contexto.

Por último, a realização de testes pode ser uma tarefa demorada devido a algumas restrições do simulador usado (FSX): este permite a simulação de missões a velocidade normal, mas também em duas, quatro oito e dezasseis vezes a velocidade normal, sendo claramente um ponto positivo numa plataforma de simulação. Contudo, os testes só podem ser realizados em velocidades de duas e quatro vezes a velocidade normal no máximo, uma vez que mais que isso a simulação começa a perder pontos de referência intermédios. Pode acontecer um agente registar que passa por um determinado ponto quando na verdade não passou, mas o verdadeiro problema está quando considera que não passou por um ponto quando na realidade passou, fazendo com que o agente adapte o voo a fim de tentar voltar a passar por um ponto que, erradamente, acha que não passou por ele. Uma forma de mitigar este risco é ter desde já um bom planeamento de experiências e, se possível, organizar tudo de forma a não deixar todos estes testes para implementar num curto espaço de tempo, uma vez que esse tempo pode ser mais extenso do que o que se imagina.

Capítulo 5

Trabalho Desenvolvido

Neste Capítulo vai ser demonstrado toda a implementação efetuada neste trabalho, que se pode dividir numa parte de âmbito mais teórico e noutra mais prática.

Na primeira parte, através da informação da Contextualização e dos objetivos deste trabalho, foram agrupados tipos de missões em grupos de missões, métricas de avaliação em perfis de métricas e foi feita ainda uma associação entre grupos de missões, padrões de pesquisa e perfis de métricas, a fim de individualizar cada um desses grupos, de forma a excluir padrões e métricas que não se associam a um determinado grupo de missões.

Na segunda parte, é descrito o padrão de pesquisa de Zamboni que foi implementado, a forma como foi concretizada a divisão de área para missões de múltiplos veículos e os resultados obtidos através das simulações efetuadas e a correspondente comparação e análise de desempenho, tendo em conta o formato da área escolhida e o número de veículos e padrão de pesquisa utilizados.

5.1 Grupos de Missões

Recordando os tipos de missão apresentados no Capítulo 2, foram identificadas missões de transporte, de lançamento, de procura ou deteção, de medição, de deteção de origem e de seguimento. Neste subcapítulo, procura-se uma forma de categorizar todas estas missões em grupos, para mais facilmente adaptar possíveis soluções a missões que partilham características entre si.

São várias as variáveis que podem ser utilizadas para agrupar tipos de missões de forma lógica: pelo seu objetivo, nível de risco, nível de complexidade, duração e localização alvo. Todo este trabalho de tentativas de agrupamento foi feito de raiz, com o objetivo de procurar a forma mais intuitiva e lógica de agrupamento de missões.

5.1.1 Objetivo

Podemos agrupar missões baseadas no seu objetivo: foram criadas três categorias de divisão tendo em conta este fator, tentando agrupar tipos de missões com objetivos similares e que permitem posteriormente usar um mesmo conjunto de métricas para a sua análise e comparação.

- Missões de entrega e/ou movimento de mercadorias/pessoas: missões que envolvem o transporte de pessoas, mercadorias e/ou outros objetos, sem a necessidade do uso de padrões de pesquisa complexos definidos. Assim sendo, nesta categoria incluem-se missões de transporte, de lançamento e de seguimento, uma vez que são tipos de missões que denotam ser de análise mais simples, uma vez que o padrão de pesquisa a utilizar não se prevê que seja complexo. No caso das missões de seguimento, o padrão de pesquisa poderá ser ajustado ao longo da missão, mas mesmo assim não se prevê que se utilize um padrão complexo único que se adapte ao movimento (aleatório) do elemento a seguir;
- Missões de identificação ou localização: missões com o objetivo de identificar e/ou localizar algo, com ou sem auxílio de fatores externos (por exemplo, de medições realizadas previamente para a zona pretendida). Aqui incluem-se missões de procura ou deteção, sem auxílio de fatores externos, e missões de deteção de origem, com auxílio de mapas evolutivos, por exemplo;
- Missões de recolha de informação: missões sem um alvo definido e cujo objetivo não passa por procurar um determinado ponto, mas sim realizar um estudo de uma zona a fim de conhecer melhor a mesma sobre uma determinada variável. Por este motivo, apenas se incluem nesta categoria missões de medição.

5.1.2 Nível de Risco

Podemos agrupar missões baseadas no nível de risco associado a cada uma delas. Podemos ter missões de baixo, médio e alto risco, e neste caso em concreto não há uma separação clara que permita separar tipos de missões nestas categorias, uma vez que estas dependem também de outros fatores, como o cruzamento entre agentes no espaço aéreo, a execução de uma missão (por completo) e questões relacionadas com a segurança dos envolvidos. Podemos, ainda assim, ter uma ideia dos fatores que mais influenciam cada tipo de missões.

Missões de transporte têm o seu nível de risco altamente relacionado com questões de segurança, uma vez que estas envolvem em grande parte uma ação de resgate ou salvamento; missões de lançamento são mais relacionadas com o impacto que o objeto lançado poderá causar quando atinge a superfície (quer seja uma descarga de água ou uma bomba/míssil); missões de procura e de medição têm principal foco na gestão dos agentes envolvidos, de forma a evitar colisões entre si; missões de deteção de origem possui riscos no cruzamento de agentes no espaço aéreo e a proximidade e intensidade de uma substância potencialmente perigosa para as aeronaves; por último, missões de seguimento são semelhantes às missões de transporte, com a diferença de que estas apenas pretendem fiscalizar a atividade de algo/alguém no terreno, pelo que os seus riscos são menores.

5.1.3 Nível de Complexidade

Podemos agrupar missões baseadas no seu nível de complexidade. Este critério é um pouco ambíguo para inequivocamente organizar os tipos de missões, mas é possível ter uma ideia de missões mais simples e mais complexas, porque mesmo dentro deste critério é preciso ter em conta outros fatores para essa decisão.

Podemos considerar missões de transporte e de lançamento como missões simples, uma vez que, tal como abordado no agrupamento sugerido pelo objetivo das missões, estas não necessitarão do uso extensivo de padrões de pesquisa complexos para obter os resultados mais prometedores, uma vez que a localização alvo já é conhecida à partida.

Por outro lado, podemos considerar missões de procura, de deteção de origem e de medição como missões complexas, dado que, comparativamente com as missões simples já identificadas, estas sugerem o uso de padrões de pesquisa complexos a fim de obter melhores resultados ao nível da avaliação do desempenho da equipa atribuída a esta missão.

Podemos ainda separar as missões de seguimento e de deteção de origem em missões compostas. No caso das missões de seguimento, dada a aleatoriedade de movimento do alvo a patrulhar, o movimento de monitorização terá de ser adaptado constantemente ao longo do tempo. No caso das missões de deteção de origem, os dados obtidos através do gradiente de uma substância e/ou variável poderão também sugerir uma adaptação do padrão de pesquisa. Por exemplo, o gradiente poderá dar informação preciosa de forma a podermos inequivocamente saber que o alvo não se encontra numa determinada zona, podendo assim diminuir a zona de pesquisa e reformulando o padrão a utilizar.

Apesar das missões complexas poderem ser vistas como missões compostas por diferentes fases dentro de um mesmo objetivo, nesta secção apenas se consideram missões compostas como missões que implicam a adaptação do padrão de pesquisa ao longo da mesma.

5.1.4 Duração

Podemos agrupar missões baseadas na sua duração. Não é aconselhável a separação em missões curtas, intermédias e longas, uma vez que isso implica um conjunto de fatores que podem tornar um qualquer tipo de missão numa missão curta ou longa, dependendo dos seus valores (como, por exemplo, a distância desde a zona de descolagem até à área que se pretende analisar, o tempo despendido até encontrar uma localização alvo, a velocidade média, entre outras). Uma forma de agrupamento relacionada com o tempo mais precisa é a separação em:

- Missões com tempo conhecido/previsto à partida: missões cujo tempo gasto se consegue prever com maior rigor, dada a simplicidade prevista dos padrões de pesquisa a utilizar. Desta forma, podemos incluir aqui as missões de transporte, de lançamento e de medição (uma vez que sabendo a área e o padrão a utilizar consegue-se ter uma noção temporal da missão);
- Missões com tempo desconhecido: missões cujo tempo de missão é incerto. Nesta categoria incluem-se as missões de procura, de deteção de origem e de seguimento. No caso das

missões de procura e de deteção de origem, é imprevisível saber quanto tempo um determinado padrão demorará a encontrar a localização alvo que pretende, uma vez que depende nomeadamente do padrão de pesquisa utilizado, da área onde este é aplicado e do número de alvos previstos. No caso das missões de seguimento, a imprevisibilidade de duração deve-se à imprevisibilidade de movimentos do que se está a monitorizar no terreno.

5.1.5 Localização Alvo

Podemos agrupar missões baseadas na localização alvo:

- Missões com localização alvo conhecida: missões em que a localização alvo já é conhecida, pelo que os agentes não têm de realizar padrões complexos de pesquisa a fim de o encontrar. São missões com uma tarefa específica para uma certa localização. Neste grupo de missões incluem-se as missões de transporte e missões de lançamento;
- Missões com localização alvo desconhecida: missões em que é necessário procurar o(s) alvo(s) que se pretende(m), com diferentes objetivos e apoios externos. Incluem-se neste grupo as missões de procura ou deteção;
- Missões com localização alvo móvel e/ou auxiliares de pesquisa: pode ser considerado um subgrupo das missões sem localização alvo conhecida, uma vez que estas também pretendem localizar um alvo, sendo que este pode estar em constante movimento e/ou existem auxiliares na pesquisa/monitorização do que é pretendido, pelo que é necessário adaptar os padrões de pesquisa conhecidos a fim de realizarem o que é pretendido. Neste grupo incluem-se as missões de deteção de origem e missões de seguimento.
- Missões sem localização alvo: missões em que não há um alvo específico, e onde se pressupõe apenas a análise de uma determinada área. Inequivocamente, incluem-se neste grupo as missões de medição, pois não há um alvo específico que se pretende encontrar. Apenas se pretende avaliar uma área em particular, realizando medições de forma a ser possível obter informações que permitem conhecer com maior detalhe aquela área.

5.1.6 Hipótese Escolhida

Todos estes agrupamentos são hipóteses possíveis. Contudo, para este trabalho, foi decidido que o agrupamento de tipos de missões iria ser baseado no objetivo destas, uma vez que é um dos agrupamentos onde é mais simples a associação aos grupos de cada tipo de missão, e porque vai ser possível associar de forma mais intuitiva os padrões de pesquisa e as métricas mais pertinentes para cada um dos grupos. Alguns grupos foram descartados (como os grupos baseados no nível de risco e de complexidade), uma vez que eram considerados ambíguos no sentido em que dependiam fortemente de fatores adicionais que podiam colocar um tipo de missão numa outra categoria. Ter em conta mais uma ou menos uma variável era o suficiente para em alguns casos classificar um tipo de missão no extremo oposto de um grupo de missões.

A hipótese escolhida é também a hipótese listada mais próxima do propósito deste trabalho: sendo que posteriormente irá ser efetuada uma análise de padrões de pesquisa com métricas distintas dependendo das missões, é mais conveniente juntar desde já tipos de missão que vão partilhar padrões de pesquisa e métricas a utilizar.

5.2 Perfis de Métricas

Tal como acima agrupamos tipos de missões por terem determinadas características em comum, o mesmo pode ser feito nas métricas, uma vez que os grupos de missões partilham não só essas características, mas também a forma como são avaliadas.

Assim sendo, são várias as hipóteses de agrupamento de métricas apresentadas de seguida, sendo que a sua origem provém da facilidade com que um perfil de métricas se interioriza como sendo útil para avaliação de um certo grupo de missões.

Desta forma, as vinte métricas enunciadas no capítulo da Contextualização podem ser agrupadas nas seguintes quatro categorias:

- **Métricas absolutas ou de desempenho:** métricas que representam algo absoluto e que fornecem uma visão do desempenho global e das capacidades dos agentes em missão. Algumas métricas deste agrupamento são o tempo gasto, a área coberta e sobreposta, a distância percorrida, o combustível gasto, entre outras.
- **Métricas relativas ou de eficiência:** métricas que representam uma medida relativa de eficiência e que pretendem comparar o quão bem preparados estão os veículos a fim de completar missões em termos de recursos e de tempo. Assim, permitem também compreender a eficácia e eficiência de um agente ou missão, usando os recursos disponíveis. Este agrupamento inclui métricas como eficiência de distância e de tempo, área coberta e sobreposta em relação à área total, combustível gasto por unidade de tempo e de área, entre outras.
- **Métricas de monitorização ou de precisão:** métricas que fornecem uma visão sobre quão precisos os veículos em missão atuaram, em comparação com o que era planeado. São usadas para avaliar a cobertura e sobreposição de uma dada área, assim como a quantidade e qualidade de informação recolhida durante uma missão. A este perfil associam-se métricas como desvio de rota esperada, desvio de localização de queda de um objeto, desvio de distância entre veículos, entre outras métricas (relativas, nomeadamente).
- **Métricas de segurança:** métricas relacionadas com a segurança de agentes em missão, de elementos a serem resgatados, do terreno coberto e da qualidade do ar. Permitem obter informação sobre alguns parâmetros que permitem avaliar o risco corrido durante uma missão. Duas das métricas mais importantes neste perfil são a distância mínima entre veículos e a distância mínima para o terreno.

Contudo, ao contrário do que foi feito na secção dos grupos de missões, todos estes perfis de métricas podem ser associados simultaneamente, sem a necessidade de escolher o uso apenas de métricas de desempenho e de eficiência, por exemplo.

5.3 Associação de missões, padrões e métricas

Juntando tudo isto, para um sistema constituído por múltiplos agentes, é necessário agrupar algumas configurações e descartar outras, uma vez que alguns padrões de pesquisa e algumas métricas podem não ter qualquer valor para um determinado tipo de missão. Existem tipos de missões muito semelhantes, que apenas diferem no peso que se dá a uma métrica ou conjunto de métricas.

5.3.1 Missões de entrega e/ou movimento de mercadorias/pessoas

Tal como especificado acima, neste grupo de missões incluem-se missões de transporte, de lançamento e de seguimento. Podemos também incluir nesta categoria missões de resgate (ou salvamento), uma vez que também são missões onde o principal objetivo é resgatar e, conseqüentemente, transportar elementos de um local para outro. Podemos ainda dizer que missões de resgate são um caso específico de missões de transporte.

Dependendo do tipo de missão específico e dos parâmetros que as individualizam, podemos ter manobras e padrões como “ir para o ponto”, “muitos pontos”, padrões de espera e pesquisa adaptativa. Padrões de espera poderão ser usados no caso das missões de resgate, uma vez que o agente terá que permanecer na mesma posição durante a fase principal da missão e são associadas ao uso de helicópteros, por ser um dos veículos aéreos mais versáteis e que permitem resgatar com maior controlo e segurança um conjunto de pessoas, animais ou objetos. Como neste grupo de missões se prevê que a localização alvo é já conhecida, não é previsto que sejam utilizados padrões de pesquisa de forma complexa e “cega” (sem qualquer previsão desta localização).

As métricas mais adequadas a este grupo de missões são as métricas de desempenho, de eficiência e de monitorização. Para além destas, devemos ter em conta métricas de segurança, uma vez que é também necessário assegurar que, tanto nas missões de transporte como nas missões de lançamento, não colocamos em risco agentes em missão ou outros elementos que interagem com os mesmos. No caso das missões de lançamento, uma métrica a ter em conta é o desvio da localização de queda de objetos.

5.3.2 Missões de identificação ou localização

Aqui incluem-se missões de procura ou deteção e deteção de origem, onde o principal objetivo é identificar e localizar uma determinada área.

Neste grupo de missões, é necessário testar vários padrões de pesquisa existentes, porque diferentes padrões podem adaptar-se melhor a diferentes zonas e tipologias de terreno. Contudo, prevê-se que padrões de pesquisa sólidos como varrimento paralelo, movimento em espiral ou

seguindo a forma da área pretendida, busca por setor e algoritmos de pesquisa cruzada-diamante-hexagonal podem ser úteis no caso de missões de procura ou detecção, enquanto localização Monte Carlo e pesquisa adaptativa são padrões mais em conta com missões de detecção de origem, onde apesar da procura de um determinado ponto, a equipa em missão conta com o auxílio de gradiente.

A estas missões associam-se métricas de precisão, de desempenho e de eficiência, com o intuito de avaliar o padrão de pesquisa utilizado e de compará-los.

5.3.3 Missões de recolha de informação

Este grupo de missões apenas inclui missões de medição, cujo objetivo é recolher dados para análise de uma determinada área. Destacam-se medições de poluição e temperatura, e considera-se essencial para construir os mapas não só medições longitudinais, mas também altitudinais.

Nestas missões, é também necessário realizar testes com diferentes padrões de pesquisa. Contudo, o objetivo dessas missões não implica a procura de um determinado objeto ou ponto, mas sim realizar uma análise (o mais rigorosa possível) de uma determinada zona, a fim de construir mapas evolutivos sobre medições realizadas pelos agentes em missão. Assim sendo, qualquer padrão de pesquisa considera-se adequado para estas missões, dependendo do tempo entre as medições de cada agente.

A este grupo de missões associam-se de alguma forma todos os perfis de métricas - métricas de desempenho, de eficiência, de segurança e de monitorização - pelo que se pretende avaliar a eficácia das medições e os modelos construídos a partir delas.

Em todas as associações de missões se adequa o uso de métricas de eficiência e de desempenho, uma vez que o objetivo deste trabalho passa por comparar diferentes missões e avaliar o seu desempenho dependendo dos parâmetros usados.

5.4 Padrão de Zamboni

Antes do desenvolvimento deste trabalho, A Plataforma possuía a implementação de três padrões de pesquisa para agentes, sendo eles os padrões em espiral, de seguimento da forma pretendida e o padrão de varrimento (*Lawnmower*). Tendo feito uma revisão da literatura sobre estes padrões, concluiu-se que o padrão de Zamboni era uma implementação viável para este projeto e que podia trazer resultados interessantes e melhores do que os padrões existentes.

Sendo este um padrão que também possui linhas de varrimento, a sua implementação é apenas uma ligeira adaptação do já existente padrão de varrimento. O padrão já implementado começa por calcular os pontos de referência das linhas de varrimento, seguido do cálculo de pontos de referência adicionais que ligam estas linhas, e a junção de todos estes pontos numa lista de pontos sequenciais. O padrão de Zamboni necessita apenas de um passo adicional antes do cálculo dos pontos de referência adicionais, que reordena as linhas de varrimento como se pode ver na Figura 2.6. No Algoritmo 1 é apresentado um pseudocódigo deste padrão, que consiste no código do padrão de varrimento com o passo adicional referido de reordenação das linhas. A forma como

essa reordenação é feita depende da paridade das linhas de varrimento: se o número de linhas de varrimento for ímpar, a última linha a ser percorrida é a central e o lado de saída da área percorrida é o lado contrário de onde começou a pesquisa; por sua vez, se for par, a última linha a ser percorrida não sofre alterações em relação ao padrão de *Lawnmower* (é a última linha), e o lado de saída é o mesmo por onde entra na área pretendida. Desta forma, no caso do número de linhas de varrimento for ímpar, é feito um ciclo desde a primeira linha até à linha que antecede a central, e são ordenadas todas as linhas pretendidas à exceção da central, que é adicionada no fim deste ciclo. No caso deste número ser par, não é necessário ter em conta este pequeno detalhe da linha de varrimento central, pelo que a ordenação é gerada por um ciclo simples sem a necessidade de adicionar posteriormente qualquer linha. Esta lógica está representada no Algoritmo 1 nas funções *OrdenarLinhasImpar* e *OrdenarLinhasPar*.

Algoritmo 1 Pseudocódigo do padrão de Zamboni

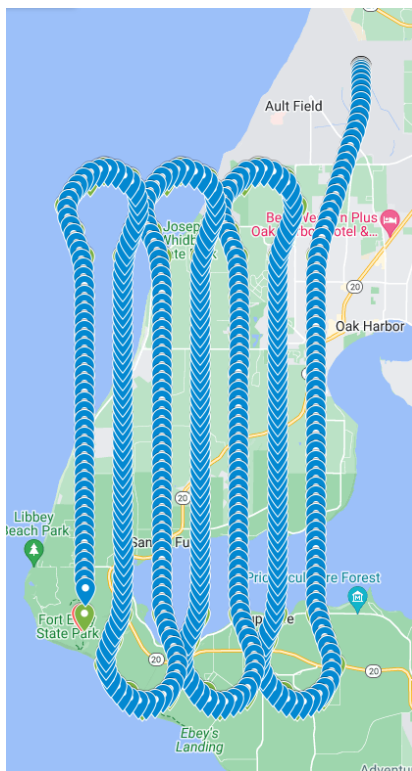
```

1: função ZAMBONIPATTERN(area)
2:   linhas ← OBTRELINHASVARRIMENTO(area, "Zamboni")
3:   linhasOrdenadas ← REORDENARLINHASZAMBONI(linhas)
4:   pontosAdicionais ← OBTERPONTOSADICIONAIS(linhasOrdenadas)
5:   pontosFinais ← OBTERPONTOSFINAIS(linhasOrdenadas, pontosAdicionais)
6: fim função
7: função REORDENARLINHASZAMBONI(linhas)
8:   linhasOrdenadas ← []
9:   se linhas.Count % 2 = 1 então
10:    linhasOrdenadas ← ORDENARLINHASIMPARG(linhas)
11:   senão
12:    linhasOrdenadas ← ORDENARLINHASPAR(linhas)
13:   fim se
14:   retornar linhasOrdenadas
15: fim função
16: função ORDENARLINHASIMPARG(linhas)
17:   linhasOrdenadas ← []
18:   para i ← 0 até LINHAS.COUNT/2 fazer
19:     linhasOrdenadas.ADICIONAR(linhas[i])
20:     linhasOrdenadas.ADICIONAR(linhas[i + linhas.Count/2 + 1])
21:   fim para
22:   linhasOrdenadas.ADICIONAR(linhas[linhas.Count/2])
23:   retornar linhasOrdenadas
24: fim função
25: função ORDENARLINHASPAR(linhas)
26:   linhasOrdenadas ← []
27:   para i ← 0 até linhas.Count/2 fazer
28:     linhasOrdenadas.ADICIONAR(linhas[i])
29:     linhasOrdenadas.ADICIONAR(linhas[linhas.Count/2 + i])
30:   fim para
31:   retornar linhasOrdenadas
32: fim função

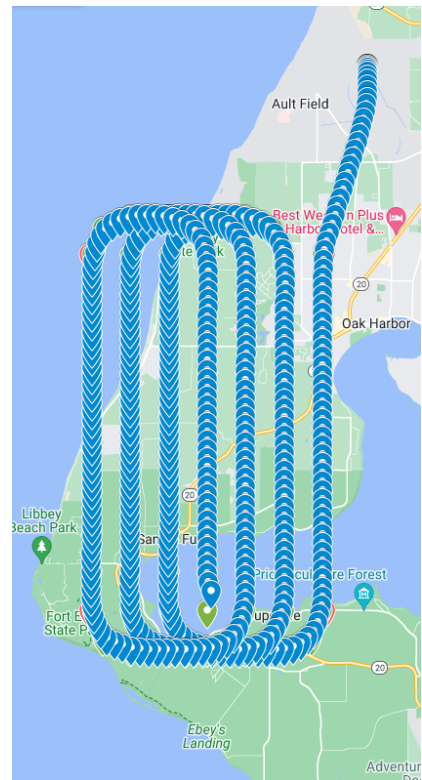
```

O problema do padrão de varrimento é que os pontos de referência adicionais que ligam as linhas de varrimento poderão ter que "alargar" a trajetória e efetuar um percurso indesejado, uma vez que o ângulo de viragem necessário para cumprir este padrão pode não ser possível utilizando um determinado veículo. O padrão de Zamboni vem atenuar este problema, uma vez que, ao contrário do padrão de varrimento que percorre as linhas de varrimento sequencialmente, percorre-as interpoladamente e corre menos riscos da necessidade de efetuar essas trajetórias indesejadas (que têm um formato de uma semicircunferência).

Na Figuras 5.1a e 5.1b podemos ver uma representação dos padrões de varrimento e de Zamboni, respetivamente, e ter uma noção gráfica de como os padrões são realmente realizados na Plataforma. A visualização foi também uma funcionalidade nova deste trabalho: as coordenadas dos agentes são guardadas num ficheiro CSV, assim como os pontos de referência obtidos, permitindo adicionar estes a um mapa (neste caso, no Google Maps) e ter a sua representação.



(a) Representação do padrão de varrimento



(b) Representação do padrão de Zamboni

Figura 5.1: Representações dos padrões de varrimento e de Zamboni

5.5 Divisão de Área na Plataforma

Foi implementada uma versão de algoritmo que apenas tratava de áreas retangulares, mas onde já aceitava um qualquer número de divisões (que era e continua a ser dado pelo número de veículos na configuração da equipa). Esta versão foi melhorada para permitir uma área poligonal de qualquer formato, seguindo o algoritmo descrito por [26]. O objetivo principal deste estudo é configurar

um sistema de missão para cobrir uma área utilizando múltiplos veículos e projetar o problema de otimização para atribuição de cada veículo a cada subárea.

Dependendo do padrão utilizado nesta divisão, a abordagem é diferente. No caso do padrão de espiral e de seguimento da forma da área pretendida, os pontos de referência são divididos equitativamente pelos UAVs disponíveis para a missão e cada um visita os pontos que lhes foram atribuídos. Na Algoritmo 2 é apresentado pseudocódigo que resume o método para estes dois padrões: depois de obtidos os pontos para um único UAV, estes são distribuídos de forma igual pelo número de UAVs na equipa em missão.

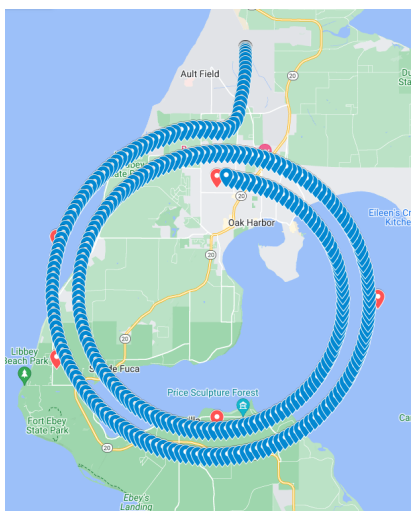
Algoritmo 2 Pseudocódigo da divisão de pontos em padrões de espiral e de seguimento da forma

```

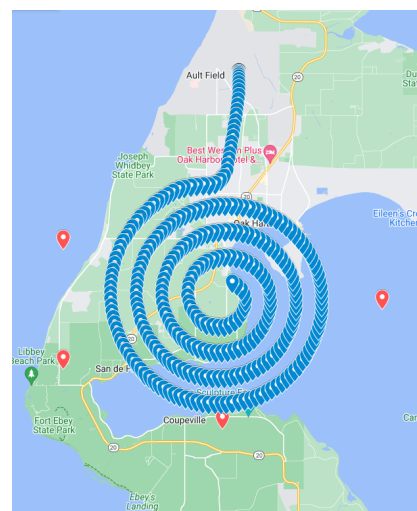
1: função AREADIVISION(sp, equipa)
2:   area ← AREAPRETENDIDA()
3:   se sp = SpiralIn ou sp = SpiralOut ou
   sp = FollowShapeIn ou sp = FollowShapeOut então
4:     pontos ← OBTERRPONTOS(area, sp)
5:     particoes ← DIVIDIRPONTOS(pontos, equipa.Count)
6:     para i ← 0 até equipa.Count − 1 fazer
7:       equipa[i].pontos ← particoes[i]
8:     fim para
9:   fim se
10: fim função

```

As Figuras 5.2a e 5.2b representam os pontos de uma equipa de 2 UAVs num padrão em espiral numa área pentagonal. Reforçando o que já foi dito, os pontos de referência são distribuídos de forma equitativa entre os UAVs em missão. Sendo assim, neste exemplo, metade dos pontos de referência são atribuídos a um UAV e a outra metade ao outro.



(a) Representação do trajeto efetuado pelo primeiro UAV



(b) Representação do trajeto efetuado pelo segundo UAV

Figura 5.2: Representações dos trajetos efetuados por cada UAV num padrão em espiral

No caso do padrão de varrimento e de Zamboni, é também considerada a distância de cada linha de varrimento de forma a que a distribuição entre UAVs seja a mais equilibrada possível, isto é, fazendo com que a diferença do número de linhas de varrimento entre UAVs seja a menor possível. Na Algoritmo 3 é apresentado pseudocódigo sobre o funcionamento do algoritmo para estes dois padrões. Resumidamente, são obtidos os pontos para um único UAV (tal como feito para os outros dois padrões), e segue-se uma distribuição das linhas de varrimento pelos UAVs na equipa da forma mais equilibrada possível. O número de linhas de varrimento e de agentes em missão são guardados de forma a poderem ser atualizados conforme a atribuição de linhas vai sendo feita. O algoritmo faz um ciclo que itera sobre cada agente, onde a cada um é atribuído o valor calculado de linhas por UAV, que é o número de linhas a dividir pelo número total de UAVs (arredondado para cima), tornando possível o cálculo dos pontos de referência finais através de uma chamada a outra função. Antes da iteração seguinte, o número de linhas e o número de UAVs é atualizado de forma a continuar o processo de distribuição de linhas de varrimento usando o mesmo método. Utilizando este algoritmo, asseguramos que a distribuição é feita de forma equilibrada entre os UAVs e que a diferença entre o(s) UAV(s) a que foi atribuído o maior e menor número de linhas de varrimento é mínima.

Algoritmo 3 Pseudocódigo da divisão de pontos em padrões de varrimento e de Zamboni

```

1: função AREADIVISION(sp, equipa)
2:   area ← AREAPRETENDIDA()
3:   linhas ← OBTERLINHASVARRIMENTO(a, sp)
4:   numLinhas ← linhas.Count
5:   numUAVs ← equipa.Count
6:   linhasPorUAV ←  $\lceil \frac{\text{numLinhas}}{\text{numUAVs}} \rceil$ 
7:   para i ← 0 até numUAVs fazer
8:     equipa[i].linhas ← linhasPorUAV
9:     equipa[i].pontos ← OBTERPONTOS(area, sp,
    equipa[i].linhas)
10:    numLinhas ← numLinhas – equipa[i].linhas
11:    numUAVs ← numUAVs – 1
12:  fim para
13: fim função

```

As Figuras 5.3a, 5.3b e 5.3c representam, por sua vez, os pontos de uma equipa de 3 UAVs num padrão de varrimento numa área triangular. Ao contrário do que acontecia nos padrões em espiral e de seguimento da forma, nos padrões de varrimento e de Zamboni as linhas de varrimento são distribuídas da forma mais equitativa possível entre os UAVs presentes na missão.

Para evasão de colisões entre UAVs, a estratégia usada passou por colocar cada UAV a uma altitude diferente, evitando assim a necessidade de adaptar as trajetórias de cada UAV. Contudo, esta medida tem implicações, nomeadamente no alcance dos sensores de cada UAV a diferentes altitudes. Apesar disso, e dadas as restrições temporais deste trabalho, foi a abordagem escolhida.

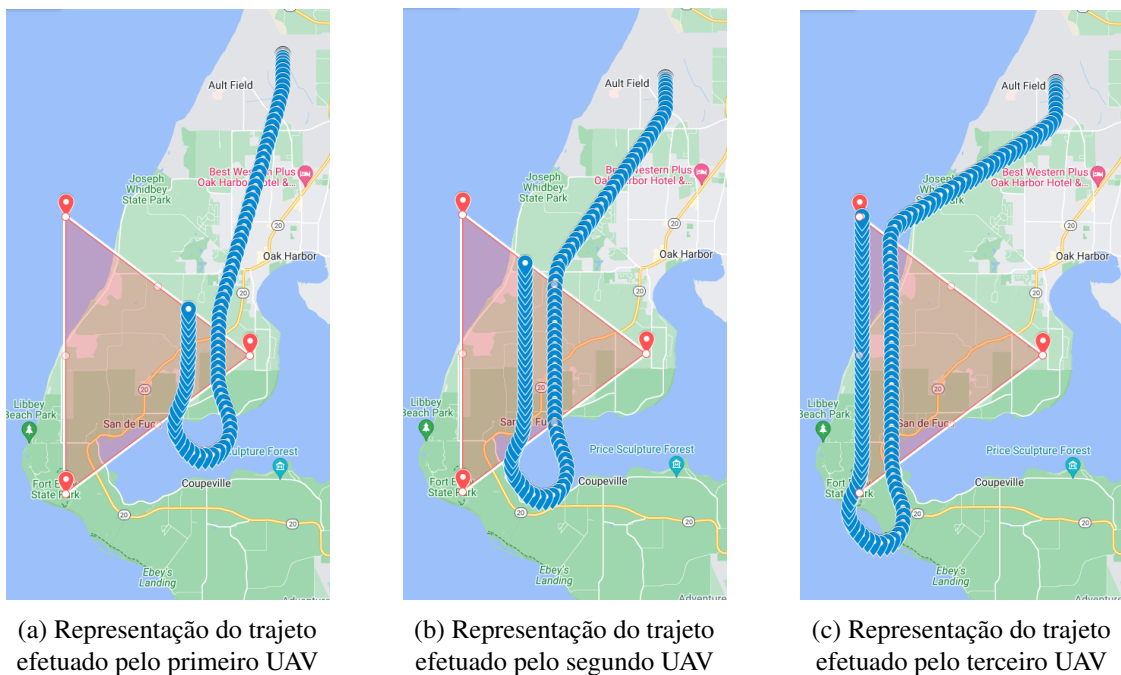


Figura 5.3: Representações dos trajetos efetuados por cada UAV num padrão de varrimento

5.5.1 Simulações

Foram realizadas 48 simulações para testar a análise de desempenho de missões multi-veículo: para cada um dos quatro padrões de pesquisa na Plataforma (padrões em espiral, de seguimento da forma, de varrimento e de Zamboni), foram realizados testes com um, dois, três e quatro UAVs numa equipa para missões de medição, ou seja, percorrem a área por completo, uma vez que necessitam de extrair informação da área pretendida total. Todas estas experiências foram testadas para áreas poligonais com as formas de um triângulo (área de aproximadamente 29 quilómetros quadrados), de um quadrado (área de aproximadamente 57 quilómetros quadrados) e de um pentágono (área de aproximadamente 70 quilómetros quadrados), a distância máxima entre linhas de varrimento utilizada é de 1000 metros e a aeronave utilizada foi a Beechcraft Baron 58, que tem um raio de viragem de 2534 metros e uma velocidade de cruzeiro de 176 nós (325.95 quilómetros por hora), e os sensores de medição utilizados nestas simulações abrangem uma área num raio de 500 metros em relação ao ponto de coordenadas em análise. Para casos de comparação destes resultados com os de outras plataformas e trabalhos, é preciso ter em conta todas as especificidades dos testes realizados neste trabalho e mencionados neste parágrafo.

Cada simulação permitiu obter os pontos de referência calculados para cada UAV na missão, as coordenadas pelas quais o UAV verdadeiramente passou ao longo do tempo (desde que descolou até que retornou ao ponto de partida), as métricas de cada UAV isoladamente e as métricas da equipa. Algumas representações destas simulações já foram apresentadas neste Capítulo para apresentar a forma como foi feita a divisão de área na Plataforma (Figuras 5.2 e 5.3) e para fazer a comparação de implementação dos padrões de varrimento e de Zamboni (Figura 5.1).

Os resultados obtidos através das métricas analisadas estão representadas na Tabelas 5.1 (para

uma área triangular), 5.2 (para uma área retangular) e 5.3 (para uma área pentagonal). O nome de cada teste tem o formato da forma da área da pesquisa seguido do número de UAVs na equipa e o padrão de pesquisa utilizado. Por exemplo, o primeiro teste da Tabela 5.1, com o nome "Triangle_1_Spiral", significa que foi a simulação realizada numa área triangular, numa equipa de apenas 1 UAV e usando o padrão em espiral. Apenas foram utilizadas 4 métricas nesta análise, uma vez que o tempo nesta fase de implementação era escasso e algumas das métricas implementadas não acrescentavam valor a resultados deste tipo de missão (medição). Assim sendo, foram utilizadas as métricas da área coberta relativamente à área pretendida (percentagem das áreas cobertas por todos os UAVs em relação à área pretendida), o tempo gasto pela equipa na área de medição pretendida (o tempo desde a descolagem de cada UAV até à área não é considerada), a soma das distâncias percorridas pelos UAVs e a percentagem de coordenadas registadas pelo UAV que se encontram dentro da área da pesquisa. O nome de cada teste é também uma ligação para o mapa de cada simulação, onde os pontos de referência (a verde) e as coordenadas de cada UAV (pontos a azul) podem ser vistos isoladamente ou em conjunto na área pretendida (os pontos a vermelho correspondem aos vértices desta área).

Tabela 5.1: Resultados obtidos numa área triangular

Nome do Teste e Ligação para visualização no <i>Google Maps</i>	Área Coberta (%)	Tempo Gasto (segundos)	Distância Percorrida (Km)	Coordenadas dentro da área (%)
Triangle_1_Spiral	95.910	1680	95.364	27.381
Triangle_1_FollowShape	94.983	1352	76.755	92.625
Triangle_1_Lawnmower	99.954	1120	63.565	49.643
Triangle_1_Zamboni	99.609	1044	59.290	52.874
Triangle_2_Spiral	96.875	852	96.721	28.404
Triangle_2_FollowShape	94.753	658	74.714	92.401
Triangle_2_Lawnmower	99.727	494	56.091	52.632
Triangle_2_Zamboni	99.302	458	52.029	57.642
Triangle_3_Spiral	96.240	557	94.999	27.990
Triangle_3_FollowShape	94.718	433	73.814	92.355
Triangle_3_Lawnmower	97.755	295	50.204	60.455
Triangle_3_Zamboni	97.615	292	49.757	60.731
Triangle_4_Spiral	96.798	433	98.388	26.790
Triangle_4_FollowShape	95.139	300	68.137	89.333
Triangle_4_Lawnmower	96.595	188	42.705	68.085
Triangle_4_Zamboni	97.826	190	43.195	67.368

5.5.2 Análise de Resultados

Começamos por analisar a Tabela 5.1. Focando apenas na área coberta por cada equipa em missão, os valores mais elevados registam-se nos padrões de varrimento e de Zamboni com o uso

Tabela 5.2: Resultados obtidos numa área retangular

Nome do Teste e Ligação para visualização no Google Maps	Área Coberta (%)	Tempo Gasto (segundos)	Distância Percorrida (Km)	Coordenadas dentro da área (%)
Square_1_Spiral	97.295	1680	95.365	58.095
Square_1_FollowShape	98.287	1856	105.353	86.422
Square_1_Lawnmower	99.800	1708	96.946	65.340
Square_1_Zamboni	99.951	1584	89.962	69.949
Square_2_Spiral	97.157	852	96.747	57.042
Square_2_FollowShape	97.624	912	103.559	86.404
Square_2_Lawnmower	99.781	806	91.539	67.742
Square_2_Zamboni	99.820	756	85.955	71.958
Square_3_Spiral	96.576	556	94.750	57.554
Square_3_FollowShape	97.257	607	103.340	86.374
Square_3_Lawnmower	99.697	500	85.174	73.333
Square_3_Zamboni	99.345	469	79.997	76.923
Square_4_Spiral	96.817	436	99.116	55.046
Square_4_FollowShape	96.339	439	99.714	86.136
Square_4_Lawnmower	99.542	350	79.586	76.638
Square_4_Zamboni	98.246	342	77.852	79.472

Tabela 5.3: Resultados obtidos numa área pentagonal

Nome do Teste e Ligação para visualização no Google Maps	Área Coberta (%)	Tempo Gasto (segundos)	Distância Percorrida (Km)	Coordenadas dentro da área (%)
Pentagon_1_Spiral	98.076	2360	134.015	52.034
Pentagon_1_FollowShape	99.742	3028	171.849	93.395
Pentagon_1_Lawnmower	98.553	2192	124.407	58.759
Pentagon_1_Zamboni	99.738	2312	131.300	58.478
Pentagon_2_Spiral	97.699	1176	133.512	52.041
Pentagon_2_FollowShape	99.714	1510	171.440	93.369
Pentagon_2_Lawnmower	97.477	1038	117.859	61.464
Pentagon_2_Zamboni	99.463	1076	122.243	62.454
Pentagon_3_Spiral	97.872	815	138.874	52.209
Pentagon_3_FollowShape	99.700	996	169.643	93.440
Pentagon_3_Lawnmower	96.043	648	110.390	65.021
Pentagon_3_Zamboni	96.287	692	117.940	60.694
Pentagon_4_Spiral	97.929	609	138.398	49.918
Pentagon_4_FollowShape	99.688	738	167.613	93.351
Pentagon_4_Lawnmower	95.773	461	104.734	67.826
Pentagon_4_Zamboni	95.593	487	110.649	64.887

de 1 e 2 veículos. Estes valores pioram ligeiramente com o número de UAVs na equipa, apenas porque 1 UAV pode não passar exatamente nas coordenadas pretendidas de um ponto de referência e este ser considerado como tal. Isto acontece porque cada UAV tem sensores que permitem obter informação sobre uma área maior do que uma só coordenada exata. Por este motivo, assim que cada sensor deteta o último ponto de referência da sua parte da missão, esta é dada como concluída, e quando são feitos os cálculos totais da área coberta, há uma região que não é considerada, uma vez que os últimos pontos de referência de cada UAV, que estão nas arestas da área pretendida, não foram realmente atingidos. A Figura 5.4 permite ter uma ideia visual desta situação: os últimos pontos de referência registados para cada UAV (pontos a azul) não chegam a atingir o último ponto calculado das respetivas linhas de varrimento (pontos a verde). Assim sendo, prevê-se que se isto não acontecesse e o último ponto de referência fosse realmente sobrevoado na sua projeção, a percentagem da área coberta, independentemente do número de UAVs, devia ser muito semelhante.

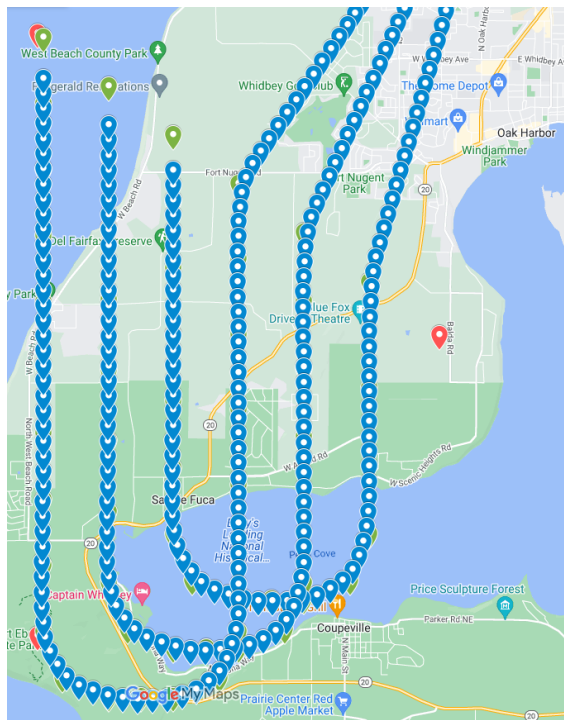


Figura 5.4: Padrão de Zamboni numa área triangular dividida por 3 UAVs

Os valores da área coberta para os padrões em espiral e de seguimento da forma são muito semelhantes, o que já era esperado, uma vez que estes 2 padrões apenas dividem o número de pontos de referência total pelo número de UAVs presentes na missão. Ao contrário dos padrões de varrimento e de Zamboni, não há necessidade de ajustar os pontos de referência adicionais para fazer as transições entre linhas de varrimento. Contudo, estes valores são praticamente constantes em relação ao número de UAVs mas apresentam também uma percentagem menor de área coberta em relação aos outros 2 padrões. Isto acontece por motivos diferentes em cada padrão. No padrão em espiral, ao dividir os pontos de referência pelos UAVs, o ângulo de entrada pode ter que ser ajustado dependendo da orientação desejada do padrão. Quando isto acontece, a área coberta sofre o mesmo

problema dos 2 padrões anteriores, em que alguns pontos de referência próximos do primeiro ponto de referência de cada UAV não são realmente sobrevoados e são dados como medidos. No padrão de seguimento da forma, o problema é que quanto menor for um dos ângulos interiores da área pretendida, maior será a área que não será coberta em redor do vértice desse ângulo. Vejamos as coordenadas do padrão de seguimento para uma área triangular e para uma área retangular, para comparar estes resultados. Como se pode ver na Figura 5.5, na área triangular os pontos de coordenadas (pontos a azul) ficam distantes dos vértices da área (pontos a vermelho), ao contrário do que acontece na área retangular que, apesar de não passar "por cima" destes vértices, passam consideravelmente perto. Esta pequena diferença na implementação faz com que a percentagem de área coberta aumente em mais de 3% na área retangular (em relação à área triangular) e em mais 4.5% na área pentagonal (ambas as percentagens considerando apenas 1 UAV).

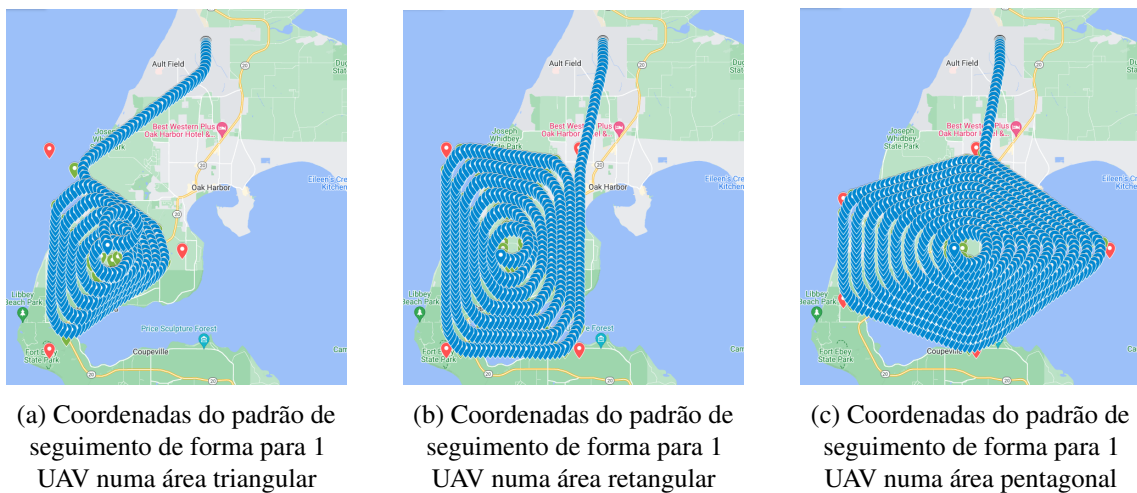


Figura 5.5: Coordenadas do padrão de seguimento de forma para 1 UAV em áreas triangulares, retangulares e pentagonais

Na Tabela 5.2, os valores da área coberta para os padrões de varrimento e de Zamboni são menos díspares com o número de UAVs, mas o motivo é o mesmo: o último ponto de referência é dado como ultrapassado assim que o sensor o atinge, pelo que a percentagem diminui ligeiramente com o número de UAVs. Os valores no padrão em espiral diminuem ligeiramente pelo mesmo motivo do que foi explicado sobre a Tabela 5.1. Sobre o padrão de seguimento da forma, os valores da área coberta diminuem de 98.3% (com 1 UAV) até 96.3% (com 4 UAVs). Estes resultados são melhores do que os resultados da área triangular porque os ângulos interiores da forma da área são maiores e, conseqüentemente, a área próxima dos vértices do quadrado são sobrevoadas de forma mais eficiente (tal como foi explicado sobre os resultados da Tabela 5.1). Contudo, estes diminuem cerca de 2% com o número de UAVs porque o limite do alcance de medição do sensor do UAV cobre pontos de referência que não chegam a ser sobrevoados, fazendo com que a percentagem final da área coberta seja menor.

Na Tabela 5.3, os resultados sobre a área coberta não trazem novidades em relação ao que já foi dito sobre as Tabelas 5.1 e 5.2. Com o aumento do número de UAVs, os valores do padrão em

espiral são praticamente constantes; os valores do padrão de seguimento da forma sofrem menos do problema do alcance dos sensores (o que não era esperado, mas pode dever-se à forma como os pontos de referência foram distribuídos entre os UAVs, favorecendo os ângulos de entrada de cada um e não comprometendo a área coberta), diminuindo apenas 0.05%; os padrões de varrimento e de Zamboni sofrem novamente do problema do alcance do sensor do último ponto de referência de cada UAV, e a diminuição (com o número de UAVs) deve-se ao agregar deste facto em linhas de varrimento adjacentes, comprometendo de forma mais considerável os valores da área coberta.

A análise sobre o tempo gasto e a distância percorrida vão agora ser analisadas em geral, uma vez que a sua explicação aplica-se aos resultados obtidos em qualquer uma das tabelas.

A métrica do tempo gasto analisada nestas simulações engloba apenas o intervalo de tempo entre o primeiro e o último pontos de referência de cada UAV, pelo que o percurso desde que o avião descola até que chega a esse primeiro ponto de referência não é analisado neste trabalho. Na Tabela 5.4 foram feitos cálculos para todas as simulações testadas de modo a aferir a relação entre o tempo gasto em missão por 1 UAV e o tempo gasto por cada um dos restantes testes numa mesma área e utilizando o mesmo padrão.

Analisando os resultados da Tabela 5.4, podemos rapidamente concluir que no caso dos padrões em espiral e de seguimento da forma, em geral, o tempo gasto numa missão utilizando n UAVs é n vezes mais rápido comparativamente à mesma missão utilizando 1 UAV. Esta conclusão era a esperada, uma vez que os pontos de referência destes padrões são distribuídos equitativamente pelo número de UAVs presentes na missão.

Contudo, esta relação nos padrões de varrimento e de Zamboni é maior e tende a aumentar com o aumento do número de UAVs em missão. Esta tendência também era esperada, visto que com o aumento do número de UAVs, o número de pontos de referência adicionais que ligam diferentes linhas de varrimento diminui (porque são distribuídas pelos UAVs e não há essa necessidade). Os testes com o tempo gasto mais curto são os testes "Triangle_4_Lawnmower" e "Triangle_4_Zamboni" por este motivo, e também porque para linhas de varrimento que são percorridas de forma consecutiva e têm diferentes comprimentos, o algoritmo precisa de realizar um percurso ligeiramente mais longo para poder realizar a mudança de linha de varrimento corretamente sem perder pontos de referência. Observando a Figura 5.6, podemos ter essa percepção: a linha vertical vermelha no mapa indica o trajeto adicional que o UAV teve que fazer para poder realizar a semicircunferência (com maior diâmetro do que a distância entre linhas de varrimento) que liga a primeira com a segunda linha de varrimento sem comprometer a passagem pelo primeiro ponto da segunda linha. O mesmo acontece no padrão de Zamboni, e este facto agregado ao da diminuição do número destas semicircunferências faz com que o tempo gasto diminua ainda mais do que nos padrões em espiral e de seguimento da forma.

Sobre a métrica da distância percorrida, as conclusões retiradas também são relativamente semelhantes independentemente da área escolhida (das que foram analisadas neste trabalho). Esta métrica é o resultado da soma das distâncias percorridas pelos UAVs em missão, pelo que, em teoria, os valores obtidos variando apenas o número de UAVs não se espera que seja substancialmente diferente.

Tabela 5.4: Relação do tempo gasto por cada teste em relação ao tempo gasto por 1 UAV na mesma área e usando o mesmo padrão

Teste	Tempo Gasto (segundos)	Relação com o uso de 1 UAV
Triangle_2_Spiral	852	1.972
Triangle_2_FollowShape	658	2.055
Triangle_2_Lawnmower	494	2.267
Triangle_2_Zamboni	458	2.279
Triangle_3_Spiral	557	3.016
Triangle_3_FollowShape	433	3.122
Triangle_3_Lawnmower	295	3.797
Triangle_3_Zamboni	292	3.575
Triangle_4_Spiral	433	3.880
Triangle_4_FollowShape	300	4.507
Triangle_4_Lawnmower	188	5.957
Triangle_4_Zamboni	190	5.495
Square_2_Spiral	852	1.972
Square_2_FollowShape	912	2.035
Square_2_Lawnmower	806	2.119
Square_2_Zamboni	756	2.095
Square_3_Spiral	556	3.022
Square_3_FollowShape	607	3.058
Square_3_Lawnmower	500	3.416
Square_3_Zamboni	469	3.377
Square_4_Spiral	436	3.853
Square_4_FollowShape	439	4.228
Square_4_Lawnmower	350	4.880
Square_4_Zamboni	342	4.632
Pentagon_2_Spiral	1176	2.007
Pentagon_2_FollowShape	1510	2.005
Pentagon_2_Lawnmower	1038	2.112
Pentagon_2_Zamboni	1076	2.149
Pentagon_3_Spiral	815	2.896
Pentagon_3_FollowShape	996	3.040
Pentagon_3_Lawnmower	648	3.383
Pentagon_3_Zamboni	692	3.341
Pentagon_4_Spiral	609	3.875
Pentagon_4_FollowShape	738	4.103
Pentagon_4_Lawnmower	461	4.464
Pentagon_4_Zamboni	487	4.747

No caso do padrão em espiral, a diferença dos valores da distância são superiores aos que eram

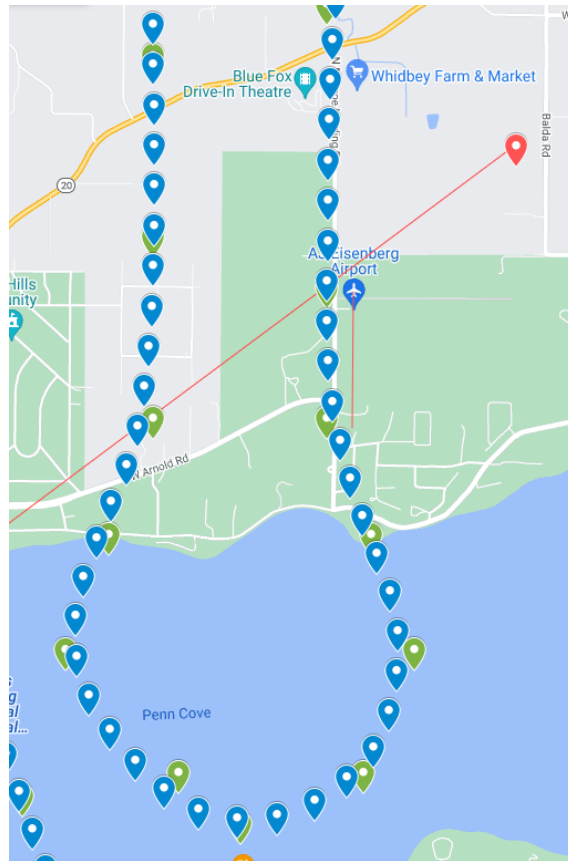


Figura 5.6: Aproximação das primeiras 2 linhas de varrimento do teste "Triangle_1_Lawnmower"

esperados inicialmente, mas depois de analisar a visualização no Google Maps podemos concluir que essa diferença deve-se à necessidade de ajustar o ângulo de entrada no primeiro ponto de referência em alguns testes. Numa futura melhoria do padrão para ajustar a divisão da área tendo em conta também esta variável, prevê-se que a amplitude destes valores seja ainda mais escassa. O padrão de seguimento da forma apresenta uma amplitude ainda considerável na área triangular mas que diminui progressivamente e apresenta diferenças mínimas na área pentagonal, devido à cobertura de pontos de referência que não chegam a ser sobrevoados (como já foi dito para a área coberta).

No caso dos padrões de varrimento e de Zamboni, a diferença da distância percorrida com o aumento do número de UAVs é mais considerável. Inicialmente isto não era esperado, mas depois da análise que já foi feita e pelos dados que temos, é possível afirmar que esta diferença deve-se também à diminuição dos pontos de referência adicionais que ligam linhas de varrimento, tal como acontecia no tempo gasto.

A métrica da percentagem das coordenadas dentro da área pretendida permite reconhecer a eficiência de voo de cada algoritmo. Periodicamente, o UAV guarda informação sobre a sua localização exata em coordenadas (de latitude e longitude), e esta métrica apenas espelha se cada uma dessas coordenadas se encontra dentro ou fora da área de medição, uma vez que a sua forma

de cálculo é o número de coordenadas que se encontra dentro da área de medição em relação ao número de coordenadas total (em percentagem). Se numa dada missão esta percentagem for 100%, significa que todas as coordenadas registadas pelos UAVs estavam dentro da área de pesquisa pretendida. Por outro lado, se esta percentagem for baixa, significa que a equipa de UAVs está a fazer medições fora da área pretendida, o que é uma fraqueza do padrão de pesquisa, uma vez que o que se pretende é maximizar as medições dentro da mesma, evitando percorrer caminhos e demorar mais tempo a fazer manobras fora desta área.

Assim sendo, no caso dos padrões em espiral e de seguimento da forma, esta percentagem varia com a área escolhida mas pouco varia com o número de UAVs. Usando o padrão em espiral, a percentagem (independentemente do número de UAVs) depende da distribuição da área total em relação ao centro da mesma. Numa área circular, usando este padrão, esta percentagem deverá ser muito próxima dos 100%. Se a área pentagonal usada fosse regular, seria de esperar que a percentagem fosse bastante superior do que os 52% apresentados. A percentagem na área triangular é muito baixa (27%), tal como seria de esperar, sendo que esta área também não é regular e, colocando este polígono dentro de uma circunferência, a sua área é consideravelmente baixa. Os melhores resultados desta variável neste padrão acabam por ser na forma retangular, uma vez que é o formato desta área é a mais próxima de um polígono regular (quadrado). Por outro lado, o padrão de seguimento da forma apresenta percentagens altas, tal como era previsto, uma vez que este padrão pretende exatamente "seguir a forma" da área desde o primeiro ao último ponto de referência. Este padrão, ao contrário do padrão em espiral, está mais recetível a formas irregulares, uma vez que adapta a sua trajetória à forma da área pretendida.

Os padrões de varrimento e de Zamboni apresentam resultados semelhantes entre si (distam de 5% dentro de uma mesma parametrização no máximo), contudo diferem consideravelmente com o número de UAVs: quanto maior é o número de UAVs, maior é a percentagem de coordenadas dentro da área. Isto deve-se à necessidade de alargar a trajetória na ligação entre linhas de varrimento, e com o aumento do número de UAVs, diminui o número destas trajetórias adicionais, motivo pelo qual não só esta métrica apresenta melhores resultados, mas também as métricas do tempo gasto e da distância percorrida (como já foi dito em parágrafos anteriores).

Em suma, focando agora em cada padrão individualmente, há algumas conclusões que podem ser retiradas destes resultados.

Sobre o padrão em espiral, podemos concluir que é mais eficaz quanto mais próxima for a área de uma área circular. As diferenças são mínimas, mas é preciso ter em conta a aplicabilidade do padrão a cada área. Este padrão abrange a área pretendida dentro de uma circunferência, na qual a vai percorrer de dentro para fora ou de fora para dentro progressivamente. Tendo isto em conta, imaginemos um retângulo de comprimento 10m e de largura 1m. Se colocarmos esta área num sistema de coordenadas centrado na origem, o centro da circunferência deste padrão seria no ponto de coordenadas $X=5m$ e $Y=0.5m$ e teria um raio de 5m. Contudo, a maioria do trajeto deste padrão seria feito fora da área pretendida, prevendo uma percentagem de coordenadas dentro da área muito baixa, não tendo qualquer valor para esta missão. Contudo, no caso deste padrão ser melhorado de forma a que a divisão dos pontos de referência tenham em conta o ângulo de

entrada no primeiro ponto de referência de cada UAV, pode ser um padrão bastante eficiente em áreas circulares (e próximas destas) usando um maior número de UAVs, de forma a evitar ajustes de entrada que aumentem a distância percorrida no total (e consequentemente o tempo gasto).

Sobre o padrão de seguimento da forma, os seus resultados evoluem de forma mais evidente com o aumento do número de lados da área pretendida (das três analisadas neste trabalho) - desde aproximadamente 95% de área coberta na área triangular até aproximadamente 99.7% na área pentagonal. Esta diferença deve-se à forma como o algoritmo está implementado, fazendo com que em redor de ângulos interiores da área pretendida pequenos a área coberta seja quase nula (como se pode ver na Figura 5.5. Os valores de tempo gasto e de distância percorrida são relativamente independentes da forma da área e a percentagem de coordenadas dentro da área aumenta com o número de UAVs, pelo que este padrão evidencia-se em áreas poligonais com maior número de lados e com um maior número de UAVs.

O padrão de varrimento (*Lawnmower*) apresenta os seus melhores resultados de área coberta com apenas 1 UAV, piorando com o aumento do número de UAVs, mas pela análise feita podemos concluir que essa regressão se deve ao alcance dos sensores ao chegar ao último ponto de referência de cada UAV. Caso este pequeno detalhe seja alterado no algoritmo, prevê-se que os valores da área coberta se mantenham constantes. É ainda possível confirmar que este padrão é mais poderoso em áreas planas (e menos próximas de áreas circulares), uma vez que consegue escolher a direção de varrimento mais facilmente e maximizar a área coberta num menor número de linhas de varrimento [13]: considerando apenas os valores para 1 UAV, na área triangular a cobertura foi de 99.9%, na área retangular foi de 99.8% e na área pentagonal de foi 98.6%. Sobre as 3 restantes métricas, o aumento de UAVs acompanha a considerável melhoria destes valores, chegando à conclusão que este padrão, assim que alterado aquele detalhe no algoritmo, pode ser bastante eficaz com um maior número de UAVs.

Sobre o padrão de Zamboni, os resultados acompanham os resultados e as adversidades do padrão de varrimento (do alcance dos sensores à chegada do último ponto de referência de cada UAV), com a diferença de que a área coberta para 1 UAV se mantém bastante elevada independentemente da área analisada (99.6% na área triangular, 99.9% na área retangular e 99.7% na área pentagonal). Por outro lado, a distância percorrida e o tempo gasto apresenta resultados ligeiramente piores aos do padrão de varrimento na área pentagonal. No caso da percentagem de coordenadas dentro da área pretendida, são apresentados resultados ligeiramente piores com o aumento do número de lados da área escolhida, mas é uma diferença pouco significativa. A explicação encontrada foi que o padrão de Zamboni, apesar de na maior parte dos casos não necessitar de "alargar" as trajetórias para fazer as ligações entre as linhas de varrimento, acaba por percorrer uma distância maior na interpolação das mesmas. Contudo, a conclusão final é de que este padrão também é bastante eficaz com o aumento do número de UAVs, se não tivermos em conta aquela especificidade dos sensores dos UAVs utilizados.

Uma das formas possíveis de comparação dos padrões de varrimento e de Zamboni é analisar o custo das semicircunferências no padrão de varrimento e o custo da sobreposição de pontos fora da área pretendida na ligação entre linhas de varrimento no padrão de Zamboni. Dentro da área

pretendida, as trajetórias são praticamente as mesmas, apesar da diferente ordenação e atribuição de linhas de varrimento a cada UAV. Contudo, o que realmente distingue estes 2 padrões é mesmo a forma como é feita a ligação entre as linhas de varrimento. No caso do padrão de varrimento, estas linhas são percorridas de forma consecutiva, e caso um UAV não tenha um ângulo de viragem que lhe permita não comprometer o ângulo de entrada na linha de varrimento seguinte, é necessário alargar a trajetória. No caso do padrão de Zamboni, é muito rara a situação em que são percorridas 2 linhas de varrimento adjacentes, pelo que o maior problema neste padrão é a distância percorrida na ligação entre 2 linhas de varrimento (consecutivas na ordem pela qual são percorridas, e não na ordem em como estão dispostas na área). Uma possível solução de resolver o problema do padrão de Zamboni seria tentar realizar as ligações entre linhas de varrimento dentro da área pretendida, sem comprometer a percentagem da área coberta. Desta forma, estaríamos a melhorar os resultados da métrica das coordenadas dentro da área e a manter os valores das restantes métricas.

Se as áreas de pesquisa tiverem formas mais irregulares e não tanto polígonos como os que foram testados, este método de divisão não é o mais adequado. No caso de termos uma área em "T" ou em "L", por exemplo, o algoritmo que parece ser mais eficiente é o de varrimento ou o de Zamboni, porque são os padrões que se preveem que tenham maior número de coordenadas dentro da área pretendida (um padrão em espiral teria muito pouca eficiência nesta métrica). A forma ideal de realizar uma pesquisa numa área em "T" seria separar a parte superior e a parte central para um determinado número de UAVs (que dependeria da "grossura" destes subpolígonos) e posteriormente planear o trajeto de voo para cada subpolígono em separado. O método usado neste trabalho não permite que para uma mesma área sejam utilizados duas direções de varrimento, pelo que numa área em "T" ou em "L" este seria o método mais eficiente.

Concluindo a análise destes resultados, podemos afirmar que todos os padrões são configurados por diferentes parametrizações, mas, em geral, pondo de parte os detalhes do alcance dos sensores do último ponto de referência de cada UAV (no caso dos padrões de varrimento e de Zamboni) e do ajuste do ângulo de entrada (no padrão em espiral), todos eles beneficiam do uso de um maior número de UAVs na área pretendida. De lembrar que esta análise apenas tem em conta o que acontece desde que cada UAV atinge o primeiro ponto de referência até que atinge o último, pelo que todo o trajeto até à chegada a esta área não está a ser considerada neste estudo e deverá ser considerada em experiências reais, assim como outras métricas que complementem toda esta análise, como, por exemplo, o combustível gasto e outras métricas como as que foram enumeradas no Capítulo 2. A forma da área também tem um fator importante na análise destes resultados, visto que apenas foram utilizadas formas convexas de polígonos regulares.

Capítulo 6

Conclusão

Este trabalho de Dissertação tinha como principal objetivo permitir a simulação de missões com múltiplos veículos e fazer uma análise dos padrões de pesquisa utilizados e procurar perceber quais as melhores parametrizações para cada tipo de missão.

Numa parte inicial, foi feita uma contextualização e uma revisão da literatura sobre missões multi-veículo, padrões de pesquisa associados, métricas de avaliação para análise de desempenho, plataformas de simulação, voo em formação e divisão de área, a fim de nos envolvermos com o contexto deste tópico e perceber o ponto de situação do que existe em relação ao que me proponho a implementar.

O trabalho desenvolvido divide-se em duas partes: uma parte teórica, onde propus agrupamentos para tipos de missão (grupos de missões), para métricas de avaliação (perfis de métricas) e fiz uma associação de grupos de missões, perfis de métricas e de padrões de pesquisa, de forma a mais facilmente relacionar cada uma destas; e uma parte prática, onde foi verdadeiramente concretizado o objetivo principal de permitir a simulação multi-veículo. A partir de agora, é possível utilizar A Plataforma para fazer simulações com um único veículo e com múltiplos veículos pertencentes a uma equipa.

No contexto de divisão de área, foram realizadas simulações com equipas de 1 até 4 veículos em áreas poligonais triangulares, retangulares e pentagonais. A colisão entre veículos não foi tida em conta, uma vez que cada veículo atuava numa altitude diferente. Este pormenor interfere com o alcance dos sensores de cada veículo, pelo que a solução usada neste trabalho não foi a ideal e pode ser melhorada, de forma a obter resultados ainda mais interessantes. A colisão dos veículos com obstáculos (zonas montanhosas à altitude usada pelo veículo, por exemplo) também não foi considerada, pelo que em situações reais também é necessário ter esta variável em conta.

Relembrando as questões-objetivo do Capítulo 1 deste trabalho:

- Q1: Uma determinada missão tem melhores resultados quando é configurada com um ou com mais veículos?

Tendo em conta o trabalho realizado nesta dissertação, a resposta à Q1 precisa de ser devidamente contextualizada para ser respondida de forma correta. Como só foram realizadas simulações

para missões de medição, para 3 formas de áreas diferentes e com equipas de 1 até 4 UAVs, só para estas é que é possível dar uma resposta devidamente fundamentada. Desta forma, e tendo em conta toda a análise de resultados efetuada no Capítulo 5, é possível afirmar que uma missão de medição apresenta melhores resultados quando é configurada com um maior número de UAVs (num máximo de 4), para qualquer um dos 4 padrões de pesquisa analisados e para áreas triangulares, retangulares e pentagonais de dimensões das que foram analisadas. Entende-se por melhores resultados uma missão que tenha resultados mais satisfatórios de percentagem de área coberta (o mais próximo possível dos 100%), de tempo gasto e de distância percorrida (menores valores significam resultados mais satisfatórios nestas 2 métricas).

- Q2: Quais as métricas de avaliação que melhor se adequam a um determinado tipo de missão?

A Q2 foi respondida apenas de forma conceptual, uma vez que na parte prática foram feitas apenas simulações de medição. Desta forma, cada tipo de missão foi agrupado num grupo de missão (dependendo do seu objetivo) que partilha padrões de pesquisa preferenciais e métricas de avaliação que, em teoria, são as que melhor permitem avaliar o comportamento de uma equipa numa missão.

- Q3: Quais os padrões de pesquisa que fornecem melhores resultados para uma determinada área?

A Q3 também tem de ser contextualizada, porque só é possível concluir sobre áreas triangulares, retangulares e pentagonais. Desta forma, para áreas circulares (ou próximas destas), os padrões em espiral e de seguimento da forma apresentam resultados sólidos e interessantes, isto é, que se equiparam em termos de percentagem de área coberta com os padrões de varrimento e de Zamboni mas o mesmo já não acontece com as métricas do tempo gasto e da distância percorrida. Por outro lado, para áreas mais menos circulares, os padrões de varrimento e de Zamboni são claramente os melhores padrões a utilizar (em relação aos padrões em espiral e de seguimento da forma), tendo sido obtidos valores mais altos de área coberta e valores mais baixos de tempo gasto e de distância percorrida para estes 2 padrões nas áreas triangulares e retangulares.

- Q4: A avaliação de desempenho de missões de um único veículo e de múltiplos veículos é justa e equilibrada? Ou poderá acontecer estarmos a dar um peso desajustado a uma determinada métrica e a adulterar os resultados obtidos?

Sobre a Q4, nada pode ser concluído, uma vez que não foi explorada a atribuição de diferentes pesos a diferentes métricas por problemas no resto da implementação.

6.1 Dificuldades Enfrentadas

O facto da Plataforma ter já vários anos e ter sido já usada por muitos estudantes anteriormente foi sem dúvida um facto que atrasou bastante toda a implementação deste projeto. Toda a configuração inicial para colocar a Plataforma em funcionamento demorou muito mais do que era

expectável, passando inclusive por tentar usar bastantes versões do projeto, com mais ou menos funcionalidades que, para o que foi proposto fazer, não acrescentavam valor e só acrescentavam adversidades. O facto destas versões não estarem devidamente documentadas foi também um dos motivos deste atraso e toda a configuração tinha de ser feita por tentativa-erro por vezes. Outra dificuldade enfrentada que atrasou a implementação deste trabalho foi a quantidade de código já implementado que não estava documentado, assim como código que já não era usado (ou porque pelo passar dos anos foi substituído por outro ou porque era código comentado onde eram feitos testes manualmente).

Dados todos estes riscos que foram severamente sentidos por mim ao longo desta dissertação, os resultados obtidos e a análise destas ficou um pouco aquém do que era esperado, nomeadamente na quantidade de métricas analisadas. Talvez tenha sido um pouco ambiciosa a proposta de objetivos feita inicialmente, não tendo ainda conhecimento da Plataforma com a qual iria trabalhar.

6.2 Trabalho Futuro

Existem ainda alguns pormenores que podem ser melhorados em trabalhos futuros nesta Plataforma.

Os resultados obtidos tiveram alguns resultados que não eram esperados, devido a implementações que talvez não tenham tido a necessidade da análise extensiva que foi feita neste trabalho, pelo que a adaptação destas implementações poderá trazer resultados ainda mais vinculados para o mesmo conjunto de simulações.

A evasão de colisões entre UAVs em missão é talvez um pontos que trará maior valor a este trabalho. Aqui os UAVs foram colocados a diferentes altitudes, fazendo com que o alcance dos sensores não fosse o mesmo para cada UAV, afetando ligeiramente os resultados obtidos (nomeadamente na percentagem da área coberta).

A evasão de obstáculos também não foi considerada, uma vez que as simulações foram feitas num ambiente livre de obstáculos, sendo este também um fator crucial na aplicação a experiências reais.

A análise destes padrões e métricas pode ser estendida para novos padrões e novas métricas que não foram implementadas, assim como a abrangência de outros formatos de área, nomeadamente áreas não convexas. Neste estudo foram apenas analisadas simulações para 4 padrões, utilizando 3 métricas e cada um destes para 3 formatos de área diferentes, mas todos eles formatos poligonais convexos.

A análise dos trajetos de aproximação e retorno da área pretendida são também fatores importantes para a aplicabilidade destas missões na vida real, assim como a personalização da missão tendo em conta a vontade e a necessidade do utilizador. Isto significa que, dependendo de cada missão e de quem a comanda, pode haver a necessidade de dar uma maior importância a uma ou mais métricas, tanto por especificação da missão como do próprio tipo da mesma. Este ponto ajudaria a dar resposta à Q4 das questões-objetivo deste trabalho.

Uma abordagem interessante que pode vir a ser feita no futuro na Plataforma é a de adicionar fatores externos (não controláveis no mundo real, mas de certo modo controláveis nas simulações), como eventos meteorológicos extremos, problemas de visibilidade ou até da qualidade do ar, que influenciam, direta ou indiretamente, as abordagens efetuadas pelos veículos pertencentes a uma missão.

Seria também interessante pôr em prática a parte teórica desenvolvida e espelhá-la na Plataforma, de forma a ser um processo mais intuitivo, simples e apelativo para o utilizador.

Referências

- [1] AgentFlyTechnologies. Solutions for UAS integration into shared airspace, 2016. Acedido a 29/06/2023.
- [2] João Almeida. Simulation and Management of Environmental Disturbances in Flight Simulator X. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.
- [3] Stephen A. Andrews e Ruben E. Perez. Comparison of box-wing and conventional aircraft mission performance using multidisciplinary analysis and optimization. *Aerospace Science and Technology*, 79:336–351, 2018.
- [4] J.F. Araújo, P.B. Sujit, e J.B. Sousa. Multiple UAV area decomposition and coverage. Em *2013 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications (CISDA)*, páginas 30–37, 2013.
- [5] Gustavo S. C. Avellar, Guilherme A. S. Pereira, Luciano C. A. Pimenta, e Paulo Iscold. Multi-UAV Routing for Area Coverage and Remote Sensing with Minimum Time. *Sensors*, 15(11):27783–27803, novembro 2015.
- [6] D.P. Barnes e J.O. Gray. Behaviour synthesis for co-operant mobile robot control. Em *International Conference on Control 1991. Control '91*, volume 2, páginas 1135–1140, Edinburgh, UK, 1991. IET.
- [7] Michael R Benjamin, Paul Newman, Henrik Schmidt, e John J Leonard. An Overview of MOOS-IvP and a Brief Users Guide to the IvP Helm Autonomy Software. *Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory (CSAIL) Technical Report*, 2009.
- [8] Mitch Bryson e Salah Sukkarieh. Co-operative Localisation and Mapping for Multiple UAVs in Unknown Environments. Em *2007 IEEE Aerospace Conference*, páginas 1–12, 2007.
- [9] Da Cai, Jian Sun, e Sentang Wu. UAVs Formation Flight Control Based on Behavior and Virtual Structure. Em Tianyuan Xiao, Lin Zhang, e Minrui Fei, organizadores, *AsiaSim 2012, Communications in Computer and Information Science*, páginas 429–438, Berlin, Heidelberg, 2012. Springer.
- [10] Yu Cai, Dushhyanth Rajaram, e Dimitri N. Mavris. Simultaneous aircraft sizing and multi-objective optimization considering off-design mission performance during early design. *Aerospace Science and Technology*, 126:107662, julho 2022.
- [11] Sandro Miguel Tavares Campos. Image Manipulation and Classification: An Application to Fire Detection. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2021.

- [12] Tiago Carvalho. Data Collection and Analysis in a Distributed Simulation Platform. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2020.
- [13] Tiago Carvalho, Leonardo Ferreira, e Daniel Castro Silva. A Study in Search Pattern Efficiency Using Under-Actuated Aircraft. *International Journal of Engineering and Technology*, 13(3):24–30, agosto 2021.
- [14] Zhou Chao, Lei Ming, Zhou Shaolei, e Zhang Wenguang. Collision-free UAV formation flight control based on nonlinear MPC. Em *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)*, páginas 1951–1956, setembro 2011.
- [15] YongBo Chen, JianQiao Yu, XiaoLong Su, e GuanChen Luo. Path Planning for Multi-UAV Formation. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 77(1):229–246, janeiro 2015.
- [16] Sung Won Cho, Hyun Ji Park, Hanseob Lee, David Hyunchul Shim, e Sun-Young Kim. Coverage path planning for multiple unmanned aerial vehicles in maritime search and rescue operations. *Computers & Industrial Engineering*, 161:107612, novembro 2021.
- [17] Chun-Ho Cheung e Lai-Man Po. Novel cross-diamond-hexagonal search algorithms for fast block motion estimation. *IEEE Transactions on Multimedia*, 7(1):16–22, fevereiro 2005.
- [18] Rafael Ricardo Damasceno. Co-Simulation Architecture for Environmental Disturbances. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2020.
- [19] Maikol Funk Drechsler, Georg Seifert, Jakob Peintner, Fabio Reway, Andreas Riener, e Werner Huber. How Simulation based Test Methods will substitute the Proving Ground Testing? Em *2022 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, páginas 903–908, Aachen, Germany, junho 2022. IEEE.
- [20] E. Fokina, J. Feger, e M. Hornung. Application of a visualization environment for the mission performance evaluation of civilian UAS. *CEAS Aeronautical Journal*, 10(3):817–825, setembro 2019.
- [21] Guillermo Frontera, Jesús Cuadrado, Emiliano Bartolomé, e Carlos Querejeta. SkyWay Simulator: an integrated ATM/UTM simulator for autonomous operations. Em *2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, páginas 1–9, San Antonio, TX, USA, 2021.
- [22] YewKee Goh e Shuangshuang Fan. Path Planning for AUV Area Coverage Mission based on MOOS-IvP. Em *2019 IEEE Underwater Technology (UT)*, páginas 1–10, Kaohsiung, Taiwan, 2019. IEEE.
- [23] A.H. Goktogan, E. Nettleton, M. Ridley, e S. Sukkarieh. Real time Multi-UAV Simulator. Em *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)*, volume 2, páginas 2720–2726, 2003.
- [24] Alberto Grati. MOOS-IvP: Cross Platform Software for Robotics Research. *NATO's Science and Technology Organization (STO)*, páginas 1–14, 2015.
- [25] Arjun Gupta, Michael Novitzky, e Michael Benjamin. Learning Autonomous Marine Behaviors in MOOS-IvP. Em *OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston*, páginas 1–10, Charleston SC, USA, 2018. IEEE.

- [26] Youkyung Hong, Sunggoo Jung, Suseong Kim, e Jihun Cha. Autonomous Mission of Multi-UAV for Optimal Area Coverage. *Sensors*, 21(7):2482, janeiro 2021.
- [27] Chanyoung Ju e Hyoung Il Son. Performance evaluation of multiple UAV systems for remote sensing in agriculture. Em *Proceedings of the Workshop on Robotic Vision and Action in Agriculture at the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Brisbane, Australia*, páginas 21–26, 2018.
- [28] Elad Kivelevitch e Pini Gurfil. Taxonomy of Mission Performance for Diverse and Homogenous UAV Flocks. Em *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, California, 2005. AIAA.
- [29] Hyunseok Lee, Hyungjoon Lee, Einkeun Kwak, e Seungsoo Lee. Development of Aircraft Mission Performance Analysis Program. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 14(2):162–171, 2013.
- [30] Yan Li, Hai Chen, Meng Joo Er, e Xinmin Wang. Coverage path planning for UAVs based on enhanced exact cellular decomposition method. *Mechatronics*, 21(5):876–885, agosto 2011.
- [31] Delin Luo, Ting Zhou, e Shunxiang Wu. Obstacle avoidance and formation regrouping strategy and control for UAV formation flight. Em *2013 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, páginas 1921–1926, junho 2013. ISSN: 1948-3457.
- [32] Ivan Maza e Anibal Ollero. Multiple UAV cooperative searching operation using polygon area decomposition and efficient coverage algorithms. Em Rachid Alami, Raja Chatila, e Hajime Asama, organizadores, *Distributed Autonomous Robotic Systems 6*, páginas 221–230, Tokyo, 2007. Springer Japan.
- [33] Ivan Maza, Anibal Ollero, Enrique Casado, e David Scarlatti. Classification of Multi-UAV Architectures. Em Kimon P. Valavanis e George J. Vachtsevanos, organizadores, *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, páginas 953–975. Springer Netherlands, Dordrecht, 2015.
- [34] LA McCullers. Aircraft configuration optimization including optimized flight profiles. *NASA Langley Research Center Recent Experiences in Multidisciplinary Analysis and Optimization, Part 1*, páginas 395–412, 1984.
- [35] Ben Mcilwaine, Mónica Rivas Casado, e Toby Waine. Investigating optimal unmanned aircraft systems flight plans for the detection of marine ingress. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 108:102729, abril 2022.
- [36] Carl Nehme, Jacob Crandall, e Mary Cummings. An Operator Function Taxonomy for Unmanned Aerial Vehicle Missions. Em *12th international command and control research and technology symposium*, páginas 19–21, 2007.
- [37] A. Nemra e N. Aouf. Robust cooperative UAV Visual SLAM. Em *2010 IEEE 9th International Conference on Cybernetic Intelligent Systems*, páginas 1–6, 2010.
- [38] Tiago Luís Pacheco Neto. Flexible Air Traffic Control Management. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.
- [39] Alexander R Perry. The FlightGear Flight Simulator. Em *Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference*, volume 686, páginas 1–12. USENIX, 2004.

- [40] André Platzer e Edmund M. Clarke. Formal Verification of Curved Flight Collision Avoidance Maneuvers: A Case Study. Em Ana Cavalcanti e Dennis R. Dams, organizadores, *FM 2009: Formal Methods*, páginas 547–562, Berlin, Heidelberg, 2009. Springer Berlin Heidelberg.
- [41] Rahul Ravichandran, Debasish Ghose, e Kaushik Das. UAV Based Survivor Search during Floods. Em *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, páginas 1407–1415, Atlanta, GA, USA, 2019. IEEE.
- [42] R. Remenyte-Prescott, J. D. Andrews, e P. W. H. Chung. An efficient phased mission reliability analysis for autonomous vehicles. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(3):226–235, 2010.
- [43] Juan Jesús Roldán, Jaime del Cerro, e Antonio Barrientos. A proposal of methodology for multi-UAV mission modeling. Em *2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, páginas 1–7, 2015.
- [44] Milan Rollo, Martin Selecký, e Přemysl Volf. Simulation of UAS integration into shared airspace for validation of impact on ATM systems. Em *2017 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, páginas 6D2–1–6D2–7, Herndon, VA, USA, 2017. IEEE.
- [45] Abel Santos. Adaptação de veículos autónomos e inteligentes e análise de desempenho no Flight Simulator X. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.
- [46] Judy Scott e Carlton Scott. Drone Delivery Models for Healthcare. Em *Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences*, páginas 1–8, Hilton Waikoloa Village, Hawaii, 2017.
- [47] F. B. Scurt, T. Vesselenyi, R. C. Tarca, H. Beles, e G. Dragomir. Autonomous vehicles: classification, technology and evolution. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1169(1):012032, agosto 2021. Publisher: IOP Publishing.
- [48] J. Seethaler, M. Strohal, e P. Stütz. Finding Metrics for Combat Aircraft Mission Efficiency: An AHP-based Approach. *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2020*, página 10 pages, 2021.
- [49] Julian Seethaler, Michael Strohal, e Peter Stütz. Multi-UAV Mission Efficiency: First Results in an Agent-Based Simulation. Em Jan Mazal, Adriano Fagiolini, Petr Vasik, e Michele Turi, organizadores, *Modelling and Simulation for Autonomous Systems*, páginas 169–188, Cham, 2021. Springer International Publishing.
- [50] Joongbo Seo, Youdan Kim, Seungkeun Kim, e Antonios Tsourdos. Collision Avoidance Strategies for Unmanned Aerial Vehicles in Formation Flight. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 53(6):2718–2734, dezembro 2017.
- [51] Shital Shah, Debadepta Dey, Chris Lovett, e Ashish Kapoor. AirSim: High-Fidelity Visual and Physical Simulation for Autonomous Vehicles. Em Marco Hutter e Roland Siegwart, organizadores, *Field and Service Robotics*, páginas 621–635, Cham, 2018. Springer International Publishing.
- [52] Daniel Castro Silva. *Cooperative multi-robot missions : development of a platform and a specification language*. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.

- [53] Camilla Tabasso, Venanzio Cichella, Syed Bilal Mehdi, Thiago Marinho, e Naira Hovakimyan. Time coordination and collision avoidance using leader-follower strategies in multi-vehicle missions. *Robotics*, 10(1):34, 2021.
- [54] Leila Takayama, Wendy Ju, e Clifford Nass. Beyond Dirty, Dangerous and Dull: What Everyday People Think Robots Should Do. Em *Proceedings of the 3rd ACM/IEEE International Conference on Human Robot Interaction, HRI '08*, páginas 25–32, New York, NY, USA, 2008. Association for Computing Machinery.
- [55] Marina Torres, David A. Pelta, José L. Verdegay, e Juan C. Torres. Coverage path planning with unmanned aerial vehicles for 3D terrain reconstruction. *Expert Systems with Applications*, 55:441–451, agosto 2016.
- [56] N. Kemal Ure, Girish Chowdhary, Jonathan P. How, Matthew A. Vavrina, e John Vian. Health Aware Planning under uncertainty for UAV missions with heterogeneous teams. Em *2013 European Control Conference (ECC)*, páginas 3312–3319, Zurich, julho 2013. IEEE.
- [57] Xiaohua Wang, Vivek Yadav, e S. N. Balakrishnan. Cooperative UAV Formation Flying With Obstacle/Collision Avoidance. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 15(4):672–679, julho 2007.
- [58] Wen Yuan, QingYang Chen, ZhongXi Hou, e Yue Li. Multi-UAVs formation flight control based on leader-follower pattern. Em *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*, páginas 1276–1281, Dalian, China, 2017. IEEE.
- [59] Jialong Zhang, Jianguo Yan, e Pu Zhang. Multi-UAV Formation Control Based on a Novel Back-Stepping Approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(3):2437–2448, março 2020.
- [60] Jialong Zhang, Jianguo Yan, Pu Zhang, e Xiangjie Kong. Collision Avoidance in Fixed-Wing UAV Formation Flight Based on a Consensus Control Algorithm. *IEEE Access*, 6:43672–43682, 2018.
- [61] Artur Zolich, Atle Sogrov, Erlend Vagsholm, Vegard Hovstein, e Tor Arne Johansen. Coordinated maritime missions of unmanned vehicles — Network architecture and performance analysis. Em *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, páginas 1–7, Paris, France, maio 2017. IEEE.
- [62] David Šišlák, Michal Pěchouček, Přemysl Volf, Dušan Pavlíček, Jiří Samek, Vladimír Mařík, e Paul Losiewicz. AGENTFLY: Towards Multi-Agent Technology in Free Flight Air Traffic Control. Em Michal Pěchouček, Simon G. Thompson, e Holger Voos, organizadores, *Defence Industry Applications of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, páginas 73–96. Birkhäuser Basel, Basel, 2008. Series Title: Whitestein Series in Software Agent Technologies and Autonomic Computing.