

# Avaliando o Impacto da Comunicação na Cobertura de Área com um Conjunto Dinâmico de Veículos Aéreos Não Tripulados

Antonio Pedro Santana Ferreira, Alirio Santos de Sá

Laboratorio de Sistemas Distribuídos (LaSiD)  
Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica (PPGM)  
Instituto de Computação e Escola Politécnica  
Universidade Federal da Bahia (UFBA)  
{antonio.pedro, aliriosa}@ufba.br

*Abstract—The multi-UAV area coverage problem concerns the coordinated action of UAVs to cover an area of interest, for example, mapping or collecting information from the entire area. In critical applications such as search and rescue, disaster mapping, and others, it is essential that the system allows for the inclusion of new UAVs, tolerates the failure or replacement of existing UAVs, and prevents potential communication failures from jeopardizing the mission. Therefore, it is crucial to develop area coverage solutions with dynamic sets of coordinated UAVs in unreliable communication environments to meet these types of applications. However, existing solutions that work with sets of UAVs either consider static sets or do not consider the possibility of communication failures. Therefore, developing solutions for critical area coverage missions remains a challenge. Consequently, in this paper, we address this problem by investigating the impact of communication on area coverage with a dynamic set of UAVs. The experimental evaluation considered area coverage applications based on static and dynamic sets of UAVs communicating over reliable and unreliable communication channels and equipped with underlying communication systems with different message detection and recovery capabilities. Performance was analyzed considering metrics related to mission execution speed and the ability to avoid redundant movement. The results show significant impacts on area coverage performance when we adopt message detection and recovery mechanisms. Furthermore, the analysis of the results shows that the appropriate combination of communication fault tolerance mechanisms at the application and communication system levels can enable complete area coverage with intermediate impacts on performance.*

*Index Terms—UAV, Sensor networks, Area Coverage, Distributed applications*

## I. INTRODUÇÃO

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), do inglês *Unmanned Aerial Vehicles* (UAVs), popularmente conhecidos como Drones, são aeronaves que podem ser controladas remotamente ou de maneira autônoma, amplamente utilizadas em diversas aplicações civis e militares devido à sua capacidade de operar em terrenos variados e condições adversas. Equipados com sensores, sistemas de comunicação e recursos de processamento, esses dispositivos desempenham papéis essenciais em tarefas como busca e resgate, monitoramento ambiental, vigilância de fronteiras, combate a incêndios e

gerenciamento de tráfego [1], [2], [3]. Além de substituir a atuação humana em missões perigosas ou exaustivas, os VANTs oferecem maior eficiência e precisão em cenários críticos. A maioria dessas aplicações, como nos casos de busca e salvamento ou mapeamento de desastres, necessitam que o VANT sobrevoe uma área de interesse coletando, processando e disponibilizando informações para estações em terra – o que pode ser chamado de cobertura de área [4], [5], [6], [3], [7]. Mais ainda, as facilidades trazidas para a cobertura de área com um VANT podem ser potencializadas quando esses equipamentos são usados em grupos, que atuam de forma coordenada e cooperativa, também conhecido como enxame de VANTs [8], [9].

Quando enxames de VANTs são usados em cenários críticos de cobertura de área, como por exemplo, em cenários de resposta a desastres, é crucial que a aplicação permita que novos VANTs possam ser incluídos, que falhas de VANTs possam ser toleradas, que VANTs sejam substituídos e que potenciais falhas de comunicação não comprometam os objetivos da missão. Entretanto, propostas que lidam com cobertura de área com conjunto dinâmico de VANTs (e.g., [3], [10]) consideram que a comunicação é confiável, o que não é uma hipótese realística para a comunicação sem fio realizada em um sistema baseado em enxame de VANTs. Outros trabalhos que lidam com aspectos de comunicação (e.g., [11], [12]), consideram um conjunto estático de VANTs ou não lidam diretamente com aspectos de cobertura de área. Portanto, realizar cobertura de área baseada em enxames de VANTs para cenários críticos ainda permanece um desafio.

Nesse contexto, este trabalho investiga o impacto da comunicação em aplicações distribuídas de cobertura de área com conjunto dinâmico de VANTs, observando principalmente como a implementação de mecanismos de detecção e recuperação de falhas de comunicação impactam o tempo necessário para a realização desse tipo missão. A relevância deste estudo se deve ao fato de que: a maioria dos trabalhos existentes que envolvem múltiplos VANTs não considera o efeito final da comunicação nos demais elementos envolvidos na cobertura

de área (como planejamento, controle e coordenação entre os veículos); outros, que lidam especificamente com cobertura de área abstraem aspectos de comunicação, assumindo modelos não realísticos; e outros que consideram aspectos de comunicação em problemas de cobertura de área com múltiplos VANTs não consideram missões com conjuntos dinâmicos de VANTs. Com isso, o entendimento do impacto da comunicação nessa categoria de aplicação distribuída de cobertura de área ainda não é claro.

Para conduzir a investigação proposta neste artigo, foi realizada uma extensão do OGUM [10], um *framework* baseado em ROS/Gazebo[13], [14], voltado à cobertura de área com um conjunto dinâmico de VANTs. Essa extensão permitiu que esse *framework* considere coberturas de área com VANTs comunicando a partir de canais de comunicação não confiáveis, além de possibilitar o uso de mecanismos de detecção e recuperação de falhas de comunicação. A aplicação de cobertura de área foi completamente implementada e avaliada considerando cenários com conjuntos estáticos e dinâmicos de VANTs, canais de comunicação confiáveis e não confiáveis e sistemas de comunicação com diferentes habilidades de detecção e recuperação de falhas de comunicação. As diferentes configurações da aplicação distribuída de cobertura de área nos variados cenários de comunicação foram avaliadas observando o tempo médio de realização da missão de cobertura de área e a redundância nas visitas em subáreas de interesse. Os resultados obtidos mostram que, em cenários livres de perdas de mensagens, implementar mecanismos de detecção de falhas de comunicação podem comprometer significativamente o desempenho da cobertura de área com conjunto dinâmico de VANTs. Além disso, os resultados também apontam que, em cenários com canais não confiáveis, implementar mecanismos de recuperação de falhas de comunicação apenas no nível da aplicação degrada significativamente o desempenho da cobertura de área. Contudo, se essa estratégia de recuperação for combinada com mecanismos de recuperação de mensagens no subsistema de comunicação é possível reduzir o impacto no desempenho e evitar que a área seja parcialmente coberta.

O restante deste artigo está organizado conforme descrito a seguir. A Seção II apresenta as hipóteses do modelo de sistema distribuído considerado na avaliação da aplicação de cobertura de área com VANTs. A Seção III discute a metodologia adotada para avaliação experimental do impacto da comunicação na cobertura de área com VANTs, detalhando ferramental tecnológico usado, cenários de avaliação, parâmetros de sistema e métricas de desempenho adotadas. A Seção IV apresenta e analisa os resultados obtidos, enquanto que a Seção V discute trabalhos relacionados existentes na literatura. Por fim, a Seção VI realiza considerações finais e apresenta perspectivas de trabalhos futuros.

## II. MODELO DE SISTEMA

O modelo de sistema adotado é similar ao proposto em [3], mas com hipóteses menos restritivas em relação à comunicação. Esse modelo considera uma área de interesse a ser coberta por um conjunto de VANTs. Por simplicidade,

assumimos que essa área de interesse está livre de obstáculos. Ela é representada por um polígono convexo, dividido em uma grade com células de mesmo tamanho e suas bordas coincidem com as bordas da grade de células.

O sistema é composto por um conjunto de VANTs com as mesmas configurações de *hardware* e *software*. Cada VANT é dotado de mobilidade e de capacidade de processamento, sensoriamento e comunicação sem fio. Durante a cobertura, um VANT se move para uma célula da grade para realizar o sensoriamento da célula. Assumimos que um VANT visita uma célula quando ele está sobre o centro da célula. Por simplicidade, o ato de visitar a célula representa todas as ações realizadas para o sensoriamento de tal célula. Um VANT só se movimenta para células adjacentes.

O sistema possui também uma estação base, representada por um dispositivo terrestre, localizado na borda da área de interesse e cuja função principal é coordenar a execução da missão de cobertura de área realizada pelos VANTs. As informações coletadas, de forma independente por cada VANT, são transmitidas para a estação base, que é responsável por receber, processar e compartilhar essas informações entre os VANTs. Cada VANT é tido como uma fonte de dados, então o sistema trabalha a todo momento agregando as informações dessas múltiplas fontes de dados na estação base. Em especial, a estação base gera mapas com subáreas a serem cobertas e também escalona essas subáreas para os VANTs.

O conjunto de VANTs cobrindo uma área de interesse é denominado conjunto ativo de VANTs. Membros desse conjunto são chamados de VANTs ativos. No início da cobertura de área, existe um conjunto não vazio de VANTs. Contudo, durante a operação, esse conjunto pode mudar com a inclusão de novos VANTs ou pela saída de VANTs do conjunto.

A configuração do sistema é uma associação específica de cada VANT ativo a uma célula da grade, representando a localização dos VANTs. O sistema começa em uma configuração inicial. As configurações do sistema mudam à medida que o sistema evolui, pela movimentação e pela inclusão ou exclusão de VANTs do conjunto ativo. O sistema chega à configuração final quando toda a área de interesse foi coberta.

A comunicação dos VANTs com a estação base está sujeita a perda de mensagens. Por isso, os VANTs adotam um sistema de comunicação para mitigar essas perdas. Assim, quando um VANT visita uma célula, ele usa o sistema de comunicação para enviar a informação para a estação base. Caso o sistema de comunicação notifique falha no envio, o VANT refaz a visita à célula e solicita novamente o envio da informação. Esse ciclo se repete até que haja sucesso no envio. Quando o envio é bem-sucedido, o VANT inicia uma mudança de configuração, se movendo para a próxima célula da subárea que lhe foi alocada.

## III. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

Para avaliar os impactos da comunicação na cobertura de área, com base no modelo de sistema proposto, a metodologia de avaliação considera experimentos com uma aplicação distribuída de cobertura de área, baseada em múltiplos VANTs

implementada usando o OGUM [10], um *framework* para cobertura de área utilizando um conjunto dinâmico de VANTs. Esse *framework* disponibiliza uma implementação específica que permite a coordenação dos VANTs durante a cobertura da área, facilita o processo de divisão da área total em subáreas, realiza a alocação das subáreas para os VANTs do conjunto, planeja os caminhos a serem usados pelos VANTs para a cobertura de suas respectivas subáreas, gerencia a inclusão e exclusão dinâmica dos VANTs do conjunto etc.

O OGUM é implementado a partir do *framework* ROS [13], que disponibiliza um conjunto de bibliotecas e ferramentas para desenvolvimento de *software* para diferentes sistemas robóticos, provendo diferentes facilidades, tais como: comunicação baseada no paradigma publicar/assinar (*publish/subscribe*); navegação de robôs; localização em mapas etc. O OGUM também faz uso do *DroneMiddleware* [15], um *framework* baseado em ROS que facilita o controle e o gerenciamento de múltiplos VANTs autônomos. Além disso, o OGUM integra-se ao simulador Gazebo [14], o qual permite a simulação de ambientes físicos com sistemas robóticos e inclui visualização em interface gráfica (ver exemplo na Figura 1).

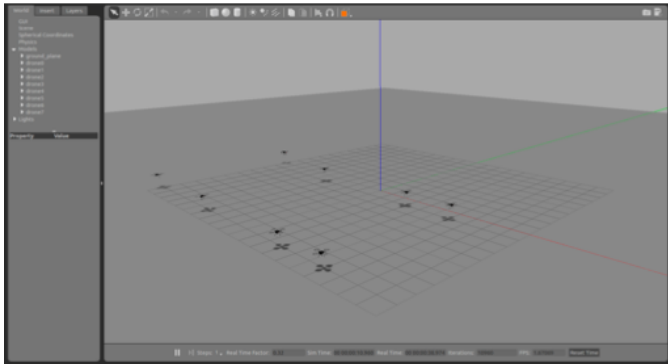


Figura 1: Ambiente de simulação ROS/Gazebo.

Para permitir a avaliação de diferentes cenários de comunicação, estendemos o *framework* OGUM para incorporar mecanismos que permitam a simulação de canais de comunicação sujeitos a perdas de mensagens e atrasos na troca de mensagens entre a estação base e os VANTs envolvidos na cobertura de área. Além disso, foram implementados mecanismos de confirmação e retransmissão de mensagens na comunicação entre VANTs e a estação base de forma a permitir uma avaliação do impacto destes no desempenho da cobertura de área. A seguir são apresentados detalhes dos cenários, parâmetros e métricas de desempenho usados nos experimentos.

#### A. Descrição de Cenários e de Parâmetros de Sistema

O cenário base adotado nos experimentos é similar àqueles propostos na validação do OGUM [10], se diferenciando nos detalhes relacionados à comunicação. Com isso, os experimentos consideram a cobertura de uma área com  $400m^2$ . Essa área é dividida em uma grade com células de  $1m \times 1m$ , o que implica em 400 células a serem visitadas. Os VANTs são inicialmente posicionados sobre a área de forma equidistante entre

si e, quando levantam voo, eles se mantêm a uma altura de  $1m$  do solo. São considerados cenários com conjuntos contendo de 1, 2, 4 e 8 VANTs por cobertura de área. Além disso, para emular mudanças dinâmicas no conjunto de VANTs, são considerados zero, uma ou duas inclusões/remoções de VANTs. Nos casos com inserção e remoção de VANTs, as inserções são realizadas primeiro e, em seguida, são realizadas as remoções. Cada mudança de configuração inicia 30s após o início das simulações. A cada remoção, o VANT a ser removido é escolhido aleatoriamente.

No início da cobertura e na inclusão ou remoção de VANTs, a estação base divide a área em subáreas usando o método de Voronói [5]. A alocação da subárea para cada VANT é realizada de acordo com sua posição e com a posição de seus vizinhos, buscando uma divisão homogênea da área entre os VANTs. Cada VANT se movimenta em sua subárea usando a abordagem de Boustrophedon [16], realizada pelo VANT em duas fases: na primeira fase, ele se movimenta do norte para o sul até alcançar o limite da região e se movimenta para a próxima célula ao leste; na segunda fase, se movimenta do sul para o norte até alcançar o limite da região, se movimenta para a próxima célula ao leste e reinicia o processo.

Para avaliar o impacto da comunicação na cobertura de área, duas modalidades de canais de comunicação foram consideradas: **canal de comunicação confiável**, no qual não há perda de mensagens; e **canal de comunicação não confiável**, sujeito à perda de mensagens.

Nas simulações com canais não confiáveis, as perdas de mensagens seguem a distribuição de probabilidade de Bernoulli [17]. Além disso, considera-se uma taxa média de 15% de perda de mensagens, o que é compatível com valores encontrados em redes veiculares aéreas [18], [12].

Por fim, três categorias de sistemas de comunicação foram implementadas:

- **Sistema de comunicação otimista** – quando recebe uma solicitação de envio, ele transmite a informação e sempre notifica sucesso no envio para a aplicação, sem se preocupar com possíveis perdas de mensagens na transmissão.
- **Sistemas de comunicação com confirmação** – quando recebe uma solicitação de envio, ele transmite a informação e aguarda durante um prazo pelo recebimento da confirmação de recebimento da informação, notificando envio bem-sucedido se a confirmação chega dentro do prazo e falha caso contrário.
- **Sistemas de comunicação com confirmação e retransmissão** – quando recebe uma solicitação de envio, ele usa a mesma abordagem do sistema com confirmação, mas, caso não obtenha envio bem-sucedido na primeira tentativa, ele transmite novamente e tenta obter confirmação um certo número de vezes, antes de notificar uma falha para a aplicação. Nas simulações, o prazo para recebimento de uma confirmação e o número de tentativas de retransmissão foram definidos como 1s e 5 tentativas, respectivamente.

## B. Métricas de Avaliação de Desempenho

Para a avaliação do desempenho da cobertura de área nos diferentes cenários simulados, foram consideradas as seguintes métricas de desempenho:

- **Tempo de Execução da Missão ( $TM$ )** – corresponde ao intervalo de tempo decorrido entre o início da missão e a cobertura completa da área de interesse. Nos experimentos, esse tempo é medido em minutos.
- **Visitas por Células ( $VC$ )** – representa o número de visitas recebidas por uma célula durante a execução da missão de cobertura da área de interesse.
- **Total de Visitas ( $TV$ )** – representa o somatório das visitas recebidas por cada célula da área de interesse durante a execução da missão de cobertura.

Todas as métricas de desempenho são avaliadas em termos de seus valores médios, considerando um intervalo de confiança de 95%. Para a obtenção dos valores médios e avaliação da variabilidade experimental dos resultados, cada experimento é replicado (repetido) 10 vezes [17].

## IV. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

A Tabela I apresenta os resultados dos experimentos nos cenários de comunicação considerados. Cada um desses resultados é discutido a seguir.

### A. Cobertura de Área com Sistema de Comunicação Otimista Usando Canal de Comunicação Confiável

Estes cenários representam o melhor caso em termos de comunicação, pois não há perda de mensagens, o sistema de comunicação não realiza confirmações nem retransmissões de mensagens, e as únicas limitações no desempenho são decorrentes da qualidade dos sensores utilizados para aquisição dos dados, da mobilidade dos VANTs, da qualidade do controle, do planejamento da cobertura de área, da gestão da mudança do conjunto de VANTs etc. Portanto, este caso pode ser considerado a base de comparação com os demais cenários, nos quais há falhas de comunicação e são implementados mecanismos de detecção e recuperação de mensagens perdidas.

Nestes cenários, os resultados da Tabela I mostram que, aumentando o número de VANTs,  $TM$  diminui em todos os experimentos – o que é compatível com o apresentado em [3]. Em coberturas de área com oito VANTs,  $TM$  tende a ser 86% inferior ao valor de  $TM$  na cobertura com apenas um VANT.

É possível observar também que a mudança dinâmica no conjunto de VANTs, com inclusões/remoções de VANTs, não traz variações estatisticamente relevantes de desempenho em relação às métricas analisadas. Em todos os casos,  $VC$  é de aproximadamente 1.1 visitas/célula e o  $TV$  varia entre 420 e 436 visitas, i.e., o conjunto de VANTs percorre em média entre 20 e 36  $m^2$  acima do tamanho total da área a ser coberta.

### B. Cobertura de Área com Sistema de Comunicação com Confirmação Usando Canal de Comunicação Confiável

Nestes cenários, os resultados mostram que a mudança dinâmica no conjunto de VANTs, com inclusões/remoções de VANTs, não traz variações de desempenho estatisticamente

relevantes em termos das métricas analisadas. Por outro lado, nestes cenários, o uso do mecanismo de confirmação de mensagens tem um impacto significativo em  $TM$  quando comparado com os experimentos nos quais não há a necessidade de confirmação de mensagens. É possível verificar que a adoção de confirmação de mensagens implica em um aumento em  $TM$  de cerca de 100% para experimentos com dois VANTs, podendo chegar a 324% em experimentos com oito VANTs, implicando em consumo de energia muito maior.

Um outro efeito importante é que, em cenários que consideram mecanismos de confirmação de mensagens, o aumento no número de VANTs traz benefícios mais modestos no desempenho em termos de  $TM$ . Mais especificamente, os valores de  $TM$  reduzem cerca de 29% e 20% quando variamos o número de VANTs de 1 para 2 e de 2 para 4, respectivamente. Pelos resultados, coberturas de área com conjuntos de oito VANTs apresentam  $TM$  ligeiramente pior do que aqueles com quatro VANTs – indicando que aumentar significativamente o número de VANTs pode comprometer  $TM$  nesses cenários.

Por fim, em todos os casos, não há mudanças significativas de desempenho em termos de  $VC$  e  $TV$ .

### C. Cobertura de Área com Sistema de Comunicação com Confirmação Usando Canal de Comunicação Não Confiável

Nestes cenários, como o sistema de comunicação não realiza recuperação de mensagens, as perdas de mensagens são contornadas pelos módulos de aplicação de cada VANT, o que traz um impacto significativo no desempenho da cobertura de área. Em relação aos cenários de melhor caso, i.e., sistema de comunicação otimista e canal confiável, a degradação de desempenho em termos de  $TM$  pode chegar a 123, 319, 541 e 810% para cobertura de área com um conjunto contendo 1, 2, 4 e 8 VANTs, respectivamente. Além disso,  $VC$  e  $TV$  também são significativamente superiores ao melhor caso, tendo  $VC \approx 1.4$  e  $468 \leq TV \leq 652$ , significando que o conjunto de VANTs pode percorrer até 252  $m^2$  (63%) adicionais em relação ao tamanho da área de interesse.

Em termos das mudanças dinâmicas no conjunto de VANTs, os resultados mostram que elas não traz variações de desempenho estatisticamente relevantes em relação às métricas analisadas.

### D. Cobertura de Área com Sistema de Comunicação com Confirmação e Retransmissão Usando Canal de Comunicação Não Confiável

Nestes cenários, o sistema de comunicação também realiza recuperação de mensagens perdidas, o que traz uma melhoria significativa quando comparado com os cenários nos quais a recuperação de mensagens perdidas é feita apenas pelos módulos de aplicação de cada VANT. Os valores de  $TM$  se reduzem 28, 21, 9 e 10% quando os conjuntos com 1, 2, 4 e 8 VANTs, respectivamente, em comparação aos cenários com recuperação de mensagens no sistema de comunicação em relação àqueles com recuperação de mensagens apenas no nível da aplicação. Além disso, como esperado, os resultados mostram que lidar com canais de comunicação não confiáveis

Tabela I: Resultados dos experimentos com coberturas de áreas usando diferentes conjuntos estáticos e dinâmicos de VANTs em cenários de comunicação, com diferentes tipos de canais de comunicação e de sistemas de comunicação.

Cenário de Comunicação	NVANT	Número de Inclusões/Remoções								
		0			1			2		
		TM	VC	TV	TM	VC	TV	TM	VC	TV
Sistema de comunicação otimista, usando canal de comunicação confiável	1	34.47 ± 3.00	1.09 ± 0.01	432 ± 4	33.63 ± 2.58	1.09 ± 0.02	432 ± 8	34.40 ± 2.77	1.10 ± 0.02	440 ± 8
	2	13.80 ± 0.47	1.07 ± 0.01	428 ± 4	13.85 ± 0.47	1.07 ± 0.01	428 ± 4	13.51 ± 0.44	1.07 ± 0.01	428 ± 4
	4	7.11 ± 0.30	1.06 ± 0.01	424 ± 4	7.40 ± 0.36	1.06 ± 0.01	424 ± 4	7.32 ± 0.35	1.06 ± 0.01	424 ± 4
	8	5.44 ± 0.24	1.07 ± 0.01	428 ± 4	5.66 ± 0.27	1.07 ± 0.01	428 ± 4	5.67 ± 0.25	1.07 ± 0.01	428 ± 4
Sistema de comunicação com confirmação, usando canal de comunicação confiável	1	39.10 ± 0.37	1.00 ± 0.00	400 ± 0	38.85 ± 0.44	1.00 ± 0.00	400 ± 0	38.74 ± 0.40	1.00 ± 0.00	400 ± 0
	2	27.73 ± 0.18	1.02 ± 0.02	408 ± 8	27.64 ± 0.20	1.02 ± 0.02	408 ± 8	27.67 ± 0.20	1.02 ± 0.02	408 ± 8
	4	22.26 ± 0.33	1.02 ± 0.02	408 ± 8	22.69 ± 0.42	1.02 ± 0.02	408 ± 8	22.70 ± 0.35	1.02 ± 0.02	408 ± 8
	8	23.04 ± 0.49	1.03 ± 0.02	412 ± 8	23.45 ± 0.56	1.03 ± 0.02	412 ± 8	23.20 ± 0.58	1.03 ± 0.02	412 ± 8
Sistema de comunicação com confirmação, usando canal de comunicação não confiável	1	76.75 ± 1.57	1.35 ± 0.17	540 ± 68	77.71 ± 1.48	1.36 ± 0.15	544 ± 60	77.35 ± 1.46	1.40 ± 0.23	560 ± 92
	2	57.89 ± 2.75	1.38 ± 0.15	552 ± 60	57.49 ± 1.92	1.38 ± 0.22	552 ± 88	57.63 ± 1.79	1.37 ± 0.18	548 ± 72
	4	45.54 ± 1.55	1.37 ± 0.18	548 ± 72	45.60 ± 1.42	1.36 ± 0.18	544 ± 72	45.36 ± 1.44	1.37 ± 0.17	548 ± 68
	8	49.49 ± 1.36	1.40 ± 0.23	560 ± 92	49.61 ± 1.11	1.40 ± 0.23	560 ± 92	49.41 ± 1.11	1.40 ± 0.23	560 ± 92
Sistema de comunicação com confirmação e retransmissão, usando canal de comunicação não confiável	1	55.15 ± 3.87	1.24 ± 0.08	496 ± 32	55.55 ± 3.21	1.21 ± 0.13	484 ± 52	56.07 ± 3.17	1.27 ± 0.13	508 ± 52
	2	46.01 ± 2.71	1.24 ± 0.08	496 ± 8	45.97 ± 2.68	1.24 ± 0.08	496 ± 8	46.00 ± 2.95	1.26 ± 0.09	504 ± 8
	4	41.45 ± 3.95	1.25 ± 0.09	500 ± 8	41.15 ± 3.12	1.26 ± 0.09	504 ± 8	41.18 ± 3.20	1.26 ± 0.09	504 ± 8
	8	44.66 ± 4.49	1.27 ± 0.13	508 ± 8	45.40 ± 4.27	1.27 ± 0.13	508 ± 8	45.39 ± 4.49	1.27 ± 0.13	508 ± 8

reduz o desempenho em todas as métricas quando comparados com a cobertura de área realizada com canais de comunicação confiáveis.

Em termos das mudanças dinâmicas no conjunto de VANTs, os resultados mostram que elas não trouxeram variações de desempenho estatisticamente relevantes em termos das métricas analisadas.

## V. TRABALHOS RELACIONADOS

Uma variada gama de aplicações com VANTs envolve alguma instância do problema básico de cobertura de uma área de interesse [19], [20], [2], [21]. Nesse contexto, o problema da cobertura de área com múltiplos VANTs tem sido estudado considerando diferentes aspectos e hipóteses básicas, por exemplo: alguns trabalhos lidam com a garantia de certas formações para evitar a perda de conectividade entre os VANTs e a estação base [22]; outras abordagens focam em coordenar os VANTs para evitar que visitem áreas de forma redundante [6]; outros trabalhos estão interessados em encontrar a melhor forma de dividir a área de interesse entre os VANTs [5], [20] etc.

Essas abordagens não consideram a cobertura de área com um conjunto dinâmico de VANTs, em que VANTs podem ser incluídos e removidos do conjunto de forma dinâmica durante a missão. A proposta apresentada em [3] foi uma das primeiras abordagens a considerar a possibilidade de missões com conjuntos dinâmicos de VANTs. Contudo, essa proposta assume que os canais de comunicação são confiáveis, desconsiderando os possíveis impactos trazidos por falhas de comunicação na cobertura de área. Alguns trabalhos analisam os impactos da comunicação em problemas com conjuntos de VANTs (e.g., [12], [11]). Entretanto, esses trabalhos não consideram conjuntos dinâmicos de VANTs [12], [11] ou não focam diretamente no problema de cobertura de área [11].

Diferente das abordagens discutidas acima, neste trabalho estendemos a proposta de [3] para investigar especificamente

os impactos trazidos por falhas de comunicação no desempenho da cobertura de área com conjunto dinâmico de VANTs. Com isso, consideramos a cobertura de área com conjuntos dinâmicos em cenários mais realísticos.

## VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho analisou o impacto da comunicação em aplicações de cobertura de área com um conjunto dinâmico de VANTs. Para tanto, a aplicação distribuída foi completamente implementada usando o OGUM, um *framework* baseado em ROS/Gazebo que permite realizar missões de cobertura de área utilizando um conjunto dinâmico de VANTs. Para viabilizar a avaliação em cenários mais realísticos de comunicação, o OGUM foi estendido para permitir a comunicação considerando canais de comunicação não confiáveis, sujeitos à perda de mensagens. Além disso, implementou-se um subsistema de comunicação capaz de realizar confirmação e retransmissão de mensagens. Para uma abordagem mais completa do desempenho, foi também implementada uma abordagem de recuperação de mensagens perdidas em módulos executados no VANT em nível de aplicação. Foram avaliados cenários com conjuntos estáticos e dinâmicos de VANTs de diferentes tamanhos. Além disso, foram considerados experimentos com diferentes perfis de comunicação.

O impacto da comunicação no desempenho da cobertura de área foi avaliado considerando o tempo médio de execução da missão, do número médio de visitas por célula e do total de visitas por célula. Os resultados mostram que, em cenários onde o canal de comunicação está livre de perda de mensagens, implementar mecanismos de confirmação de mensagem pode comprometer significativamente o desempenho da cobertura de área. Por outro lado, em cenários com canais de comunicação sujeitos a perda de mensagens, implementar mecanismos de recuperação de mensagens no nível da própria aplicação pode implicar em degradação significativa de desempenho quando comparado com os casos nos quais a recuperação é realizada pelos sistemas de comunicação subjacentes.

Em nenhum dos cenários analisados, as variações no tamanho do conjunto de VANTs implicaram em variações estatisticamente relevantes no desempenho em relação às métricas analisadas. Acreditamos que a decisão de remoção e inclusão dinâmica de VANTs, o (re)particionamento e a (re)alocação de subáreas centralizados na estação base pode ter contribuído para esse efeito nos experimentos realizados.

Como trabalhos futuros, é importante investigar aspectos relacionados a cobertura de área com conjuntos dinâmicos de VANTs com coordenação descentralizada, i.e., sem dependência da estação base. Nessa investigação, é importante considerar se a coordenação e planejamento distribuídos não são elementos que comprometem significativamente o desempenho de aplicações de cobertura de área com conjuntos dinâmicos de VANTs. Ainda nessa perspectiva de trabalho futuro é avaliar como perdas de mensagens mais severas e potenciais particionamentos temporários dos canais de comunicação impactam o desempenho e a consistência da cobertura de área com conjunto dinâmico de VANTs.

Por fim, os resultados apontam que o contexto de comunicação tem impacto significativo no desempenho da cobertura de área. Por isso, outro trabalho futuro é investigar como estratégias sensíveis ao contexto de comunicação podem impactar o desempenho da cobertura de área com conjunto dinâmico de VANTs.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e pela Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB).

#### REFERÊNCIAS

- [1] J. "George, S. P. B., and J. B. Sousa, "Search strategies for multiple uav search and destroy missions," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 61, no. 1, pp. 355–367, Jan 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10846-010-9486-8>
- [2] N. Nigam, "The multiple unmanned air vehicle persistent surveillance problem: A review," *Machines*, vol. 2, no. 1, pp. 13–72, 2014. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2075-1702/2/1/13>
- [3] G. B. P. Ribeiro, G. M. Simões, F. Assis, S. Gorender, and A. S. de Sá, "Simple area coverage by a dynamic set of unmanned aerial vehicles," in *2020 X Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC)*, 2020, pp. 1–8. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/SBESC51047.2020.9277866>
- [4] Y. Chen, H. Zhang, and M. Xu, "The coverage problem in uav network: A survey," in *Fifth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT)*, 2014, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICCCNT.2014.6963085>
- [5] S. Chen, C. Li, and S. Zhuo, "A distributed coverage algorithm for multi-uav with average voronoi partition," in *2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. IEEE, 2017, pp. 1083–1086. [Online]. Available: <https://doi.org/10.23919/ICCAS.2017.8204377>
- [6] T. M. Cabreira and P. R. Ferreira, "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)*, 2016, pp. 151–156. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/LARS-SBR.2016.32>
- [7] M. F. da Silva and A. S. de Sá, "THexCAD: Uma plataforma de prototipagem e simulação de cobertura para Área com múltiplos drones," in *Anais do Salão de Ferramentas do XLIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2025)*. Porto Alegre: SBC, 2025, pp. 53–63. [Online]. Available: [https://doi.org/10.5753/sbrc\\_estendido.2025.7062](https://doi.org/10.5753/sbrc_estendido.2025.7062)
- [8] S. Javed, A. Hassan, R. Ahmad, W. Ahmed, R. Ahmed, A. Saadat, and M. Guizani, "State-of-the-art and future research challenges in uav swarms," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, no. 11, pp. 19 023–19 045, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3364230>
- [9] Y. Zhou, B. Rao, and W. Wang, "Uav swarm intelligence: Recent advances and future trends," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 183 856–183 878, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028865>
- [10] G. B. P. Ribeiro, "Ogum: um framework para cobertura de área utilizando um conjunto dinâmico de VANTs," Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, Jun 2021. [Online]. Available: <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/33608>
- [11] L. Lucchesi, M. Endler, and B. J. O. de Souza, "Dynamic effects of communication delay, failure rates, and speed on UAV swarm formation," in *Anais do XL II Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. SBC, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5753/sbrc.2024.1445>
- [12] I. Chandran and K. Vipin, "Network analysis of decentralized fault-tolerant UAV swarm coordination in critical missions," *Drone Systems and Applications*, vol. 12, pp. 1–15, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0101>
- [13] O. S. R. Foundation, "ROS:robot operating system," 2022, acesso em: 24 jan. 2025. [Online]. Available: <https://www.ros.org/>
- [14] Gazebo, "Open source robotics foundation," 2022, acessado em 10 abr. 2022. [Online]. Available: <http://gazebosim.org/>
- [15] G. M. Simões and A. S. de Sá, "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, pp. 217–224. [Online]. Available: [https://doi.org/10.5753/sbrc\\_estendido.2020.12422](https://doi.org/10.5753/sbrc_estendido.2020.12422)
- [16] H. Choset and P. Pignon, "Coverage path planning: The boustrophedon cellular decomposition," in *Field and Service Robotics*, A. Zelinsky, Ed. London: Springer, 1998, pp. 203–209. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1273-0\\_32](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1273-0_32)
- [17] R. Jain, *The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling.*, ser. Wiley professional computing. Wiley, 1991.
- [18] I. Bekmezci, O. Sahingoz, and a. Temel, "Flying ad-hoc networks (fanets): a survey," *Ad Hoc Networks*, vol. 11, pp. 1254–1270, 05 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.12.004>
- [19] Q. Yu, L. Cheng, X. Wang, P. Bao, and Q. Zhu, "Research on multiple unmanned aerial vehicles area coverage for gas distribution mapping," in *2018 10th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*, 2018, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICMIC.2018.8529963>
- [20] A. Maarouf, W. Ko, and A. S. Nough, "A recursive optimization algorithm for a surveillance of a convex area," in *2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO)*, 2019, pp. 1–4. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICMSAO.2019.8880353>
- [21] S.-J. Chung, A. A. Paranjape, P. Dames, S. Shen, and V. Kumar, "A survey on aerial swarm robotics," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34, no. 4, pp. 837–855, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TRO.2018.2857475>
- [22] M. Rosalie, M. R. Brust, G. Danoy, S. Chaumette, and P. Bouvry, "Coverage optimization with connectivity preservation for uav swarms applying chaotic dynamics," in *2017 IEEE International Conference on Autonomic Computing (ICAC)*, 2017, pp. 113–118. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICAC.2017.26>