



Universidade Federal da Bahia
Instituto de Matemática e Estatística

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

**OGUM: UM FRAMEWORK PARA
COBERTURA DE ÁREA UTILIZANDO UM
CONJUNTO DINÂMICO DE VANTS**

Grazieno Barbosa Pellegrino Ribeiro

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Salvador
11 de dezembro de 2020

GRAZIENO BARBOSA PELLEGRINO RIBEIRO

**OGUM: UM FRAMEWORK PARA COBERTURA DE ÁREA
UTILIZANDO UM CONJUNTO DINÂMICO DE VANTS**

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Flávio Morais de Assis Silva

Salvador
11 de dezembro de 2020

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Universitária de
Ciências e Tecnologias Prof. Omar Catunda, SIBI - UFBA.

R484 Ribeiro, Grazieno Barbosa Pellegrino

Ogum: Um *framework* para cobertura de área utilizando um conjunto dinâmico de VANTS / Grazieno Barbosa Pellegrino Ribeiro. – Salvador, 2020.

69 f.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Morais de Assis Silva.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Instituto de Matemática e Estatística, 2020.

1. Ciência da Computação. 2. Sistemas Computacionais. I. Silva, Flávio Morais de Assis. II. Universidade Federal da Bahia. III Título.

CDU – 681.5

TERMO DE APROVAÇÃO

GRAZIENO BARBOSA PELLEGRINO RIBEIRO

OGUM: UM FRAMEWORK PARA COBERTURA DE ÁREA UTILIZANDO UM CONJUNTO DINÂMICO DE VANTS

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada adequada à obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal da Bahia.

Salvador, 11 de dezembro de 2020



Prof. Dr. Flávio Morais de Assis Silva
Universidade Federal da Bahia



Prof. Dr. Allan Edgard Silva Freitas
Instituto Federal da Bahia



Profa. Dra. Daniela Barreiro Claro
Universidade Federal da Bahia

À minha Mãe, Everilda Barbosa Pellegrino, por todo incentivo, coragem, alegria, apoio, dedicação e carinho, em todos os momentos de minha vida.

AGRADECIMENTOS

À minha Esposa, amiga e companheira de todas as horas, Hivanna Nascimento Santos Pellegrino, por todo apoio, paciência, conselhos, carinho e amor. Esses sentimentos foram agigantados ainda mais depois do nascimento do nosso pequeno, Pedro Santos Pellegrino.

Ao meu Tio, grande mestre e exemplo, Egnaldo Barbosa Pellegrino, por todo colossal incentivo à minha educação, pela sua generosa amizade e permanente orientação, desde os meus tempos de adolescente.

Agradeço ao Professor Flávio Assis, pela orientação acadêmica, conversas fundamentais para a realização deste trabalho, contribuindo grandemente para meu crescimento intelectual. Agradeço também pela sua paciência, dedicação, apoio e incentivo ao longo de todo esta jornada. Sua presença foi fundamental para a realização deste trabalho.

Agradeço também aos Professores Sérgio Gorender e Alírio Sá, pelas críticas e sugestões que tanto contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Agradeço a todos os colegas do PGCOMP, estudantes e demais professores, pelos conselhos, conversas de corredor, dicas e por todo convívio durante esta jornada.

O mais importante da vida não é a situação em que estamos, mas a direção para a qual nos movemos.

—OLIVER W. HOLMES

RESUMO

A coordenação de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) cooperativos tornou-se uma área ativa de pesquisa. As abordagens para coordenar esses enxames geralmente incluem uma solução para uma classe de problemas chamada Cobertura de Área. Os problemas de Cobertura de Área consistem na obtenção de informações sobre uma determinada área de interesse (comumente um polígono ou um poliedro) por meio de um conjunto de VANTs, geralmente com coordenação descentralizada e mínima intervenção humana. Problemas de Cobertura de Área representam os requisitos de diferentes tipos de aplicações, como no caso de emergências e desastres, detecção de vazamento de gás, resgate de pessoas perdidas, entre muitos outros. As soluções existentes para estes problemas normalmente consideram um conjunto fixo de VANTs, que estão sujeitos a riscos diversos durante a missão de cobertura. Nesta dissertação, descreve-se uma estratégia para coordenar conjuntos dinâmicos de VANTs para resolver um problema específico de Cobertura de Área. Em conjuntos dinâmicos, os VANTs podem entrar ou sair do conjunto. Para implementar a estratégia, um *framework* foi desenvolvido utilizando ROS e Gazebo. O *framework* *Robotic Operating System* (ROS) é um conjunto de bibliotecas e ferramentas para robôs. As missões de Cobertura de Área são reproduzidas no ambiente de simulação Gazebo. O *framework* facilita a implementação de diferentes estratégias para a coordenação de múltiplos VANTs. Como forma de avaliação da estratégia adotada, foram adotados mapas de calor que representam o movimento dos VANTs no plano.

Palavras-chave: VANT, enxame, enxames dinâmicos, cobertura de área, mapa de calor.

ABSTRACT

The coordination of cooperative Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) has become an active area of research. Approaches to coordinating these swarms often include a solution to a class of problems called Area Coverage. Problems in this class consist of obtaining information about a specific area of interest (usually a polygon or polyhedron) through a set of UAVs, usually with decentralized coordination and minimal human intervention. Area coverage problems model the requirements of different types of applications, such as in the case of emergencies and disasters, gas leak detection, rescue of lost people, among many others. Existing solutions to these problems usually consider a fixed set of UAVs, which are subject to different risks during the coverage mission. In this dissertation, a strategy to coordinate *dynamic* sets of UAVs to solve a specific Area Coverage problem is described. In these dynamic sets, UAVs can enter or leave the set. To implement the strategy, a framework was developed using ROS and Gazebo. The framework ROS is a set of libraries and tools for robots. Area Coverage missions are executed in the Gazebo simulation environment. The framework facilitates the implementation of different strategies for coordinating multiple UAVs. We introduced *heat maps* to assess the quality of the adopted strategy. A heat map represents the movement of UAVs in the plan.

Keywords: UAV, swarm, dynamic swarms, area coverage, heat map.

SUMÁRIO

Capítulo 1—Introdução	1
1.1 Conjunto de VANTs	1
1.2 Coordenação de Conjuntos Dinâmicos de VANTs	3
1.3 Contribuições desta Dissertação	5
1.4 Estrutura da Dissertação	5
Capítulo 2—Cobertura de Área com VANTs	7
2.1 Problemas de Cobertura de Área	7
2.1.1 Cobertura Estática	8
2.1.2 Cobertura Dinâmica	9
2.1.3 Vigilância Persistente	9
2.1.4 Tarefa de Cobertura	10
2.1.5 Cobertura de Terreno	10
2.1.6 Controle de Cobertura	11
2.2 Cobertura da Área de Interesse	11
2.2.1 Decomposição de Área	11
2.2.2 Movimentação na Região	13
2.3 Estratégias para evitar Colisão	16
2.4 Sincronização de mapas	17
2.5 Métricas para avaliação de estratégias de Cobertura	18
2.6 Plataformas de Simulação	19
Capítulo 3—Uma Estratégia para o Problema de Cobertura Simples de Área	21
3.1 Definições Básicas e Notação	21
3.1.1 Área de interesse	21
3.1.2 VANT	21
3.1.3 Estação base	23
3.1.4 Conjunto ativo de VANTs	24
3.1.5 Configurações	24
3.2 O Problema de Cobertura Simples de Área	24
3.3 Estratégia Geral para o Problema de Cobertura Simples de Área	25
3.3.1 Decomposição de Área	26
3.3.2 Movimentação na Região	26
3.3.3 Completando a cobertura de uma Região	27
3.3.4 Completando a cobertura da Área de Interesse	27

Capítulo 4—Framework Ogum	29
4.1 Arquitetura Geral	29
4.1.1 <i>Framework</i> Ogum	29
4.1.2 ROS e Gazebo	30
4.1.3 Drone <i>Middleware</i>	31
4.1.4 Coordenação de vários VANTs para cobrir uma área	31
4.2 Experimentos e Resultados	32
4.2.1 Cenários de Simulação	32
4.2.2 Discussão	33
4.2.3 Mapas de Calor	35
Capítulo 5—Conclusão	37
5.1 Trabalhos Futuros	38
5.2 Publicação	39

LISTA DE FIGURAS

1.1	Exploração futura de VANTs para cidades (Elbanhawi et al., 2017).	2
1.2	Ambiente de simulação ROS/Gazebo (Robotics, 2020; OSRF, 2020).	5
2.1	Diferenças entre cobertura estática e dinâmica (Chen, Zhang e Xu, 2014).	8
2.2	Diagramas de Voronoi para um conjunto dinâmico de VANTs.	13
2.3	Abordagem para regiões de Voronoi de tamanhos equivalentes (Chen, Li e Zhuo, 2017).	14
2.4	Movimentos da abordagem <i>Geométrica</i> (Cabreira e Ferreira, 2016).	14
2.5	Cobertura completa de uma região.	15
2.6	Abordagem Geométrica híbrida. O ponto A representa o início e o fim do percurso (Kadioglu, Urtis e Papanikolopoulos, 2019).	16
2.7	Movimentos da abordagem <i>Pesquisa em Tempo Real</i> (Cabreira e Ferreira, 2016).	17
2.8	Exemplo de Sincronização de mapas (Vargas et al., 2019).	18
2.9	Média de concentração de gás em cada região (Yu et al., 2018).	19
3.1	Representação em 3D da área de interesse (Jin, Wu e Fan, 2014).	22
3.2	Tipos de comunicação entre VANTs e estação base (Elbanhawi et al., 2017).	24
4.1	Arquitetura geral do <i>framework</i> Ogum.	30
4.2	Número de VANTs X Tempo.	33
4.3	Número de VANTs X Média de Visitas.	35
4.4	Representação de movimentos com Mapas de Calor	36

LISTA DE TABELAS

4.1	Resumo das missões realizadas.	34
-----	--	----

LISTA DE SIGLAS

GCS <i>Ground Control System</i>	23
GPS <i>Global Positioning System</i>	2
IMU <i>Inertial Measurement Unit</i>	2
ISTAR <i>Intelligence, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaissance</i>	3
MAV <i>Micro Aerial Vehicles</i>	1
ROS <i>Robotic Operating System</i>	4
RPA <i>Remotely Piloted Aircraft</i>	1
RPAS <i>Remotely Piloted Aircraft System</i>	1
SAR <i>Save and Rescue</i>	3
UAS <i>Unmanned Aircraft Systems</i>	1

Este capítulo introduz o presente trabalho, descrevendo a estratégia para coordenação de VANTs, as contribuições e a estrutura da Dissertação.

INTRODUÇÃO

1.1 CONJUNTO DE VANTS

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT, do termo no inglês *Unmanned Aerial Vehicle* - UAV) são aeronaves capazes de voar de forma controlada ou autônoma para cumprir determinada missão. Estes equipamentos são popularmente conhecidos como *drones*, da tradução do termo zangão, pelo ruído característico que emitem durante o voo. Diversos nomes também são utilizados na literatura para os referenciar:

- Sistemas de Aeronaves Não Tripuladas (*Unmanned Aircraft Systems* (UAS));
- Micro Veículos Aéreos (*Micro Aerial Vehicles* (MAV));
- Sistema de Aeronave Pilotada Remotamente (*Remotely Piloted Aircraft System* (RPAS));
- Aeronave Pilotada Remotamente (*Remotely Piloted Aircraft* (RPA));
- Dentre outros.

O interesse pela utilização de VANTs para resolver problemas do mundo real tem aumentado constantemente, acompanhado pela queda de preços e melhoria de desempenho de *software* e *hardware* (Chung et al., 2018; Ali, Xiaoguang e Fu, 2017; Chen, Li e Zhuo, 2017). Novos avanços tecnológicos reduziram seus custos e transformaram os VANTs de pequenas dimensões em equipamentos de uso cada vez mais comum. Estima-se que, somente nos Estados Unidos, o mercado comercial de VANTs tenha crescido de US\$ 40 milhões em 2012 para quase US\$ 1 bilhão em 2017, além de ultrapassar US\$ 12 bilhões em 2021 no mercado mundial (Chung et al., 2018). Essa indústria é o setor de crescimento mais rápido da indústria aeroespacial (Elbanhawi et al., 2017).

Estes dispositivos são relativamente insensíveis ao terreno, podem cobrir áreas extensas, carregar inúmeros tipos de sensores e equipamentos compatíveis com sua carga (Nigam, 2014; DECEA, 2017; Paula et al., 2016). Os VANTs podem ser equipados com recursos de processamento e comunicação, além de um conjunto de diferentes tipos de dispositivos, tais como câmeras, sensores de gás, laser, unidade de medida inercial (*Inertial Measurement Unit* (IMU)), câmera termal, acelerômetros, bússola e dispositivos de posicionamento (*Global Positioning System* (GPS)), tornando-os ferramentas úteis em muitos cenários de aplicação. De modo geral, os VANTs são utilizados para sobrevoar uma determinada área, coletando, processando e disponibilizando dados detectados para posterior processamento em dispositivos externos (Chen, Zhang e Xu, 2014; Jin, Wu e Fan, 2014). Tais características justificam a forte atenção recebida da comunidade acadêmica, pelo fato de que estas aeronaves estão reorganizando a maneira como diversos setores interagem com o ambiente físico (Berger et al., 2016; Rosalie et al., 2017b).

Como exemplos de potencial utilização, pode-se citar: inspeção de estruturas físicas, aplicações de visão computacional (por exemplo, identificar pontos de corrosão em materiais metálicos), detecção de vazamentos de gás, transmissão de imagens em tempo real para múltiplos usuários, segurança pública, Sistema de Informações Geográficas (SIG, do inglês *Geographic Information System* - GIS), criação de nuvens de pontos (*cloud points*), dentre outros (Fig. 1.1). Os principais casos de utilização estão nas áreas de: agricultura, militar, engenharia, topografia, resgate e monitoramento (Brust et al., 2017; Saadaoui e Bouanani, 2017).

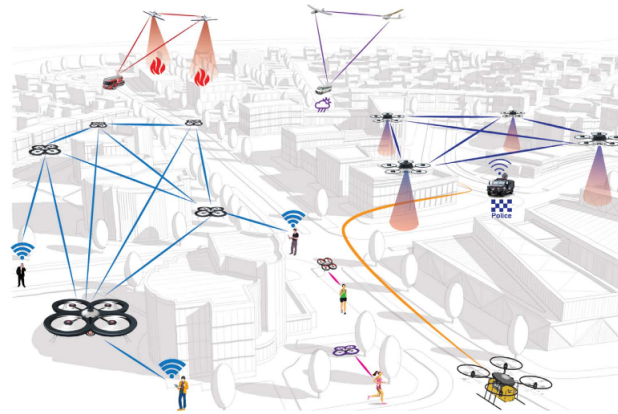


Figura 1.1: Exploração futura de VANTs para cidades (Elbanhawi et al., 2017).

Os benefícios dos VANTs são potencializados quando são usados em grupos, para obter informações sobre um espaço definido, operando cooperativamente de forma coordenada (Jin, Wu e Fan, 2014; Braga et al., 2017; Chung et al., 2018), o que ficou conhecido como enxames (no inglês, *swarms*). O objetivo de um enxame é atingir o propósito de uma *missão*, por meio do melhor uso de seus componentes de cooperação (Elbanhawi et al., 2017). O sensoriamento distribuído é uma das principais áreas de aplicações de um enxame de VANTs (Chung et al., 2018). Os enxames possuem a habilidade de obter informações de lugares disjuntos simultaneamente. Um conjunto de VANTs está menos

exposto a possibilidades de falhas (por exemplo: mecânicas, de sensoriamento ou colisão), já que existe redundância nos elementos neste agrupamento.

Um enxame é uma plataforma de computação móvel poderosa, capaz de resolver diferentes tipos de problemas. Um exemplo de uma classe de tais problemas, que é central para este trabalho, são os *problemas de Cobertura de Área* (Alami et al., 1995). Em geral, os *problemas de Cobertura de Área* referem-se àqueles problemas em que um conjunto de um ou mais VANTS voa sobre uma determinada região para cumprir um determinado objetivo (Chen, Zhang e Xu, 2014; Berger et al., 2016; Rosalie et al., 2017b). Nesta classe de problema estão as missões de salvamento e resgate (da expressão em inglês, *Save and Rescue* (SAR)) e de inteligência, vigilância, aquisição de alvos e reconhecimento (da expressão em inglês, *Intelligence, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaissance* (ISTAR)), para encontrar uma pessoa desaparecida, para detectar fogo em uma floresta ou vazamento de gás em uma planta industrial, entre muitos outros (Jin, Wu e Fan, 2014; Brust et al., 2017).

Embora os problemas dessa classe compartilhem muitas semelhanças entre si, suas particularidades definem *problemas de Cobertura de Área* específicos. Por exemplo, o problema de usar um conjunto de VANTS para encontrar uma pessoa desaparecida em uma floresta envolve coordenar os VANTS para cobrir a área para encontrar a pessoa o mais rapidamente possível e, uma vez encontrada, a missão está cumprida. A coordenação de VANTS pode ser baseada, por exemplo, na maior ou menor probabilidade de se encontrar a pessoa em determinada região. Por outro lado, em uma aplicação onde os VANTS sobrevoam uma estrada para detectar acidentes, eles devem ser coordenados para cobrir continuamente toda a área (a estrada), de forma a garantir que o tempo entre dois instantes consecutivos de monitoramento de um determinado local esteja conforme um intervalo definido. Essas particularidades exigem que decisões específicas sejam tomadas ao projetar uma solução para o problema.

Apesar do crescente interesse e diversos estudos realizados, os *problemas de Cobertura de Área* com um conjunto de VANTS ainda apresentam inúmeros desafios em aberto (Nigam, 2014). As principais dificuldades envolvem: coordenação e controle do enxame (Rosalie et al., 2017a); geração de trajetória para seus membros (Chung et al., 2018); comunicação (Mansouri et al., 2017); heterogeneidade de VANTS; aprendizado (Nigam, 2014); tipos de voos (Yang et al., 2017); decomposição do espaço (Chen, Li e Zhuo, 2017); precaução com colisões (Cabreira e Ferreira, 2016); alocação de tarefas entre os membros do enxame (Chung et al., 2018); atraso nos algoritmos de cobertura; falhas nos equipamentos; imprecisão de dados de posicionamento e gerenciamento de recursos; entre outros.

1.2 COORDENAÇÃO DE CONJUNTOS DINÂMICOS DE VANTS

Para abordar a coordenação de vários VANTS para cumprir uma missão específica, defini-se nesta dissertação um problema particular intitulado *Cobertura Simples de Área*. Este problema consiste em cobrir completamente uma determinada área de interesse por um *conjunto dinâmico* de VANTS em um tempo finito e mínimo. Cobrir completamente a área significa que cada parte da área deve ser sensoriada por pelo menos um VANT (ou

seja, capturada por seu(s) sensor(es)) no mínimo uma vez.

O problema de *Cobertura Simples de Área* utilizando enxames dinâmicos pode ser dividido em dois subproblemas principais: (i) como atribuir sub-regiões da área de interesse ao conjunto dinâmico de VANTs de forma a minimizar os movimentos (*problema de decomposição de área*); e (ii) tendo atribuído uma determinada região a um VANT, como esse VANT deve percorrer essa área (*problema de movimentação*). Entre as muitas outras questões envolvidas neste problema, a entrada e saída de membros pode inserir perturbações no sistema. Por este motivo, há um interesse particular adicional em como coordenar as tarefas de VANTs entre os membros do enxame dinamicamente e como avaliar a qualidade de uma determinada solução para o problema.

Nesta dissertação, descreve-se uma estratégia para coordenar as tarefas do enxame de tal forma que se adaptem à variação no número de VANTs que executam a missão. Ou seja, novos VANTs podem ser adicionados ao conjunto de VANTs ativos que executam a tarefa e VANTs atualmente ativos podem deixar o conjunto. Quando os VANTs deixam uma missão, os membros restantes do grupo podem ficar sobrecarregados. Adicionar novos VANTs pode permitir que a missão seja concluída mais rapidamente. Em ambos os casos, um sistema deve ser adaptável para se beneficiar ao máximo do número atual de VANTs ativos. A estratégia discutida neste trabalho é uma abordagem para atingir este objetivo.

Neste trabalho é descrito o *framework Ogum*¹, que assume como entrada uma área de busca e um enxame dinâmico de VANTs para realizar o sensoriamento completo da área informada, na forma do problema de *Cobertura Simples de Área*. O principal benefício de se utilizar um *framework* é garantir que o desenvolvedor tenha a possibilidade de utilizar o sistema de acordo com a experiência desejada. O *framework Ogum* permite que a simulação dos VANTs origine informações aderentes a um voo real, com as implicações físicas envolvidas. O *framework Ogum* coordena o conjunto de VANTs eficientemente, a fim de evitar que as regiões sejam sensoriadas de maneira redundante. Considera-se que este é um caso particular importante de problemas de cobertura de área, pois modela muitas situações importantes da vida real.

A implementação do *framework Ogum* é baseada no *framework Robotic Operating System* (ROS) (Robotics, 2020) e no ambiente de simulação Gazebo (OSRF, 2020). O ROS é um *framework* que fornece um conjunto de bibliotecas e ferramentas para o desenvolvimento de *software* para diferentes tipos de robôs. O Gazebo simula a física real dos VANTs voando em um espaço virtual. A Figura 1.2 mostra um cenário com oito VANTs modelados em ROS/Gazebo.

Em termos de decomposição de área, Ogum implementa a técnica de *diagramas de Voronoi* para alocar regiões específicas para cada membro ativo do enxame. Os diagramas de Voronoi representam uma forma de decompor um plano em um conjunto de regiões, definida pela proximidade a um conjunto de pontos (posicionamento inicial dos VANTs) (Siligardi et al., 2019). Adicionalmente, a área de busca é dividida em forma de uma grade, ou seja, quadrados contíguos de mesmo tamanho. Para a movimentação de

¹Ogum é uma divindade cultuada como Orixá em religiões brasileiras de matriz africana. Ogum é considerado senhor do ferro, da guerra, da agricultura e da tecnologia.

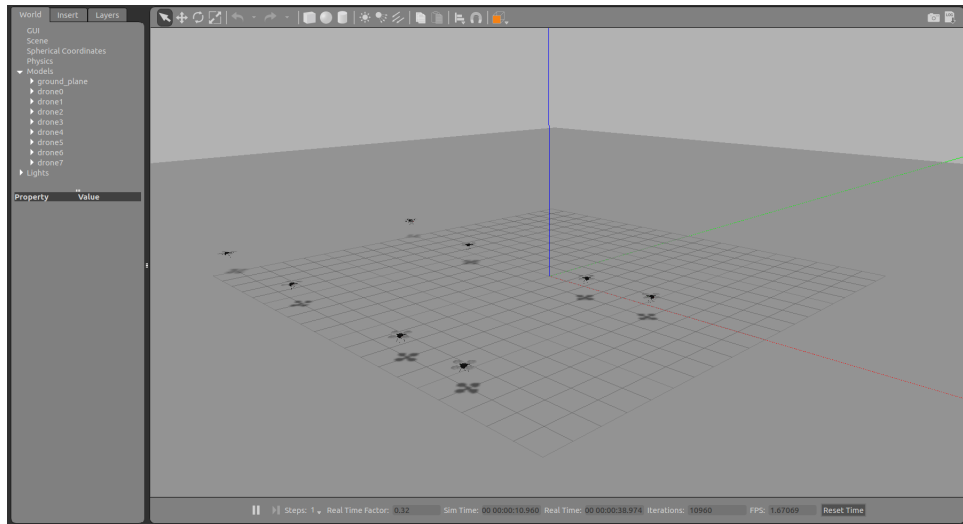


Figura 1.2: Ambiente de simulação ROS/Gazebo (Robotics, 2020; OSRF, 2020).

área, o *framework* implementa o movimento *Boustrophedon*, forma bastante estudada na literatura e capaz de reduzir o número de curvas que o VANT realiza no plano (Manerikar, Das e Banerjee, 2017). De forma geral, outras técnicas de decomposição de área e movimentação podem ser introduzidas no *framework*, ampliando seu escopo de avaliação.

No melhor do que foi pesquisado, não foi encontrado na literatura trabalhos que tenham abordado o problema como definido nesta dissertação. Em todas as outras abordagens estudadas, o conjunto de VANTs é estático, definido no início do processo de cobertura de área e sem possibilidade de troca de membros. Os módulos implementados para o ROS/Gazebo são úteis para desenvolver e avaliar diferentes estratégias para este e vários outros problemas relacionados à coordenação de VANTs. A dinamicidade no número de VANTs ativos é uma importante contribuição, já que reflete situações reais de uso.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO

As principais contribuições desse trabalho de pesquisa são:

1. O desenvolvimento do *framework* Ogum, que simula a movimentação real de VANTs;
2. Definição do problema de Cobertura Simples de Área;
3. Uma estratégia que gerencia o dinamismo no conjunto ativo de VANTs;

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A continuação deste texto se divide em mais quatro capítulos, os quais serão descritos a seguir:

- O **Capítulo 2** descreve a fundamentação teórica deste trabalho. Neste capítulo encontra-se uma apresentação sobre os principais conceitos encontrados na literatura e as principais estratégias relacionadas ao problema de *Cobertura Simples de Área*
- O **Capítulo 3** indica as definições básicas, a definição sobre o Problema de *Cobertura Simples de Área* e as decisões adotadas.
- O **Capítulo 4** apresenta a arquitetura geral do framework *Ogum*, assim como os experimentos realizados.
- Por fim, o **Capítulo 5** conclui esta dissertação. Assim, fornece as considerações finais, apresenta as contribuições científicas da pesquisa desenvolvida, indica as limitações existentes na abordagem proposta e apresenta orientações para trabalhos futuros.

Este capítulo apresenta as principais conceitos relacionados e estratégias existentes sobre o tema.

COBERTURA DE ÁREA COM VANTS

2.1 PROBLEMAS DE COBERTURA DE ÁREA

O problema de Cobertura de Área consiste em obter informações sobre uma área de interesse (polígono) ou região de interesse (poliedro) utilizando um enxame de VANTS, com coordenação descentralizada e mínima intervenção humana. Este é um problema relativamente novo, ainda pouco explorado (Chen, Zhang e Xu, 2014; Nigam, 2014; Kalyaev et al., 2017; Chung et al., 2018). Técnicas de enxame permitem que os sistemas robóticos realizem tarefas de maneira mais rápida e eficiente, reduzindo o número de agentes necessários (Fermin et al., 2017; Rosalie et al., 2017a). Esse entendimento é relevante para o problema, pois o número de VANTS tende a ser continuamente decrescido durante uma missão, já que são constantemente expostos a riscos de colisão, falhas mecânicas, intempéries, esgotamento elétrico, dentre outras adversidades (Fermin et al., 2017; Chen, Zhang e Xu, 2014; Mansouri et al., 2017).

Em termos gerais, os principais desafios de operar um conjunto de VANTS estão na elaboração de algoritmos responsáveis por permitir que membros de um enxame possam comunicar-se e decidir a alocação de tarefas entre si, planejar trajetórias livres de obstáculos e coordenar o voo em conjunto, de forma que os propósitos do enxame sejam alcançados com eficiência (Chung et al., 2018).

Existe uma série de aspectos discutidos na literatura, que, de fato, são problemas importantes para missões reais, mas ainda não estão incluídos neste trabalho. Por exemplo, o principal deles é o aspecto de gerenciamento de energia (Elbanhawi et al., 2017). Os autores (Vargas et al., 2019) indicam uma possibilidade para lidar com o problema de esgotamento energético, ao definir um problema específico de Cobertura de Área que considera estações de recarga estacionárias disponíveis na área de interesse. A alternativa de recarga de bateria nessas estações é uma opção para estender o tempo total de execução em missões reais. Esta dissertação considera que os VANTS podem atuar sem a necessidade de recarga de energia.

A relação entre maximizar a cobertura de uma área e preservar a conectividade entre os VANTS é analisada em (Chen, Zhang e Xu, 2014) e (Rosalie et al., 2017a). Para esses

autores, manter a capacidade de comunicação entre os VANTS é fundamental para obter a propagação de dados locais e, por consequência, garantir o comportamento global do enxame. Nesta dissertação, considera-se que os VANTS comunicam-se somente com a estação-base, não havendo comunicação entre si. A visão de conectividade entre VANTS é importante. Entretanto esta dissertação considera que, nos possíveis cenários em que a comunicação exista, a conexão deve ser estabelecida somente dentro de um raio de atuação definido por cada VANT. Esta conexão deve ser temporária, de acordo com o tempo necessário para o completo intercâmbio de informações entre as partes.

De forma particular, um tipo de objetivo estudado na literatura é o de Cobertura de Área. Em (Chen, Zhang e Xu, 2014), o termo Cobertura de Área, associado a uma rede de VANTS, define o objetivo conjunto de: i) monitorar completamente uma área dada; e ii) prover a habilidade de cooperação entre os membros do enxame. A Cobertura de Área é um termo amplo, que engloba dois tipos principais: *Cobertura Estática* e *Cobertura Dinâmica* (Fig. 2.1).

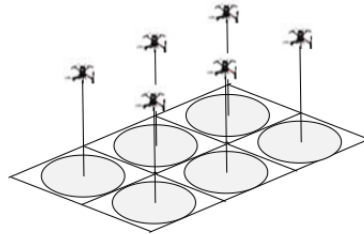


Fig. 1: Static coverage

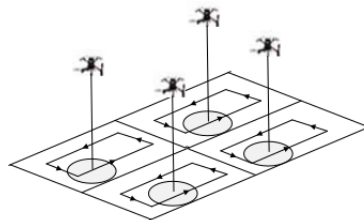


Fig. 2: Dynamic coverage

Figura 2.1: Diferenças entre cobertura estática e dinâmica (Chen, Zhang e Xu, 2014).

2.1.1 Cobertura Estática

Este é um problema clássico em rede de sensores sem fio, bastante estudado na literatura, como citado em (Nigam, 2014; Chen, Zhang e Xu, 2014). Conforme o autor, a diferença fundamental entre redes de sensores sem fio e redes de múltiplos VANTS é a mobilidade inerente aos VANTS. Em geral, seu foco está em determinar a localização ótima para sensores, de forma que a área alvo esteja completamente coberta (Maarouf, Ko e Nouh, 2019). Uma vez que a localização ideal seja atingida não há engajamento para movimentação (Sulák, Kotuliak e Čičák, 2017).

De forma abrangente, a *Cobertura Estática* pode ser entendida como um problema de posicionamento de dispositivos (por exemplo, sensores). Para cobertura de uma área utilizando VANTs, este problema pode ser mapeado em como posicionar VANTs de maneira estática, de forma que somente parem sobre pontos durante todo o tempo da missão, como nós estáticos (Chen, Zhang e Xu, 2014). Nesta configuração, o problema de *Cobertura Estática* utilizando VANTs se assemelha a uma distribuição de sensores em uma rede sem fio (Nigam, 2014).

2.1.2 Cobertura Dinâmica

Se um VANT desloca-se para novas posições durante todo o tempo da missão, a cobertura pode ser definida como dinâmica (Nigam, 2014). Este tipo de cobertura oferece a possibilidade de realizar ajustes e lidar melhor com um ambiente dinâmico, ao tratar possíveis incertezas para que toda a área fique coberta.

Segundo uma comparação dos autores em (Nigam, 2014), para monitorar uma área de mesmo tamanho, a *Cobertura Dinâmica* necessita de uma quantidade menor de VANTs do que a *Cobertura Estática*. No entanto, a primeira pode apresentar uma precisão de cobertura inferior. Os autores de (Chen, Zhang e Xu, 2014) afirmam que o problema de *Cobertura Dinâmica*, em um enxame de VANTs, pode ser dividido em duas partes principais: i) decomposição de área e ii) planejamento de caminho.

O conceito de *Cobertura de Área* utilizando um agrupamento de VANTs abrange um conjunto de conceitos relacionados, cada um deles com suas características e especificidades. Nesse sentido, existem divergências na literatura quanto à definição de termos utilizados em atividades com enxames de VANTs (Shakhatreh et al., 2016). É comum encontrar leves distanciamentos ao tratar de termos correlatos, tais como *Cobertura de Área*, *Vigilância Persistente*, *Cobertura de Terreno* e *Controle de Cobertura*, para citar alguns exemplos. Esta seção contextualiza cada um desses problemas, apontando semelhanças e diferenças com o tema proposto.

2.1.3 Vigilância Persistente

O termo *Vigilância* é definido em (Chung et al., 2018) como um problema em que um time de VANTs deve cobrir uma área, sem qualquer requisito de tempo mínimo entre visitas a uma mesma célula da área. Uma célula é a menor unidade em que uma área é dividida. O objetivo da *Vigilância* é frequentemente relacionado a potencializar alguma medida de cobertura ou de informação (Koenek, Babiceanu e Seker, 2019). Os mesmos autores de (Chung et al., 2018) consideram que a necessidade de visitar completamente uma área, em uma frequência desejada (mínima ou máxima) de visitas, está relacionada ao termo *Monitoramento Persistente*.

Por outro lado, em (Nigam, 2014), o termo *Vigilância Persistente* é definido como uma cobertura contínua de uma área alvo, tendo como objetivo principal diminuir o tempo de retorno a sub-áreas já visitadas. O trabalho citado indica que o termo frequentemente é referenciado na literatura como *Monitoramento Persistente* ou *Vigilância de Área*. Os autores em (Nigam, 2014) também indicam que *Vigilância Persistente* pode ser tratada como uma generalização do *Problema de Patrulhamento*. Outra forma mencionada de

definir o termo *Vigilância Persistente* é como manter uma fotografia viva de uma área, ou seja, não permitir que uma sub-área permaneça sem visitas durante muito tempo (frequência pré-determinada).

Supondo que a área alvo seja dividida em células de tamanhos iguais e que cada célula possua um atributo específico de idade, representado pelo tempo decorrido desde a última visita a cada célula, o termo *Vigilância Persistente* poderia ser entendido em como minimizar a maior idade de todas as células, durante um período definido de tempo, conforme o entendimento de (Nigam, 2014). Nesta dissertação, considera-se que o termo *Persistente* refere-se a uma atividade contínua no tempo ou repetitiva, relacionando-se à necessidade de frequência determinada (por exemplo, mínima ou máxima) entre visitas a uma área, assim como os autores em (Nigam, 2014).

Para tarefas de vigilância é comum utilizar *mapas de idade* ou outro tipo de informação sobre o ambiente (Chung et al., 2018). Em geral, o valor de uma célula no mapa de idade aumenta com o passar do tempo e diminui somente quando um VANT visita esta célula, recomeçando uma nova contagem (Koenke, Babiceanu e Seker, 2019). Em outro exemplo, um *mapa de probabilidade* pode consolidar o sensoriamento de diversos VANTS em relação a suas células, baseando-se na qualidade de sensores e de dados obtidos, em um conjunto heterogêneo de VANTS (Saadaoui e Bouanani, 2018).

2.1.4 Tarefa de Cobertura

Os autores em (Jin, Wu e Fan, 2014) definem o termo *Tarefa de Cobertura* como a realização de tarefas diversas através da atuação de sensores, em uma área alvo. Os autores propõem uma estratégia colaborativa, distribuída e em tempo real para um agrupamento de VANTS. No mesmo sentido, similarmente definem o termo *Tarefa de Cobertura Persistente* para um enxame de VANTS, como um tipo de tarefa de cobertura dinâmica, na qual a área de interesse é continuamente e frequentemente coberta. Os autores citam que o objetivo pode ser definido em como minimizar o intervalo de tempo entre duas visitas em uma mesma região da área de interesse.

2.1.5 Cobertura de Terreno

O problema de *Cobertura de Terreno* tem como foco encontrar um caminho para percorrer uma área, passando por todos os locais dentro desta área (Cabreira e Ferreira, 2016; Koenig e Liu, 2001). Além deste escopo, seu objetivo também é localizar eventos dentro da área percorrida. Este problema já foi discutido amplamente para veículos terrestres (Cabreira e Ferreira, 2016). Por este ângulo, o conceito de *Cobertura de Terreno* é próximo ao de *Cobertura de Área* (Cabreira e Ferreira, 2016). Outro ponto de alinhamento entre os conceitos são os domínios de utilização: detecção de incêndio, missões de salvamento e resgate, imagens aéreas, para citar alguns. Por outro lado, o trabalho (Vasquez-Gomez, Herrera-Lozada e Olguin-Carbajal, 2017) referencia o termo *Cobertura de Terreno* como um problema relacionado a métricas ótimas de altura e velocidade para obtenção de imagens para a construção de um mapa 2D.

2.1.6 Controle de Cobertura

O *survey* apresentado em (Huang, Teo e Leong, 2017) conceitua *Controle de Cobertura* como o problema de encontrar uma configuração de sensores ou VANTs de forma que todo o espaço de busca ou áreas de interesse seja completamente coberto de forma contínua, minimizando o custo operacional. Esta abordagem possui aspectos de semelhança com *Cobertura Estática* e *Vigilância Persistente*. De modo destoante ao contexto desta dissertação, os autores em (Brust et al., 2017) citam que é necessário considerar como improvável a cobertura completa de todo o mapa para muitos casos.

2.2 COBERTURA DA ÁREA DE INTERESSE

Um enxame de VANTs precisa definir uma estratégia de atuação em relação à área de interesse. As principais determinações estão associadas à forma com que a área de interesse será dividida entre os membros (regiões ou sub-áreas) e o modo de movimentação que cada VANT adota dentro de cada área dividida. Nesta seção, descrevem-se estratégias para: i) dividir a área a ser coberta em regiões separadas; ii) examinar essas regiões com VANTs, de modo cooperativo.

2.2.1 Decomposição de Área

Decomposição de área é entendido como o processo de dividir uma área em sub-áreas lógicas menores (Christmann e Johnson, 2010). Nesta dissertação, estas sub-áreas são denominadas *regiões*. Dentro do problema de *Cobertura de Área*, diversos trabalhos apresentam abordagens diferentes de decomposição de áreas para VANTs (Tong et al., 2012; Mansouri et al., 2017; Berger et al., 2016).

O trabalho de (Mansouri et al., 2017) cita a alternativa de dividir a área em quadrados de tamanhos iguais, assim como em (Saadaoui e Bouanani, 2018), mesmo que as posições iniciais sejam próximas. Por outro lado, o trabalho de (Berger et al., 2016) adota a possibilidade de alocar área a cada integrante do enxame, levando em consideração as características de cada VANT, como, por exemplo, a capacidade de bateria que impacta no tempo de voo restante. Este exemplo reforça a ideia de que atributos específicos de missão ou mesmo a heterogeneidade dos dispositivos podem ser considerados critérios para alocação de área (Nigam, 2014).

No mesmo sentido, o trabalho de (Kalyaev et al., 2017) menciona a opção de segmentar a área em retângulos. O número de VANTs necessário para a tarefa define o número de retângulos em que a área será dividida. De modo inicial, uma fórmula define o número exigido de VANTs para cobrir a área, de acordo com a relação entre a largura da área de interesse e a capacidade de monitoramento de um único VANT. Em seguida, de posse dessa quantidade, os VANTs são designados para o centro de cada retângulo criado. Os autores em (Chevet et al., 2018) também seguem a mesma linha, ao descreverem a utilização de técnica similar para conjuntos dinâmicos de VANTs, de forma a decompor a área de interesse em regiões, conforme a quantidade de membros disponíveis.

Os autores em (Tong et al., 2012) afirmam que *diagramas de Voronoi* são largamente escolhidos na literatura como opção para a tarefa de decomposição de área. De fato,

muitos trabalhos referentes a VANTs baseiam suas tarefas de decomposição de área nesta forma (Davis et al., 2012; Chen e Chen, 2014; Huang, Teo e Leong, 2017; Chen, Li e Zhuo, 2017; Darbari, Gupta e Verma, 2017). Os *diagramas de Voronoi* representam uma estrutura geométrica em que o plano é particionado em um conjunto de *regiões*¹. A decomposição em regiões é feita a partir de um conjunto de *nós de entrada*, posicionados no plano. Cada *nó de entrada* é separado de seus vizinhos por linhas equidistantes uns dos outros, formando as bordas das regiões (Siligardi et al., 2019). Nesta dissertação, os *nós de entrada* são representados pela posição inicial dos VANTs na área de interesse.

Nesse sentido, define-se $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ um conjunto de pontos no plano. Cada ponto p em P representa o posicionamento de um VANT. Seja R_i , a região de Voronoi alocada para o ponto p_i na área de interesse. Esta região R_i representa o conjunto de pontos q do plano que estão mais próximos de p_i do que de qualquer outro ponto p integrante de P . Dessa forma, a região R_i para o ponto p_i é determinada por $R_i = \{q \mid \|p_i q\| < \|p_j q\|, \text{ para qualquer } j \neq i\}$, onde pq indica a distância entre os pontos p e q no plano (Davis et al., 2012).

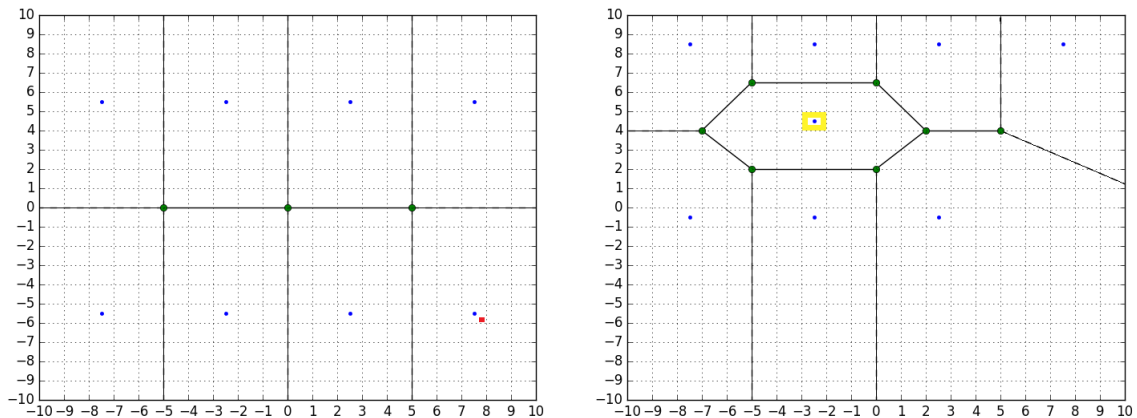
Os *diagramas de Voronoi* têm três propriedades úteis para o *Problema de Cobertura Simples de Área*. Primeiro, as células localizadas dentro de uma região de *Voronoi* estão mais próximas ao VANT que originou aquela região do que de qualquer outro VANT no plano. Segundo, as regiões podem ser calculados *localmente*, ou seja, a região a ser atribuída a um determinado VANT pode ser calculada apenas com base na posição atual deste VANT e dos VANTs em sua vizinhança (Chen, Li e Zhuo, 2017; Maarouf, Ko e Nouh, 2019; Srivastava et al., 2019). Esse comportamento localizado pode diminuir a quantidade de dados a ser trocada entre os VANTs e a estação base e, assim, melhorar a escalabilidade. Terceiro, as regiões geradas são convexas. Este fato implica que o movimento dos VANTs acontece completamente dentro de suas regiões, pois todas as linhas que conectam dois pontos dentro da mesma região terão *todos os pontos* dentro da região (Chen, Li e Zhuo, 2017; Davis et al., 2012).

Como exemplo, a Figura 2.2 ilustra uma reconfiguração das regiões a serem cobertas por um conjunto de VANTs, utilizando *diagramas de Voronoi*. A Fig. 2.2a representa a configuração inicial dos VANTs. Os pontos azuis representam o posicionamento inicial de 8 VANTs. A Fig. 2.2b representa o estado do sistema após: (a) a inclusão de um novo VANT (destacado com um fundo amarelo); (b) a exclusão de um dos VANTs ativos (aquele marcado com um quadrado vermelho em 2.2a); e (c) o movimento dos VANTs restantes (todos eles moveram um conjunto de células para o norte). Na Fig. 2.2b pode-se ver o novo diagrama de Voronoi calculado, que define qual região cada um dos VANTs irá cobrir.

É importante frisar que a abordagem de *diagramas de Voronoi* não garante que as regiões formadas sejam de tamanhos iguais. O tamanho de cada região dependerá das posições dos *nós de entrada*. Um conjunto de *nós de entrada* deve ser informado como entrada para a decomposição de área.

Abordagens alternativas podem ser usadas para garantir certas relações entre os ta-

¹Essas regiões são comumente chamadas de *células*. Este termo não será usado para evitar confusão com células de grade.



(a) Divisão de área para o conjunto inicial de VANTs. (b) Divisão de área depois da inclusão e exclusão de um VANT.

Figura 2.2: Diagramas de Voronoi para um conjunto dinâmico de VANTs.

manhos das regiões de *Voronoi*, como citam, por exemplo, os autores em (Chen, Li e Zhuo, 2017). Este trabalho propõe como escopo uma alternativa de algoritmo que garante que todas as regiões de *Voronoi* sejam de tamanhos equivalentes (Fig. 2.3). A abordagem altera iterativamente as regiões de *Voronoi*, ao promover sucessíveis ajustes no posicionamento dos *nós de entrada* (ex.: VANTs), através da troca de informações locais, com o propósito de obter regiões próximas em tamanho. (Chen, Li e Zhuo, 2017).

Outro aspecto importante a ser discutido é o formato das regiões de *Voronoi* geradas. Por exemplo, ao comparar com a figura de um retângulo, as regiões de *Voronoi* normalmente apresentam estruturas irregulares, formadas com *pontas* que podem representar dificuldade de sensoriamento. À medida que VANTs entram e saem do conjunto ativo, mais as áreas podem apresentar essas estruturas irregulares. Caso não haja inserção e remoção de VANTs, a figura geométrica é um retângulo, o que torna as regiões em estruturas mais regulares.

2.2.2 Movimentação na Região

Ao percorrer o espaço dividido em grade, cada VANT deve decidir qual direção seguir para percorrer toda a região. Esta decisão envolve avaliar as células adjacentes e determinar a próxima célula de destino. O objetivo primordial é direcionar o VANT para áreas ainda não visitadas ou pouco visitadas na grade.

Em (Cabreira e Ferreira, 2016), seis alternativas para cobertura cooperativa de terrenos são discutidas, sendo duas *Geométricas* e quatro baseadas em *Pesquisas em Tempo Real*. As principais abordagens citadas para movimentação no espaço para a abordagem *Geométrica* são *Boustrophedon* e *Circular*. Para a abordagem de *Pesquisas em Tempo Real*, a principal é a baseada em *Feromônios* (Cabreira e Ferreira, 2016).

As abordagens *Geométricas* seguem passos pré-determinados no plano, constituindo

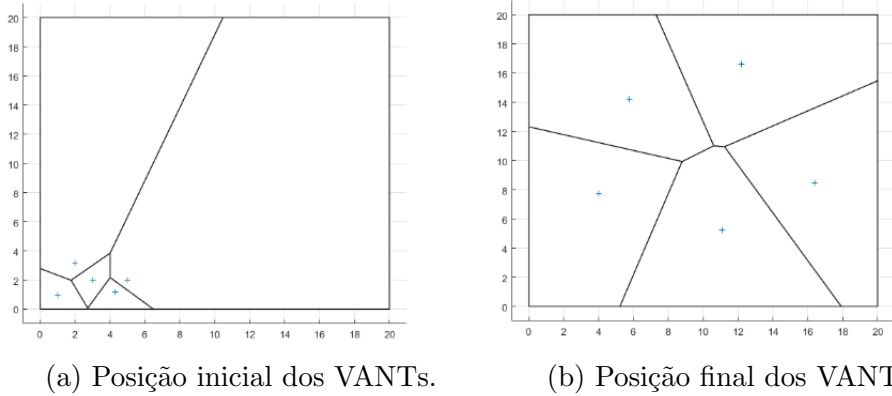


Figura 2.3: Abordagem para regiões de Voronoi de tamanhos equivalentes (Chen, Li e Zhuo, 2017).

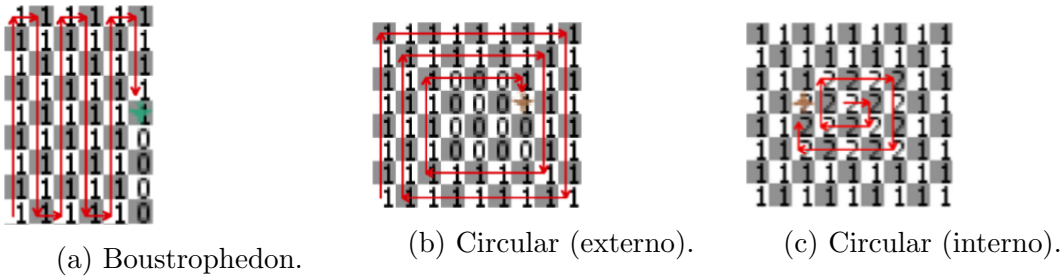


Figura 2.4: Movimentos da abordagem *Geométrica* (Cabreira e Ferreira, 2016).

movimentos de padrão fixo, com pouco custo computacional, de simplicidade de entendimento e de implementação (Sulák, Kotuliak e Čičák, 2017) (Fig. 2.4). O movimento *Boustrophedon* é executado em duas fases alternadas (Choset e Pignon, 1998; Cabreira e Ferreira, 2016). Durante a primeira fase, partindo de sua posição atual, o VANT move-se para o norte até atingir o limite de sua região. Quando isso acontece, o VANT desloca-se uma célula da grade para o leste. Na segunda fase, o VANT move-se para o sul, até atingir novamente o limite de sua região. Quando isso acontece, o VANT desloca-se uma célula para o leste e reinicia todo o processo, movendo-se para o norte novamente. O procedimento do movimento é encerrado quando a direção muda, mas o VANT não pode se mover porque a primeira célula naquela direção já foi visitada ou não está na região do VANT.

Destaca-se que, dependendo da posição inicial na área de interesse, algumas das células da grade em uma região de VANT podem permanecer sem serem visitadas, quando a movimentação em *Boustrophedon* é utilizada. A Fig. 2.5 ilustra essa situação. Nesta figura pode-se ver o ponto inicial em azul, o caminho percorrido com uma linha vermelha e o ponto final com um "x" vermelho. Verifica-se, portanto, que as células fora desse trajeto permaneceram sem sensoriamento. Por exemplo, essa situação acontece quando a cobertura inicia em uma célula central da região.

O padrão *Boustrophedon* é reconhecido por manter uma sobreposição ordenada entre

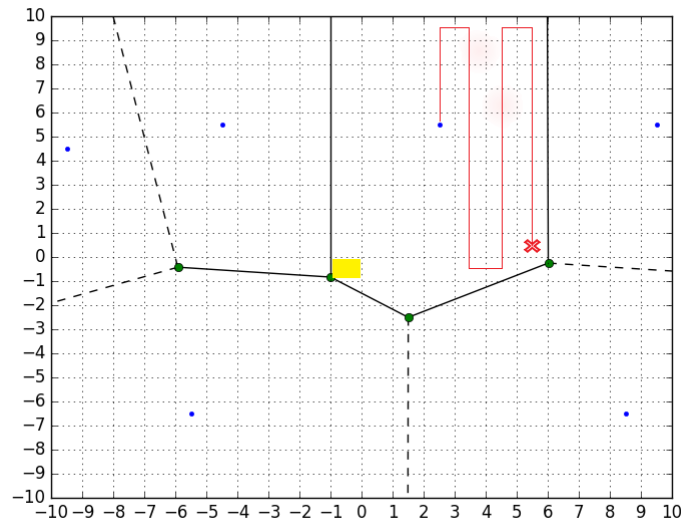


Figura 2.5: Cobertura completa de uma região.

as informações sensoriadas (por exemplo, imagens, dados de sensoriados) e reduzir o número de curvas que o VANT deve realizar no plano (Vasquez-Gomez, Herrera-Lozada e Olguin-Carbajal, 2018; Choi et al., 2019). Por sua vez, o padrão *Circular* pode ter dois sentidos de movimentação: i) externo-interno (Fig. 2.4 (b)) e ii) sentido interno-externo (Fig. 2.4 (c)).

Na literatura, há um tipo híbrido de movimentação *Geométrica*, representando uma possibilidade intermediária entre o *Boustrophedon* e o *Circular*, citado em (Kadioglu, Urtis e Papanikolopoulos, 2019). O percurso definido envolve parte do movimento em círculo, na sua fase inicial e final, sendo a parte intermediária em *Boustrophedon* (Fig. 2.6). Os pontos de partida e de chegada são os mesmos. O movimento circular inicial é originado no extremo esquerdo superior da figura e segue até o extremo direito inferior, envolvendo a grade. A partir desse ponto, o deslocamento é feito por *Boustrophedon*, da direita para a esquerda, até o encontro com o ponto do partida. Segundo os autores, o objetivo do trabalho é encontrar um caminho de cobertura mais curto para um único VANT.

Por outro lado, uma opção de movimentação são os algoritmos baseados em *Pesquisa em Tempo Real*. Estes algoritmos utilizam o comportamento de feromônios para indicar a próxima célula de deslocamento, à medida que cada célula da grade pode registrar uma série de informações, como a quantidade de vezes que já foi visitada, o tempo desde a última visita ou mesmo uma métrica consolidada dos VANTs que passaram pela célula. Esta técnica funciona como um canal indireto de comunicação entre os membros do enxame (Cabreira e Ferreira, 2016). O objetivo é o deslocamento de VANTs preferencialmente para áreas inexploradas ou pouco visitadas no cenário (Cabreira e Ferreira, 2016).

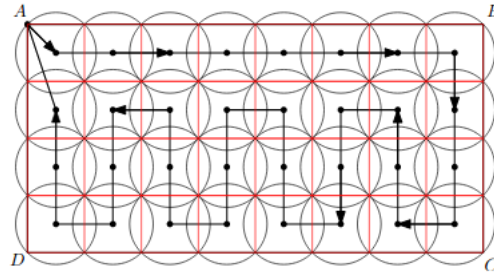


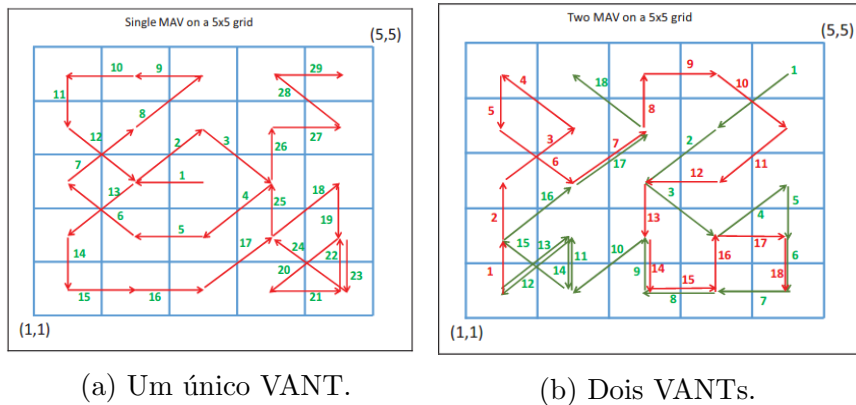
Figura 2.6: Abordagem Geométrica híbrida. O ponto A representa o início e o fim do percurso (Kadioglu, Urtis e Papanikolopoulos, 2019).

Um VANT deposita simbolicamente feromônios em uma célula quando ela é visitada, de modo que uma célula com muitos feromônios significa um grande número de visitas já realizadas, enquanto que uma célula com poucos feromônios indica uma célula pouco ou não visitada. De posse dessas informações, os VANTS podem direcionar-se para a célula adjacente com o valor que maximize ou minimize uma métrica definida para a missão. Como exemplo de movimentação, pode-se direcionar o movimento dos VANTS para células com o menor valor de visitas, incrementando este valor na célula atual antes do deslocamento para a próxima célula. Em caso de igualdade nesse número, uma célula aleatória pode ser escolhida.

Uma preocupação nesse tipo de movimento é com a possibilidade de alto número de curvas (Vargas et al., 2019). Nesse sentido, o número de curvas tende a ser maior do que a abordagem *Boustrophedon* (Koenke, Babiceanu e Seker, 2019). Os autores em (Rajan, Otte e Sofge, 2017) citam que este movimento não armazena o comportamento já realizado, de forma que é possível que sensoriem a mesma sub-área várias vezes. A Fig. 2.7 ilustra esses comportamentos. Por exemplo, na 2.7a, iniciando na célula com numeral 1 acima da linha vermelha, é possível verificar o número de curvas executadas pelo VANT a cada movimento. Na mesma figura, é possível verificar visitas redundantes às células durante o trajeto. Como exemplo, os movimentos de numerais 1 e 12 passam pela mesma célula, assim como os movimentos de numerais 3 e 25 ou os de numerais 17 e 24. A Fig. 2.7b possui o mesmo comportamento, porém com a utilização de dois VANTS.

2.3 ESTRATÉGIAS PARA EVITAR COLISÃO

Um dos artifícios para evitar colisão entre os membros de um enxame é implementar o uso do *período de guarda* (Koenke, Babiceanu e Seker, 2019), conforme descrito a seguir. Cada VANT, ao processar os dados das células adjacentes, decide para qual célula seguir e comunica aos outros membros. O *período de guarda* é um tempo em que se espera antes de realizar o deslocamento para a célula vizinha escolhida. Neste período é verificado se há alguma chance de dois membros estarem deslocando-se para uma mesma célula da área de interesse ao mesmo tempo. Este mecanismo busca evitar colisões, já que um evento de resolução de conflito é disparado quando esta situação é diagnosticada. Dessa forma, novas possibilidades de deslocamento são calculadas, a fim de se obter a garantia



(a) Um único VANT.

(b) Dois VANTs.

Figura 2.7: Movimentos da abordagem *Pesquisa em Tempo Real* (Cabreira e Ferreira, 2016).

de ausência de riscos e o procedimento é reiniciado. Entende-se esta abordagem como válida e factível para VANTs, no sentido de evitar colisões entre membros de um enxame. A implementação do *framework* Ogum adota este procedimento.

Uma outra possibilidade de evitar colisão é identificar previamente membros que eventualmente estejam na mesma direção, mas em sentidos contrários (Arul et al., 2019). Os autores inicialmente detectam os obstáculos da área e traçam os melhores caminhos a seguir. O trabalho (Arul et al., 2019) buscou a prevenção de colisões com obstáculos de tipos fixos e móveis. Uma outra opção para evitar colisão entre membros do enxame é escalonar os VANTs em alturas diferentes.

2.4 SINCRONIZAÇÃO DE MAPAS

Existem algumas referências a sincronização de informações entre VANTs em enxames, principalmente relacionadas a mapas de visitas anteriormente realizadas. A estratégia é encontrar células ainda não visitadas ou para decidir as próximas movimentações no plano, como mostrado nos trabalhos (Saadaoui e Bouanani, 2017, 2018; Vargas et al., 2019). Normalmente, o intercâmbio de informações acontece dentro de um raio de alcance entre VANTs (Fig. 2.8). O armazenamento de mapas pode ser realizado em âmbito local (no próprio VANT) ou remoto (um repositório global). Os autores em (Vargas et al., 2019) citam a possibilidade de armazenamento de múltiplos mapas em um único VANT, uma cópia de mapa para cada membro em que houve interação. A sincronização dos mapas internos é feita quando novas interações são realizadas entre os VANTs relacionados. Entende-se que esta arquitetura pode ser factível, mas é necessário preocupar-se com o espaço de armazenamento reservado para os mapas e para que o processamento dispendido nesta funcionalidade não atrapalhe os controles básicos de deslocamento dos VANTs. Sabe-se que os recursos computacionais em um VANT são limitados e, por este motivo, devem ter critérios de utilização controlados.

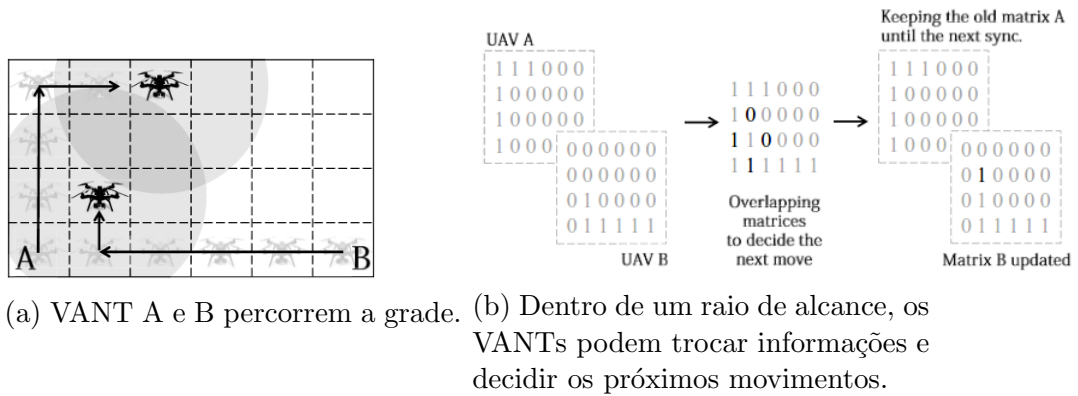


Figura 2.8: Exemplo de Sincronização de mapas (Vargas et al., 2019).

2.5 MÉTRICAS PARA AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE COBERTURA

Para avaliação da solução de cobertura de área com VANTs, algumas métricas podem ser indicadas para aferição de qualidade, tais como: número médio de visitas a células, desvio padrão do número de visitas, tempo mínimo para realização da cobertura, número mínimo de VANTs utilizados na missão, idade mínima ou máxima entre visitas, entre outras opções (Nigam, 2014; Brust et al., 2017; Rosalie et al., 2017a; Li, Li e Chen, 2018; Vargas et al., 2019). Nesse sentido, métricas são utilizadas para avaliar as estratégias adotadas nas simulações. Nesta dissertação, o tempo de cobertura de área e a ocorrência de visitas redundantes a células da área de interesse são as métricas a serem avaliadas. Em relação ao número de visitas, valores de visitas a células iguais a 1 são o objetivo a ser perseguido.

Mapas de calor são um tipo de ferramenta de visualização de dados que basicamente usa uma matriz de células para apresentar o valor ou a intensidade dos dados por meio de cores. Esta forma de representação permite visualizar relacionamentos e tendências em uma série de dados. A associação entre um gradiente de cores e a posição relativa das células na matriz permite conclusões sobre o conjunto de dados em geral, bem como sobre algumas situações localizadas. Por exemplo, na Fig. 2.9, cores próximas ao vermelho indicam maiores concentrações de gás. Em contrapartida, cores mais próximas ao azul apresentam menores concentrações. O mapa de calor de visitas (Cabreira e Ferreira, 2016) informa o número de visitas que uma célula já recebeu, incrementado seu valor a cada visita de um VANT.

O trabalho em (Yu et al., 2018) apresenta uma métrica, que, adicionalmente, também é utilizada para variar a velocidade de movimentação dos VANTs em uma sub-área específica. Os autores abordam um sensoriamento em uma área de interesse e, através de uma função específica, indicam uma alteração imediata na velocidade do VANT. Por exemplo, regiões com maiores valores para a métrica definida devem ser sensoriadas mais lentamente, a fim de garantir melhores resultados de sensoriamento. Por outro lado, regiões com dados que apresentam menores valores podem ser rapidamente visitadas. Este é um caso de *métrica ativa*, ou seja, em que o resultado do sensoriamento interfere

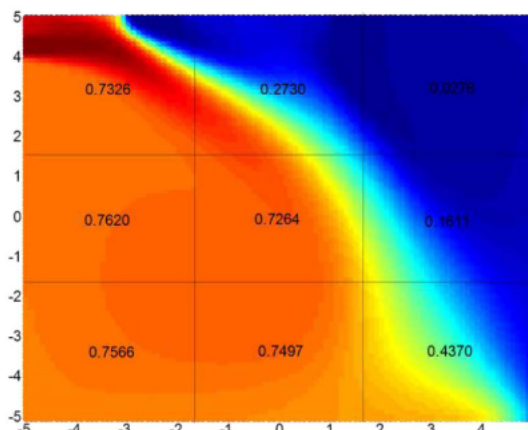


Figura 2.9: Média de concentração de gás em cada região (Yu et al., 2018).

proativamente no resultado da cobertura, de forma instantânea. Normalmente, os dados de métricas são consolidados para avaliação em relatórios posteriores.

2.6 PLATAFORMAS DE SIMULAÇÃO

Normalmente, os resultados técnicos de experimentos são limitados quando executados em simuladores ou ambientes de laboratório. Porém, existem inúmeras barreiras técnicas em manipular vários VANTs em um cenário real, de forma que poucos sistemas foram testados dessa forma. Mesmo para casos de sucesso, a escala de uso foi limitada a menos de dez VANTs (Chung et al., 2018). Mesmo neste cenário, simulações são uma forma usual de validar abordagens propostas (Nigam, 2014). Nesse sentido, os autores em (Shakhatreh et al., 2016; Rosalie et al., 2017a; Chung et al., 2018) apontam que a tarefa de simulação para um enxame de VANTs é importante para avaliar as atividades de aprendizagem sobre o ambiente e de tomadas de decisão dos seus membros, conduzindo a melhores níveis de flexibilidade. Do mesmo modo, a tarefa de simulação tem por objetivo reduzir riscos e custos, além de examinar diferentes fatores que podem impactar uma operação real. Esses fatores podem ser representados e qualificados na forma de requisitos, tais como: segurança, robustez, comportamento, estabilidade, sincronização e controle.

A autonomia de um enxame de VANTs pode ser caracterizada pela forma como seus elementos lidam com incertezas no ambiente, falhas de *hardware*, administração de energia, dados de sensores, processamento, classificação e respostas a alterações no ambiente, bem como tratam a comunicação e o processo de aprendizagem cooperativa do ambiente, em tempo de voo (Chung et al., 2018). As atividades de tolerância a falhas, isolamento e recuperação devem ser tratadas em nível de sub-sistemas, individual e coletivo (Chung et al., 2018). Essas atividades podem ser organizadas, repetidas e avaliadas através de simulação, de modo que sua operação concreta atinja seus objetivos com maior segurança (Shakhatreh et al., 2016).

Os principais ambientes de simulação utilizados nos trabalhos relacionados foram: i)

Matlab; ii) Plataforma própria; iii) PyGame; e, iv) ROS/Gazebo. No melhor do que foi pesquisado, ainda faltam referências (*surveys*) para comparação entre plataformas de simulação. Existe uma lacuna em avaliações técnicas de trabalhos, que apontem critérios específicos para a escolha de um simulador para VANTS.

A escolha pelo ambiente ROS/Gazebo, para esta dissertação, considerou a maturidade desses projetos, a ampla comunidade envolvida em seu desenvolvimento e a sua aderência às particularidades da estratégia proposta. Este *framework* utiliza cenários realistas, possui suporte a diferentes motores de física, simula aspectos físicos do ambiente e permite realizar o desenvolvimento de algoritmos de forma rápida (Robotics, 2020).

Este capítulo trata sobre as decisões adotadas para o Problema de Cobertura Simples de Área.

UMA ESTRATÉGIA PARA O PROBLEMA DE COBERTURA SIMPLES DE ÁREA

3.1 DEFINIÇÕES BÁSICAS E NOTAÇÃO

As principais premissas e termos usados na descrição da estratégia são definidos com detalhes a seguir.

3.1.1 Área de interesse

Na literatura, diversos trabalhos buscam definir formalmente o termo área de interesse, como em (Yang et al., 2017; Mansouri et al., 2017; Saadaoui e Bouanani, 2018). De forma ampla, a área de interesse pode ser entendida como toda área a ser coberta pelo conjunto de VANTs. Esta área é geralmente representada como um polígono delimitado sobre um plano ou um poliedro em um espaço 3D.

Nesta dissertação, a área de interesse é considerada como um retângulo, dividido em uma *grade* de células idênticas e contíguas. Cada célula pode receber atributos específicos, como, por exemplo, o número total de visitas, o número de vezes que um VANT em específico esteve na célula, o tempo desde a última visita, para citar alguns.

Para simplificar, e sem perder a generalidade, definiu-se que as arestas do polígono são coincidentes com as arestas das células da grade. Em geral, a grade possui o mesmo número de linhas e colunas. Durante uma missão, os VANTs podem classificar as células da área de interesse em três tipos principais: visitadas, não visitadas ou obstáculos (Chung et al., 2018). Para esta dissertação, a área de interesse é considerada livre de obstáculos.

A este plano bidimensional, estruturado em linhas e colunas, pode ser acrescentado o parâmetro de altura, inerente à atividade de VANTs, formando o plano tridimensional (3D), como ilustrado na Figura 3.1.

3.1.2 VANT

Um VANT representa um dispositivo com capacidade de processamento, comunicação, armazenamento, detecção e movimento. Os tipos principais de VANTs são os de asa

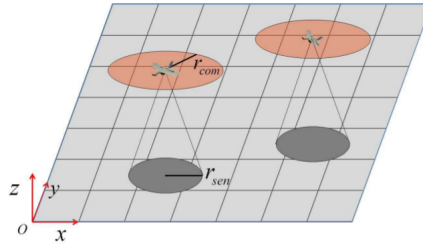


Figura 3.1: Representação em 3D da área de interesse (Jin, Wu e Fan, 2014).

fixa e os de asa rotativa (Chen, Zhang e Xu, 2014). Nesta dissertação, considera-se que o conjunto de VANTs é do tipo asa rotativa e possui características *homogêneas*, ou seja, todos os VANTs no enxame têm exatamente a mesma configuração de *hardware* e *software*. Cada VANT possui seu próprio conjunto de sensores.

Para conjuntos heterogêneos de VANTs, os autores (Bandyopadhyay e Chung, 2017; Saadaoui e Bouanani, 2017, 2018; Chung et al., 2018) também citam a possibilidade de simultaneamente obter dados de regiões disjuntas. As diferentes visões de uma mesma área viabilizam a diminuição de incertezas em relação aos dados sensorizados, melhorando a robustez dos erros dos sensores.

Cada VANT é considerado uma partícula no plano tridimensional da área de interesse. Um VANT move-se para uma célula para *sensoriá-la*, ou seja, para realizar a tarefa orientada para a missão do VANT naquela célula (por exemplo, registrar uma imagem, detectar vazamento de gás, etc). Esta ação pode gerar informações que posteriormente serão processadas para atingir um determinado objetivo. Uma vez na célula, assume-se que o VANT detectou toda a região celular. O nome dado a esta operação na célula é o de *visita*.

Um VANT pode pairar sobre uma posição fixa ou deslocar-se em uma direção específica. Ao se dirigir de uma célula para outra, um VANT sempre se move em direção ao ponto central da célula. Nesta dissertação, foi considerado que um VANT move-se apenas para uma célula adjacente em uma das quatro direções possíveis: acima (norte), abaixo (sul), direita (leste) e esquerda (oeste). Em algumas ocasiões (detalhadas em 3.3.3), um VANT pode mover-se de uma célula para alguma outra célula remota não adjacente, a fim de retomar o sensoriamento.

A energia é uma característica que deve ser considerada nos VANTs. Com tempo médio de duração de missão de cerca de 30 minutos, o controle de energia é crucial para permitir o desenvolvimento da Cobertura de Área e garantir que os VANTs possam retornar com segurança ao ponto de partida ou outro local pré-determinado (Chen, Zhang e Xu, 2014). Em termos de avanços tecnológicos, a tendência é de expansão nesse tempo médio, de forma a permitir que as missões sejam executadas em um período mais longo. Usualmente, o tempo de bateria é menor do que o tempo necessário para completar uma missão de cobertura, a depender do tamanho da área (Chen, Zhang e Xu, 2014). O monitoramento do tempo de vida da bateria de cada VANT, e do enxame como um todo, pode ser um requisito determinante para o sucesso de uma missão. O escalonamento de

tarefas do enxame pode ser afetado por esta característica. Um exemplo de abordagem nesse sentido pode indicar que o VANT com maior carga de bateria pode ser alocado para percorrer a maior distância restante para cobrir totalmente uma área de interesse.

Além da questão energética, a preocupação com colisões é uma constante em um enxame de VANTs. Quando o problema considera a existência de obstáculos na área de interesse, além de os perceber no terreno (obstáculos podem ser fixos ou móveis), os VANTs também devem evitar colidir entre si.

3.1.3 Estação base

Uma estação base, do inglês *Ground Control System* (GCS) (Sistema de Controle de Solo), é um dispositivo terrestre, localizado na borda da área de interesse, cuja principal tarefa é coordenar a execução da missão pelos VANTs. Este equipamento está associado a maior poder de processamento e capacidade energética (Elbanhawi et al., 2017).

A estação base representa um repositório central de dados no sistema, onde as informações coletadas independentemente por cada VANT são armazenadas e consolidadas. A estação base é responsável por receber, processar e compartilhar informações entre os VANTs. Cada VANT é entendido como uma única fonte de dados, de forma que todo o sistema funciona o tempo todo consolidando múltiplas fontes de dados na estação base (Gu et al., 2018; Vargas et al., 2019).

Na literatura, uma estação base pode ter características diferentes quanto a tipos de comunicação, localização e quantidade, dentre outros fatores. Quanto aos tipos de comunicação, pode ser definida como direta, satélite, celular ou malha (Fig 3.2). Quanto à localização, a estação base pode estar fixa ou deslocar-se na borda da área de interesse. Em relação à quantidade, pode haver nenhuma, uma ou mais estações base disponíveis para o enxame de VANTs na área de interesse.

Para esta dissertação, assume-se que o protótipo desenvolvido contém uma única estação base fixa, de localização externa à área de interesse e de tipo de comunicação direta (Fig 3.2 (a)). Neste tipo de comunicação, os membros do enxame podem comunicar-se diretamente com a estação-base e não há interação entre os membros.

Cada VANT é capaz de se comunicar com a estação base a qualquer momento. Os enlaces de comunicação são considerados confiáveis (não há mensagens perdidas, duplicadas ou corrompidas nos canais). A comunicação constante com a estação base também é considerada disponível em qualquer lugar da área de interesse (Koeneké, Babiceanu e Seker, 2019; Vargas et al., 2019) e, de fato, pode modelar a situação em muitos ambientes reais.

Segundo (Wang et al., 2018), comportamentos autônomos para um enxame de VANTs ainda são um problema em aberto. Por este motivo, entende-se que a existência de uma estação-base é fundamental para estruturar as políticas de decisão de cada elemento do enxame, auxiliando a atividade de cobertura de área. Em particular, uma estação base é responsável por armazenar dados de visitas e gerar mapas de cobertura para coordenar as operações dos VANTs. Uma funcionalidade de destaque é o controle de tempo global (*timestamp*) para todo o conjunto ativo de VANTs.

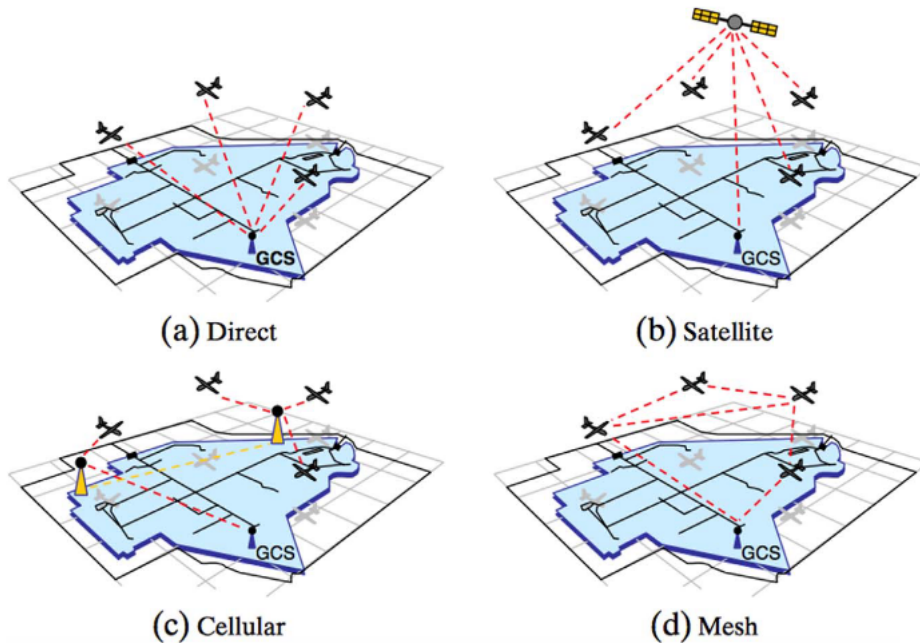


Figura 3.2: Tipos de comunicação entre VANTs e estação base (Elbanhawi et al., 2017).

3.1.4 Conjunto ativo de VANTs

A qualquer momento, há um conjunto de VANTs cobrindo a área de interesse. Este conjunto é denominado *conjunto ativo* de VANTs. Os membros deste conjunto são chamados de VANTs *ativos*. No início da operação do sistema, este conjunto não está vazio. É, entretanto, *dinâmico*: ao longo da operação do sistema, este conjunto pode mudar, com a inclusão de novos VANTs ou pela saída dos VANTs do conjunto.

3.1.5 Configurações

Uma *configuração* do sistema é uma atribuição específica de cada VANT ativo a uma célula da grade, representando a localização dos VANTs. Em geral, em qualquer dado instante, cada célula é atribuída a no máximo um VANT. Uma exceção pode ocorrer durante a movimentação de VANTs na área, em caso de ocorrência de colisão. O sistema inicia em uma *configuração inicial*. As configurações do sistema mudam à medida que o sistema evolui, pela movimentação, inclusão ou exclusão de VANTs do conjunto ativo. O sistema termina em uma *configuração final*, quando toda a área é coberta.

3.2 O PROBLEMA DE COBERTURA SIMPLES DE ÁREA

Nesta seção, define-se um problema específico de cobertura de área, delimitado a seguir, considerando as definições fornecidas nas seções anteriores.

A configuração inicial é formada por uma área de interesse, uma estação base e um conjunto de VANTs, inicialmente não vazio. Para desconsiderar uma solução trivial para

o problema, considera-se que o conjunto inicial de VANTs possui cardinalidade menor que o número de células da grade.

O problema consiste em coordenar o movimento dos VANTs para *cobrir* toda a área. A área é considerada coberta quando todas as células da grade foram visitadas por pelo menos um VANT pelo menos uma vez. Quando isso acontece, o sistema atinge uma *configuração final*. O conjunto de VANTs ativos é dinâmico. Mudanças na configuração e movimento dos VANTs ocorrem conforme descrito na Seção 3.1.

A adição de novos VANTs no conjunto ativo é feita *sem* controle do sistema. Ou seja, essas operações não são consideradas etapas básicas de uma solução, mas eventos que o sistema deve tratar. A remoção pode ser feita sob controle do algoritmo ou não. Esse comportamento modela as falhas de VANTs bem como a remoção de VANTs do conjunto porque eles não são mais necessários (por exemplo, há menos células a serem visitadas do que o número de VANTs ativos no momento). A cobertura da área deve ser realizada de tal modo que minimize o tempo necessário para que o sistema alcance a configuração final e os movimentos do VANT.

Este trabalho refere-se a esta versão específica de um problema de cobertura de área como *Problema de Cobertura Simples de Área*.

3.3 ESTRATÉGIA GERAL PARA O PROBLEMA DE COBERTURA SIMPLES DE ÁREA

Nesta seção, são destacadas as decisões adotadas nesta dissertação para: i) decomposição da área de interesse; ii) movimentação dos VANTs na região; iii) completar a cobertura de uma região; e, iv) completar a cobertura de uma área de interesse. São opções que, de fato, interferem no modo de atuação dos VANTs ao sensoriar a área de interesse.

A estratégia de cobertura de área é baseada em *mapas de cobertura*, ou simplesmente *mapas*. Um mapa de cobertura é uma representação da área em forma de grade. Existem dois tipos de mapas: *mapas de cobertura local* e o *mapa de cobertura global*. Um mapa de cobertura local é um mapa armazenado e mantido por cada VANT. Um mapa de cobertura global é um mapa exclusivo mantido pela estação base, que é usado para representar o conhecimento sobre o *status* atual do processo de cobertura da área.

O *Problema de Cobertura Simples de Área* pode ser dividido em três subproblemas principais: (a) dividir a área de interesse em um conjunto de regiões, uma para cada VANT ativo a cobrir; (b) determinar como cada VANT percorrerá sua região; e (c) redividir as regiões restantes a serem cobertas quando o conjunto de VANTs mudar ou quando uma região for completamente coberta por um VANT.

A execução é parcialmente centralizada, com etapas executadas pela estação base, e parcialmente distribuída, com etapas executadas pelos VANTs. A estação base é principalmente responsável pelos subproblemas (a) e (c). Os próprios VANTs são responsáveis pelo subproblema (b). A estação base executa sua tarefa com base no mapa de cobertura global. Os VANTs realizam suas tarefas com base em seus respectivos mapas de cobertura local.

A estratégia geral para resolver o *Problema de Cobertura Simples de Área* é descrita a seguir. Dado um conjunto inicial não vazio de VANTs ativos, cada VANT é primeiramente

posicionado na área de interesse, de forma a manter uma distância aproximadamente igual entre eles e ter uma distribuição homogênea dos VANTs sobre a área. A área é então dividida em regiões, uma para cada VANT. Os VANTs começam a percorrer suas respectivas regiões. Devido ao posicionamento inicial dos VANTs, as regiões iniciais podem ter aproximadamente a mesma área.

Durante a execução, três eventos podem ocorrer: (a) inserção de um novo VANT no conjunto; (b) remoção de um VANT do conjunto; e (c) cobertura completa de uma região por um VANT.

O sistema é reconfigurado de acordo com cada evento, conforme descrito abaixo:

1. Quando um novo VANT é inserido no conjunto, ele iniciará a execução em uma célula livre da grade (não visitada anteriormente). Toda a área de interesse é redividida, com base no posicionamento do novo conjunto de VANTs. O novo VANT começa a percorrer sua região. Os outros VANTs continuam sua execução com base na nova divisão regional.
2. Quando um VANT sai do conjunto, a área é redividida e os VANTs continuam cobrindo suas regiões.
3. Quando um VANT completa a cobertura de sua região, é atribuída a ele uma nova célula não vazia. O VANT se move para essa célula. Quando o VANT chega ao seu destino, a área de interesse é redividida e este VANT começa a percorrer sua nova região. Os outros VANTs continuam cobrindo suas regiões, com base na nova divisão.

Para cada um dos casos citados, quando a área é redividida, algumas das regiões do VANT podem ser modificadas (podem ter uma nova forma). Os VANTs cobrem sua região assumindo a nova forma estruturada. Essas etapas são repetidas até que todas as células tenham sido visitadas.

3.3.1 Decomposição de Área

Adotou-se como referência para decomposição de área a abordagem de *diagramas de Voronoi*. A principal justificativa para a escolha dessa estratégia deve-se ao fato de que, a partir de um ponto original, as células a serem percorridas estão mais próximas deste ponto do que de quaisquer outros pontos no plano. Essa característica endereça um importante fator de localidade à tarefa de sensoriamento das células. Outra justificativa é a geração de regiões convexas, ou seja, o deslocamento entre quaisquer pontos de origem e de destino sempre ocorre dentro da mesma região. Esta abordagem é, de fato, largamente utilizada em trabalhos relacionados na literatura.

3.3.2 Movimentação na Região

Para movimentação na Região foi empregado como modelo a abordagem *Geométrica* do tipo *Boustrophedon*. Como discutido na seção 2.2.2, esta abordagem possui propriedades importantes que, acredita-se, justifiquem esta decisão. São propriedades do

movimento *Boustrophedon*: redução do número de curvas realizadas pelo VANT, movimentos de padrão fixo, baixo custo computacional, simplicidade de implementação e sobreposição ordenada das informações sensoriadas (Vasquez-Gomez, Herrera-Lozada e Olguin-Carbajal, 2018; Choi et al., 2019).

Acredita-se que estas características agreguem valor à implementação proposta como uma solução para o *Problema de Cobertura Simples de Área*.

3.3.3 Completando a cobertura de uma Região

É necessário implementar uma abordagem que garanta a um VANT a cobertura completa da sua região. A depender do posicionamento inicial de um VANT na região, o movimento em *Boustrophedon* não garante a cobertura completa de todas as suas células. A cobertura completa da região é garantida através de uma consulta ao mapa local do VANT, a fim de diagnosticar o estado das células daquela região.

Determina-se uma posição vazia na região comparando-se as células visitadas no mapa de cobertura global e o mapa de regiões de Voronoi. Dessa forma, é aferido o total de células da região, a quantidade de células já visitadas e a de células livres de visitas. O conjunto com todas as células livres de visitas é o principal resultado dessa operação.

Primeiramente, o VANT escolhe uma célula não visitada dentro do conjunto de células livres de visitas, a uma determinada distância de sua posição (por exemplo, células próximas até um raio igual a 2). Se não houver, ele se moverá para a célula não visitada mais a oeste e ao sul de sua região. O VANT move-se para a célula escolhida e retoma a cobertura usando *Boustrophedon* novamente. Este procedimento é repetido até que toda a região seja coberta.

3.3.4 Completando a cobertura da Área de Interesse

Quando um VANT completa a cobertura de sua região, ele é alocado para uma célula não visitada, considerando-se toda a *área de interesse* que está mais a oeste e sul. Ao atingir aquele destino, um novo diagrama de Voronoi é calculado e os VANTs continuam cobrindo assumindo suas (potencialmente) novas regiões.

O controle de cobertura da área de interesse é feito pelos VANTs, enviando para a estação base as informações das células já visitadas. A estação base atualiza seu mapa de cobertura global, de acordo com essas informações.

Durante a cobertura de área é possível que mais de um VANT identifique uma mesma célula ainda não visitada como opção de deslocamento. Esta circunstância tende a aparecer quando a maioria das células no plano já foi visitada. Para evitar esta condição, foi implementada na estação base uma estrutura de controle que permite consolidar as próximas células alvo de todos os VANTs do conjunto ativo. Esse controle analisa as células de destino de cada VANT à medida que os dados são processados, impedindo que uma mesma célula ainda não visitada seja motivo de disputa.

Este capítulo apresenta a Arquitetura Geral da abordagem proposta, bem como trata da execução de experimentos.

FRAMEWORK OGUM

4.1 ARQUITETURA GERAL

A implementação da abordagem proposta é baseada no *framework* ROS (Robotics, 2020) e no ambiente de simulação Gazebo (OSRF, 2020). O *framework* Ogum foi implementado com código específico para coordenar o grupo de VANTs para cobertura de área. O componente `drone_middleware` (Simões e Sá, 2020), que não faz parte do escopo desta dissertação, foi utilizado para tornar mais fácil o controle e gerenciamento de vários VANTs autônomos. O *framework* Ogum interage com o componente `drone_middleware` e o *framework* ROS/Gazebo. Cada um desses elementos são descritos nas subseções a seguir.

4.1.1 Framework Ogum

Esta seção apresenta os componentes do *framework* Ogum, de forma a esclarecer as responsabilidades e funcionalidades de cada componente (Fig. 4.1).

VANT. Componente responsável pelo gerenciamento dos VANTs. Identifica cada VANT e interage com os demais componentes para a execução completa da missão.

Mapas. Componente responsável pelas operações com Mapas. Responsável pelas atividades de: a) criação de mapas de células visitadas; b) atualização de dados de visitas; c) consultas a mapas para alocação de células livres na área e d) consolidar os dados da missão para relatórios de desempenho.

Estação Base. Componente de gerenciamento de informações entre todos os VANTs. Administra os mapas em execução, regiões de Voronoi ativas, comando sobre a execução da missão, controle de alocação de células livres e marcação de tempo, entre outros.

Posicionamento. Componente responsável pelo posicionamento dos VANTs. Cada missão possui informações básicas de posicionamento, de acordo com suas especificidades. Encarregado de posicionar novos VANTs no plano.

Decomposição de Área. Componente responsável pela atribuição de diagramas de Voronoi às regiões da grade. Recebe como parâmetro o posicionamento do conjunto ativo de VANTs, definindo uma região de Voronoi a cada VANT, a qualquer momento da execução. Estabelece a relação entre diagramas de Voronoi, regiões da grade e VANTs ativos.

Movimentação de Área. Componente responsável pela estratégia de movimentação na área. Utiliza como estratégia a abordagem *Boustrophedon*. Implementa as funções de deslocamento nas quatro direções previstas: Norte, Sul, Leste e Oeste. Responsável pelas validações de: a) obedecer aos limites da área de interesse; b) permanecer na mesma região de Voronoi; c) informar para a estação base o próximo movimento planejado para um VANT; d) consultar a estação base para evitar a indicação de uma célula livre já mapeada para outro VANT (potencial colisão); e) indicar o centro da próxima célula adjacente, de acordo com o posicionamento atual.

Drone Middleware. Camada responsável pela interação com o `drone_middleware`. Esse componente recebe os parâmetros de identificação de VANT e sua célula destino, gerenciando a movimentação básica no simulador ROS/Gazebo, de acordo com a física do mundo real (aceleração, velocidade, sustentação, carga em cada multirotor etc).

Ogum. Componente principal do *framework*. Interage com todas as camadas e componentes descritos nesta seção, além de interagir com o *ROS/Gazebo*. Responsável pela inicialização de VANTs, estação base, mapas, inserção e exclusão de VANTs do conjunto ativo e funcionalidades secundárias (geração de mapas de calor, relatórios de cobertura e encerramento de missão, etc) (Fig. 4.1).

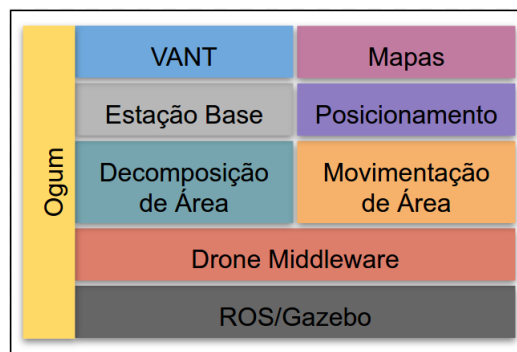


Figura 4.1: Arquitetura geral do *framework* Ogum.

4.1.2 ROS e Gazebo

O *Robot Operating System (ROS)* (Robotics, 2020) é um *framework* que fornece um conjunto de bibliotecas e ferramentas para o desenvolvimento de *software* para diferentes tipos de robôs. Dentre o seu conjunto de funcionalidades, o ROS fornece uma infraestrutura de comunicação para componentes de um projeto com base no paradigma *publish/subscribe*, recursos específicos de robôs, como uma biblioteca de geometria, navegação móvel, localização em mapas, entre outras, e ferramentas como linha de comando e ferramenta

de visualização.

Gazebo (OSRF, 2020) é um ambiente de simulação que apresenta o comportamento físico de robôs, além de fornecer uma interface programática e gráfica. No contexto deste trabalho, os robôs são VANTs do tipo multirotor. As primitivas de comunicação do ROS são utilizadas para coordenar os módulos de *software*. O Gazebo desempenha a representação física dos VANTs sobrevoando um espaço virtual.

4.1.3 Drone Middleware

O componente `drone_middleware`¹ adiciona funcionalidade ao ambiente ROS/Gazebo para fazer simulações mais fáceis com múltiplos veículos quadrotoros, para controlar seus movimentos e coletar informações dos veículos ou da própria simulação.

A geometria, a dinâmica de vôo e o controle sobre cada veículo individual são fornecidos por um componente adicional, chamado `hector_quadrotor`² (Meyer et al., 2012). Este componente adiciona aerodinâmica e propulsão como *plug-ins* Gazebo, que calculam a propulsão e o arrasto com base no estado do quadrotor, seus motores e as condições de vento simuladas. O estado do veículo é estimado por meio de um filtro de Kalman estendido, que agrega os valores medidos pelos sensores simulados (que incluem erros de medição), também implementados como *plug-ins* independentes. O controle é implementado com um conjunto de controladores Proporcional Integral Derivativo (PID) em cascata, assumindo que cada eixo pode ser controlado de forma independente.

O componente `drone_middleware` abstrai essas funcionalidades e cria uma interface de programação muito mais simples, permitindo a criação e execução mais fácil de simulações com vários veículos. O componente fornece *scripts* para configurar simulações e controlar os movimentos dos veículos com uma interface de nível superior. O movimento pode ser controlado usando uma sequência temporizada de velocidades a serem usadas pelos veículos, bem como fornecendo locais no mapa para onde os veículos devem se mover. A estrutura também permite monitorar as posições do veículo e o tempo de simulação usado pelo Gazebo (como uma sequência de etapas discretas) e suporta a geração de mapas de calor de movimento e dados de registro.

O `drone_middleware` foi usado para mover VANTs de uma posição para outra. Durante a movimentação, o componente também manteve informações sobre onde no mapa cada VANT passou. A área de interesse foi representada por uma matriz, composta por células. Cada célula tinha originalmente um valor zero. Sempre que um VANT entra em uma célula, a entrada da célula na matriz tem seu valor incrementado. A partir dessa representação, o componente gerou os mapas de calor do movimento (ver Seção 4.2.3).

4.1.4 Coordenação de vários VANTs para cobrir uma área

A coordenação de vários VANTs para cobrir uma área de interesse foi implementada como um conjunto de classes no *framework* Ogum, que usam as funcionalidades implementadas no componente `drone_middleware`, ROS e Gazebo. As classes em Ogum controlam o mo-

¹https://gitlab.com/gustavoms00/drone_middleware

²http://wiki.ros.org/hector_quadrotor

vimento dos VANTs levando em consideração o mapa local, a escolha da próxima célula para visitar, controle sobre as restrições de movimento (por exemplo, que um VANT não entre em uma região de Voronoi diferente da sua), comunicação com a estação base, representação de mapas e registro de informações. Cada VANT no simulador ROS/Gazebo é uma instância da classe VANT, representada como um objeto independente, com seus próprios atributos e responsabilidades.

4.2 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Cobrir toda a área de interesse é obviamente um critério de correção para qualquer estratégia para o problema de cobertura simples de área. A estratégia descrita nesta dissertação sempre satisfaz essa condição, contanto que haja pelo menos um VANT ativo, já que a estação base mantém o conhecimento global da cobertura do VANT e os VANTs continuam a se mover para áreas descobertas após visitar todas as células em suas respectivas regiões. No entanto, algumas estratégias podem cobrir toda a área de uma maneira melhor ou pior. Portanto, é necessário definir uma métrica para avaliar a *qualidade* de uma estratégia.

Uma boa estratégia para o problema de cobertura simples é aquela que cobre toda a área e: (a) minimiza o tempo necessário para completar a cobertura; e (b) resulta em baixa redundância de movimentos. Por baixa redundância de movimentos, entende-se que, em relação apenas ao movimento, deve-se esperar que uma solução ótima seja aquela em que cada célula é visitada apenas uma vez, por um único VANT. Além disso, ter mais de um VANT passando por uma célula representa desperdício de energia pelos VANTs, pois visitas adicionais (mais de uma) são desnecessárias para resolver o problema. Espera-se que uma boa solução exiba um baixo número de vezes que os VANTs estiveram nas células e um tempo total de cobertura que é inversamente proporcional ao número de VANTs usados.

Portanto, definiram-se as seguintes métricas para avaliar os resultados: (i) o tempo necessário para cobrir toda a área de interesse, ou seja, o tempo para chegar a uma configuração onde todas as células foram visitadas pelo menos uma vez; (ii) número médio de visitas que os VANTs estiveram em cada célula; e (iii) desvio padrão do número de visitas. As métricas foram avaliadas sob o foco do dinamismo, ou seja, como se comportam em relação à entrada e saída de membros do conjunto ativo de VANTs.

4.2.1 Cenários de Simulação

Os experimentos foram executados a fim de validar a estratégia proposta para o *Problema de Cobertura Simples de Área*. As simulações consideraram uma área de 400 m^2 , dividida em uma grade. Cada célula da grade possui o tamanho de $1\text{m} \times 1\text{m}$, resultando em um total de 400 células a serem visitadas. Os limites da área são sempre respeitados, ou seja, os VANTs não ultrapassam as fronteiras da área previamente definida, durante o sensoriamento. Os VANTs são inicialmente posicionados sobre a área, mantendo uma distância igual entre eles. Os VANTs voam a um metro de altura.

Os experimentos foram conduzidos usando, inicialmente, de um a oito VANTs por

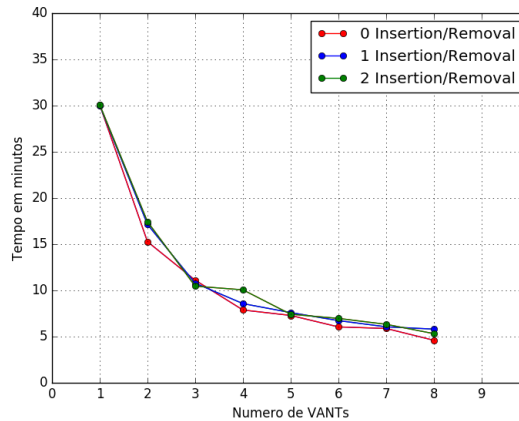


Figura 4.2: Número de VANTs X Tempo.

missão. Cada experimento foi executado 10 vezes. Para cada número de VANTs iniciais, fizeram-se experimentos com zero, uma e duas inserções e remoções de VANTs. Nestes casos, as inserções foram feitas primeiro, depois as remoções aconteceram. Cada mudança de configuração ocorria a cada 30s, desde o início da simulação. Em cada remoção, o VANT específico a ser removido foi escolhido aleatoriamente.

4.2.2 Discussão

A tabela 4.1 apresenta os dados dos procedimentos realizados para avaliar o desempenho da solução proposta. A primeira coluna exibe o número de ações de inserção e remoção de VANTs durante a cobertura de área. Nesse sentido, o valor 0 identifica que nenhum VANT foi incluído ou removido, o valor 1 aponta que houve uma operação de inserção e uma operação de exclusão e o valor 2 sinaliza que existiram duas operações de inserção e duas operações de remoções de VANTs. A segunda coluna mostra o número de VANTs no início da simulação, sendo o intervalo fixado de 1 a 8 VANTs. A terceira coluna apresenta o tempo médio de execução, de acordo com as condições das colunas anteriores. A quarta, quinta e sexta colunas estão relacionadas a dados de visitas, e apontam, respectivamente, a média de visitas recebidas por cada célula, o desvio padrão e o percentil-90 das visitas.

A Fig. 4.2 consolida os tempos médios de execução em um gráfico. Na Tabela 4.1 e no gráfico observa-se que o tempo de cobertura da área foi apenas ligeiramente afetado pela adição e retirada de VANTs. Observa-se, adicionalmente, que o tempo para cobrir a área diminuiu fortemente quando o número de VANTs passou de 1 a 4 VANTs, mas mais moderadamente de 4 a 8 VANTs. Isso pode ser explicado pelo fato de que as regiões de Voronoi podem se tornar mais irregulares à medida que o número de VANTs aumenta e as posições dos VANTs tornam-se mais heterogeneamente distribuídas na área, devido aos movimentos.

Os valores de média de visitas são apresentados em um gráfico na Fig. 4.3. Neste gráfico observa-se que: (a) os valores são relativamente baixos (o maior valor registrado foi de 1.36); (b) em geral, há predominância da linha correspondente a duas

Dinamismo	VANTs	Tempo	Visitas		
			Média	Desvio Padrão	Percentil-90
0	1	30.07 min	1.36	0.50	2.0
0	2	15.27 min	1.12	0.38	2.0
0	3	11.10 min	1.11	0.50	1.0
0	4	7.88 min	1.03	0.23	1.0
0	5	7.29 min	1.04	0.28	1.0
0	6	6.05 min	1.03	0.33	1.0
0	7	5.78 min	1.06	0.49	1.0
0	8	4.60 min	1.02	0.22	1.0
1	1	30.03 min	1.34	0.51	2.0
1	2	17.14 min	1.19	0.78	1.0
1	3	10.78 min	1.09	0.47	1.0
1	4	8.57 min	1.06	0.34	1.0
1	5	7.60 min	1.09	0.64	1.0
1	6	6.73 min	1.09	0.58	1.0
1	7	6.06 min	1.08	0.50	1.0
1	8	5.81 min	1.09	0.70	1.0
2	1	30.09 min	1.32	0.53	2.0
2	2	17.44 min	1.33	0.96	2.0
2	3	10.46 min	1.20	0.97	2.0
2	4	10.06 min	1.17	1.03	2.0
2	5	7.42 min	1.16	0.81	2.0
2	6	6.97 min	1.12	0.57	1.0
2	7	6.33 min	1.08	0.55	1.0
2	8	5.32 min	1.09	0.49	1.0

Tabela 4.1: Resumo das missões realizadas.

inserções/remoções (verde) sobre a linha de uma inserção/remoção (azul); e (c) por sua vez, também existe a mesma relação entre a linha que representa somente uma inserção/remoção (azul) sobre a linha que simboliza nenhuma operação nesse sentido (vermelho). A justifica para este comportamento está no fato de que as ações de inserção e remoção de VANTs implicam em maior desordem para a execução da cobertura de área, nas operações de divisão das regiões de Voronoi, o que se reflete na maior média de visitas.

Outro ponto de análise é o comportamento homogêneo apresentado pela Fig. 4.3. Diferentemente da diminuição apresentada pela redução do tempo de cobertura na Fig. 4.2, principalmente entre 1 a 4 VANTs, esta figura não apresenta grande variação no número de visitas, independente do número de VANTs utilizado. Os números indicam que há uma leve redução na média de visitas à medida que a quantidade de VANTs aumenta.

A possibilidade de adicionar e remover VANTs e ter o conjunto de VANTs se adaptando dinamicamente é importante, pois se acredita que este comportamento imita uma missão de área de cobertura em uma situação real, onde os VANTs estão sujeitos a falhas,

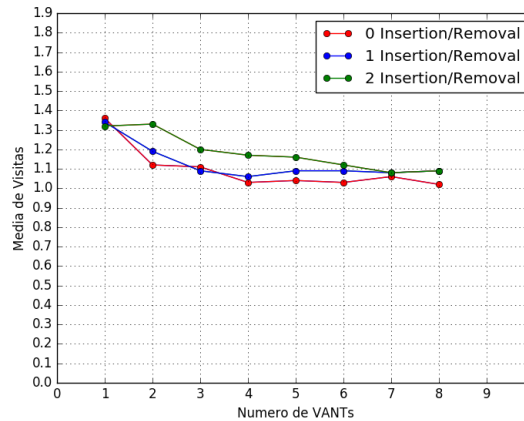


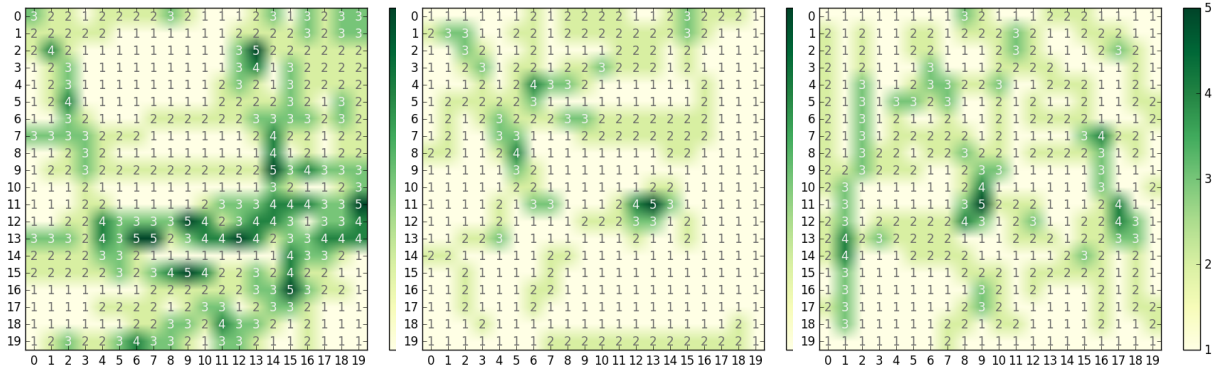
Figura 4.3: Número de VANTs X Média de Visitas.

colisões, esgotamento da bateria e outros tipos de eventos perturbadores.

4.2.3 Mapas de Calor

Os mapas de calor foram utilizados para visualizar e avaliar o movimento dos VANTs para cobrir a área. Quanto mais claro o mapa de calor, menor a quantidade de movimento dos VANTs sobre a área. De forma análoga, cores mais escuras indicam uma movimentação maior na área. Esta forma de visualização de dados facilita o entendimento da dinâmica de movimentação em geral, apontando regiões com menores ou maiores níveis de visitas. Por exemplo, cada célula dos mapas de calor na Fig. 4.4 é colorida de acordo com a frequência com que os VANTs estiveram naquela célula. A gama de cores é mostrada no lado direito das figuras. As cores mais próximas do amarelo claro (mais abaixo na faixa de cores) representam as células menos visitadas. As cores mais próximas do verde escuro (no topo da faixa de cores) representam as células visitadas com mais frequência. Para gerar os mapas, o número de vezes em que os VANTs passaram por uma célula foi registrado.

A Fig. 4.4 mostra exemplos de mapas de calor para 2, 4 e 8 VANTs (respectivamente nas Figs. 4.4a, 4.4b e 4.4c). Pode-se verificar nas figuras uma grande parte das células em amarelo claro, o que significa que os VANTs estiveram nessas células apenas uma vez (situação ideal). Outro ponto importante a destacar é que o número máximo de vezes que os VANTs estiveram nas células foi 5 para todos os casos. Observa-se nas figuras que 4 VANTs (Fig. 4.4b) evitaram o movimento mais redundante, quando os três casos são comparados entre si. Em todos os casos, é possível verificar que apenas uma ou duas visitas representam a maioria das células, o que reflete a baixa redundância de movimento.



(a) 2 VANTs.

(b) 4 VANTs.

(c) 8 VANTs.

Figura 4.4: Representação de movimentos com Mapas de Calor

Este capítulo conclui o presente trabalho.

CONCLUSÃO

O problema de cobertura de área está relacionado a um conjunto de VANTs cooperando para desempenhar uma tarefa específica, através da coleta de informações sobre uma área de interesse. Em termos gerais, dada uma área delimitada dentro de um plano, divide-se o plano em células e posiciona-se um conjunto de VANTs dentro da área de interesse. Cada VANT, ao entrar em uma célula, visita e sensoria esta célula. Em cada período da missão, um VANT sensoria uma célula e move-se para uma célula adjacente, de acordo com o movimento definido. A configuração final é atingida quando toda a área de interesse é coberta.

Este problema foi alvo de pesquisa, pois embora muitos problemas relacionados a cobertura de área pareçam bastante semelhantes, eles diferem uns dos outros em alguns aspectos, muitas vezes sutis (Nigam, 2014; Huang, Teo e Leong, 2017). Tais aspectos diferentes confundem as abordagens de solução em muitas situações, o que origina ruídos no entendimento e nos resultados das estratégias adotadas.

Nesta dissertação, um caso particular do problema de cobertura de área foi apresentado. Essa instância de uma classe mais geral de problemas de cobertura foi detalhada, a fim de que uma abordagem fosse proposta. Esta estratégia baseou-se na forma de particionar a área de interesse, na maneira de percorrer a área de busca e, principalmente, na possibilidade de dinamismo a partir do conjunto inicial de VANTs. Acredita-se que a possibilidade de inserir e/ou excluir membros de um enxame de VANTs durante uma missão de cobertura seja muito próxima da realidade de diferentes contextos de utilização, já que os equipamentos são suscetíveis a falhas, riscos e intempéries. No mesmo sentido, uma definição para o problema de cobertura simples de área foi fornecida, além do estabelecimento de um modelo, que pode suportar outros trabalhos acadêmicos e iniciativas semelhantes.

Os principais subproblemas foram identificados (particionamento de área, estratégia de varredura e redivisão da área em caso de mudança no conjunto de VANTs ativos) e uma descrição de como cada um deles pode ser endereçado foi apresentada. Foi implementada uma abordagem de solução utilizando ROS/Gazebo como base e componentes de *software*

próprios: *framework Ogum* e componente *drone_middleware*. O primeiro implementa classes específicas para coordenar a estratégia geral de cobertura. O segundo comanda a movimentação individual dos VANTs no plano.

A estratégia foi avaliada com base nos critérios de: (a) média de visitas a células; (b) tempo necessário para completar a cobertura da área de interesse; e (c) 0, 1 e 2 ações de inserção e remoção de membros do conjunto ativo de VANTs. Além dessas avaliações, foram criados mapas de calor relacionados ao número de visitas às células e movimento dos VANTs.

Os experimentos apresentaram resultados relevantes, que demonstraram a viabilidade da estratégia adotada, ou seja, mesmo diante de perturbações no conjunto ativo de VANTs a cobertura de área foi realizada. Dessa forma, pode-se concluir que os critérios de adaptabilidade foram mantidos. A avaliação do desempenho da estratégia foi feita através de 240 simulações (80 em cada grupo de 0, 1 e 2 inserções e remoções), com base nas métricas citadas para medir o nível de coordenação e redundância alcançada com a solução.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Um possível trabalho futuro pode ser a incorporação de melhorias de planejamento de caminho (*path planning*), no sentido de impedir a ocorrência de quaisquer colisões entre os membros do conjunto ativo de VANTs. Estas colisões têm maior probabilidade de surgir durante os deslocamentos para células livres no plano, após completar uma região. Estruturar estes deslocamentos pode ser uma questão desafiadora, considerando os distúrbios previstos, como inserções, remoções e movimentações dos outros membros. De maneira prévia, uma métrica que minimize o número de colisões pode ser definida como alvo.

Outra possibilidade de evolução do simulador seria uma melhor forma de acompanhar o desenvolvimento da atividade de cobertura. Estipular uma métrica de cobertura, alimentada com dados gerados pelo enxame, que indica a relação entre a área já coberta e a área inicialmente dada durante a execução. Esta medida pode representar o grau de eficiência de cobertura e percepção de área, em relação ao tempo (Chen, Zhang e Xu, 2014).

Considera-se este trabalho como um ponto de partida para estudar sistematicamente o problema de cobertura simples de área, bem como variações deste problema. Muitos problemas estão envolvidos na concepção de uma solução apropriada para este problema, para aplicação em cenários reais. Algumas das questões que podem ser investigadas são o projeto de estratégias totalmente distribuídas, assumindo a comunicação direta e parcial entre VANTs (o que inclui o aspecto de conhecimento parcial por VANTs sobre quais células já foram visitadas), falhas de comunicação e uma análise mais aprofundada do uso de diferentes abordagens de particionamento de área (em particular, a abordagem descrita em (Chen, Li e Zhuo, 2017)).

5.2 PUBLICAÇÃO

Um artigo derivado deste trabalho foi elaborado, conforme descrições a seguir:

- Autores: Grazieno Pellegrino, Gustavo Mota, Flávio Assis, Sérgio Gorender, Alírio Sá;
- Título: *Simple Area Coverage by a Dynamic Setof Unmanned Aerial Vehicles*;
- Local de Publicação: *10th Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC)*;
- Ano: 2020 ;

Este artigo foi considerado o melhor artigo no *10th Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (X SBESC)* (Pellegrino et al., 2020).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAMI, R. et al. Multi-robot cooperation through incremental plan-merging. In: *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. [S.l.: s.n.], 1995. v. 3, p. 2573–2579 vol.3. ISSN 1050-4729.
- ALI, S. A.; XIAOGUANG, G.; FU, X. Resource match cost based multi-UAV decentralized coalition formation in an unknown region. In: *2017 14th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 297–304. ISSN 2151-1411.
- ARUL, S. et al. Lswarm: Efficient collision avoidance for large swarms with coverage constraints in complex urban scenes. *IEEE Robotics and Automation Letters*, PP, p. 1–1, 07 2019.
- BANDYOPADHYAY, S.; CHUNG, S. Distributed bayesian filtering using logarithmic opinion pool for dynamic sensor networks. *CoRR*, abs/1712.04062, 2017. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1712.04062>.
- BERGER, C. et al. Area coverage with heterogeneous UAVs using scan patterns. In: *2016 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 342–349.
- BRAGA, R. G. et al. UAV swarm control strategies: A case study for leak detection. In: *2017 18th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 173–178.
- BRUST, M. R. et al. Target tracking optimization of UAV swarms based on dual-pheromone clustering. In: *2017 3rd IEEE International Conference on Cybernetics (CYB-CONF)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–8.
- CABREIRA, T. M.; FERREIRA, P. R. Terrain coverage with UAVs: Real-time search and geometric approaches applied to an abstract model of random events. In: *2016 XIII Latin American Robotics Symposium and IV Brazilian Robotics Symposium (LARS/SBR)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 151–156.
- CHEN, S.; LI, C.; ZHUO, S. A distributed coverage algorithm for multi-UAV with average voronoi partition. In: *2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1083–1086.
- CHEN, X.; CHEN, X. The UAV dynamic path planning algorithm research based on voronoi diagram. In: *The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1069–1071.

CHEN, Y.; ZHANG, H.; XU, M. The coverage problem in UAV network: A survey. In: *Fifth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5.

CHEVET, T. et al. Voronoi-based UAVs formation deployment and reconfiguration using MPC techniques. In: *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 9–14.

CHOI, Y. et al. Multi-UAS path-planning for a large-scale disjoint disaster management. In: *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 799–807.

CHOSSET, H.; PIGNON, P. Coverage path planning: The boustrophedon cellular decomposition. In: *Field and Service Robotics*. [S.l.]: Springer London, 1998. p. 203–209.

CHRISTMANN, H. C.; JOHNSON, E. Modeling urban environments for communication-aware UAV swarm path planning. *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference 2010*, 08 2010.

CHUNG, S. et al. A survey on aerial swarm robotics. *IEEE Transactions on Robotics*, v. 34, n. 4, p. 837–855, Aug 2018. ISSN 1552-3098.

DARBARI, V.; GUPTA, S.; VERMA, O. P. Dynamic motion planning for aerial surveillance on a fixed-wing UAV. In: *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 488–497.

DAVIS, J. et al. Development of a modified voronoi algorithm for UAV path planning and obstacle avoidance. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference 2012*, 08 2012.

DECEA. Departamento de controle do espaço aéreo. sistemas de aeronaves remotamente pilotadas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro. In: <https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacaooid=4510>. [S.l.: s.n.], 2017.

ELBANHAWI, M. et al. Enabling technologies for autonomous MAV operations. *Progress in Aerospace Sciences*, v. 91, p. 27 – 52, 2017. ISSN 0376-0421. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042116300367>.

FERMIN, C. K. Y. et al. Development and implementation of swarm sweep cleaning protocol for quadrotor unmanned aerial vehicle (QUAV) swarm. In: *TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conference*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1988–1991. ISSN 2159-3450.

GU, J. et al. Multiple moving targets surveillance based on a cooperative network for Multi-UAV. *IEEE Communications Magazine*, v. 56, n. 4, p. 82–89, April 2018.

HUANG, S.; TEO, R. S. H.; LEONG, W. L. Review of coverage control of multi unmanned aerial vehicles. In: *2017 11th Asian Control Conference (ASCC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 228–232.

JIN, Y.; WU, Y.; FAN, N. Research on distributed cooperative control of swarm UAVs for persistent coverage. In: *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1162–1167.

KADIOGLU, E.; URTIS, C.; PAPANIKOLOPOULOS, N. UAV coverage using hexagonal tessellation. In: *2019 27th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 37–42.

KALYAEV, I. et al. A novel method for distribution of goals among UAVs for oil field monitoring. In: *2017 6th International Conference on Informatics, Electronics and Vision 2017 7th International Symposium in Computational Medical and Health Technology (ICIEV-ISCMHT)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–4.

KOENEKE, R.; BABICEANU, R. F.; SEKER, R. Target area surveillance optimization with swarms of autonomous micro aerial vehicles. In: *2019 IEEE International Systems Conference (SysCon)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6. ISSN 1944-7620.

KOENIG, S.; LIU, Y. Terrain coverage with ant robots: A simulation study. In: . [S.l.: s.n.], 2001. p. 600–607.

LI, X.; LI, J.; CHEN, J. Effective cooperative UAV searching using adaptive STGM mobility model in a FANET. In: *2018 IEEE Intl Conf on Parallel Distributed Processing with Applications, Ubiquitous Computing Communications, Big Data Cloud Computing, Social Computing Networking, Sustainable Computing Communications (ISPA/IUCC/BD-Cloud/SocialCom/SustainCom)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 295–301. ISSN null.

MAAROUF, A.; KO, W.; NOUH, A. S. A recursive optimization algorithm for a surveillance of a convex area. In: *2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–4. ISSN 2473-4748.

MANERIKAR, A.; DAS, D.; BANERJEE, P. Optimal control for constrained coverage path planning. 08 2017.

MANSOURI, S. S. et al. On the covering of a polygonal region with fixed size rectangles with an application towards aerial inspection. In: *2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1219–1224.

MEYER, J. et al. Comprehensive simulation of quadrotor UAVs using ROS and gazebo. In: *Proc. of the International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots, SIMPAR - Lecture Notes in Computer Science LNCS 7628*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 400–411.

NIGAM, N. The multiple unmanned air vehicle persistent surveillance problem: A review. *Machines*, v. 2, n. 1, p. 13–72, 2014. ISSN 2075-1702. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2075-1702/2/1/13>.

OSRF. *Gazebo: Robot simulation made easy*. 2020. Disponível em: <http://gazebo.org-Acessadoem10/08/2020>.

PAULA, P. de S. et al. A swarm solution for a cooperative and self-organized team of UAVs to search targets. In: *2016 8th Euro American Conference on Telematics and Information Systems (EATIS)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–8.

Pellegrino, G. et al. Simple area coverage by a dynamic set of unmanned aerial vehicles. In: *2020 X Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–8.

RAJAN, R.; OTTE, M.; SOFGE, D. Novel physicomimetic bio-inspired algorithm for search and rescue applications. In: *2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–8.

ROBOTICS, O. *ROS: Robotic operating system*. 2020. Disponível em: [⟨https://www.ros.org-Acessadoem10/08/2020⟩](https://www.ros.org-Acessadoem10/08/2020).

ROSALIE, M. et al. Coverage optimization with connectivity preservation for UAV swarms applying chaotic dynamics. In: *2017 IEEE International Conference on Autonomic Computing (ICAC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 113–118.

ROSALIE, M. et al. Area exploration with a swarm of UAVs combining deterministic chaotic ant colony mobility with position MPC. In: *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1392–1397.

SAADAOU, H.; BOUANANI, F. E. Information sharing in uavs cooperative search based on calculating the minimum time. In: *Proceedings of the 2017 International Conference on Smart Digital Environment*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2017. (ICSDE '17), p. 168–173. ISBN 9781450352819. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1145/3128128.3128154⟩](https://doi.org/10.1145/3128128.3128154).

SAADAOU, H.; BOUANANI, F. E. Information sharing based on local pso for UAVs cooperative search of unmoved targets. In: *2018 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6.

SHAKHATREH, H. et al. On the continuous coverage problem for a swarm of UAVs. In: *2016 IEEE 37th Sarnoff Symposium*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 130–135.

SILIGARDI, L. et al. Robust area coverage with connectivity maintenance. In: *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 2202–2208.

SIMÕES, G.; Sá, A. de. Um framework para simulação de sistemas robóticos baseados em múltiplos veículos aéreos não tripulados. In: *Anais Estendidos do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2020. p. 217–224. ISSN 2177-9384. Disponível em: [⟨https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/_estendido/article/view/12422⟩](https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/_estendido/article/view/12422).

SRIVASTAVA, D. et al. Adaptable UAV swarm autonomy and formation platform. In: *2019 IEEE Aerospace Conference*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6. ISSN 1095-323X.

SULÁK, V.; KOTULIAK, I.; ČIČÁK, P. Search using a swarm of unmanned aerial vehicles. In: *2017 15th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.

TONG, H. et al. Path planning of UAV based on voronoi diagram and dpso. *Procedia Engineering*, v. 29, p. 4198 – 4203, 2012. ISSN 1877-7058. 2012 International Workshop on Information and Electronics Engineering. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812006534>.

VARGAS, P. et al. Patrolling strategy for multiple UAVs with recharging stations in unknown environments. In: . [S.l.: s.n.], 2019. p. 346–351.

VASQUEZ-GOMEZ, J. I.; HERRERA-LOZADA, J.; OLGUIN-CARBAJAL, M. Coverage path planning for surveying disjoint areas. In: *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 899–904.

VASQUEZ-GOMEZ, J. I.; HERRERA-LOZADA, J. C.; OLGUIN-CARBAJAL, M. Spatial resolution optimization for terrain coverage with UAVs. In: *2017 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 37–42.

WANG, J. et al. Autonomous UAV swarm: Behavior generation and simulation. In: *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–8. ISSN 2575-7296.

YANG, F. et al. Cooperative search of UAV swarm based on improved ant colony algorithm in uncertain environment. In: *2017 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 231–236.

YU, Q. et al. Research on multiple unmanned aerial vehicles area coverage for gas distribution mapping. In: *Proc. of the 10th International Conference on Modeling, Identification and Control (ICMIC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5.