

Análise de Escalabilidade de Método de Exploração e Mapeamento Bioinspirado no Formato das colmeias de Abelha

Bruno de Campo Monteiro Gomes
brunogomes.1982@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Prof. Dr. Marco Aurélio Wehrmeister
wehrmeister@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

ABSTRACT

In situations of catastrophes or accidents that cause a high risk of life for people and also for the rescue team, the use of multiple Unmanned Aerial Vehicles (UAV) can help a lot in scenarios where the expected time of mapping and exploration is very small, so the faster the internal environment is known and mapped, the better the rescue strategy will be and the more likely the lives will be saved. The help of multiple UAVs can be very advantageous in the race against time for data collection of the scenario to be rescued, in indoor and unknown environments, in which navigation systems such as global positioning (GPS) are not a possible solution. However, a proposal was created to be applied in these cases, which uses a bioinspired method with multiple UAV for exploration and mapping, so that each autonomous UAV starts the process of territory exploration inspiring in the hexagonal shape of honeycombs of bees. However, this method used a maximum of three UAV due to the technological limitations of the simulation environment. Therefore, the purpose of this work was to create a simulation environment capable of working with dozens of UAV at the same time, so that the scalability of this method can be evaluated, taking into account the metrics of the original work and adding more and more UAV to the scenarios. It was observed that the method can be scalable up to a certain number of UAVs, depending on the area of the environment, so that when adding more UAVs, the exploration time does not decrease, sometimes increases, due to increased traffic and the blockages generated.

CCS CONCEPTS

• **Computing methodologies** → **Simulation environments.**

PALAVRAS CLAVES

Abelha, Bioinspirado, Drones, Escalabilidade, Exploração, Hexagonal, Múltiplos, NetLogo, Robôs, Simulação, VANT.

1 INTRODUÇÃO

O uso de múltiplos robôs em atividades de exploração proporciona melhores resultados, realizando as tarefas em menor tempo do que se fosse utilizado apenas um robô, além disso, o aumento da redundância de agentes reflete em maior tolerância a falhas [3].

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) são ferramentas que auxiliam às operações de resgate em ambientes em que o acesso é reduzido e perigoso. Então, o desafio é diminuir o tempo de exploração e geração de dados em ambientes internos com diversos robôs trabalhando ao mesmo tempo [10]. Desenvolver e testar esses sistemas de múltiplos robôs em um ambiente real é caro e perigoso. Por isso, as simulações são ferramentas indispensáveis para ajudar em projetos de exploração interna multi-agente [2]

Além disso, a medida que o número de agentes aumenta, a dificuldade de controle do sistema para atingir a meta se torna cada vez mais difícil [8].

Pensando nisso, Rosa em seu estudo [9] propôs a criação de um método de exploração e mapeamento bioinspirado na construção dos favos de mel das abelhas. O qual mostrou-se eficaz para explorações com um ou três VANT apenas, e em ambiente de simulação. Porém, explorações em áreas maiores necessitam de mais agentes trabalhando, de modo que é vital o uso de dezenas ou até centenas de VANT para que o tempo do mapeamento seja menor e aceitável para um resgate de sucesso.

Contudo, as ferramentas de simulação utilizadas no trabalho de [9], limitaram-se a no máximo três VANT, devido ao alto tempo de processamento dispensado. Consequentemente, observou-se os seguintes problemas:

- Número de VANT insuficientes para o tamanho da área a ser explorada.
- Tempo para realizar o mapeamento inaceitável devido as urgências em resgates.
- Periculosidade e custo muito alto para teste do método em ambientes físicos reais.
- Ferramentas de simulação que dispensam um alto custo computacional com o aumento do número de VANT nos experimentos. Tornando-se inviável a simulação com dezenas deles.

Portanto, o objetivo deste trabalho é desenvolver o método de exploração e mapeamento do Rosa [9] em um ambiente de simulação capaz de testar a sua escalabilidade. Para isso, utilizou-se a ferramenta de simulação NetLogo [11] que permitiu a adição de dezenas de VANT aos cenários. Utilizando-se as mesmas métricas para analisar os resultados do trabalho original, possibilitou-se a verificação da escalabilidade e a quantidade máxima de VANT trabalhando em cada tamanho de ambiente explorado.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

A maior parte das soluções de exploração e mapeamento apresentadas em estudos anteriores fizeram o mapeamento orientado pelas técnicas de SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), ou seja, simultaneamente mapeando e localizando objetos e possíveis focos de perigo, como incêndio por exemplo.

Entretanto, não é o foco desses algoritmos de SLAM garantir a exploração completa do ambiente, por mais que alguns trabalhos definam pontos a serem mapeados e estabeleçam algum critério para definir qual robô será responsável por mapeá-lo. Muitos trabalhos são focados no mapeamento métrico, o que pode gerar alto consumo de memória e processamento [10]. Consequentemente, inviabiliza o desenvolvimento de sistemas de controle de robôs autônomos em áreas internas e desconhecidas.

Um dos desastres mais famosos que foi o ataque terrorista as torres do (*World Trade Center*). Já naquela época, usou-se robôs para a procura e resgate das vítimas [4]. Os quais foram responsáveis pelas imagens capturadas e conclui-se que a interação entre humanos e robôs ajuda muito a diminuir o perigo, o estresse e a fadiga da equipe de resgate.

Atualmente, para implementações com múltiplos robôs, existem diferentes estudos para enfrentar os inúmeros desafios que ocorrem, como a navegação, comunicação entre os robôs, ou a tomada de decisão por consenso. O sucesso em vencer esses desafios gera um sistema robusto e confiável que permite um ótimo desempenho nas tarefas de exploração e localização de vítimas [7]

Um exemplo de método bioinspirado e que também utiliza a ferramenta Netlogo para as simulações é o criado por [12], o qual reproduz o comportamento de busca de alimentos das formigas para atingir o alvo através de uma rota ideal, usando feromônios. Porém, diferentemente dos algoritmos de *ant* (formiga) comuns, nesse caso, o comportamento das formigas é afetado por um número diferente de fatores ambientais e também é expandido ao longo da simulação. Encontrando-se no final, uma relação entre o número de formigas e os fatores de influência do ambiente.

Contudo, o estudo de [1] diz que a evolução da miniaturização dos VANT estimula a utilização desses multi-agentes nas missões de busca em ambientes desconhecidos, desde que o controle autônomo e adaptativo dos sistemas sejam eficazes. [1] também explana que as meta-heurísticas de inspiração biológicas, como às apresentadas neste trabalho, são um desafio para pesquisas futuras quando trata-se de: combinar e otimizar múltiplas meta-heurísticas e aprimorar as meta-heurísticas biologicamente inspiradas com os avanços da tecnologia. Esse trabalho usa duas meta-heurísticas bioinspiradas para otimizar a coordenação dos VANT na busca pelo alvo, as quais são: como o comportamento de agrupamento de pássaros e *stigmergy* (estigmergia), que representa a forma de comunicação direta e indireta observada em cupins.

Finalmente, o método de [10], que é a inspiração deste presente trabalho de escalabilidade, promove a cooperação dos VANT no mapeamento e exploração dos ambientes de simulação. Inspirado na forma como as abelhas constroem as colmeias, de modo que cada novo espaço adjacente (hexágono) a ser explorado é identificado pelo VANT, esse hexágono é adicionado a uma estrutura topológica, a qual é o mapa em que os múltiplos VANT usam para realizar seus deslocamentos e explorações. De modo que assim que o primeiro VANT (sentinela) entra no ambiente desconhecido, inicia-se o processo de exploração e mapeamento, e a medida que os subsequentes VANT também entram no ambiente, um mapeamento topológico avança a cada movimentação até que todo o território fica conhecido.

3 SOLUÇÃO PROPOSTA

Primeiramente, o método original foi desenvolvido para que seja executado em um ambiente de simulação, o qual foi construído com a ferramenta V-REP (*virtual Robot Experimentation Platform*) (Coppelia) [6]. A qual possibilita a construção de cenários com diversos tipos de robôs. No V-REP são definidos os VANT com seus devidos controles de movimento, obstáculos, sensores, pessoas a serem resgatadas e demais componentes do cenário para serem

usados na simulação. No matlab, são implementados os comandos para a construção dos mapas e controle das tarefas do VANT, ou seja, é onde está a unidade centralizadora (UC) das informações, a qual organiza a exploração.

3.1 Exploração

O método inicia o mapeamento de um ambiente desconhecido a partir de um ponto inicial gerado pelo primeiro VANT que dá início a exploração (sentinela), esse primeiro VANT é responsável por fazer a primeira exploração, adicionando o primeiro hexágono explorado na lista de hexágonos visitados. Em seguida, ele verifica se há adjacências ao hexágono em que se encontra, adicionando-as à lista de hexágonos não visitados. Posteriormente, os demais VANT iniciam a exploração já com algum hexágono na lista de hexágonos não visitados [10].

No experimento de [10], criou-se dois cenários diferentes no simulador V-REP para avaliar o algoritmo desenvolvido, os quais representam um ambiente interno parecido com um escritório comercial com mobílias, paredes, corredores e um foco de incêndio. Os dois ambientes possuem uma dimensão de 10m2. As Figuras 1 e 2 apresentam os cenários 1 e 2, respectivamente, com visões superiores.



Figure 1: Cenário 1: visão superior [10].

A Figuras 3 apresenta o diagrama de atividade das ações de exploração do VANT sentinela, o qual inicia a exploração do ambiente, que inicialmente é desconhecido. Esse VANT sentinela faz a leitura dos espaços adjacentes e inicia as listas de hexágonos visitados e não visitados. Depois dessa primeira exploração, os próximos VANT se comportam como ilustrado na Figura 4, sendo a condição de parada do experimento o fato de que a lista de hexágonos não visitados esteja vazia. Portanto, primeiro VANT ao iniciar a exploração tem um comportamento um pouco diferente dos demais na

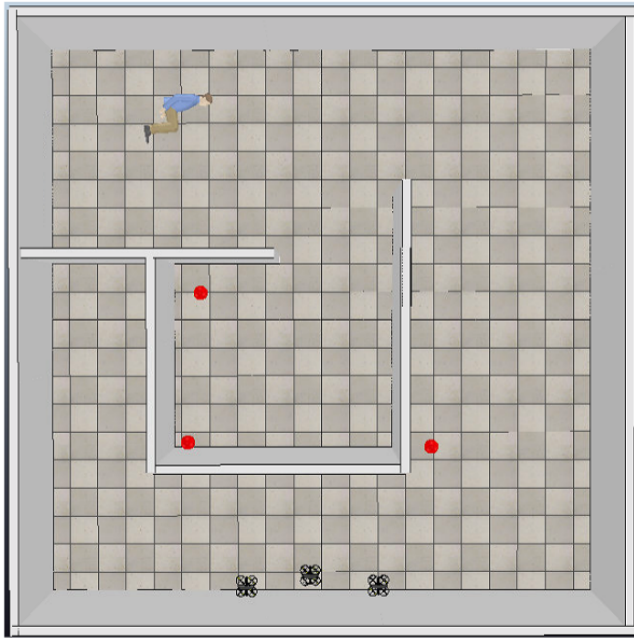


Figure 2: Cenário 2: visão superior [10].

primeira tarefa, pois é o responsável por gerar o primeiro hexágono do mapa, o qual é identificado pelo sistema com um número (id). Nas próximas explorações, ele terá o comportamento padrão dos demais VANT [10].

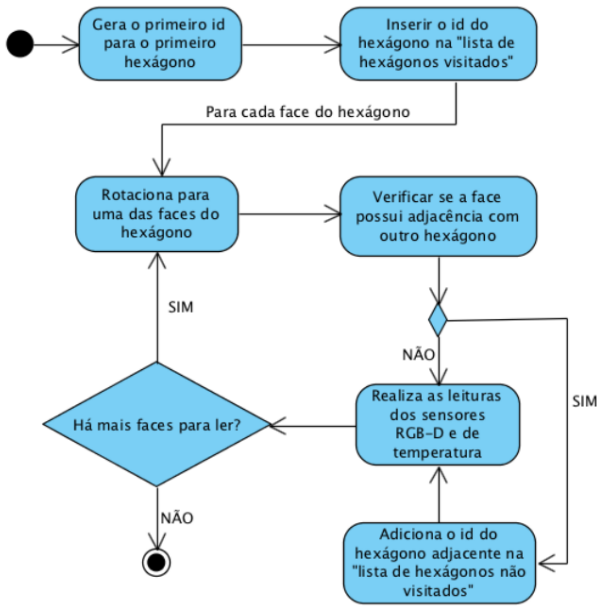


Figure 3: Primeira exploração do ambiente com o primeiro VANT [10].

A Figura 5 ilustra dois VANT em ação em um ambiente desconhecido, de modo que o hexágono 1 (verde) representa um espaço

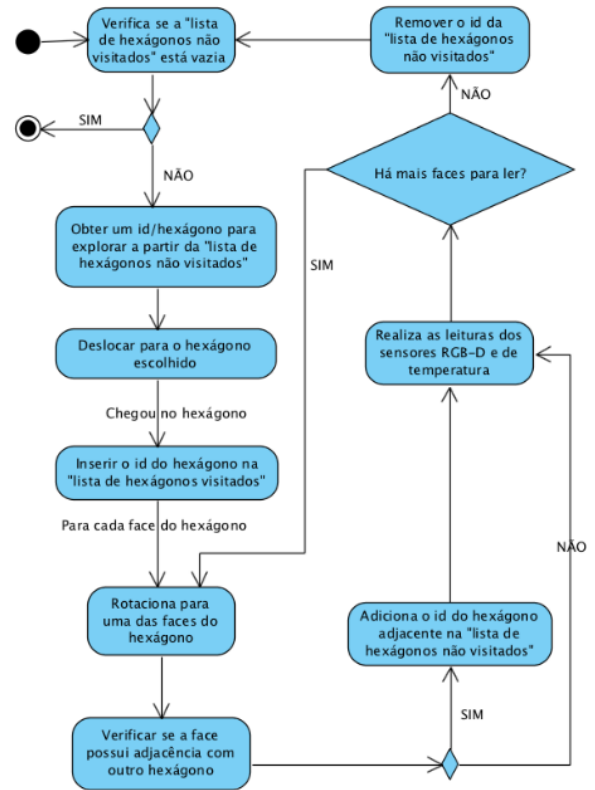


Figure 4: Exploração de todos os VANT depois da primeira exploração [10].

que já foi visitado e por isso teve seu número identificador (id) retirado da lista de hexágonos não visitados. Os hexágonos amarelos (4, 5, 6 e 7) são locais detectados pelo VANT 2, e são adicionados à lista de hexágonos não visitados. Finalmente, os hexágonos azuis (2 e 3) exibem os VANT em exploração.

3.2 Estratégia de escolha do próximo hexágono

A escolha do próximo hexágono a ser explorado é muito importante pois afeta diretamente na quantidade de deslocamentos que os VANT farão no processo de mapeamento. Para isso, adotou-se três estratégias

- *First In First Out (FIFO)*, de modo que o primeiro hexágono inserido na "lista de hexágonos não visitados" é o escolhido para ser o próximo a ser explorado.
- *Distância euclidiana (DE)* do primeiro hexágono mapeado pelo VANT sentinela em relação aos hexágonos da "lista de hexágonos não visitados". Escolher-se-á o hexágono que tiver a menor DE do primeiro hexágono. Portanto, considerando a posição $x1y1z1$ do primeiro hexágono $h1$ e a posição $xjyjzj$ de cada hexágono, o escolhido será aquele hj que possuir a menor DE, calculada como demonstra a equação 1.

$$DE = \sqrt{(x1 - xj)^2 + (y1 - yj)^2 + (z1 - zj)^2} \quad (1)$$

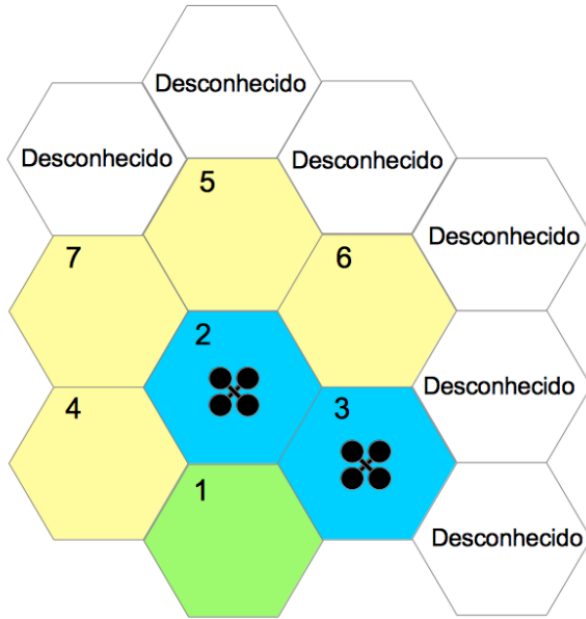


Figure 5: VANT em exploração em um ambiente desconhecido [10].

- Distância euclidiana relativa (DER) em relação ao primeiro hexágono, assim como a estratégia anterior, somando-se com a distância euclidiana entre cada hexágono e a posição atual do VANT. Considerando a posição $x_j y_j z_j$ de cada hexágono, o escolhido será o que possuir a menor DER, calculada como pode ser visto na equação 2.

$$DER = DE_j + \sqrt{(x_1 - x_j)^2 + (y_1 - y_j)^2 + (z_1 - z_j)^2} \quad (2)$$

3.3 Deslocamento do VANT

Assim que o próximo hexágono a ser explorado é escolhido por uma das três estratégias anteriores, o VANT em ação se deslocará até o centro do hexágono escolhido, e para isso, ele transita apenas por meio de espaços livres e conhecidos, de modo que esses hexágonos formam um ou mais caminhos a serem percorridos, tendo como origem a posição do VANT e o hexágono escolhido como destino.

Para a definição do caminho a ser adotado pelo VANT entre os possíveis, utilizou-se o algoritmo de Dijkstra [5] que calcula o caminho de custo mínimo entre os hexágonos conhecidos no mapa topológico da simulação. Com esse caminho estabelecido, que é uma lista de ids de hexágonos adjacentes, o VANT transita pelo mapa, através de trajetórias retílineas do centro de um hexágono até o centro do outro, até alcançar seu destino. Assumindo que durante o deslocamento não serão encontrados demais obstáculos dinâmicos, com exceção dos outros VANT que estão circulando no espaço [10].

3.4 Descrição do Modelo Proposto

Este trabalho visa avaliar se esse método pode ser escalável, ou seja, fazer um estudo sobre os resultados da exploração quando

se adiciona dezenas de VANT aos cenários, sendo assim, optou-se por utilizar a ferramenta Netlogo [11], que possibilita o desenvolvimento de um ambiente multiagente necessário para o sucesso deste experimento. Essa ferramenta é comumente usada para estudar comportamentos complexos de sistemas multiagentes. Para este trabalho foram criadas duas interfaces, uma representa o tamanho original do [10] com os seus dois cenários diferentes (1 e 2), as Figuras 6 e 7 ilustram dois desses ambientes do NetLogo que correspondem e representam proporcionalmente a mesma área dos dois construídos por [10] no V-REP, portanto, possuem a mesma proporção entre tamanhos do VANT e do hexágono. A outra interface contempla dois cenários maiores, com dimensões grandes o suficiente para a inserção de múltiplos VANT, de modo que haja um tráfego menor, com isso os VANT têm mais liberdade para explorar sem serem afetados com os bloqueios entre os mesmos, possibilitando uma análise ainda maior sobre a escalabilidade do método.

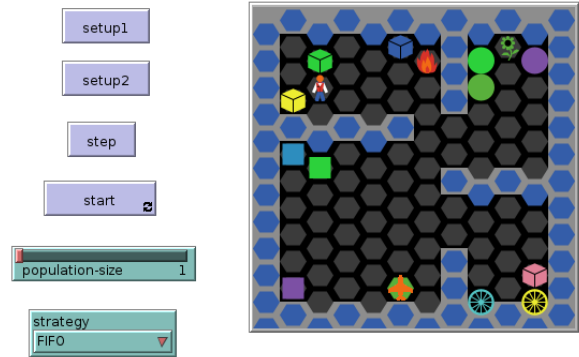


Figure 6: Cenário 1 - Netlogo - Tamanho original.

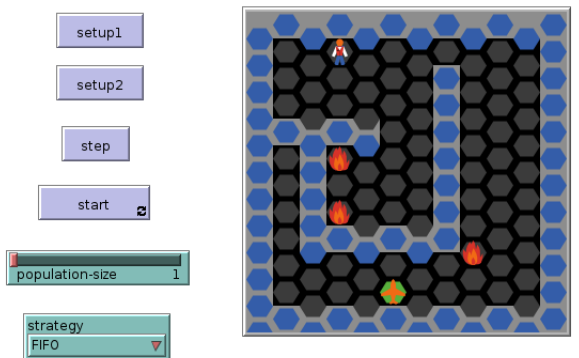


Figure 7: Cenário 2 - Netlogo - Tamanho original.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Algumas premissas são adotadas para as métricas de tempo utilizadas nos experimentos. Elas representam as estimativas de tempo que um VANT real necessita para realizar as seguintes ações [10]:

- unidade de tempo de deslocamento: (5 segundos) tempo gasto para um VANT se deslocar do centro de um hexágono para o centro de outro hexágono vizinho;
- unidade de tempo de exploração do hexágono: (30 segundos) tempo necessário para que um VANT faça a exploração e leitura para identificar adjacências;
- tempo de resolução de bloqueio: (4 segundos) tempo que leva para a resolução do bloqueio.

A equação 3 exibe como é feito o cálculo para estimar o tempo total para o término das explorações nos experimentos. Portanto, o campo D representa o número de deslocamentos realizados pelo VANT, B é o número de bloqueios e H é o número de hexágonos explorados pelo VANT.

$$T = (D \times 5\text{segundos}) + (H \times 30\text{segundos}) + (B \times 4\text{segundos}) \quad (3)$$

As tabelas 1 e 2 exibem os dados obtidos dos tempos estimados gerados pela equação (3) nas simulações com apenas um VANT, referindo-se aos cenário 1 e cenário 2 respectivamente. Compara-se em cada uma dessas duas tabelas os valores obtidos pelos experimentos originais de [10] com os obtidos neste trabalho através da ferramenta NetLogo.

Table 1: Dados dos cenários 1 dos experimentos com apenas um VANT.

| Estratégia | Cenário1-Original | | | Cenário1-NetLogo | | |
|------------|-------------------|---|-----|------------------|---|----|
| | D | B | H | D | B | H |
| FIFO | 318 | 0 | 103 | 184 | 0 | 69 |
| DE | 375 | 0 | 103 | 260 | 0 | 69 |
| DER | 142 | 0 | 103 | 97 | 0 | 69 |

Autoria própria.

Table 2: Dados dos cenários 2 dos experimentos com apenas um VANT.

| Estratégia | Cenário2-Original | | | Cenário2-NetLogo | | |
|------------|-------------------|---|-----|------------------|---|----|
| | D | B | H | D | B | H |
| FIFO | 377 | 0 | 132 | 255 | 0 | 77 |
| DE | 449 | 0 | 131 | 241 | 0 | 77 |
| DER | 190 | 0 | 128 | 105 | 0 | 77 |

Autoria própria.

Além disso, as tabelas 3 e 4 exprimem os resultados alcançados pelo trabalho de [10] com três VANT na simulação. Elas mostram os números obtidos por cada VANT no experimento.

Para efeito de comparação as tabelas 5 e 6 ilustram os resultados obtidos correspondentes aos cenários 1 e 2 deste trabalho através do NetLogo.

Table 3: Dados dos experimentos com três VANT-Cenário1-Original.

| Estratégia | VANT 1 | | | VANT 2 | | | VANT 3 | | |
|------------|--------|---|----|--------|---|----|--------|---|----|
| | D | B | H | D | B | H | D | B | H |
| FIFO | 151 | 7 | 35 | 152 | 6 | 34 | 161 | 7 | 32 |
| DE | 111 | 5 | 33 | 96 | 4 | 33 | 99 | 7 | 33 |
| DER | 45 | 0 | 37 | 46 | 0 | 32 | 58 | 1 | 33 |

[10].

Table 4: Dados dos experimentos com três VANT-Cenário2-Original.

| Estratégia | VANT 1 | | | VANT 2 | | | VANT 3 | | |
|------------|--------|----|----|--------|----|----|--------|----|----|
| | D | B | H | D | B | H | D | B | H |
| FIFO | 182 | 4 | 45 | 183 | 11 | 42 | 189 | 8 | 41 |
| DE | 159 | 23 | 42 | 170 | 19 | 44 | 166 | 11 | 42 |
| DER | 59 | 0 | 46 | 68 | 0 | 41 | 64 | 0 | 43 |

[10].

Table 5: Dados dos experimentos com três VANT-Cenário1-Netlogo.

| Estratégia | VANT 1 | | | VANT 2 | | | VANT 3 | | |
|------------|--------|---|----|--------|---|----|--------|---|----|
| | D | B | H | D | B | H | D | B | H |
| FIFO | 36 | 0 | 25 | 50 | 1 | 22 | 35 | 0 | 22 |
| DE | 50 | 1 | 21 | 38 | 0 | 23 | 42 | 0 | 25 |
| DER | 30 | 0 | 24 | 28 | 0 | 22 | 30 | 0 | 23 |

Autoria própria.

Table 6: Dados dos experimentos com três VANT-Cenário2-Netlogo.

| Estratégia | VANT 1 | | | VANT 2 | | | VANT 3 | | |
|------------|--------|---|----|--------|---|----|--------|---|----|
| | D | B | H | D | B | H | D | B | H |
| FIFO | 43 | 1 | 27 | 33 | 1 | 25 | 32 | 0 | 25 |
| DE | 36 | 0 | 26 | 27 | 0 | 26 | 31 | 1 | 25 |
| DER | 47 | 0 | 27 | 28 | 0 | 25 | 29 | 1 | 25 |

Autoria própria.

Os números das tabelas apresentadas mostram um número maior de hexágonos explorados no trabalho original de maneira geral, isso se deve ao fato dele ser explorado em duas camadas (superior e inferior) ao invés de uma camada operada pela simulação do NetLogo. Outra questão que diferencia é a dos bloqueios, os quais apareceram com valor mais elevado na simulação do V-REP, na qual o processamento é muito mais lento e as questões físicas de subir e descer as camadas também têm uma implicância maior na simulação.

Entretanto, observou-se que a diminuição dos tempos de simulação seguem a mesma tendência de atenuação apontada pelo trabalho original. Inclusive na questão das estratégias utilizadas. A Figura 8 mostra o gráfico do tempo estimado para os cenários 1 e 2, com 1 e 3 VANT, obtido no trabalho original do [10]. Já as Figuras

9 e 10 exibem os resultados obtidos por este trabalho nos cenários 1 e 2 respectivamente.

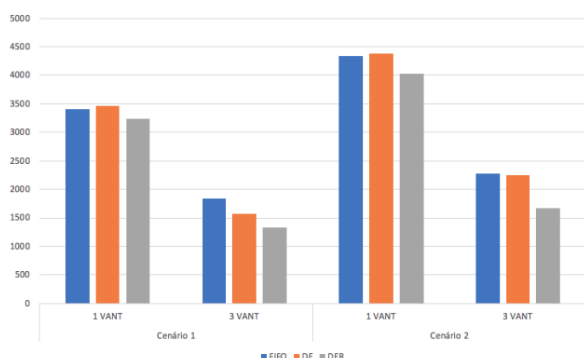


Figure 8: Tempos estimados - Cenário 1 e 2 - 1 e 3 VANT - Em segundos.

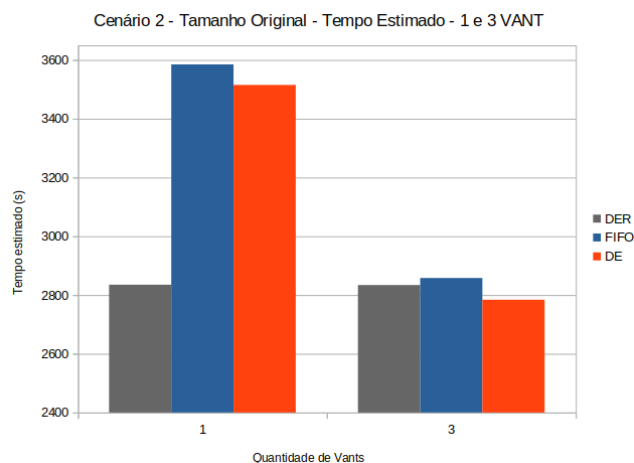


Figure 10: Tempos estimados - Cenário 2 - 1 e 3 VANT - Em segundos.

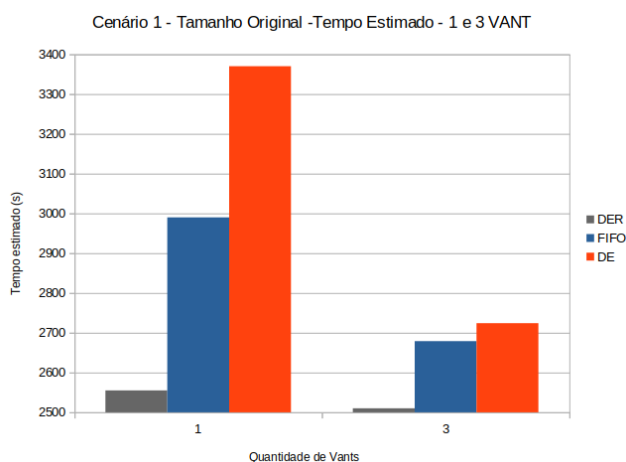


Figure 9: Tempos estimados - Cenário 1 - 1 e 3 VANT - Em segundos.

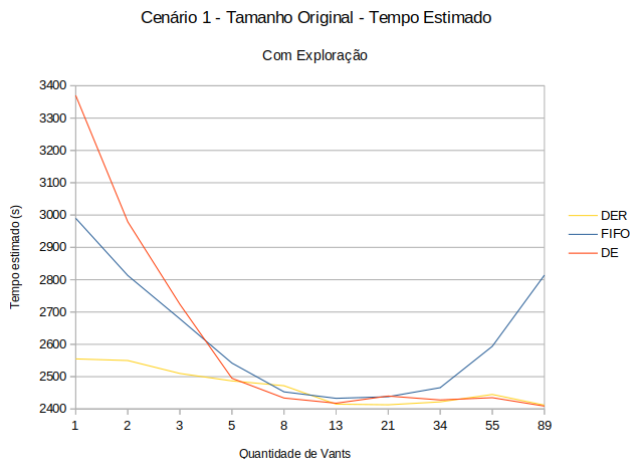


Figure 11: Tempos estimados - Cenário 1 - Com exploração.

Posteriormente, com o intuito de testar a escalabilidade do método original, adicionou-se mais VANT aos cenários de forma gradual e esse acréscimo de número de VANT foi feito com base na sequência de Fibonacci. Neste caso, os valores foram aumentados até o valor 89. Então, os experimentos foram feitos com os seguintes números de VANT: (1, 2, 3, 5, 8, 11, 13, 21, 34, 55 e 89).

A Figura 11 demonstra um gráfico com a diminuição do tempo estimado com os acréscimos dos VANT nas 3 estratégias.

Percebe-se, que embora sejam próximos, os valores obtidos nos experimentos deste trabalho são ligeiramente maiores do que os valores das métricas de [10]. Atribui-se essa diferença a dinâmica do movimento dos VANT que, no NetLogo, é mais simples e com menor precisão em relação ao ambiente físico, quando comparado com o V-REP. Claramente há um *trade-off* da precisão da simulação em relação ao mundo físico e a duração da simulação e quantidade de recursos computacionais necessários para realização da simulação.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho desenvolveu um sistema de exploração em ambientes internos desconhecidos, os quais, devido aos obstáculos e particularidades do ambiente interno, não podem usar sistemas de localização para ajudar em sua movimentação. Usando a ferramenta NetLogo que possibilitou a geração de experimentos que corresponderam ao sistema criado originalmente no V-REP e Matlab.

Com o uso da ferramenta de simulação NetLogo, permitiu-se adicionar dezenas de VANT aos experimentos, provocando uma notável diminuição no tempo estimado de exploração dos cenários.

Os cenários reproduzidos no NetLogo corresponderam aos cenários originais, além disso, cenários de perímetro expandido foram criados para aumentar a área da simulação, com o objetivo de diminuir o tráfego e os bloqueios quando dezenas de VANT são adicionados aos experimentos. Chegou-se ao número de no máximo 13 VANT para a melhora no tempo de uma área de $10m^2$ que corresponde ao

tamanho do cenário original. E para as áreas aumentadas de $116m^2$ aproximadamente a melhora significativa ocorreu até o número de 21 VANT.

Por fim, este trabalho demonstrou que o método de [10] é escalável nas três estratégias de escolha do próximo hexágono a ser explorado (DE, DER e FIFO). Contudo os gráficos mostram que, apesar das diferenças das ferramentas utilizadas e dos aspectos físicos dos cenários dos experimentos, os resultados obtidos na simulação com NetLogo são coerentes aos resultados apresentados em [10] e, portanto, a abordagem adotada neste trabalho usando o NetLogo é válida para analisar a escalabilidade do método proposto.

As simulações foram eficazes pois foram utilizados os mesmos algoritmos e também as mesmas métricas de estimação de tempo para validação dos resultados, assim como o mesmo critério de parada.

Portanto, o método de exploração bioinspirado de [10] mostrou-se escalável, sendo uma opção de estudos para exploração e mapeamento de ambientes internos desconhecidos de alto risco, podendo ser adaptado e aplicado em ambientes de simulação reais em trabalhos futuros.

REFERENCES

- [1] Antonio L Alfeo, Mario GCA Cimino, and Gigliola Vaglini. 2019. Enhancing biologically inspired swarm behavior: Metaheuristics to foster the optimization of UAVs coordination in target search. *Computers & Operations Research* 110 (2019), 34–47.
- [2] Andrea Augello, Salvatore Gaglio, Giuseppe Lo Re, and Daniele Peri. 2021. Simulation and Test of UAV Tasks with Resource-Constrained Hardware in the Loop. In *2021 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*. IEEE, 347–352.
- [3] W. Burgard, M. Moors, D. Fox, R. Simmons, and S. Thrun. 2000. Collaborative multi-robot exploration. In *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*, Vol. 1. 476–481 vol.1.
- [4] Jennifer Casper and Robin R. Murphy. 2003. Human-robot interactions during the robot-assisted urban search and rescue response at the world trade center. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)* 33, 3 (2003), 367–385.
- [5] Edsger W Dijkstra. 1959. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik* 1, 1 (1959), 269–271.
- [6] Marc Freese, Surya Singh, Fumio Ozaki, and Nobuto Matsuhira. 2010. Virtual Robot Experimentation Platform V-REP: A Versatile 3D Robot Simulator, Vol. 6472. 51–62. https://doi.org/10.1007/978-3-642-17319-6_8
- [7] Rubén Martín García, Daniel Hernández de la Iglesia, Juan F de Paz, Valderi RQ Leithardt, and Gabriel Villarrubia. 2021. Urban search and rescue with anti-pheromone robot swarm architecture. In *2021 Telecoms Conference (ConfTELE)*. IEEE, 1–6.
- [8] Ronnier Frates Rohrich et al. 2021. Comportamento coletivo e bioinspirado para sistemas multirrobô. (2021).
- [9] Ricardo da Rosa. 2020. *Método bioinspirado para exploração e mapeamento de ambientes internos com múltiplos VANT*. Ph. D. Dissertation. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
- [10] Ricardo da Rosa et al. 2020. Método bioinspirado para exploração e mapeamento de ambientes internos com múltiplos VANT. (2020), 15.
- [11] Seth Tisue and Uri Wilensky. 2004. NetLogo: Design and implementation of a multi-agent modeling environment. In *Proceedings of agent*, Vol. 2004. 7–9.
- [12] Yunxiang Zhang, Yanling Zhou, and Jing Cao. 2022. Research and Simulation of Ant Colony Foraging Behavior Based on Netlogo. In *2022 International Conference on Computation, Big-Data and Engineering (ICCBE)*. IEEE, 177–180.