

ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE COBERTURA DESCENTRALIZADAS: ABORDAGEM VIA CÉLULAS DE VORONOI

MATEUS S. MOURA, BERNARDO ORDONEZ

Laboratório de Controle e Automação, Departamento de Engenharia Elétrica

Escola Politécnica - UFBA

E-mails: mateus.sm@ieee.org; bordonez@ufba.br

Abstract— The control of a land vehicles network aiming to solve the coverage problem is evaluated, under the decentralized approach, through an established strategy that relies on the division of an environment of interest into Voronoi cells. Each cell is computed locally, considering the vehicle's range limit to the network, its field of view, the work area and the presence of obstacles, and after processing of the cell region, its centroid becomes the vehicle trajectory reference. Iteratively, this procedure is carried out until an equilibrium setting is achieved, seeking to maximize coverage. The simulations performed indicate an efficient and well distributed setup for convex and obstacle-free regions, and some questions arise for more complex regions, as the need of evaluation criteria for distribution and computational efficiency. However, the expansion of this strategy proved to be opportune and promising, in particular for a future application in aerial vehicles.

Keywords— Vehicle networks, Coverage problem, Voronoi, Delaunay, Range limit.

Resumo— O controle de uma rede de veículos terrestres almejando solucionar o problema de cobertura é avaliado, sob a abordagem descentralizada, por meio de uma estratégia consolidada pela literatura que se baseia na divisão de uma área de interesse em células de Voronoi. Cada célula é computada de forma local, levando em consideração o limite de alcance do veículo com a rede, o seu campo de visão, a área de trabalho e a presença de obstáculos, e após o processamento da região da célula, o seu centroide se torna a referência de trajetória do veículo. Iterativamente, este procedimento é realizado até que se obtenha uma situação de equilíbrio, buscando a maximização da cobertura. As simulações realizadas indicam uma configuração eficiente e bem distribuída para regiões convexas e desobstruídas, e algumas questões como critérios de avaliação da distribuição e eficiência computacional necessitam ser endereçados para regiões mais complexas. Contudo, a expansão dessa estratégia mostra-se oportuna e promissora, em particular para uma futura aplicação em veículos aéreos.

Palavras-chave— Redes de veículos, Problema de cobertura, Voronoi, Delaunay, Limite de alcance.

1 Introdução

O controle coordenado de múltiplos veículos autônomos, em particular os *drones* ou VANTs (veículos aéreos não tripulados), tem se tornado cada vez mais viável e vantajoso, do ponto de vista operacional, econômico e de segurança (Kumar e Michael, 2012). As diversas aplicações das redes de veículos, a exemplo de combate à incêndios (Khoon, Sebastian e Saman, 2012), cobertura de desastres naturais (Chen et al, 2013), vigilância (Stump e Michael, 2011) e logística (Kato et al, 2015), dentre outras, justificam a continuidade do desenvolvimento de estratégias efetivas de controle e comunicação.

O controle de uma rede de veículos pode ser centralizado, partindo do pressuposto de que o sistema central será sempre capaz de operar um conjunto de veículos, o que pode se tornar inviável; ou descentralizado, tornando o sistema mais robusto, flexível e operacional e, assim, sendo utilizado com maior frequência (Cao et al, 2013). Uma das limitações do controle descentralizado é o conjunto de restrições impostos pelo sistema de sensoriamento dos veículos, que possuem um alcance máximo de detecção determinado pela tecnologia utilizada, limitando a comunicação com outros veículos em certos casos e demandando novas abordagens para contornar o problema. A interação, portanto, passa a ser local, logo, limitada (Zavlanos, Ribeiro e Pappas, 2013).

Parte das aplicações das redes de veículos incorpora o requisito de cobrir, sem a orientação direta de uma entidade central, um determinado espaço, seja aéreo ou terrestre, caracterizando assim um problema de cobertura (*coverage*), que consiste em distribuir um grupo de veículos buscando ocupar um determinado ambiente de interesse. Para atingir tal objetivo, faz-se necessária a aplicação de estratégias de controle, levando em consideração as limitações de comunicação entre os veículos – o que leva à consequente limitação de informações sobre a vizinhança, além de critérios para medir a eficácia da cobertura de uma determinada distribuição (Bullo, Cortés e Martínez, 2009).

Na literatura, encontram-se diversos algoritmos para a solução do problema de cobertura em uma rede distribuída. Cortés et al (2004) introduziram o conceito de cobertura para redes de veículos e desenvolveram um procedimento baseado nos centroides de uma partição de Voronoi aplicada à área de trabalho. Cortés, Martínez e Bullo (2005) ampliaram essa percepção, ao considerarem as implicações dos limites de comunicação entre os veículos no algoritmo. Trabalhos mais recentes nesse sentido foram desenvolvidos por Schwager, Rus e Slotine (2009), Pavone et al (2011), Aragues, Sagues e Mezouar (2014) e Jiang, Sun e Anderson (2015).

Este trabalho se baseia nos conceitos e estratégias de controle explicitados por Bullo, Cortés e Martínez (2009), visando implementar uma estratégia descentralizada pela aplicação das partições de Vo-

ronoi para uma rede de veículos terrestres, utilizando como referência para cada veículo o respectivo centroide de sua célula de Voronoi e considerando os efeitos decorrentes dos limites de alcance da comunicação e da obstrução dos campos visuais para cada veículo por obstáculos e pela própria área de trabalho. Considera-se como ponto de partida a definição abrangente de Cortés et al (2004) do problema de cobertura: para uma área A e um número de veículos n , elaborar uma lei de controle descentralizada, de modo a tornar uniforme a distribuição dos veículos sobre A , e de modo que para cada veículo $i \in \{1, \dots, n\}$ com posição $p_i(t) \in \mathbb{R}^2$, exista um sinal de controle u_i , que dependa apenas de informação local, tal que $\dot{p}_i(t) = u_i$.

O artigo está dividido em cinco seções. A primeira seção consiste na introdução ao trabalho. A segunda seção consiste na definição e explanação acerca da partição de Voronoi, assim como conceitos complementares, como campo visual e conectividade de veículos. A terceira seção descreve a estratégia utilizada a fim de se cumprir o objetivo proposto a partir do problema de cobertura. A quarta seção mostra os resultados da estratégia de cobertura para diferentes casos, sem e com limitações de conectividade e para áreas convexas e não convexas, incluindo no último caso obstáculos, realizando-se uma análise da efetividade da metodologia. Por fim, a quinta seção consolida as conclusões obtidas a partir da análise e destaca possibilidades de evolução do trabalho.

2 Células de Voronoi

Nesta seção são conceituadas matematicamente a partição e as células de Voronoi, sendo posteriormente consideradas questões de limite de alcance, em conformidade com o objetivo do trabalho de desenvolver estratégias de cobertura descentralizadas.

2.1 Definição

Seja X um espaço, $d : X \times X \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ uma função distância, S um conjunto tal que $S \subset X$ e n pontos distintos $\mathcal{P} = \{p_1, \dots, p_n\}$ em S . Define-se a *partição* ou *diagrama de Voronoi* de S gerada por $\mathcal{P}$ como a coleção de conjuntos $\mathcal{V}(\mathcal{P}) = \{V_1(\mathcal{P}), \dots, V_n(\mathcal{P})\} \subset \mathbb{P}(S)$ definidos, para $i \in \{1, \dots, n\}$, como

$$V_i(\mathcal{P}) = \{q \in S \mid d(q, p_i) \leq d(q, p_j), \forall p_j \in \mathcal{P} \setminus \{p_i\}\}. \quad (1)$$

$V_i(\mathcal{P})$ é definida como uma *célula de Voronoi* do ponto p_i e corresponde ao conjunto de pontos de S que está mais próximo de p_i do que de quaisquer outros pontos de $\mathcal{P}$. O diagrama de Voronoi, em suma, pode ser descrito como uma coleção de células de Voronoi para todos os pontos em $\mathcal{P}$ em S . Considera-se a distância euclidiana entre pontos para a função d .

O diagrama de Voronoi é considerado o dual da triangulação de Delaunay, método comumente utili-

zado em aplicações matemáticas e em geometria computacional (Sung et al, 2015; Dai e Wang, 2015). Os circuncentros dos triângulos obtidos a partir de uma triangulação de Delaunay, para um determinado conjunto de pontos, correspondem aos vértices do diagrama de Voronoi para o mesmo conjunto.

2.2 Limitação de alcance e observabilidade

As definições na seção 2.1 não levam em consideração as restrições de alcance da comunicação nas redes de veículos, derivadas de limitações técnicas nos sensores e transmissores dos veículos. Para um determinado veículo com um raio de comunicação finito, sua respectiva célula de Voronoi pode em algum momento exceder a circunferência (ou esfera, no caso tridimensional) referente ao limite de comunicação do veículo com a rede.

Além do exposto acima, é preciso pontuar que, devido ao caráter descentralizado da estratégia, um veículo nem sempre será capaz de detectar todos os seus semelhantes à sua volta devido às limitações expostas, e tal fato afeta a construção da célula de Voronoi, pois somente a sua vizinhança observável comporá a rede de veículos à qual o mesmo está conectado em determinado momento.

Incluindo as restrições acima, para um raio de comunicação r , define-se a *célula de Voronoi limitada* em r :

$$V_{i,r}(\mathcal{P}_{v,i}) = V_i(\mathcal{P}_{v,i}) \cap \mathcal{B}(p_i, r), \quad i \in \{1, \dots, n\}, \quad (2)$$

em que $\mathcal{B}(p_i, r)$ corresponde à região circular ou esférica fechada de centro $p_i \in S$ e raio $r \geq 0$, e $\mathcal{P}_{v,i}$ ao conjunto de pontos *vizinhos* a p_i , sendo o subconjunto de $\mathcal{P}$ cujos pontos $p_j \in S$ satisfazem as seguintes expressões:

$$d(p_i, p_j) \leq r; p_k \in S, \forall p_k \in p_i p_j, \quad (3)$$

$p_i p_j$ se referindo ao segmento de reta entre p_i e p_j . Em outras palavras, o veículo i deve ser capaz de observar livremente o veículo j , sem que exista obstrução na sua visão por obstáculos ou pelos limites da área de trabalho.

As células de Voronoi da partição assim se limitam às regiões observáveis pelos veículos.

Assume-se que o intercâmbio de informações na rede de veículos é sincronizado e que não há erros de comunicação.

2.3 Área de trabalho, obstáculos e campo visual

Além das limitações impostas pela conectividade da rede, o próprio ambiente delimita a expansão da célula, ao se sondar possíveis obstáculos na área de trabalho.

A área de trabalho Q é definida, considerando o conjunto de m obstáculos $\mathcal{O} = \{O_1, \dots, O_m\}$, $O_i \subset S$ para $i \in \{1, \dots, m\}$, como:

$$Q = S \setminus (UO_i), \text{ para } i = 1, \dots, m. \quad (4)$$

A definição do diagrama de Voronoi é, então, atualizada:

$$V_i(\mathcal{P}) = \{q \in Q \mid d(q, p_i) \leq d(q, p_j), \forall p_j \in \mathcal{P} \setminus \{p_i\}\} \quad (5)$$

Finalmente, com as definições aplicadas acima, necessita-se levantar o impacto dos obstáculos e de áreas de trabalho côncavas no campo visual do veículo, para que o mesmo não calcule sua trajetória se baseando em áreas obstruídas visualmente. Desta forma, aplica-se a última modificação à célula de Voronoi para determinado veículo.

Define-se o campo visual $\mathcal{C}$ de p_i com respeito à Q da seguinte forma:

$$\mathcal{C}(p_i, Q) = \{c \in Q \mid p_j \in Q, \forall p_j \in p_{ic}\}, \quad (6)$$

em suma, $\mathcal{C}$ é o conjunto de todos os pontos c observáveis a partir de p_i na área de trabalho Q .

Aplicando a definição anterior na célula de Voronoi limitada em r , tem-se:

$$V_{i,r}(\mathcal{P}_{v,i}) = V_i(\mathcal{P}_{v,i}) \cap \mathcal{B}(p_i, r) \cap \mathcal{C}(p_i, Q). \quad (7)$$

3 Estratégia de Cobertura

Esta seção define uma metodologia para o cumprimento do objetivo de cobertura da área de interesse a ser programada nos veículos, utilizando os conceitos discutidos na seção 2, e faz considerações sobre o comportamento esperado da rede de veículos.

3.1 Estratégia de Cobertura Descentralizada

Para fins deste trabalho, a seguinte definição da tarefa de cobertura é aplicada:

$$\begin{aligned} \mathcal{T}_\varepsilon(\mathcal{P}) &= \text{verdadeiro,} \\ \text{se } \|p_i - \text{CM}(V_{i,r}(\mathcal{P}_{v,i}))\|_2 &\leq \varepsilon, i \in \{1, \dots, n\}, \\ \text{falso, caso contrário,} \end{aligned} \quad (8)$$

sendo $V_{i,r}(\mathcal{P}_{v,i})$ a célula de Voronoi limitada em r do veículo i e redefinida na seção 2.3, $\text{CM}(V_{i,r}(\mathcal{P}_{v,i}))$ o centroide da referida célula, e ε um critério de tolerância predeterminado. Desta forma, para o cumprimento do objetivo da tarefa que corresponde ao valor verdadeiro de $\mathcal{T}_\varepsilon(\mathcal{P})$, a estratégia de controle deve buscar a aproximação dos veículos a suas respectivas referências até que as normas euclidianas dos erros de posição sejam menores do que ε .

O cumprimento da tarefa direciona os veículos para uma configuração mais equilibrada dentro da área de trabalho em comparação à uma formação concentrada. Contudo, executá-la uma vez não é sufi-

ciente para obtenção da configuração desejada, e as posições de referência devem ser atualizadas a cada processamento. Consequentemente, um procedimento iterativo é elaborado para que os veículos atualizem suas posições sucessivamente até que uma situação de equilíbrio seja alcançada.

O equilíbrio se caracteriza quando a tarefa $\mathcal{T}_\varepsilon(\mathcal{P})$ eventualmente é cumprida. É possível haver configurações em que o equilíbrio não é alcançável ou pode levar muito tempo, neste caso, estabelece-se um limite de iterações n_{lim} que interrompa o algoritmo quando ultrapassado.

O seguinte algoritmo, com base no proposto por Cortés et al. (2005) e adaptado pelos autores, é implementado para aplicação da estratégia de cobertura mencionada:

- 1: Inicializar $k = 0$
- 2: Realizar loop enquanto $k < n_{lim}$ ou $\mathcal{T}_\varepsilon(\mathcal{P})$:
- 3: Obter $\mathcal{P} = \{p_1, \dots, p_n\}$
- 4: Para $i \in \{1, \dots, n\}$
- 5: Determinar $\mathcal{P}_{v,i}$
- 6: Determinar $V_{i,r}(\mathcal{P}_{v,i})$
- 7: Calcular $\text{CM}(V_{i,r}(\mathcal{P}_{v,i}))$
- 8: Fazer $p_i \rightarrow \text{CM}(V_{i,r}(\mathcal{P}_{v,i}))$
- 9: Verificar o estado de $\mathcal{T}_\varepsilon(\mathcal{P})$
- 10: Fazer $k = k + 1$

A estratégia descrita acima é descentralizada, ou seja, os veículos são autônomos de forma a determinar suas referências com base no espaço observado pelos mesmos e pelas interações com sua vizinhança, restritas pelas condições de conectividade existentes e pelos obstáculos da área de trabalho. Se um veículo não detecta nenhum semelhante ou obstáculo no seu espaço visível em um determinado momento, a sua célula de Voronoi se torna o lugar geométrico gerado pelo alcance de comunicação, cujo centro é a própria posição do veículo, permanecendo então no seu lugar até que alguma modificação ocorra.

Vale ressaltar, contudo, que o algoritmo em si não trata do controle de posição dos veículos, apenas estabelece a referência de posição, admitindo-se que a dinâmica dos veículos é significativamente mais rápida, e que os mesmos possuem uma estratégia de controle local para seguimento da trajetória.

4 Apresentação e análise dos resultados

Para simular a dinâmica e a eficácia da estratégia utilizada neste trabalho, além de visualizar o movimento dos veículos em uma área de trabalho para determinadas condições iniciais, o pseudocódigo descrito na seção 3 foi adaptado ao software numérico MATLAB. As simulações foram realizadas em duas dimensões, para posterior teste em veículos terrestres, e podendo ser estendida para uma análise tridimensional futuramente.

Para avaliar a eficiência da estratégia para cada caso, o tempo decorrido (ΔT) e o número de iterações requeridas para se alcançar o equilíbrio foram levantados. Além disso, critérios estatísticos como a média e o desvio padrão das áreas das células de Voronoi foram analisados, a fim de se estabelecer uma métrica da uniformidade da distribuição final.

Almejando simular um comportamento parecido com o futuro ambiente de testes, a área-limite, dentro da qual a área de trabalho deve obrigatoriamente ser inserida, foi definida como um quadrado de lado 10 m. O número limite de iterações definido foi de 1000 e a tolerância foi definida em 1% (10 cm). De acordo com o código, a cada nova iteração as posições dos veículos foram atualizadas conforme o tempo decorrido, permitindo uma simulação mais realista. Adicionalmente, a distância média percorrida (em metros) pelos veículos foi registrada, como uma métrica complementar da performance.

Foram testadas diversas configurações, sem e com restrições de alcance, para áreas de trabalho côncavas e convexas, com e sem obstáculos, variando a quantidade de veículos e o raio de comunicação, conforme apresentado e discutido a seguir.

4.1 Problema com área convexa sem limitação de conectividade

A estratégia de controle estudada neste trabalho foi aplicada inicialmente para cinco veículos autônomos (representados como asteriscos pretos nas figuras), distribuídos aleatoriamente numa área de trabalho (região branca nas figuras) correspondente a um quadrilátero irregular conforme a Figura 1(a). Na mesma forma, pode-se verificar o caminho percorrido por cada um dos veículos até as suas posições de equilíbrio.

A Figura 1(b) mostra o resultado final da aplicação, com todos os veículos na configuração de equilíbrio. As linhas pontilhadas no gráfico representam as fronteiras entre as células de Voronoi, e as cruzes vermelhas representam os centroides de cada célula, referências de posição para cada veículo. Em 21 segundos (57 iterações), e percorrendo em média 6,06 m, foi possível obter tal estado, gerando uma distribuição de áreas com média 7,5 m² e desvio 0,86 m², resultando assim num coeficiente de variação (CV) igual à 12%. Por não haver limite de alcance, a cobertura da área de trabalho foi de 100%.

A mesma simulação foi realizada conforme visto nas Figuras 2(a) e 2(b), variando-se o formato da área e aumentando expressivamente o número de veículos. Os indicadores obtidos também se mostraram satisfatórios considerando a quantidade maior de veículos.

4.2 Problema com área convexa com limitação de conectividade

O problema 4.1 considera um alcance de comunicação infinito, o que pode ser estendido para raios de alcance grandes o suficiente para que a cobertura

da área pelos veículos seja total. Contudo, para áreas grandes ou para comunicações bastante limitadas, faz-se necessário incluir a restrição na geração dos diagramas, e tal inclusão aumenta a complexidade do problema.

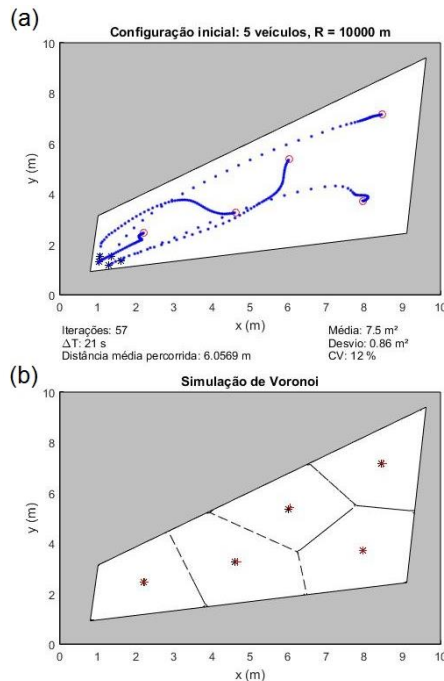


Figura 1 – Posições iniciais dos veículos e respectivos caminhos percorridos (a) e diagrama de Voronoi com as posições finais dos veículos, no estado de equilíbrio (b), sem limite de alcance.

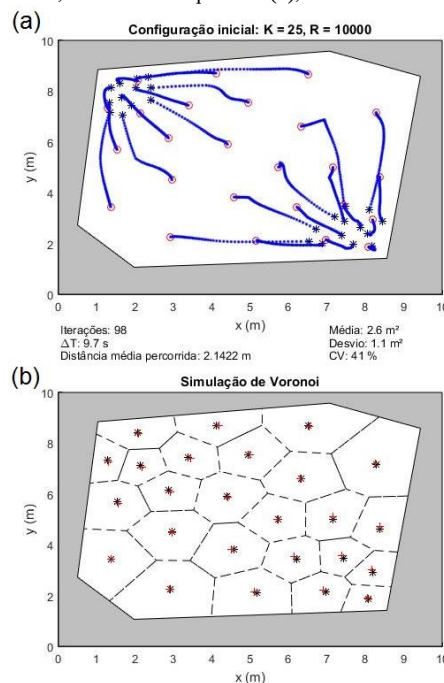


Figura 2 – Posições iniciais dos veículos e respectivos caminhos percorridos (a) e diagrama de Voronoi com as posições finais dos veículos, no estado de equilíbrio (b), sem limite de alcance.

As Figuras 3(a) e 3(b) evidenciam o caso em que o raio de comunicação dos 6 veículos inseridos aleatoriamente numa área é razoável (1,5 m) para manter a rede conectada, porém insuficiente para obter uma total cobertura.

É possível notar que não houve muita movimentação, os veículos meramente se afastassem das bor-

das e de uns aos outros, e as áreas cobertas pelos veículos são bastante similares às áreas dos círculos ($7,07 \text{ m}^2$) que correspondem às suas respectivas regiões observáveis. Assim, a distribuição obtida é bastante uniforme, todavia, a cobertura total não alcançou 70%.

Para os fins do problema proposto, as condições foram satisfeitas eficientemente (11 iterações), porém se há a necessidade de percorrer ou sobrevoar toda a região, estratégias de coordenação adicionais devem ser tomadas em conjunto com a ação de cobertura, ou veículos adicionais devem ser incorporados à rede.

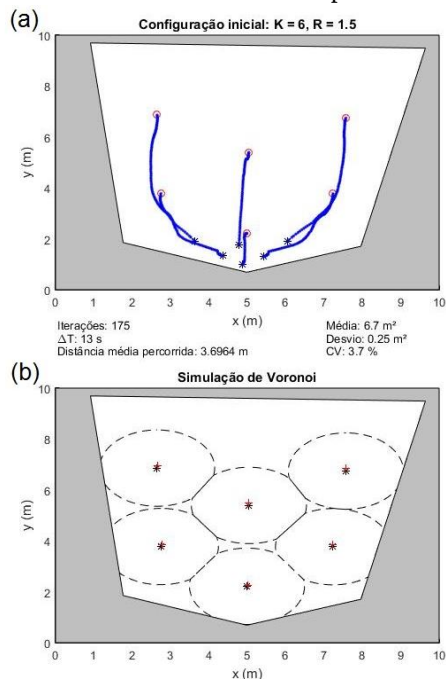


Figura 3 – Posições iniciais e caminho percorrido (a), posições finais e diagrama de Voronoi no estado de equilíbrio (b) dos veículos, para médio alcance.

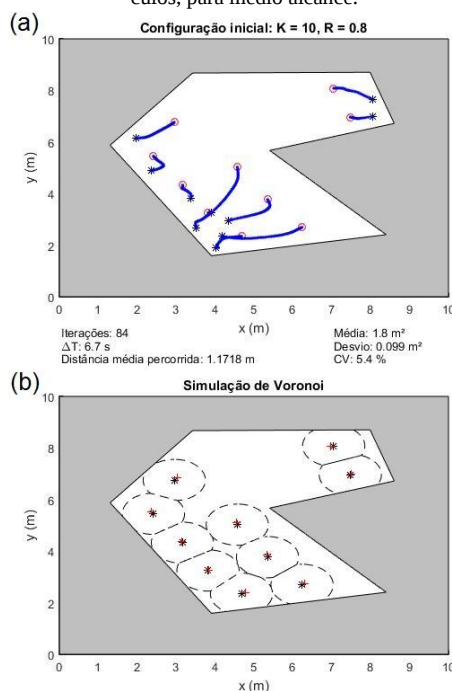


Figura 4 – Posições iniciais e caminho percorrido (a), posições finais e diagrama de Voronoi no estado de equilíbrio (b) dos veículos, para uma região convexa e baixo alcance.

A diminuição do raio de alcance, conforme esperado e visto nas Figuras 4(a) e 4(b), leva a uma diminuição da cobertura, uma uniformidade da distribuição e a uma menor distância percorrida, pois os veículos não possuem uma orientação definida quando não são capazes de identificar o ambiente e estão desconectados da rede. Para esse conjunto de situações, é importante que se estude uma estratégia complementar de formação e controle, para varredura da área total de cobertura.

4.3 Problema com área não convexa e presença de obstáculos

Situações mais complexas e próximas de ambientes reais também foram simuladas, como nas Figuras 5(a) e 5(b).

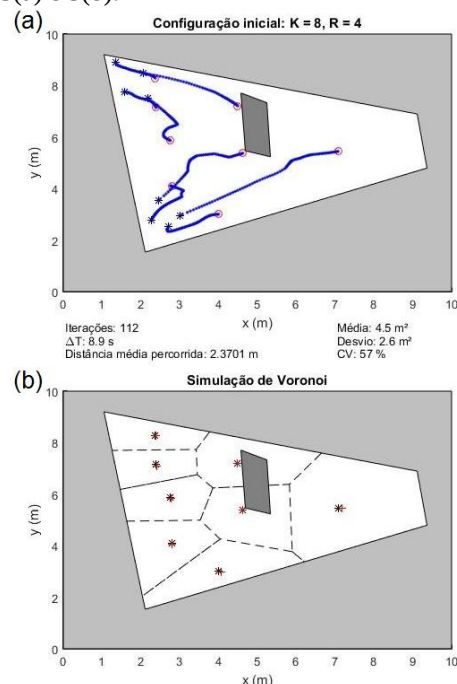


Figura 5 – Posições iniciais e caminho percorrido (a), posições finais e diagrama de Voronoi no estado de equilíbrio (b) dos veículos, para uma região côncava com um obstáculo.

Pode-se observar o comportamento de oito veículos buscando ocupar uma área convexa, com a presença de um obstáculo, porém sem a limitação por campo visual. Nota-se que há uma dificuldade por parte de alguns veículos de se desviar do obstáculo, apesar do objetivo de cobertura ser efetivado, resultando numa distribuição irregular.

Por sua vez, as Figuras 6(a) e 6(b) mostram o teste realizado com quatro veículos, inicialmente concentrados numa área irregular, não-convexa e com a presença de três obstáculos, já com o campo visual implementado.

Como é possível observar, o objetivo de cobertura foi almejado em um tempo razoável, quase toda a área foi explorada, e é possível notar que o veículo posicionado inicialmente mais próximo à grande área foi o primeiro a explorar o ambiente, seguido dos outros. Todavia, a uniformidade da configuração foi

pior do que nas outras simulações, o que se justifica, novamente, pela ausência de uma função de otimização que induzisse os veículos “enclausurados” a expandirem suas regiões de cobertura.

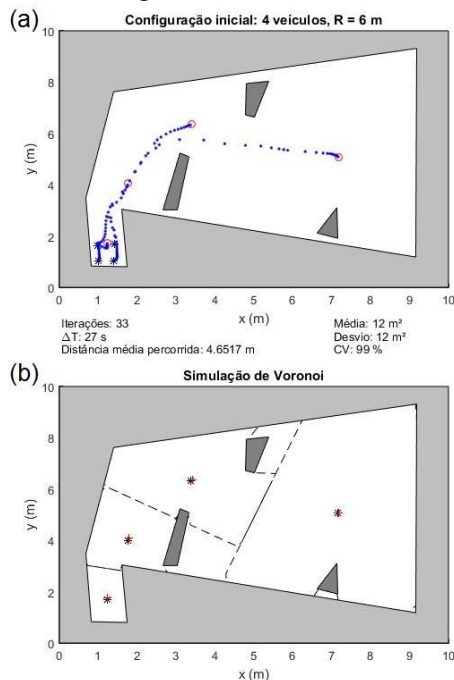


Figura 6 – Posições iniciais e caminho percorrido (a), posições finais e diagrama de Voronoi no estado de equilíbrio (b) dos veículos, para uma região convexa com obstáculos.

5 Conclusão e Trabalhos Futuros

A implementação da estratégia de cobertura por diagramas de Voronoi resultou em uma orientação rápida e efetiva dos veículos em configurações mais simples, e ao considerar a presença de obstáculos, áreas de trabalho com mais detalhes e limitações de alcance, certas configurações não puderam garantir o estado de equilíbrio almejado ou uma distribuição uniforme. Isso se deve pelo fato de não se utilizar um critério de otimização para a cobertura da área, buscando no equilíbrio dinâmico dos veículos a distribuição mais uniforme possível em consonância com a maximização da cobertura, conforme objetivo de cobertura estabelecido.

A inclusão do campo visual no cálculo das células de Voronoi permitiu uma abordagem realista do problema na presença de obstáculos e áreas não convexas. Contudo, o peso computacional do novo algoritmo faz com que as iterações levem mais tempo para serem concluídas, o que constitui um desafio para sua implementação em tempo real.

Para trabalhos futuros, estuda-se a implementação e avaliação da estratégia em redes de veículos reais, a inclusão de critérios de otimização que levem em consideração a área ocupada e a uniformidade da distribuição, dentre outras variáveis, e a extensão do algoritmo para veículos aéreos.

Referências Bibliográficas

- Aragues, R., Sagues, C. e Mezouar, Y., 2014. Triggered Minimum Spanning Tree for distributed coverage with connectivity maintenance, 2014 European Control Conference (ECC), 1881–1887.
- Bullo, F., Cortés, J. and Martínez, S., 2009. Distributed Control of Robotic Networks, by Applied Mathematics Series. Princeton: Princeton University Press.
- Chen, D. et al, 2013. Natural Disaster Monitoring with Wireless Sensor Networks: A Case Study of Data-intensive Applications upon Low-Cost Scalable Systems, Mobile Network Applications, 18(5), 651–663.
- Cortés, J., Martínez, S., Karatas, T., & Bullo, F., 2004. Coverage control for mobile sensing networks, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 20(2), 243–255.
- Cortés, J., Martínez, S., and Bullo, F., 2005. Spatially-distributed coverage optimization and control with limited-range interactions, ESAIM: Control, Optimisation & Calculus of Variations, 11, 691–719.
- Dai, L., Wang, B., 2015. Sensor Placement based on Delaunay Triangulation for Complete Confidential Information Coverage in An Area with Obstacles, 2015 IEEE 34th International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC), 1–8.
- Jiang, B., Sun, Z., Anderson, B. D. O., 2015. Higher order Voronoi based mobile coverage control, 2015 American Control Conference, 1457–1462.
- Kato, T., Chiba, R., Takahashi, H., Kinoshita, T., 2015. Agent-Oriented Cooperation of IoT Devices towards Advanced Logistics, 2015 IEEE 39th Annual International Computers, Software & Applications Conference, 223–227.
- Khoon, T. N., Sebastian, P., Saman, A. B. S., 2012. Autonomous Fire Fighting Mobile Platform, International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors 2012 (IRIS 2012), 41, 1145–1153.
- Kumar, V., Michael, N., 2012. Opportunities and challenges with autonomous micro aerial vehicles, The International Journal of Robotics Research, 31(11), 1279–1291.
- Stump, E. e Michael, N., 2011. Multi-robot persistent surveillance planning as a vehicle routing problem, In: Proceedings of the IEEE Conference on Automation Science and Engineering, Trieste, Italy, 569–575.
- Sung, T. et al, 2015. Direction Control Using Delaunay Triangulation for Coverage Improvement in Directional Sensor Networks, 2015 Third International Conference on Robot, Vision and Signal Processing, 290–293.
- Zavlanos, M. M., Ribeiro, A. and Pappas, G. J., 2013. Network Integrity in Mobile Robotic Networks, IEEE Transactions on Automatic Control, 58(1), 3–18.