

Universidade Federal do Pará  
Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Novo Autômato Celular Multicamada para  
Posicionamento de Células Voadoras em Redes  
Móveis 5G auto-organizáveis**

Evelin Helena Silva Cardoso

TD: 02/2021

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém - Pará - Brasil

2021

Universidade Federal do Pará  
Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Evelin Helena Silva Cardoso

**Novo Autômato Celular Multicamada para  
Posicionamento de Células Voadoras em Redes Móveis  
5G auto-organizáveis**

Tese de Doutorado submetida à avaliação da Banca Examinadora aprovada pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará para a obtenção do Grau de Doutora em Engenharia Elétrica, na área de Computação Aplicada.

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém - Pará - Brasil

2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

---

C268n Cardoso, Evelin Helena Silva Cardoso, 1989-  
Novo Autômato celular multicamadas para  
posicionamento de células voadoras em rede móveis 5G  
auto-organizáveis/ Evelin Helena Silva Cardoso.-  
2021

Orientador: Carlos Renato Lisboa Francês

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do  
Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2021

1.Sistema de Comunicação móvel 2.Automato celular  
3.Telecomunicações - Tráfego 4. Dispositivos de  
redes sem fio I. Título

CDD 22.ed.621.38456

---

**Maria Ivone Maia da Costa - CRB-2/768**

**“NOVO AUTÔMATO CELULAR MULTICAMADA PARA POSICIONAMENTO DE  
CÉLULAS VOADORAS EM REDES MÓVEIS 5G AUTO-ORGANIZÁVEIS”**

AUTORA: **EVELIN HELENA SILVA CARDOSO**

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM: 12/03/2021

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês**  
(Orientador – PPGEE/UFPA)

---

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Jasmine Priscyla Leite de Araújo**  
(Avaliadora Interna – PPGEE/UFPA)

---

**Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa**  
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

---

**Prof. Dr. Marcelino Silva da Silva**  
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

---

**Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto**  
(Avaliador Externo – UFES)

---

**Dr.<sup>a</sup> Maria Valéria Marquezini Miranda**  
(Avaliadora Externa – ERICSSON)

**VISTO:**

---

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Emília de Lima Tostes**  
(Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA)

*Aos meus pais  
Dulce e Evandro Cardoso.  
Outros corações tão bondosos podem existir, mas não deste lado do céu.*

# Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus, por Seu cuidado e amor infinito por mim.

Aos meus pais, Dulce e Evandro, por todo o amor, suporte e compreensão que sempre encontro em seus ensinamentos e abraços. Ao meu irmão, Rodrigo, e meus sobrinhos, pelo carinho e por compartilharem da vida comigo.

A todos os meus familiares, pela torcida e apoio constante. Agradeço, especialmente, os meus tios Raimundo e Darcirema, pelo acolhimento em sua casa e em suas vidas.

Ao meu prezado orientador e amigo Carlos Renato Lisboa Francês, pela confiança e gentileza com as quais sempre me recebe. Pela amizade construída nesse tempo de plantação (e hoje, colheita) e por todas as oportunidades e desafios que tem me proporcionado, que certamente vão muito além do desenvolvimento desta tese.

A minha co-orientadora e amiga Jasmine Priscyla Leite de Araújo, pela confiança e suporte na elaboração deste trabalho, e também pelo carinho maternal e conselhos valiosos que me inspiram a ser uma pessoa resiliente e melhor a cada dia.

A todos os meus amigos do Laboratório de Planejamento de Redes de Alto Desempenho, os quais me furtarei a citar nomes para não correr o risco de deixar ninguém de fora. Todos, sem exceção, contribuíram de alguma forma ao longo desta caminhada e fizeram do caminho, um caminho mais feliz.

A Universidade Federal Rural da Amazônia, que concedeu licença para que eu pudesse me dedicar com mais afinco ao desenvolvimento deste trabalho. Gratidão especial aos meus amigos do Campus Capitão Poço, que não deixaram faltar apoio e não mediram esforços para a aprovação da minha licença.

A Universidade Federal do Pará, especialmente o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, nas pessoas do seu corpo técnico e docente. A CAPES e ao CNPq, pelo apoio financeiro ao longo da minha formação acadêmica, desde a graduação até os dias atuais.

Finalmente, a todos os meus amigos de uma vida inteira, pelo acolhimento, carinho e incentivo de todos os dias.

*"Presentemente eu posso me considerar um sujeito de sorte  
Porque apesar de muito moço me sinto são e salvo e forte  
Tenho sangrado demais, tenho chorado pra cachorro  
Ano passado eu morri mas esse ano eu não morro."  
(Sujeito de sorte - Belchior)*

# Resumo

A quinta geração de redes móveis celulares (5G) terá um impacto profundo no desenvolvimento de cidades inteligentes. Devem ser consideradas questões como “Como as operadoras de telecomunicações fornecerão infraestrutura de rede com eficiência”, “Quando e onde os parâmetros de qualidade do serviço estão degradados ou abaixo do esperado”. Nesse contexto, tem chamado a atenção o uso de estações base transportadas por Veículos Aéreos Não Tripulados (UAV) atuando como células voadoras para compensar o serviço de redes móveis em áreas onde os sistemas de telecomunicações estão sendo desafiados por condições anormais durante sua operação. Esta tese apresenta uma solução inteligente baseada em um novo Autômato Celular Multicamada para resolver o problema do posicionamento eficiente de células voadoras em redes sem fio e, conseqüentemente, aumentar a capacidade da rede durante situações temporárias de tráfego pesado, tais como ao longo de avenidas congestionadas durante algumas horas do dia, eventos sobrelotados, situações de desastres ou tráfego de *hotspot*. Nesta nova abordagem distribuída, todas as estações base transportadas por UAVs operam em paralelo. A auto-organização surge de um padrão emergente baseado na aplicação de regras simples em uma vizinhança local definida. A metodologia proposta considera restrições de *backhaul* sem fio e de recursos de rádio. O modelo é descrito para suportar múltiplos UAVs e múltiplos usuários, com diferentes características de mobilidade e requisito de qualidade de serviço. A avaliação de desempenho do método proposto é realizada por meio de simulação computacional discreta, utilizando o *software* MATLAB. O algoritmo proposto foi comparado com outros dois algoritmos baseados em Algoritmo Genético e um esquema de posicionamento fixo. Os resultados mostraram que o método proposto tem um desempenho favorável em comparação com os outros métodos testados em termos das métricas de desempenho consideradas. Assim, os experimentos simulados mostram os benefícios da solução proposta para o posicionamento rápido e eficiente de um enxame de UAVs para responder em tempo real a mudanças urgentes na rede.

**Palavras-chaves:** Situações temporárias de tráfego pesado. Posicionamento de células voadoras. Novo autômato celular multicamada. Sistemas de telecomunicações.

# Abstract

The fifth generation of cellular mobile networks (5G) will have a profound impact on the development of smart cities. Issues such as "How telecommunications operators will efficiently provide network infrastructure", "When and where service quality parameters are degraded or below expectations" should be considered. In this context, the use of base stations carried by Unmanned Aerial Vehicles (UAV) acting as flying cells to compensate the service of mobile networks in areas where telecommunications systems are challenged by abnormal conditions during their operation has attracted attention. This thesis presents an intelligent solution based on a new Multilayer Cellular Automaton to solve the problem of efficient positioning of flying cells in wireless networks and, consequently, increase the capacity of the network during temporary situations of heavy traffic, such as in congested avenues during some hours of the day, overcrowded events, disaster situations or hotspot traffic. In this new distributed approach, all base stations carried by UAVs operate in parallel. Self-organization arises from an emerging pattern based on the application of simple rules in a defined neighborhood. The proposed methodology considers restrictions on wireless backhaul and radio resources. The model is described to support multiple UAVs and multiple users, with different mobility characteristics and quality of service requirement. The performance evaluation of the proposed method is performed by means of discrete computer simulation, using MATLAB software. The proposed algorithm was compared with two other algorithms based on Genetic Algorithm and a fixed positioning scheme. Results showed that the proposed method has a favorable performance in comparison with the other tested methods in terms of the performance metrics considered. Thus, the simulated experiments show the benefits of the proposed solution for the fast and efficient positioning of several flying base stations to respond in real time to urgent changes in the network.

**Keywords:** Temporary situations of heavy traffic. Flying cells positioning. Novel Multilayered Cellular Automata. Telecommunications systems.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Rede móvel auxiliada por UAVs. Fonte: adaptado de (LI et al., 2019). . . . .	10
Figura 2 – Tipos mais populares de vizinhanças e condições de limite. (a) Vizinhança de Von Neumann, vizinhança de Moore e vizinhança hexagonal, respectivamente; (b) Condições de limite fixo e periódico, respectivamente. Fonte: (FISHWICK, 2007). . . . .	16
Figura 3 – Exemplo de representação binária. . . . .	18
Figura 4 – Fluxograma do algoritmo genético. . . . .	19
Figura 5 – Esquema para o posicionamento de células voadoras. . . . .	35
Figura 6 – Novo Autômato Celular Multicamadas para posicionamento de células voadoras em Redes 5G Auto-Organizáveis. . . . .	36
Figura 7 – Sistema de redes móveis auxiliadas por UAV - Modelo proposto. . . . .	37
Figura 8 – Possíveis direções de movimento. (a) Direções. (b) Orientações. . . . .	39
Figura 9 – Área de cobertura do UAV. . . . .	49
Figura 10 – Exemplo do cenário de simulação. (a) Cenário de implantação aleatória, episódio 1. (b) Alocação inicial, episódio 1. (c) Posicionamento final com o método MCA, episódio 100. (d) Alocação final com o método MCA, episódio 100. (e) Alocação final com o método de posicionamento fixo, episódio 100. (f) Alocação final com o método do AG, episódio 100. . . . .	60
Figura 11 – Expectativa da SINR (em dB) ao longo do cenário: (a) apenas macrocélula fixa no centro. (b) método MCA. (c) método de posicionamento fixo. (d) método AG. . . . .	61
Figura 12 – Distribuição de percentil sobre a expectativa da SINR máxima. . . . .	62
Figura 13 – Porcentagem de usuários fora de serviço por episódio (100 Usuários, 10 UAVs). . . . .	63
Figura 14 – Expectativa da máxima vazão atingível (em Mbps) ao longo do cenário: (a) apenas macrocélula fixa no centro. (b) método MCA. (c) método de posicionamento fixo. (d) método AG. . . . .	64
Figura 15 – Distribuição de percentil sobre a expectativa da máxima vazão atingível. . . . .	65
Figura 16 – Média da vazão global da rede por episódio (100 Usuários, 10 UAVs). . . . .	66
Figura 17 – Porcentagem média de usuários satisfeitos por episódio (100 Usuários, 10 UAVs). . . . .	67
Figura 18 – Porcentagem média de usuários servidos por UAVs por episódio (100 usuários, 10 UAVs). . . . .	67
Figura 19 – Porcentagem média de usuários servidos pela macrocélula (100 usuários, 10 UAVs). . . . .	68

Figura 20 – Média da razão de cobertura de usuários em diferentes cenários. (a) 50 usuários, 10 UAVs, (b) 100 usuários, 10 UAVs, (c) 150 usuários, 10 UAVs, (d) 200 usuários, 20 UAVs, (e) 250 usuários, 20 UAVs, (f) 300 usuários, 20 UAVs, (g) 300 usuários, 30 UAVS, (h) 350 usuários, 30 UAVS e (i) 400 usuários, 30 UAVs. . . . .	69
Figura 21 – Representação gráfica da evolução do MCA ao longo de iterações e episódios (100 usuários, 10 UAVs). . . . .	71
Figura 22 – Representação gráfica da evolução do AG ao longo de gerações e episódios (100 usuários, 10 UAVs). . . . .	71
Figura 23 – Tempo de execução da evolução do algoritmo MCA ao longo dos episódios.	73
Figura 24 – Tempo de execução da evolução do algoritmo AG ao longo dos episódios.	73

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Casos de Uso 5G para redes de acesso aéreas. . . . .	7
Tabela 2 – Síntese dos trabalhos correlatos. . . . .	29
Tabela 3 – Parâmetros da simulação. . . . .	57
Tabela 4 – Parâmetros do Autômato Celular Multicamada. . . . .	58
Tabela 5 – Razão de cobertura de usuários (%). . . . .	68
Tabela 6 – Número médio de iterações para atingir o critério de parada. . . . .	69
Tabela 7 – Vazão no <i>backhaul</i> sem fio. . . . .	72
Tabela 8 – Tempo de execução considerando diferentes cenários. . . . .	74

# Lista de abreviaturas e siglas

<b>3GPP</b>	3rd Generation Partnership Project
<b>AG</b>	Algoritmo Genético
<b>AN</b>	Access Network
<b>BS</b>	Base Station
<b>eMBB</b>	Enhanced Mobile BroadBand
<b>eNB</b>	eNodeB
<b>EPC</b>	Evolved Packet Core
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union
<b>ICAO</b>	International Civil Aviation Organization
<b>IoT</b>	Internet of Things
<b>LoS</b>	Line of sight
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>M2M</b>	Machine to Machine
<b>mMTC</b>	massive Machine Type Communications
<b>MCA</b>	Multilayered Cellular Automata
<b>NR</b>	New Radio
<b>NLoS</b>	Non line of sight
<b>NSA</b>	Non Stand Alone
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>SON</b>	Self-Organizing Network
<b>SA</b>	Stand Alone
<b>URLLC</b>	Ultra-Reliable and Low Latency Communications
<b>UAV</b>	Unmanned Aerial Vehicle
<b>UE</b>	User Equipment

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa e Motivação . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos . . . . .</b>	<b>3</b>
1.2.1	Objetivos Específicos . . . . .	3
<b>1.3</b>	<b>Organização da Tese . . . . .</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO . . . . .</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Considerações Iniciais . . . . .</b>	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>Redes Móveis 5G auxiliadas por UAVs . . . . .</b>	<b>5</b>
2.2.1	Funções para redes não terrestres no sistema 5G . . . . .	6
2.2.2	Sistemas de múltiplos UAVs . . . . .	7
2.2.3	UAVs como estações base voadoras . . . . .	9
2.2.3.1	Modelagem do canal . . . . .	11
2.2.3.2	Implantação . . . . .	11
2.2.3.3	Planejamento de percurso . . . . .	12
2.2.3.4	Altitude . . . . .	12
2.2.3.5	Gerenciamento de interferência . . . . .	12
2.2.3.6	Energia limitada . . . . .	13
2.2.3.7	<i>Backhaul</i> limitado . . . . .	13
2.2.3.8	Segurança . . . . .	13
<b>2.3</b>	<b>Autômatos Celulares . . . . .</b>	<b>14</b>
2.3.1	Componentes, estrutura e terminologia . . . . .	15
<b>2.4</b>	<b>Algoritmo Genético . . . . .</b>	<b>17</b>
2.4.1	Componentes, estrutura e terminologia . . . . .	18
<b>2.5</b>	<b>Considerações Finais . . . . .</b>	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>3.1</b>	<b>Considerações Iniciais . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>3.2</b>	<b>Correlatos . . . . .</b>	<b>22</b>
3.2.1	UAV como estação base voadora . . . . .	23
3.2.2	UAV como retransmissor . . . . .	27
<b>3.3</b>	<b>Contribuições da proposta no estado da arte . . . . .</b>	<b>32</b>
<b>3.4</b>	<b>Considerações Finais . . . . .</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA PROPOSTA . . . . .</b>	<b>34</b>
<b>4.1</b>	<b>Considerações Iniciais . . . . .</b>	<b>34</b>

<b>4.2</b>	<b>Autômato Celular Multicamada para posicionamento de células voadoras em redes móveis 5G auto-organizáveis</b>	<b>35</b>
4.2.1	Estrutura	37
4.2.2	Camadas	37
4.2.3	Estados	38
4.2.4	Vizinhança	38
4.2.5	Funções de transição de estado	39
4.2.6	Primeira fase - Para onde ir?	39
4.2.7	Segunda fase - É possível ir?	42
4.2.8	CrITÉrios de Parada	43
4.2.9	Sobre a prevençŁo de colisŁo	44
4.2.10	Sobre as limitaçŁes de energia	45
<b>4.3</b>	<b>ConsideraçŁes Finais</b>	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>AVALIAÇŁO DE DESEMPENHO</b>	<b>47</b>
<b>5.1</b>	<b>ConsideraçŁes Iniciais</b>	<b>47</b>
<b>5.2</b>	<b>Modelo do Sistema</b>	<b>47</b>
5.2.1	Sobre a associaçŁo de usuÁrios e alocaçŁo de recursos	51
5.2.2	Sobre o efeito Doppler	52
<b>5.3</b>	<b>Métricas de desempenho</b>	<b>52</b>
<b>5.4</b>	<b>CenÁrio de simulaçŁo</b>	<b>54</b>
5.4.1	Método baseado em Algoritmo Genético	55
5.4.2	ParÁmetros do cenÁrio	56
<b>5.5</b>	<b>Resultados Numéricos</b>	<b>59</b>
5.5.1	AnÁlise empírica da complexidade dos algoritmos	72
<b>5.6</b>	<b>ConsideraçŁes Finais</b>	<b>74</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>76</b>
<b>6.1</b>	<b>PublicaçŁes</b>	<b>78</b>
<b>6.2</b>	<b>Trabalhos futuros</b>	<b>79</b>
<b>6.3</b>	<b>Dificuldades encontradas</b>	<b>81</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>83</b>

# 1 Introdução

A comunicação móvel tem sido uma das inovações tecnológicas mais importantes da contemporaneidade. Nos últimos anos, vimos um desenvolvimento significativo nas redes celulares, e um aumento exponencial no tráfego de dados móveis e no número de assinantes. De acordo com (CISCO, 2019), em 2022, o tráfego global mensal de dados móveis chegará a 77 exabytes e o tráfego anual a quase um zetabyte. O número de assinantes é estimado em 5,7 bilhões, e o número de todos os dispositivos conectados em cerca de 12,3 bilhões. A velocidade média global de conexão dos *smartphones* ultrapassará 28,5 Mbps e na América do Norte e Europa Ocidental poderá chegar a mais de 40 Mbps. Este incrível crescimento de tráfego exigirá um aumento considerável na capacidade da rede sem fio, o que leva à necessidade de desenvolver e consolidar as redes móveis de quinta geração (5G) e posteriores.

O ITU-R IMT para 2020 e superior (SERIES, 2015) definiu três conjuntos de casos de uso: eMBB (*Enhanced Mobile BroadBand*), mMTC (*massive Machine Type Communications*) e URLLC (*Ultra-Reliable and Low Latency Communications*). (KAVANAGH, 2019) destaca:

- Banda Larga Móvel Melhorada (eMBB): casos de uso que requerem altas taxas de dados em uma ampla área de cobertura.
- Comunicações Massivas do Tipo Máquina (mMTC): cenários que apresentem necessidade de suportar um grande número de dispositivos, como os casos de uso de Internet das Coisas (IoT, *Internet of Things*). Em outras palavras, visam a conexão acessível e robusta de bilhões de dispositivos, sem sobrecarregar a rede.
- Comunicações de Baixa Latência e Ultraconfiáveis (URLLC): abrange cenários de uso com requisitos estritos de latência e confiabilidade para comunicações de missão crítica, tais como cirurgia remota, veículos autônomos e Internet tátil.

Tais casos de uso serão cada vez mais frequentes no contexto de cidades inteligentes. O atual mercado de comunicação móvel requer o desenvolvimento de um ecossistema sustentável para atender a necessidade de melhorar ainda mais a eficiência do sistema, como eficiência de espectro, eficiência energética, eficiência operacional e eficiência de custos (3GPP, 2017b). Nas últimas décadas, os veículos aéreos não tripulados (UAV, *Unmanned Aerial Vehicle*) alcançaram um desempenho excepcional em aplicações militares, comerciais e civis. Graças a sua versatilidade e agilidade, as redes de UAVs têm atraído atenção significativa tanto da academia quanto da indústria. De acordo com (3GPP, 2020), espera-se que as Redes Não Terrestres:

- Possibilitem a implantação do serviço 5G em áreas ainda não atendidas ou que não podem ser cobertas pela rede 5G terrestre, tais como áreas isoladas/remotas, redes a bordo de aeronaves ou navios.
- Reforcem a confiabilidade do serviço 5G, fornecendo continuidade de serviço para dispositivos M2M/IoT ou a passageiros a bordo de plataformas móveis ou garantindo a disponibilidade de serviço em qualquer lugar, a qualquer momento, especialmente para comunicações críticas ou comunicações ferroviárias/marítimas/aeronáuticas do futuro.
- Habilitem a escalabilidade da rede 5G ao fornecer recursos *multicast/broadcast* eficientes para entrega de dados na borda da rede ou até mesmo no terminal do usuário.

Esses benefícios referem-se não apenas às redes não terrestres operando de forma isolada, mas também às redes não terrestres operando integradas às redes terrestres (3GPP, 2017b).

Uma cidade inteligente é essencialmente uma cidade conectada, na qual qualquer dispositivo pode conectar-se à rede a qualquer hora, em qualquer lugar. Assim, as redes 5G e posteriores devem oferecer suporte para a criação de cidades inteligentes. Um dos problemas enfrentados pelos planejadores do ambiente urbano é a infraestrutura necessária para atender às demandas das mais diversas aplicações nesse novo contexto. Além disso, manter uma infraestrutura fixa pode ser bastante oneroso (energia, equipamentos, locação e aluguel de recursos de transmissão) e não garante o retorno dos investimentos num tempo viável, pois algumas vezes seu uso não é eficiente. Portanto, além da infraestrutura fixa, uma abordagem promissora é a adoção de UAVs como estações base voadoras (BS, *Base Station*) para atender, temporariamente, o tráfego sob demanda. Além disso, UAVs também podem funcionar como equipamentos de usuários aéreos (UE, *User Equipment*) para realizar missões de inspeções de estrutura, por exemplo. Especificamente, a exploração de cenários de conexão entre UEs terrestres e UAVs é relativamente recente.

No contexto de cidades inteligente e redes 5G, é esperada a expansão do uso de técnicas de aprendizado de máquina (ML, *Machine Learning*) para identificar e tratar áreas onde os parâmetros de Qualidade de Serviço (QoS) foram degradados, por exemplo, devido a uma alta demanda temporária de tráfego gerada por eventos superlotados, desastres ou tráfego de *hotspot*. Além disso, sistemas de comunicação auxiliados por UAVs podem melhorar o desempenho da rede, aumentando a sua capacidade em situações de emergência ou que excedem o tráfego esperado, fornecendo rápida recuperação de serviço e/ou descarregando o tráfego temporariamente. Casos de usos como esses podem ser baseados em enxames de UAVs, cuja operação requer técnicas eficientes de coordenação e controle.

## 1.1 Justificativa e Motivação

Até o presente momento, não há uma estratégia única e simples sobre como utilizar UAVs como estações base aéreas. Além disso, existem vários problemas e desafios em aberto na avaliação de projetos existentes de UAVs no que se refere à rede 5G, tais como: aspectos de comunicação da camada física, gerenciamento de recursos, segurança e implantação dos nós aéreos. A investigação e criação de estratégias utilizando algoritmos inteligentes para orientar a implantação e posicionamento de cada UAV no cenário são cruciais nesse contexto. Ademais, as soluções devem ser adaptáveis e flexíveis para atender os requisitos de escalabilidade, estabilidade e agilidade das redes 5G auto-organizáveis (SON, *Self-Organizing Network*).

Essa conjuntura motivou o desenvolvimento do presente trabalho, visto que oferece não uma solução final e definitiva, mas sim uma nova alternativa para tratar o problema do posicionamento automático de UAVs em redes móveis auto-organizáveis, respondendo de forma dinâmica às mudanças das condições do cenário.

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal desta tese é desenvolver uma nova metodologia de alto nível para tomada de decisão de posicionamento de células voadoras carregadas por UAVs em redes móveis 5G auto-organizáveis. Objetiva-se alcançar uma estratégia de posicionamento mais adequada e que melhor se ajuste aos requisitos dessas redes. Nesta tese, a modelagem do problema deve definir onde os UAVs devem ser posicionados, de acordo com a distribuição de usuários no solo em uma região de interesse. A solução proposta é baseada no conceito de redes de comunicação auxiliadas por UAVs. Para resolver o problema de posicionamento de múltiplos UAVs no cenário, um novo Autômato Celular Multicamadas (MCA, *Multilayered Cellular Automata*) é proposto. A metodologia proposta considera restrições da rede em termos da limitação da capacidade do *backhaul* e de recursos de rádio, e suporta múltiplos usuários com diferentes características de mobilidade e requisito de qualidade de serviço, visando maximizar o número de usuários servidos pela rede.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

De forma mais específica, esta proposta apresenta os seguintes objetivos:

- Determinar os principais parâmetros para o posicionamento de células voadoras, levando em consideração as limitações e restrições dos cenários de interesse.
- Oferecer uma metodologia escalável e flexível, que possa torná-la capaz de incorporar novos elementos e variáveis, de acordo com o objetivo ou caso de interesse.

- Definir um novo algoritmo de posicionamento de células voadoras, sensível à distribuição de usuários no solo, capaz de acompanhar o deslocamento dos usuários.
- Desenvolver um método inteligente baseado em um novo Autômato Celular Multicamada, a fim de resolver o problema de posicionamento de um enxame de UAVs em sistemas de comunicação sem fio. Até o presente momento, na melhor pesquisa feita pela autora, tal solução baseada na teoria de autômatos celulares é inédita para este problema, além de considerar também diferentes condições da rede, tais como restrições de *backhaul* e recursos de rádio, e usuários com características diferentes de mobilidade e requisito de qualidade de serviço.
- Implementar um ambiente de simulação discreta propício para a modelagem, caracterização e avaliação da estratégia proposta.
- Realizar avaliação de desempenho para fins de avaliação e validação da solução proposta. Para isto, o algoritmo proposto será comparado com dois outros algoritmos baseados em Algoritmo Genético e um esquema de posicionamento fixo em termos de várias métricas de desempenho.

### 1.3 Organização da Tese

Este documento está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1: apresenta uma breve introdução do assunto abordado, a justificativa e motivação para realização desta tese, bem como seus objetivos geral e específicos.
- Capítulo 2: apresenta a fundamentação teórica que norteou o desenvolvimento desta pesquisa, destacando os principais conceitos e tecnologias envolvidos nesta tese.
- Capítulo 3: elenca os principais trabalhos correlatos a este estudo, apontando as contribuições desta tese perante ao estado da arte da problemática abordada.
- Capítulo 4: descreve a metodologia proposta, em especial, o Novo Autômato Celular Multicamada desenvolvido para resolver o problema do posicionamento eficiente de células voadoras.
- Capítulo 5: apresenta o modelo do sistema, as métricas de desempenho, o cenário de simulação, os algoritmos testados, a parametrização dos cenários avaliados, além da discussão a respeito dos resultados numéricos obtidos a partir dos experimentos simulados.
- Capítulo 6: traz as considerações finais sobre as discussões abordadas neste trabalho, apontando as principais contribuições da tese, bem como as dificuldades encontradas e os possíveis desdobramentos em trabalhos futuros.

## 2 Referencial Teórico

### 2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica que norteou o desenvolvimento desta tese, iniciando com a contextualização acerca das características da quinta geração de comunicações móveis e o papel das redes não terrestres nesse novo paradigma. Também serão discutidos os principais desafios que as redes móveis auxiliadas por UAVs devem enfrentar a fim de atender as expectativas da academia e do mercado de telecomunicações.

Posteriormente, serão abordados os principais conceitos relacionados à teoria dos Autômatos Celulares e do Algoritmo Genético, destacando as terminologias, componentes e funcionamento destas técnicas.

### 2.2 Redes Móveis 5G auxiliadas por UAVs

A Quinta Geração de Comunicações Móveis, popularmente conhecida como 5G, é definida em pelo menos duas fases, segundo o *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*, que reúne uma série de organizações de desenvolvimento de padrões de telecomunicações. A Fase 1 é especificada na versão 15 (3GPP, 2019a), enquanto as fases subsequentes serão especificadas em versões posteriores. Além do 5G Fase 1, a versão 15 também define, entre outros requisitos: melhorias adicionais em comunicações críticas (incluindo comunicação de baixa latência ultra confiável e comunicação de baixa latência altamente confiável), comunicações máquina a máquina (MTC) e Internet das coisas (IoT), comunicações relacionadas a veículos, além de recursos relacionados a redes locais sem fio e espectro não licenciado.

Ao contrário das gerações anteriores, as redes 5G e posteriores devem necessariamente suportar uma infinidade de serviços simultaneamente. O principal objetivo do sistema 5G é ser capaz de oferecer suporte a novos cenários de implantação para atender a diversos segmentos de mercado. A especificação técnica 22.261 (3GPP, 2019b) do 3GPP compila os requisitos que definem o sistema 5G. Segundo a especificação 22.261, o sistema 5G é caracterizado, por exemplo, por:

- Suporte para tecnologias de múltiplo acesso.
- Rede escalável e personalizável.

- Indicadores-chave de desempenho (KPIs) avançados. Por exemplo, disponibilidade, latência, confiabilidade, taxas de dados de experiência do usuário, capacidade de tráfego por área.
- Flexibilidade e programabilidade. Por exemplo, fatiamento de rede (*network slicing*), gerenciamento de mobilidade, virtualização de função de rede.
- Uso eficiente de recursos (tanto no plano do usuário, quanto no plano de controle da rede).
- Mobilidade perfeita (*seamless mobility*) em ambiente densamente povoado e heterogêneo.
- Suporte para serviços e aplicações multimídia em tempo real ou não tempo real, com qualidade de experiência avançada.

### 2.2.1 Funções para redes não terrestres no sistema 5G

Redes não terrestres são redes, ou segmentos de redes, que usam veículo aéreo (aerotransportado) ou espacial para embarcar o nó de (re)transmissão ou estação base (3GPP, 2020). São vários os benefícios das redes não terrestres operando isoladas ou integradas às redes terrestres. Espera-se que elas desempenhem um papel importante no sistema 5G, especialmente para os seguintes setores: transporte, segurança pública, mídia e entretenimento, eSaúde, energia, agricultura, finanças, indústria automotiva, entre outros. A implantação dessas redes impactarão na cobertura, largura de banda do usuário, capacidade do sistema, confiabilidade ou disponibilidade do serviço, consumo de energia, densidade da conexão, etc. (3GPP, 2017b).

Nesse contexto, funções de Redes Não Terrestres referem-se aos serviços habilitados pelo componente de Rede Não Terrestre no sistema 5G para dar suporte a um caso de uso. Um caso de uso, normalmente refere-se às interações entre uma função e um sistema, a fim de atingir um objetivo específico. Conforme citado anteriormente, o sistema 5G completo inclui pelo menos três grandes categorias de serviços, chamadas de: largura de banda melhorada (eMBB), comunicações massivas máquina a máquina (mMTC) e comunicações ultra confiáveis e de baixa latência (URLLC). Cada uma dessas categorias apresenta um requisito crítico. A fase inicial da implantação do 5G *Non-Stand Alone* concentra-se na eMBB, que fornece maior largura de banda de dados, também complementada por melhorias moderadas em termos de latência em ambos 5G New Radio e 4G LTE.

Conforme já mencionado, redes não terrestres podem incluir segmentos espaciais, tal como sistemas de satélite. Devido à rápida implantação e flexibilidade do caso de uso explorado neste estudo, esta tese foca no uso de UAVs, popularmente conhecidos como drones, voando em baixa altitude, como nós voadores. A Tabela 1 explora os casos de uso

Tabela 1 – Casos de Uso 5G para redes de acesso aéreas.

Serviço 5G	Caso de Uso 5G	Descrição do caso de Uso	Serviço de rede de acesso aérea	Referência
eMBB	<i>Hotspot</i> sob demanda	Usuários que se encontram em áreas sub-atendidas (por exemplo, grandes eventos) podem se conectar à rede 5G e se beneficiar de altas taxas de dados.	Prover conectividade de banda larga para células ou nó de retransmissão em áreas sub-atendidas.	TR 22.863: Deployment and coverage. Relacionado a TS 22.261.
eMBB	Segurança pública regional	Equipes de emergência, como polícia, bombeiros e equipe médica podem trocar mensagens, serviços de voz e vídeo em condições internas/externas em qualquer lugar e em qualquer cenário de mobilidade.	Prover serviço a equipamento de usuário (aparelho portátil ou montado no veículo); Prover conectividade adhoc entre duas células.	TR 22.862: Mission critical services. Relacionado a TS 22.261.
eMBB	Conectividade de célula fixa	Usuários em vilas isoladas ou instalações industriais (mineração, plataforma <i>off-shore</i> ) acessam serviços 5G e se beneficiam de altas taxas de dados	Prover conectividade de banda larga entre a rede central e outras células em áreas não atendidas (áreas isoladas).	TR 22.863: Deployment and coverage. Relacionado a TS 22.261

de rede de acesso aérea. A partir dela é possível identificar a categoria de serviço 5G e a função que a rede não terrestre pode desempenhar. Note que todas elas estão relacionadas à categoria de largura de banda melhorada e isto leva a soluções nas quais há a necessidade de aumentar a capacidade e/ou qualidade de serviço da rede.

## 2.2.2 Sistemas de múltiplos UAVs

A Organização Internacional de Aviação Civil (ICAO) define um UAV como uma aeronave capaz de realizar voos sem um piloto humano a bordo (ICAO, 2011). Um sistema

básico de UAV é formado pelo UAV, um controlador terrestre e um sistema de comunicação entre eles. O voo do UAV pode ser operado remotamente por um operador humano ou de forma autônoma por computadores de bordo. Há vários tipos de UAVs disponíveis no mercado, de diversos tamanhos e tecnologias. A escolha do modelo a ser utilizado depende do tipo de aplicação ao qual este será direcionado. Por exemplo, os de grande porte podem ser usados de maneira isolada em vários tipos de missões, enquanto os de pequeno porte podem ser usados juntos de maneira coordenada, formando uma espécie de enxame.

O uso de enxames de UAVs ao invés de usar um único UAV para completar uma missão apresenta algumas vantagens. (SKOROBOGATOV; BARRADO; SALAMÍ, 2020) cita algumas:

- Ações simultâneas: um enxame de UAVs pode realizar tarefas em diferentes localizações geográficas ao mesmo tempo, ao contrário de um único UAV.
- Redução do tempo de missão: dependendo da missão, os tempos operacionais podem ser significativamente reduzidos com o uso de vários UAVs.
- Custo: em alguns casos, adquirir um único UAV de grande porte pode ser uma solução muito onerosa, ao passo que ter vários UAVs de pequeno porte pode ser mais barato, além de reduzir os custos relacionados a, por exemplo, consumo de energia.
- Complementaridade: num enxame de UAVs, cada UAV pode portar um conjunto específico de sensores quando os objetivos da missão exigem que diferentes tipos de sensores estejam localizados em diferentes áreas.
- Tolerância a falhas: no caso de múltiplos UAVs em operação, a perda de um UAV não significa necessariamente o encerramento da missão. Neste caso, a perda de um UAV pode ser mitigada pelo algoritmo que coordena a rede, atribuindo tarefas adicionais a outros UAVs.
- Flexibilidade: um grupo de UAVs pode ser alocado dinamicamente para diferentes tarefas simultaneamente, e podem ser reorganizados, se necessário.

(SKOROBOGATOV; BARRADO; SALAMÍ, 2020) também citam algumas desvantagens:

- Restrições legais: o uso de vários UAVs ao mesmo tempo pode não ser permitido em algumas jurisdições.
- Complexidade: quanto mais UAVs um sistema possui, mais complexa torna-se a sua gerência.

- Questões de segurança: uso de vários UAVs apresenta questões relacionadas à segurança. Uma delas é a prevenção de colisão.

Existem várias propostas para o uso de sistemas de múltiplos UAVs para cobrir áreas a fim de melhorar a qualidade da conexão quando houver distúrbios nas redes móveis celulares, que podem acontecer, por exemplo, durante eventos de grande escala, tais como shows, desastres naturais, ataques terroristas, entre outros. Muitos trabalhos discutem soluções para o problema de posicionamento dos UAVs. Um levantamento de propostas relacionados ao uso de UAVs para auxiliar redes móveis celulares será discutido no Capítulo 3 desta tese.

Em um sistema de múltiplos UAVs, pode haver diferentes canais de comunicação. O canal mais básico é o V2G (veículo para a terra). Neste, o UAV pode obter ou enviar dados de/para o centro de controle terrestre. Outro tipo muito comum é o V2V (veículo para veículo), quando um UAV se comunica com outro UAV. A comunicação V2I (veículo para infraestrutura) pode ser usada para conectar UAVs a redes celulares terrestres. Comunicação S2V (sensor para veículo), útil em aplicações nas quais os UAVs se comunicam com sensores no solo. E, finalmente, uma comunicação G2I (terra para infraestrutura) é usada para conectar a estação terrestre com a internet.

### 2.2.3 UAVs como estações base voadoras

Redes auxiliadas por UAVs estão emergindo como um método promissor para estabelecer redes de emergência ou redes de compensação temporária. Uma rede de comunicação de emergência é crucial para auxiliar em situações de resgate em caso de desastres naturais ou intencionais, especialmente quando a infraestrutura de comunicação (por exemplo, macrocélulas) foi parcial ou totalmente destruída. Por outro lado, mesmo na ausência de desastres, a rede móvel celular também está sujeita a sofrer condições anormais durante a sua operação, por exemplo, ao longo de avenidas congestionadas em horário de pico ou durante eventos superlotados (como manifestações, festivais, eventos esportivos), sobrecarregando a rede fixa com uma enorme quantidade de solicitações que nem sempre são possíveis de serem atendidas. Neste contexto, o uso de UAVs atuando como células voadoras tem sido apontado como uma solução atrativa.

Graças à versatilidade e alta mobilidade, os UAVs de baixa altitude podem ser usados como plataformas de comunicação aérea, estações base voadoras (BSs) ou estações retransmissoras móveis, para fornecer serviços de comunicação para equipamentos de usuários terrestres, onde e quando forem necessárias. Sobre isto, (LI et al., 2019) destaca duas perspectivas diferentes:

- Perspectiva da operadora: as soluções baseadas em UAVs são atraentes para reduzir

a carga de tráfego celular, fornecendo soluções rápidas, temporárias e de baixo custo.

- Ponto de vista do dispositivo móvel: as soluções baseadas em UAVs são atraentes ao fornecerem altas taxas de dados em redes complementares.

A Fig. 1 ilustra uma arquitetura de rede auxiliada por UAVs na qual cada UAV é equipado com transceptores (rádio transmissor e receptor) sem fio, permitindo que eles se comuniquem com UEs terrestres e também com outros UAVs. Na ilustração também é possível observar um enxame de UAVs formando uma rede *ad hoc* voadora, na qual eles estabelecem uma comunicação UAV-para-UAV. Tais redes são apontadas, por exemplo, como soluções alternativas para aumentar temporariamente a capacidade da rede quando a rede terrestre encontra-se superlotada ou enfrenta problemas de interrupção completa ou parcial devido a situações de desastres. Assim, estações base montadas em UAVs de baixa altitude são implantadas para reforçar a infraestrutura de comunicação a fim de compensar a sobrecarga de células ou interrupção local, ou mesmo prover acesso a áreas isoladas ou sub-atendidas, formando uma célula voadora. Numa outra alternativa, os UAVs também podem ser usados como UEs aéreos (ou seja, UAV-UEs), a fim de permitir uma infinidade de aplicações que vão desde entrega de carga até vigilância de perímetro.

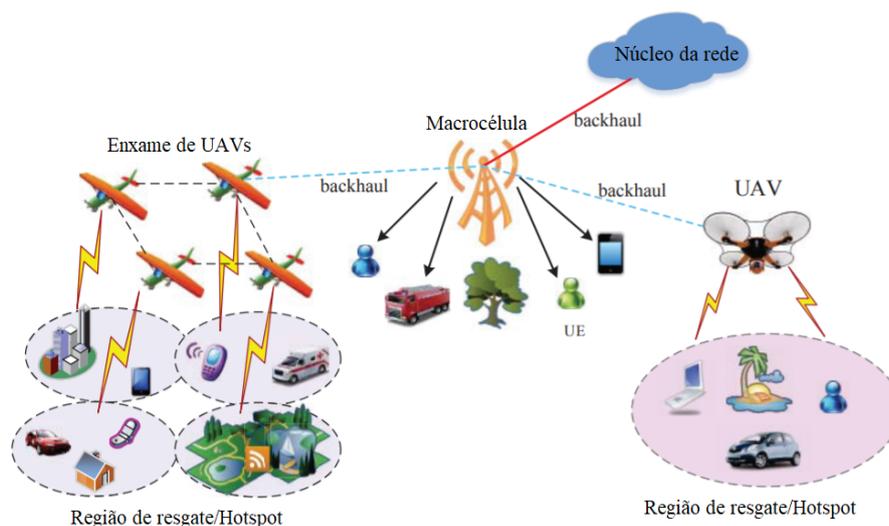


Figura 1 – Rede móvel auxiliada por UAVs. Fonte: adaptado de (LI et al., 2019).

Como candidatas a complementar redes celulares já existentes, (SHI et al., 2018b) destaca os principais atributos das redes auxiliadas por UAVs:

- Links de linha de visada: estações base montadas em UAVs têm uma probabilidade maior de conectar UEs terrestres por links de linha de visada (LoS, *line of sight*), o que facilita transmissões mais confiáveis em longas distâncias. Além disso, a

flexibilidade e versatilidade dos UAVs permitem ajustar seus locais de implantação para manter a qualidade dos links.

- Implantação dinâmica: em comparação com as infraestruturas terrestres estacionárias, os UAVs podem ser implantados dinamicamente de acordo com as demandas em tempo real. Além disso, estações base montadas em UAVs não exigem custos de aluguel do local, eliminando assim a necessidade de torres e cabos.
- Redes baseadas em enxames de UAVs: um enxame de UAVs é capaz de formar redes escaláveis e oferecer conectividade onipresente para UEs terrestres. Beneficiando-se de sua alta flexibilidade e recursos de provisionamento rápido, tal solução é viável para recuperar e expandir a comunicação em um determinado local de maneira rápida e eficaz.

Estações base montadas em UAVs, por outro lado, estão sujeitas a restrições rigorosas devido ao tamanho, capacidade de carga e autonomia energética. Por exemplo, UAVs de pequeno porte normalmente têm baixa potência e baixa capacidade em termos de carga útil e autonomia. Por outro lado, UAVs de maior porte podem fornecer uma cobertura mais ampla e maior autonomia energética (MOZAFFARI et al., 2019). Sobre a altitude do UAV, (SHI et al., 2018b) ressalta que conforme a altitude aumenta, a probabilidade de ter um link LoS para comunicação ar-solo também aumenta. Por outro lado, a perda de propagação é mais severa devido ao aumento da distância entre o UAV e o UE terrestre. Assim, deve haver um compromisso entre a altitude e a cobertura da célula voadora. A seguir são brevemente descritos os principais desafios enfrentados pelas redes móveis auxiliadas por UAVs.

### 2.2.3.1 Modelagem do canal

Para (BOR-YALINIZ; SZYSZKOWICZ; YANIKOMEROGLU, 2017), a variabilidade no tempo e no espaço 3D tornam a modelagem do canal UAV-Solo muito mais complexa do que a modelagem dos canais de comunicação terrestres. Além disso, o canal UAV-Solo é mais suscetível a sofrer obstruções do que o canal UAV-UAV, que experimentam links LoS predominantemente. Portanto, os modelos de propagação convencionais geralmente não são adequados para caracterizar canais UAV-Solo. Ademais, os canais UAV-Solo são altamente dependentes da altitude do UAV, do ângulo de elevação e do tipo de ambiente de propagação.

### 2.2.3.2 Implantação

As características dos canais UAV-Solo precisam ser consideradas para a implantação 3D ideal de UAVs a fim de alcançar um ótimo compromisso altitude-cobertura e evitar colisões com outros UAVs e obstáculos no ambiente (SHI et al., 2018b). Se por um lado a

possibilidade de implantação dinâmica é uma vantagem, também é desafiadora já que está sujeita a mudanças em tempo real em termos de requisitos, demanda e ambiente, o que pode tornar complexa a tomada de decisão, especialmente ao se tratar da coordenação de múltiplos UAVs.

### 2.2.3.3 Planejamento de percurso

O planejamento de percurso busca encontrar um caminho ideal entre a origem e o destino do UAV. Para resolver esse problema, a tomada de decisão requer um mapa ou gráfico do ambiente na qual a missão será realizada, cujo objetivo das técnicas de planejamento de percurso não é apenas encontrar um caminho ideal e mais curto, mas também fornecer um ambiente livre de colisão para os UAVs (AGGARWAL; KUMAR, 2020). Para isto, é importante o desenvolvimento de técnicas de planejamento de percurso para calcular um caminho seguro no menor tempo possível até o destino final.

### 2.2.3.4 Altitude

Devido às restrições de tamanho, peso e potência (SWAP), diferentes tipos de UAVs podem ser restritos a diferentes altitudes de operação. (ZENG; WU; ZHANG, 2019) ressalta que à medida que a altitude do UAV aumenta, maior a distância em relação a um UE terrestre, aumentando assim a perda de propagação do sinal, o que exige novos *designs* de antenas e técnicas de comunicação celular a fim de alcançar uma cobertura satisfatória até a altitude máxima de 300 metros, conforme especificado pelo 3GPP (3GPP, 2017a). Por outro lado, uma altitude de operação mais alta promove maior conectividade em linha de visada, uma vez que os efeitos da reflexão e o sombreamento são diminuídos (SHI et al., 2018b). Portanto, deve haver o compromisso entre altitude do UAV e a perda de propagação, a fim de obter a cobertura desejada.

A altitude de operação do UAV também influencia na interferência co-canal percebida pelos usuários. (VALIULAHY; MASOUROS, 2020) destaca que voar em altitudes mais altas pode diminuir os efeitos da interferência do co-canal, aumentando a distância euclidiana entre os UAVs e os usuários e que para melhorar o desempenho dos serviços de comunicação, é necessário otimizar conjuntamente as potências de transmissão e altitudes dos equipamentos de transmissão carregados pelos UAVs.

### 2.2.3.5 Gerenciamento de interferência

O canal UAV-Solo com predominância de links em linha de visada traz oportunidades e desafios para o projeto de comunicações de UAV em comparação com as comunicações terrestres tradicionais. De acordo com (ZENG; WU; ZHANG, 2019), se por um lado esta predominância leva a um desempenho de canal mais confiável entre o UAV e BSs/UEs terrestres, por outro lado também causa forte interferência em células adjacentes

na mesma banda de frequência (BSs voadoras e terrestres coexistentes). O gerenciamento de interferência é uma questão crítica em projetos e torna-se ainda mais desafiador nesses cenários, já que pode limitar severamente a capacidade da rede celular.

### 2.2.3.6 Energia limitada

Uma vez que os UAVs dependem principalmente de baterias recarregáveis, a duração das missões é fortemente afetada pelo consumo de energia dos UAVs, que por sua vez depende de uma variedade de fatores, mas principalmente da carga das asas, peso e desempenho desejado (BERTRAN; SÀNCHEZ-CERDÀ, 2016). O consumo de energia é um problema crítico para os UAVs visto que a bateria a bordo do veículo é limitada e utilizada não somente para manter as funções relacionadas ao voo da aeronave mas também os equipamentos de computação e transmissão a bordo do veículo. Portanto, como balancear a energia de transmissão e a energia de propulsão é um desafio importante a ser investigado.

### 2.2.3.7 Backhaul limitado

Uma diferença importante entre BSs terrestres e voadoras é o tipo de *backhaul*. Especificamente, as BSs terrestres são normalmente conectadas ao núcleo da rede por meio de links com fio, que possuem grande largura de banda. Em contraste, as BSs voadoras são conectadas às estações base terrestres ou ao núcleo da rede necessariamente por meio de links de *backhaul* sem fio, geralmente com capacidade inferior aos links cabeados. Assim, o *backhaul* limitado torna-se muitas vezes um gargalo, podendo afetar a qualidade de serviço dos UEs.

Os autores em (SHAKOOR et al., 2020) destacam que em comunicações celulares auxiliadas por UAVs, geralmente usa-se links sem fio dedicados como *backhaul* para conectar o UAV à estação terrestre. Esses links podem ser estabelecidos usando ondas milimétricas, enlace óptico no espaço livre ou usando tecnologias abaixo de 6GHz. No entanto, isso pode aumentar a interferência entre o link de *backhaul* do UAV e os links de acesso devido à reutilização da mesma frequência. Conseqüentemente, são necessários métodos mais avançados que possam gerenciar com eficiência essa interferência por meio da alocação adequada de recursos.

### 2.2.3.8 Segurança

O canal UAV-Solo predominantemente formado por links LoS e a alta mobilidade dos UAVs trazem novas oportunidades, bem como desafios em termos de segurança da camada física, como vulnerabilidade a ataques maliciosos, interceptação, e etc. (ZENG; WU; ZHANG, 2019). Além disso, os UAVs podem ser capturados ou atacados fisicamente durante o voo. Por outro lado, graças à alta mobilidade, BSs voadoras podem mover-se

para longe dos "bisbilhoteiros" terrestres a fim de reduzir o vazamento de informações para eles. Essa vantagem porém pode caracterizar-se como nova ameaça às redes terrestres, pois poderiam ser interceptadas e/ou bloqueadas por UAVs "bisbilhoteiros". Portanto, o desenvolvimento de estratégias ou protocolos de segurança são de suma importância nessa nova conjuntura.

Além das perspectivas discutidas acima, ainda existem muitas outras questões em aberto relacionadas à praticidade de implantar redes móveis auxiliadas por UAVs. Estas porém podem ajudar a entender melhor o contexto e a arquitetura de rede envolvida nesta tese.

## 2.3 Autômatos Celulares

De maneira geral, os sistemas podem ser compreendidos como entidades formadas de componentes bem definidos. (MITCHELL; NEWMAN, 2002) destaca que um sistema complexo é formado por componentes ou agentes individuais que interagem entre si e frequentemente levam a comportamentos em larga escala que não são facilmente previstos a partir do conhecimento do comportamento de um único agente. Esse efeito coletivo é chamado de comportamento emergente. Para (PEARCE; MERLETTI, 2006), tais sistemas são complexos no sentido em que há um grande número de agentes que, aparentemente independentes, interagem entre si, e a riqueza dessas interações muitas vezes permite que o sistema como um todo seja auto-organizado.

A pesquisa em redes sem fio tem utilizado várias ferramentas para avaliar o desempenho dos mais diversos sistemas, tais como medição, simulação computacional, emulação e modelagem analítica. Na modelagem analítica, por exemplo, um fenômeno deve ser descrito matematicamente. No entanto, existem vários fenômenos que são difíceis de serem modelados por meio de equações. Uma alternativa é o estudo desses fenômenos a partir do conceito de sistemas complexos.

Uma das mais importantes propriedades dos sistemas complexos é a de que regras locais podem produzir comportamento global, sendo que tais regras dependem das relações entre os diversos agentes que compõem o sistema. (WOLFRAM, 2018) ressalta que os resultados obtidos pelas relações entre os agentes são conhecidos como efeitos coletivos e que as análises de tais resultados extrapolam a análise da matemática clássica.

Autômatos Celulares e modelos baseados em agentes são exemplos genuínos de ferramentas matemáticas capazes de simular essa classe de sistema e podem ser utilizados como ferramentas para o estudo e modelagem de sistemas complexos reais, de natureza física, biológica, econômica, entre outros (MELOTTI, 2009). Dentre estas técnicas, os Autômatos Celulares (AC) destacam-se pela simplicidade de simulação, capazes de representar as interações entre os indivíduos que compõem o sistema, além de simular o comportamento

coletivo gerado pelos indivíduos de um sistema complexo (WOLFRAM, 2018).

Os Autômatos Celulares (AC) começaram a ser estudados em torno das décadas de 40 e 50, pelos matemáticos John Von Neumann e Stanislaw Ulam, para descrever o comportamento auto-reprodutivo e evolutivo de sistemas vivos (NEUMANN; BURKS et al., 1966). No entanto, foi a partir da década de 70 que os Autômatos Celulares se popularizaram no meio acadêmico, especialmente devido aos resultados da pesquisa de John Conway, chamado de *Game of Life*, cujo objetivo era criar um autômato celular simples com computabilidade universal (FISHWICK, 2007). O *Game of Life* foi o primeiro exemplo de AC relativamente simples capaz de mostrar sua habilidade em reproduzir padrões complexos da natureza e estruturas que se assemelhavam a organismos artificiais. A partir da década de 80, Stephen Wolfram desenvolveu a teoria dos autômatos celulares, que descreve o comportamento dinâmico dos ACs e seus estudos se tornaram fonte principal de referência para os trabalhos posteriores nesta área (WOLFRAM, 1984).

Os ACs são técnicas de modelagem matemática e numérica voltada para processos espaço-temporais (FISHWICK, 2007). Os autômatos celulares são modelos completamente discretos em termos de estado, espaço e tempo. Além disso, são sistemas distribuídos, espacialmente estendidos, que consistem em um grande número de componentes simples e idênticos com conectividade local. O estado de cada componente simples (geralmente referido como células) muda de forma síncrona e é disparado por atualizações de estado em células vizinhas (ALIU; MEHTA; EVANS, 2013). Essas atualizações são baseadas em regras locais e nos estados atuais da própria célula e nos estados de suas células vizinhas (WOLFRAM, 2002). Essa atualização acontece de forma síncrona e em paralelo.

Os autômatos celulares são exemplos de técnica de modelagem matemática capaz de exibir um comportamento de auto-organização (WOLFRAM, 1983). Segundo (WOLFRAM, 1984), mesmo partindo de uma desordem completa, sua evolução irreversível pode gerar estruturas ordenadas espontaneamente. A teoria dos ACs tem atraído pesquisadores de uma ampla variedade de disciplinas nos últimos anos, e suas aplicações têm sido propostas em quase todos os ramos da ciência, conforme explorado em (TONGUZ; VIRIYASITAVAT; BAI, 2009), (ALIU et al., 2014), (HORNG, 2014), (ESPÍNOLA et al., 2014), (WATANABE, 2015), (TOMEU; SALGUERO; CAPEL, 2016), (TSOMPANAS et al., 2017) e (SONG et al., 2019). Isso se deve ao seu enorme potencial na modelagem de sistemas complexos, apesar de sua relativa simplicidade. Este é um dos principais motivos apontados por (CUNHA et al., 2005) que faz dos ACs uma abordagem adequada para o projeto de redes auto-organizáveis.

### 2.3.1 Componentes, estrutura e terminologia

A dinâmica do AC se desenvolve em uma grade espacial discreta n-dimensional (geralmente,  $n = 1, 2$  ou  $3$ ). No caso bidimensional (2D), vários tipos de vizinhanças podem

ser definidas, mas as mais comuns são a vizinhança de Von Neumann, vizinhança de Moore e vizinhança Hexagonal (FISHWICK, 2007), como mostrado na Fig. 2(a). A vizinhança de Von Neumann tem cinco células, consistindo em uma célula central e suas quatro células vizinhas imediatas não diagonais e tem um raio 1. O raio de uma vizinhança é definido como a distância máxima da célula central em relação às células horizontais ou verticais em uma vizinhança. A vizinhança de Moore tem nove células, consistindo na célula central e suas oito vizinhas circundantes, de raio 1. Por outro lado, uma vizinhança hexagonal tem sete células, consistindo de uma célula central e suas seis vizinhas circundantes. As condições de limite (ou borda) mais populares são: limite nulo (as células da borda são conectadas ao estado lógico 0), limite periódico (as células da borda da grade são adjacentes umas às outras) e limite fixo (se as células da borda estiverem conectadas a qualquer valor de estado fixo) (NAYAK; PATRA; MAHAPATRA, 2014), como mostrado na Fig. 2(b).

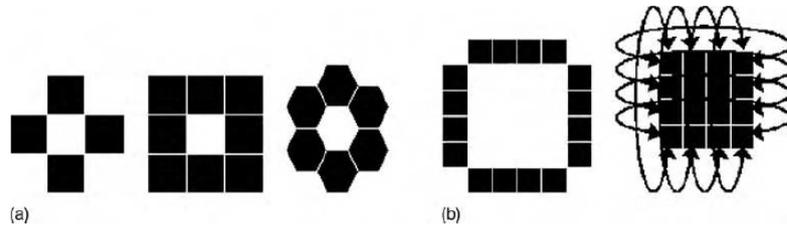


Figura 2 – Tipos mais populares de vizinhanças e condições de limite. (a) Vizinhança de Von Neumann, vizinhança de Moore e vizinhança hexagonal, respectivamente; (b) Condições de limite fixo e periódico, respectivamente. Fonte: (FISHWICK, 2007).

Os autômatos celulares bidimensionais são definidos como uma lista de quatro elementos  $(L, S, F, N)$ , onde  $L$  é uma estrutura regular quadrada (os elementos de  $L$  são chamados de células),  $S$  é o conjunto de possíveis estados das células,  $F$  reúne as funções de transição de estados do AC e  $N$  é a vizinhança da célula. Em outras palavras, um modelo de AC consiste em um conjunto de células organizadas ao longo de uma grade espacial discreta  $n$ -dimensional regular, na qual cada célula pode estar em um dos estados finitos definidos.

Considere  $L$  o conjunto de células quadradas numa estrutura 2D,  $L = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_Q\}$ . A célula  $\phi$  ocupa a posição  $(x, y)$  na grade e  $Q$  é o número total de células na estrutura  $L$ .  $N$  é o conjunto de vizinhanças, um subconjunto finito de  $Q$ ,  $N \subset Q$ ,  $N = \{n_1, n_2, \dots, n_\iota\}$ , onde  $\iota$  é o tamanho da vizinhança.  $S$  é um conjunto finito de estados  $S(\phi, t) = \{S_1(\phi, t), S_2(\phi, t), \dots, S_m(\phi, t)\}$  associado à célula  $\phi$  na posição  $(x, y)$  considerando os estados de suas células vizinhas no tempo  $t$ .  $S(\phi, t)$  são atualizados de acordo com o conjunto de funções de transição de estado  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$  aplicado uniformemente

a todas as células, da seguinte maneira:

$$S_i(\phi, t + 1) = f_i(S(\phi, t), \dots, S(\phi + n_i, t)) \quad (2.1)$$

Onde  $\phi + n_i$  designa as células na vizinhança de uma determinada célula  $\phi$  na posição  $(x, y)$  e  $t$  é o tempo de transição de uma célula transitando de seu estado atual para o próximo estado. Uma iteração do AC é alcançada após a aplicação síncrona (ou seja, simultânea no tempo) das funções de transição para cada célula de  $L$  (FISHWICK, 2007). (ALIU; MEHTA; EVANS, 2013) destaca propriedades relevantes dos autômatos celulares:

- Os autômatos celulares são sistemas complexos, formados por componentes individuais simples.
- A evolução de cada componente é baseada nas interações com sua vizinhança local.
- Seguem regras simples e resultam em um padrão emergente.
- Todos os componentes operam em paralelo de forma síncrona.

As características discutidas nesta seção tornam os autômatos celulares um algoritmo apropriado para modelar sistemas auto-organizáveis, como o que é tratado nesta tese, nos quais há o surgimento de um padrão emergente e global a partir de relações locais (ALIU; MEHTA; EVANS, 2013). Isso pode ser alcançado sem um controlador centralizado, mas a partir de uma coordenação local simples entre componentes vizinhos.

## 2.4 Algoritmo Genético

Nos últimos anos, tem havido um crescente interesse no uso da biologia como fonte de inspiração para a solução de problemas práticos. Essas técnicas são frequentemente chamadas de algoritmos computacionais bioinspirados. O objetivo desses algoritmos é principalmente extrair metáforas úteis de sistemas biológicos naturais. A partir deles, podem ser criadas soluções computacionais eficazes para problemas complexos em uma ampla gama de áreas de domínio. (GAO, 2012) destaca que o desenvolvimento mais notável acerca dos algoritmos bioinspirados inclui os Algoritmos Genéticos (GA), inspirados pela teoria neodarwiniana da evolução, o Sistema Imunológico Artificial (AIS), inspirado por princípios imunológicos biológicos e a Inteligência de Enxame (SI), inspirada pelo comportamento social de insetos e outros animais.

O Algoritmo Genético (AG), muitas vezes referido como algoritmos genéticos, foi inventado por John Holland na Universidade de Michigan na década de 1970 (LUKE, 2013).

É inspirado na teoria evolucionária de Charles Darwin, na qual os indivíduos mais aptos sobrevivem para uma próxima geração. Em outras palavras, quanto melhor a capacidade de um indivíduo de adaptar-se ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes. O AG é, portanto, um método evolutivo de otimização. Isto é, visa determinar os pontos extremos de uma função, seja ele mínimo (problema de minimização), ou máximo (problemas de maximização).

### 2.4.1 Componentes, estrutura e terminologia

De acordo com (RONDEAU; BOSTIAN, 2009), um algoritmo genético codifica um conjunto de parâmetros de entrada que representam possíveis soluções em um cromossomo. Por sua vez, um cromossomo é formado por genes, que é a unidade básica de informação. Cada gene ocupa uma posição específica no cromossomo e controla uma característica hereditária também específica (LINDEN, 2008). Em outras palavras, o cromossomo é uma estrutura de dados que representa uma possível solução para o problema. A representação cromossomial é fundamental na modelagem do AG e basicamente consiste em uma maneira de traduzir a informação do problema em uma maneira viável de ser tratada computacionalmente (normalmente essa representação é do tipo binária, inteira ou real). A mais comum é utilizar uma série (*string*) binária, onde cada bit da série representa alguma característica da solução. A Fig. 3 traz um exemplo utilizando representação binária.

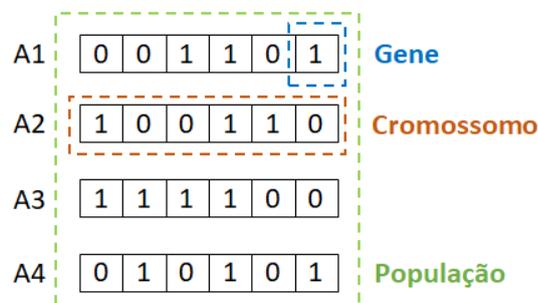


Figura 3 – Exemplo de representação binária.

São componentes comuns a quase todos os AGs (CARR, 2014):

- Uma função de aptidão (ou *fitness*) para otimização.
- Uma população de cromossomos.
- Um mecanismo de seleção de quais cromossomos irão se reproduzir.
- Uma operação de cruzamento (ou *crossover*) para produzir a próxima geração de cromossomos.

- Uma operação de mutação aleatória de cromossomos na nova geração.

Para (MITCHELL, 1995), a função de aptidão é a função que o algoritmo está tentando otimizar. A palavra aptidão é inspirada na teoria da evolução. Ela testa e quantifica o quão ‘adequada’ é cada solução potencial. A Fig. 4 apresenta um fluxograma que representa as etapas básicas de um algoritmo genético de acordo com (LINDEN, 2008).

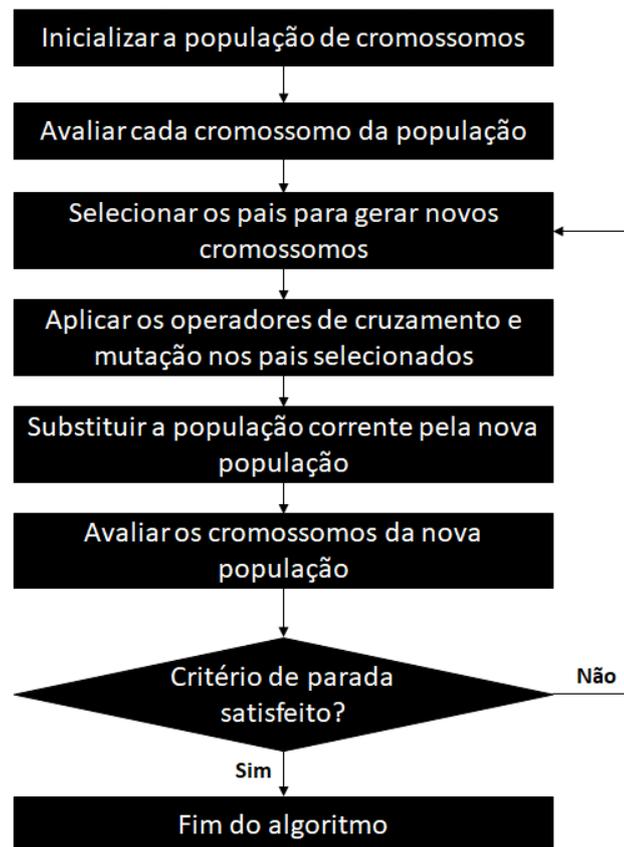


Figura 4 – Fluxograma do algoritmo genético.

Note que inicialmente é gerada uma população formada por um conjunto (geralmente aleatório) de indivíduos, ou seja, possíveis soluções do problema. Os indivíduos (ou cromossomos) são codificados em uma forma inspirada no genoma dos seres vivos: um vetor de características que possa ser desmembrado e recombinado com partes dos vetores de outras soluções (IKEDA, 2009).

No segundo passo, a população inicialmente gerada é avaliada por meio de uma função objetivo. Na etapa de avaliação, cada indivíduo será testado empiricamente em uma função e receberá um valor de aptidão chamado *fitness*. Este valor geralmente é dado por uma função objetivo  $f(x)$  que se deseja otimizar com o AG. Dependendo do problema a ser otimizado, o melhor valor pode ser o maior para casos de maximização, ou o menor para casos de minimização. Essa etapa é sempre definida com relação à população atual. A função objetivo é definida a partir dos parâmetros envolvidos no problema.

No terceiro passo, já de posse dos valores de *fitness* de cada indivíduo, a população inteira é submetida a um mecanismo de seleção, na qual alguns indivíduos da geração atual serão selecionados para avançar para a próxima etapa. Na etapa de seleção, os indivíduos com melhor *fitness* (mais aptos) têm mais chance de gerar filhos para próxima geração em comparação aos indivíduos menos aptos. Existem diversos tipos de mecanismos de seleção dependendo do tipo de codificação do indivíduo (GOLBERG, 1989). Alguns mecanismos clássicos de seleção são:

- Roleta: o método cria uma roleta em formato de ‘pizza’ onde cada fatia representa a porcentagem de escolha de determinado indivíduo. Quanto melhor o *fitness*, maior a fatia correspondente na roleta e, portanto, maior a chance de ser escolhido.
- Torneio: o método cria pequenos subgrupos de indivíduos selecionados aleatoriamente, dentro destes subgrupos é realizada uma disputa onde indivíduos com melhor *fitness* têm mais chance de ganhar.

Após os indivíduos serem selecionados (pais), novos indivíduos são gerados no quarto passo do algoritmo. Nesta etapa, os operadores de cruzamento são os responsáveis por misturar a carga genética (genes) de dois indivíduos e gerar filhos para a próxima geração. A operação de cruzamento é a responsável por evoluir a população, através da combinação dos genótipos dos pais, com a chance de melhorar a solução para o problema. Há várias formas de fazer o cruzamento (*crossover*). São exemplos comuns o *crossover* em um ou mais pontos, *crossover* uniforme e *crossover* aritmético (IKEDA, 2009). Junto, ou após a operação de cruzamento, os indivíduos podem sofrer mutações, que são pequenas perturbações geralmente aleatórias na carga genética do indivíduo, podendo assim aumentar as chances de evitar que o algoritmo fique preso em um ótimo local e melhore a busca por melhores resultados.

Considera-se então que o AG opera em um ambiente de recursos limitados e que a cada atuação do operador genético novos filhos são criados. Estes por sua vez vão sendo gerados até que o número de filhos criados seja igual ao tamanho da população corrente (LINDEN, 2008) ou quando atinge o intervalo de geração. O intervalo de geração indica a porcentagem da população que será substituída na próxima geração. No próximo passo então a população corrente é substituída pela nova população.

No passo seguinte, a nova população é avaliada por meio da função objetivo e cada indivíduo receberá um valor de aptidão.

Os critérios de parada do algoritmo geralmente são atingidas quando o AG: (i) atinge o resultado ótimo do problema, (ii) executou o número máximo de gerações definidas ou (iii) ficou preso em algum ótimo local por um número determinado de gerações. Caso o critério de parada não seja satisfeito, o algoritmo retorna para o passo de seleção dos pais

para gerar uma nova população e repete os passos seguintes num ciclo que chega ao fim quando o critério de parada é atingido. Finalmente, o AG entrega a otimização desejada ou uma solução aproximada.

São parâmetros comuns do AG (IKEDA, 2009): o tamanho da população (que mede o número de cromossomos em uma geração), taxa de cruzamento (frequência com que o cruzamento é realizado), taxa de mutação (frequência com que as partes dos cromossomos sofrerão mutação), número de gerações (o número de vezes que os passos do AG serão repetidos até chegar em uma solução) e o intervalo de geração. A escolha dos parâmetros influenciam no comportamento dos AGs e é uma etapa importante da modelagem. Uma escolha mal conduzida pode prejudicar o desempenho do algoritmo na obtenção dos resultados esperados.

Existem ainda outros conceitos, como o elitismo, em que indivíduos com melhor *fitness* de cada geração são preservados para gerações futuras. De acordo com as particularidades de cada problema, estratégias adequadas são adotadas no intuito de atingir a melhor solução.

## 2.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os principais fundamentos teóricos que nortearam a composição e desenvolvimento desta tese. Para isto, discutiu-se as principais expectativas, vantagens e desafios a respeito da implantação de redes não terrestres para complementar a capacidade das redes terrestres tradicionais dentro do contexto das redes móveis da próxima geração e posteriores. Também foram apresentados os principais conceitos relacionados a teoria dos Autômatos Celulares e Algoritmo Genético, que serviram de base para o desenvolvimento dos métodos de posicionamento propostos nesta tese.

## 3 Trabalhos Relacionados

### 3.1 Considerações Iniciais

O presente capítulo apresenta um panorama geral dos trabalhos relacionados a esta tese publicados nos últimos anos. Com as referências apresentadas, busca-se ratificar que a problemática abordada representa uma área ativa e em aberto na literatura. A Tabela 2 apresenta uma síntese dos trabalhos discutidos ao longo deste capítulo, destacando as principais considerações e limitações. O capítulo encerra com a localização desta tese no estado da arte e as contribuições apresentadas para superar as limitações identificadas.

### 3.2 Correlatos

A evolução das tecnologias de telecomunicações, a demanda cada vez maior por novos serviços e o crescimento exponencial de dispositivos inteligentes destacam o desenvolvimento de redes não terrestres como uma potencial solução para complementar as redes terrestres, especialmente na prestação de serviços em áreas ainda não atendidas ou sub-atendidas (3GPP, 2020). (RINALDI et al., 2020) destaca que essa complementação da rede possibilita o atendimento de solicitações de conexões em qualquer lugar e a qualquer hora, oferecendo ampla área de cobertura e garantindo a disponibilidade, continuidade e escalabilidade do serviço.

A integração de redes não terrestres às redes terrestres é, portanto, considerada uma solução atraente para o desenvolvimento do padrão 5G e posteriores. Embora o papel das redes não terrestres seja promissor, essa integração é uma tarefa desafiadora. Os desafios incluem modelagem de canal (UAV-UAV, UAV-Solo), posicionamento ótimo de UAVs, eficiência energética, planejamento de caminho, gerenciamento de recursos e potência, associação de usuários, segurança de rede, etc (LI; FEI; ZHANG, 2018), (SHAKOOR et al., 2020).

O posicionamento de UAVs na rede afeta várias métricas de desempenho, como vazão, cobertura e conectividade (RAHMAN et al., 2018). Em comparação com as infraestruturas terrestres estacionárias, as estações base montadas em UAVs podem ser implantadas dinamicamente de acordo com os requisitos em tempo real, permitindo o posicionamento conforme a localização dos UEs, ou um conjunto de sensores no solo, por exemplo. Por outro lado, determinar o posicionamento ótimo de UAVs não é trivial. Isto porque além de determinar a posição no plano horizontal  $(x, y)$ , é preciso determinar a posição no plano vertical (altura do UAV), que por sua vez impacta na perda de

propagação e na área de cobertura no solo. O cálculo da cobertura leva em consideração a modelagem dos canais UAV-UAV e UAV-Solo. Além disso, no caso co-canal deve considerar a interferência de outras células (voadoras e terrestres). Em cenários com múltiplos UAVs, a coordenação é ainda mais desafiadora. Por exemplo, o posicionamento dinâmico deve evitar colisões com outros UAVs e obstáculos na região de interesse (construções, vegetação, colinas).

Sobre a tomada de decisão, de acordo com (MESSOUS; SEDJELMACI; SENOUCI, 2017) e (SÁNCHEZ-GARCÍA; REINA; TORAL, 2019) existem três abordagens principais: (i) Centralizada: o algoritmo de controle está implantado inteiramente em um nó central (responsável pela maior parte do processamento dos dados e da tomada de decisão), cada nó compartilha suas informações com o nó central, que tem a visão global da rede; (ii) Descentralizada: o controle não está em um nó central, cada nó toma decisões utilizando exclusivamente suas informações locais, ou seja, não há troca de informações entre os nós; e (iii) Distribuída: o controle não está em um nó central, no entanto, cada nó compartilha suas informações com outros nós em uma determinada vizinhança e, posteriormente, toma suas próprias decisões, podendo se basear em suas informações locais e também nas informações compartilhadas por nós vizinhos.

Cada abordagem tem suas vantagens e desvantagens. A abordagem centralizada é mais precisa, porém requer um custo computacional mais alto para processar todos os dados da rede em um único nó; além disso, a troca de dados entre os nós pode causar *overhead* e atrasos. (SÁNCHEZ-GARCÍA; REINA; TORAL, 2019) destaca também que neste caso uma falha no nó central pode comprometer toda a missão. Abordagens descentralizadas são menos precisas pois as informações são mais limitadas, porém são mais tolerantes à falhas. Finalmente, abordagens distribuídas usufruem da vantagem de serem mais tolerantes à falhas, pois a tomada de decisão não é centralizada, e mais precisas do que a abordagem descentralizada, já que há troca de informações com outros nós na vizinhança.

Muitos pesquisadores apontam o posicionamento da estação base voadora como o fator mais impactante na cobertura e desempenho da rede. Por este motivo, a otimização da implantação de estações base voadoras tem sido amplamente estudada nos últimos anos. Alguns desses trabalhos foram selecionados e serão sumarizados a seguir.

### 3.2.1 UAV como estação base voadora

UAVs funcionando como estações base voadoras é um dos temas mais interessantes na área de comunicação sem fio por causa de seu papel promissor nas redes de comunicação de emergência ou para aumentar a capacidade da rede temporariamente (ZHONG et al., 2020).

Sobre a implantação de UAVs, um dos trabalhos mais importantes e precursores do

tema foi realizado por (AL-HOURANI; KANDEEPAN; LARDNER, 2014). Até a presente data, a plataforma Google Acadêmico apontava que o trabalho acumulava mais de 1060 citações desde a sua publicação e certamente serviu de base para o desenvolvimento de muitos outros trabalhos na área. Em (AL-HOURANI; KANDEEPAN; LARDNER, 2014), os autores apresentaram um modelo matemático para otimizar a altitude do UAV a fim de fornecer máxima cobertura no solo. Uma das principais contribuições do artigo é a proposição de um modelo de perda de propagação em termos da probabilidade de haver condições de linha de visada (LoS) e não linha de visada (NLOS) entre o UAV e um UE no solo. A probabilidade de haver LoS depende das características do ambiente considerado (suburbano, urbano, densamente urbano, etc). A altitude ideal é então calculada em termos da perda de propagação e dos parâmetros do ambiente. Os resultados das análises mostraram que para cada tipo de ambiente, há uma altitude máxima que maximiza a área de cobertura do UAV no solo. Ao implantar o UAV em altitudes acima desse limiar, a perda de propagação aumenta, resultando na diminuição da área de cobertura no solo.

Os autores de (MOZAFFARI et al., 2015) investigaram a altitude ótima do UAV que garante a máxima cobertura no solo e a mínima potência de transmissão. Três cenários foram investigados, considerando: (i) um único UAV; (ii) dois UAVs, livre de interferência; (iii) dois UAVs, com interferência. Nos cenários (ii) e (iii), os autores também investigaram a distância ideal de separação entre os UAVs. Os resultados numéricos foram satisfatórios e forneceram *insights* importantes sobre a implantação de UAVs.

O trabalho em (LYU et al., 2016) buscou determinar a posição 2D de UAVs e o número mínimo de UAVs necessários para fornecer cobertura sem fio para um grupo de UEs no solo. Os autores propuseram um algoritmo de posicionamento espiral para implantar UAVs, sequencialmente, no cenário, iniciando pela borda em direção ao centro, até que todos os UEs estivessem sob a área de cobertura de pelo menos um UAV. O desempenho satisfatório da solução foi comprovado por meio de simulação.

Em (BOR-YALINIZ; EL-KEYI; YANIKOMEROGLU, 2016), os autores formularam uma solução para o posicionamento 3-D do UAV com o objetivo de maximizar o número de terminais servidos pela estação base voadora. A solução se baseou na localização dos UEs no solo. Os autores formularam o problema de posicionamento do UAV como um problema de programação quadrática combinado com um problema de otimização não linear, a fim de encontrar a posição 3-D e o tamanho da área de cobertura. A solução, no entanto, foi desenhada para apenas um UAV e não considerou o efeito da interferência da estação base terrestre, bem como restrições de recursos de rádio e *backhaul*.

No trabalho (KALANTARI et al., 2017), os autores investigaram como diferentes tipos de *backhaul* sem fio impactam no número de UEs atendidos por um UAV. Para isto, duas abordagens foram propostas. A abordagem centrada na rede maximizou o número total de usuários atendidos (independentemente das taxas de vazão requeridas), enquanto

a abordagem centrada no usuário maximizou a vazão global de dados. Ambas consideraram limitação da capacidade do *backhaul* e largura de banda. Os resultados mostraram que baixas taxas de transmissão no *backhaul* limitam severamente o número de UEs atendidos.

Os autores de (ALZENAD; EL-KEYI; YANIKOMEROGLU, 2017) propuseram um algoritmo de posicionamento 3-D do UAV que maximiza o número de UEs atendidos considerando diferentes requisitos de qualidade de serviço. Eles modelaram o problema da cobertura como um problema de posicionamento de múltiplos círculos e propuseram um algoritmo de busca exaustiva para determinar a posição 2D e a altitude ideal do UAV. O requisito de QoS dos UEs se deu em termos da razão sinal ruído. Os resultados foram favoráveis, com menor complexidade, quando comparado com outras soluções.

Em (HUANG; SAVKIN, 2018) os autores formularam um modelo de otimização distribuído para maximizar a cobertura e minimizar a interferência. Para isto, o algoritmo levou em consideração as informações locais, como as densidades de UEs em determinados pontos do cenário e a posição de UAVs próximos. Os autores consideram a mesma altitude para todos os UAVs. Portanto, a posição é determinada em termos do plano horizontal  $(x, y)$ . O cenário é mapeado em pontos quentes, com base em um conjunto de dados reais coletados a partir do aplicativo Momo (CHEN; KAAFAR; BORELI, 2013), usado para inferir a densidade de UEs nos pontos. O espaço de busca de posições no plano horizontal está restrito a esses pontos. Os resultados demonstraram que o desempenho do algoritmo proposto foi superior em qualidade e em tempo de execução quando comparado com um algoritmo guloso padrão.

No trabalho (KHUWAJA et al., 2019), os autores propuseram uma estratégia para coordenar a implantação de múltiplos UAVs considerando interferência co-canal entre eles. Para isto, eles desenvolveram um algoritmo para otimizar a distância de separação ideal entre UAVs a fim de mitigar a interferência co-canal e maximizar a cobertura. Os resultados mostraram que a área de cobertura depende não somente do número de UAVs no cenário, mas também da distância entre eles e do tipo de ambiente considerado. Os autores concluíram que o ajuste adequado da distância de separação pode ajudar a minimizar a interferência co-canal e o vazamento de cobertura para fora da região alvo.

Os autores de (SHAKOOR et al., 2020) propuseram otimizar conjuntamente o posicionamento 3D do UAV e o fator de compensação de perda de propagação, a fim de maximizar a probabilidade de cobertura dos usuários. (SHAKOOR et al., 2020) destaca que o problema de posicionamento torna-se ainda mais complexo à medida que o UAV muda de altitude, o que por sua vez impacta nas condições de canal. Além disso, a alta interferência co-canal reduz a área de cobertura no solo. O algoritmo inicia com a determinação da posição dos UAVs no plano horizontal, e em seguida otimiza a altitude dos UAVs juntamente com o fator de compensação de perda, a fim de maximizar a probabilidade de cobertura. Os resultados revelaram que quando os UAVs e as estações base terrestres transmitem

com esquemas de controle de potência, o desempenho da cobertura pode ser melhorado.

Conforme mencionado anteriormente, a implantação de estações base voadoras para atender cenários de desastres também tem atraído a atenção. Isso porque em tais situações, o colapso da infraestrutura de comunicação local torna-se um problema imperativo devido à destruição de edifícios, antenas, fontes de energia e outras infraestruturas (AKRAM et al., 2020). Por exemplo, em (KLAINÉ et al., 2018) os autores formularam uma heurística para posicionamento de UAVs em um cenário de emergência usando um método de aprendizado por reforço. No trabalho, os autores propuseram uma abordagem distribuída baseada em Q-learning para determinar o posicionamento dos UAVs. A recompensa global foi definida em termos do número total dos usuários cobertos pela rede de UAVs. Os resultados mostraram que a solução proposta superou amplamente outros esquemas de posicionamento fixos em relação a todas as métricas testadas.

Também nesse contexto, os autores de (AKRAM et al., 2020) propuseram um algoritmo que maximiza o número de usuários atendidos utilizando um número mínimo de UAVs. Para isso, eles desenvolveram uma abordagem baseada em visão computacional para identificar áreas geográficas com alta concentração de potenciais usuários e também apresentaram um modelo matemático que realiza a otimização conjunta da associação usuário-UAV e do posicionamento do UAV na área selecionada. Os resultados da simulação demonstraram que a abordagem proposta é implementável em cenários reais e atingiu um desempenho competitivo em comparação a solução ótima.

Enquanto a maioria dos trabalhos geralmente levam em consideração apenas a cobertura de UEs *outdoor*, o trabalho em (LIU et al., 2018) apresenta uma heurística baseada em Algoritmo Genético para otimizar o posicionamento de UAVs a fim de maximizar a cobertura de UEs e minimizar o número de UAVs necessário, considerando cenários com usuários *outdoor* e *indoor*. Os resultados mostraram que a abordagem é capaz de encontrar solução eficiente com complexidade computacional bem menor quando comparada a uma solução baseada em força bruta.

Em (HYDHER et al., 2020) os autores estudaram o problema do posicionamento eficiente de UAVs a fim de associar os UEs aos UAVs maximizando a probabilidade de cobertura e a vazão global da rede. Para isto, eles propuseram duas abordagens. Ambas iniciam com a determinação da posição 2D dos UAVs (baseado no algoritmo k-means) e a associação dos UEs. Em seguida é feito o ajuste da altitude dos UAVs. A primeira abordagem usa um algoritmo de busca exaustiva para encontrar a altitude ótima. Em outras palavras, todos os UAVs voam na mesma altitude. Por outro lado, a segunda abordagem é baseada em um PSO (otimização por enxame de partículas) para encontrar soluções sub-ótimas para a altitude dos UAVs considerando que eles podem voar em diferentes altitudes. A partir dos resultados da simulação, os autores concluíram que a primeira abordagem requer menos recursos computacionais (não considera diversidade de

altitude) e é mais adequada para ambientes com menor probabilidade de links LoS. Já a segunda abordagem requer mais recursos computacionais, atinge maiores taxas de vazão e é mais adequada para ambientes com maior probabilidade de links LoS.

Outra área promissora explora o uso temporário de estações base voadoras durante eventos superlotados a fim de complementar a infraestrutura terrestre existente quando a rede celular recebe uma demanda de solicitações inesperada para aquela região, por exemplo, durante festivais, manifestações, eventos esportivos, ou mesmo durante congestionamento em horários de pico em uma determinada região da cidade.

Nesse contexto, no trabalho (BOUCETTA et al., 2019), os autores otimizaram o posicionamento de UAVs a fim de maximizar a cobertura da rede celular durante eventos superlotados. A abordagem inicia com a detecção de anomalias na demanda da rede. Nessa fase, para detectar células sobrecarregadas na rede, os autores utilizaram um algoritmo de aprendizado de máquina, chamado *Long Short-Term Memory* (LSTM), e um conjunto de dados reais extraído do registro de detalhes de chamada, CDR (*Call Detail Records*), de Milão (Itália). Na segunda fase, eles formularam um problema de otimização cujo objetivo é maximizar o número de usuários a serem cobertos em células sobrecarregadas, encontrando o posicionamento 3D ótimo dos UAVs, além de minimizar o consumo de energia. A melhoria da qualidade de serviço da rede foi demonstrada por meio de simulação.

Os autores de (LAI; WANG; HAN, 2020) abordaram o problema de sobreposição de cobertura para servir multidões arbitrárias em redes celulares auxiliadas por UAVs. Eles propuseram um algoritmo de posicionamento 3D orientado a dados (eDDP) que resolve o problema da sobreposição de células quando mais de um UAV ocupa a mesma coordenada  $(x,y)$ , porém diferentes altitudes, ou quando um UAV ocupa a mesma a mesma coordenada  $(x,y)$  da estação base terrestre. A abordagem leva em conta a minimização da interferência co-canal entre células. O algoritmo encontra o número mínimo de UAVs necessário bem como a posição 3D de cada UAV. Os resultados da simulação demonstraram que o algoritmo proposto é capaz de aumentar a vazão global da rede em comparação a outros esquemas.

### 3.2.2 UAV como retransmissor

Uma outra aplicação recente e bastante atraente é utilizar UAVs como retransmissores em redes sem fio, a fim de melhorar o desempenho da rede terrestre ou estabelecer links para os pares de comunicação remotos. (ZHONG et al., 2020) destaca que utilizar um UAV como retransmissor é mais oportuno do que usar um retransmissor terrestre pois o UAV pode fornecer uma probabilidade muito maior de transmissão em linha de visada para os nós terrestres. Portanto, o posicionamento desses UAVs é sem dúvida um dos fatores que mais afetam o desempenho da rede.

No trabalho (CHEN; FENG; ZHENG, 2017), os autores propuseram uma heurística para determinar a altitude ótima de um UAV atuando como estação retransmissora entre um UE terrestre e uma estação base remota, a fim de aumentar a confiabilidade da rede. A abordagem numérica se deu em torno das métricas de perda de potência, probabilidade de bloqueio e taxa de erro de bit (BER). O modelo do sistema foi descrito para um UAV, considerando cenários nos quais o UAV é: (i) estático ou (ii) móvel. Os resultados numéricos mostraram que diferentes medidas de confiabilidade resultam em altitudes ótimas ligeiramente diferentes e que decodificar e encaminhar (DF) tem um desempenho melhor do que amplificar e encaminhar (AF).

Em (HU et al., 2020), os autores formularam um modelo de posicionamento de múltiplos UAVs atuando como retransmissores com base no problema de otimização de restrição não linear para cenários nos quais o terreno é levemente ondulado ou plano. Para resolver o problema, eles utilizaram o método do menor círculo envolvente e algoritmo genético. O modelo é capaz de fornecer a localização e o número mínimo de UAVs necessário para cobrir todos os terminais no solo. Os resultados foram validados por meio de simulação.

Em (HOSSEINALIPOUR; RAHMATI; DAI, 2020), os autores investigaram o uso de UAVs como retransmissores a fim de aumentar a taxa de transmissão entre um par de transmissor e receptor no solo, considerando a presença de interferência no ambiente. Nele, a abordagem teórica se deu em torno da determinação do posicionamento ótimo de um UAV (*dual-hop*) ou vários UAVs (*multi-hop*) no cenário, considerando: i) a existência de uma fonte principal de interferência; e ii) a existência de fontes estocásticas de interferência. Além disso, propuseram uma heurística para determinar o número mínimo de UAVs necessário para maximizar a razão sinal-interferência (SIR) do sistema. Para ter soluções tratáveis, os autores determinaram a posição ideal do(s) UAV(s) em termos do plano  $(x, y=0, h)$ , ou seja, consideraram o(s) UAV(s) em linha reta conectando o par de nós transmissor e receptor, determinando a altitude e a distância entre eles. O desempenho das soluções foi comprovado por meio de simulação numérica.

Os autores em (ZHONG et al., 2020) propuseram a otimização conjunta da posição de UAVs retransmissores, alocação de canal de frequência e atribuição de UAVs para pares de nós terrestres com o objetivo de maximizar a capacidade da rede. Para torná-lo tratável, o problema original foi decomposto em dois subproblemas. O primeiro buscou otimizar a alocação de canal e a atribuição de UAVs para os pares de nós do cenário e para isso usou um algoritmo de aprendizado por reforço (*stochastic learning automata*), enquanto o segundo buscou otimizar a posição dos UAVs usando um algoritmo de aprendizado online baseado na métrica de capacidade. No trabalho, a tomada de decisão é distribuída. Os resultados da simulação foram satisfatórios e mostraram que o sistema é capaz de atingir uma alta capacidade. A Tabela 2 descreve a síntese dos principais trabalhos abordados neste capítulo.

Tabela 2 – Síntese dos trabalhos correlatos.

Referência	Método	Resumo em um parágrafo	Limitações	Grande área
(AL-HOURANI; KANDEEPAN; LARDNER, 2014)	Modelagem matemática, modelo analítico	Busca determinar a altitude ótima do UAV que maximiza a área de cobertura no solo	Aplicável para determinar a altitude do UAV para uma coordenada (x,y) fixa; o sistema é descrito para um UAV	UAV como estação base voadora
(MOZAFFARI et al., 2015)	Modelagem matemática, modelo analítico	Busca determinar altitude ótima do UAV que maximiza a cobertura no solo e minimize a potência de transmissão, considerando cenários com ou sem interferência	O sistema é descrito considerando até 2 UAVs no cenário	UAV como estação base voadora
(BOR-YALINIZ; EL-KEYI; YANIKOME-ROGLU, 2016)	Modelagem matemática, modelo analítico	Busca determinar a posição ótima do UAV que maximize o número de UEs servidos pelo UAV	O sistema considera apenas um UAV no cenário, livre de interferência; não considera restrição de recursos de rádio e backhaul	UAV como estação base voadora
(LYU et al., 2016)	Heurística de posicionamento espiral	Busca determinar a posição de UAVs e minimizar o número de UAVs necessário para fornecer cobertura sem fio para um grupo de UEs no solo	A perda de propagação é baseada apenas em links LoS; a localização de todos os UEs é previamente conhecida	UAV como estação base voadora
(CHEN; FENG; ZHENG, 2017)	Modelagem matemática, modelo analítico	Busca determinar a altitude ótima de um UAV atuando como retransmissor, a fim de aumentar a confiabilidade da rede	Considera um único UAV; não considera interferência da estação base terrestre; determina a altitude do UAV para uma coordenada (x,y) fixa	UAV como retransmissor
(ALZENAD; EL-KEYI; YANIKOME-ROGLU, 2017)	Heurística de posicionamento de múltiplos círculos	Busca determinar a posição do UAV que maximiza o número de UEs considerando diferentes requisitos de qualidade de serviço	O sistema considera apenas um UAV no cenário, livre de interferência; não considera restrição de recursos de rádio e backhaul	UAV como estação base voadora
(HUANG; SAVKIN, 2018)	Modelo analítico distribuído	Busca otimizar a posição de UAVs para maximizar a cobertura e minimizar a interferência	Os UAVs só podem ser implantados em coordenadas pré-definidas; Determina o posicionamento no plano horizontal (x,y); assume uma altitude fixa para todos os UAVs	UAV como estação base voadora

(KLAINÉ et al., 2018)	Heurística baseada em Q-Learning	Busca otimizar o posicionamento de UAVs a fim de maximizar o número de UEs cobertos pela rede	A abordagem baseada em Q-learning não otimiza a satisfação dos usuários; é comparado com esquemas fixos	UAV como estação base voadora
(LIU et al., 2018)	Heurística baseada em Algoritmo Genético	Busca otimizar o posicionamento de UAVs a fim de maximizar a área de cobertura	Os UAVs usam canais dedicados, o que pode resultar em desperdício de recursos de frequência	UAV como estação base voadora
(KHUWAJA et al., 2019)	Modelagem matemática, modelo analítico	Busca otimizar a distância de separação ótima entre UAVs para mitigar a interferência do co-canal e maximizar a cobertura	Os UAVs só podem ser implantados em coordenadas pré-definidas; após a otimização, considera que os UAVs permanecem estáticos; logo a cobertura oferecida também é estática	UAV como estação base voadora
(BOUCETTA et al., 2019)	Heurística baseada em LSTM e modelagem analítica	Busca otimizar o posicionamento de UAVs a fim de maximizar a área de cobertura	Assume uma altitude fixa para todos os UAVs; não considera restrições de backhaul	UAV como estação base voadora
(HOSSEINALIPOUR; RAHMATI; DAI, 2020)	Modelagem matemática, modelo analítico	Busca determinar a posição ótima de UAV(s) funcionando como retransmissor considerando um ambiente com interferência	Considera o posicionamento em termos do plano (x, y=0,h). Ou seja, considera o(s) UAV(s) sempre em linha reta em relação ao par transmissor e receptor no solo	UAV como retransmissor
(ZHONG et al., 2020)	Algoritmo de aprendizado por reforço e um algoritmo de aprendizagem online	Busca otimizar, conjuntamente, a posição de UAVs retransmissores, alocação de canal e atribuição de UAVs entre nós terrestres	Os UAVs usam canais dedicados, o que pode resultar em desperdício de recursos de frequência	UAV como retransmissor
(HU et al., 2020)	Menor círculo envolvente (smallest enclosing circle) e algoritmo genético	Busca otimizar a posição de UAVs retransmissores e determinar o número mínimo de UAVs necessário	A perda de propagação é baseada apenas na distância entre os UAVs e os terminais no chão, simples demais para ambientes urbano, sub-urbano	UAV como retransmissor
(SHAKOOR et al., 2020)	Modelagem matemática, modelo analítico	Busca otimizar conjuntamente o posicionamento 3D dos UAVs e o fator de compensação de perda de propagação a fim de maximizar a probabilidade de cobertura dos usuários	Os RBs da estação base são divididos igualmente entre os UEs associados, o que nem sempre garante o atendimento dos requisitos de QoS	UAV como estação base voadora

(AKRAM et al., 2020)	Modelagem matemática, modelo analítico	Busca otimizar o posicionamento dos UAVs e determinar o número mínimo de UAVs necessários para atender a missão	Os UAVs só podem ser implantados em coordenadas pré-definidas; assume uma altitude constante para todos os UAVs	UAV como estação base voadora
(HYDHER et al., 2020)	Heurística baseada em k-means e PSO	Busca otimizar o posicionamento de UAVs a fim de maximizar a probabilidade de cobertura e a vazão global da rede	Não considera restrições de backhaul e requisitos de QoS	UAV como estação base voadora
(LAI; WANG; HAN, 2020)	Modelagem matemática, modelo analítico	Busca otimizar o posicionamento de UAVs a fim de maximizar a área de cobertura	Não garante que todos os UEs servidos terão os requisitos mínimos de vazão atendidos	UAV como estação base voadora

Da literatura apresentada, é possível notar que os trabalhos fornecem discussões importantes sobre o posicionamento de UAVs em redes móveis celulares. No entanto, as soluções apresentadas, em geral, são centralizadas e, portanto, assumem que um controlador central possui uma visão global da rede. Outro ponto observado é que muitos trabalhos consideram apenas um UAV em todo o cenário. Tal estratégia, apesar de ser menos onerosa e apresentar baixa complexidade do ponto de vista do controle e coordenação, pode ser inadequada no que se refere à capacidade da rede e é menos tolerante à falhas.

Muitos trabalhos também não especificam como a solução se adapta às mudanças no sistema e/ou ambiente. Outro fato importante é que habitualmente as abordagens não consideram usuários com diferentes requisitos de QoS e mobilidade, bem como as restrições do *backhaul* sem fio e seu impacto no desempenho da rede. Além disso, um aspecto intrínseco a ser considerado é que as estações base carregadas por UAVs de baixa altitude geralmente operam com nível de potência menor quando comparado à potência de transmissão de estações base terrestres, principalmente devido à fonte de energia limitada. Uma faixa comum abrange valores que variam de 20 dBm a 30 dBm como em (ALI; JAMALIPOUR, 2020), (ZHOU et al., 2019), (HYDHER et al., 2020), e (KURIBAYASHI et al., 2020).

Portanto, no caso co-canal, ao implantar a rede de UAVs deve-se considerar o impacto da interferência que as células terrestres impõem às células de menor potência e também a interferência entre células voadoras. Uma alternativa vista em alguns trabalhos é a adoção de canais diferentes de frequência (canais dedicados), o que pode implicar no uso ineficiente de recursos de frequência ao fatiar a largura de banda disponível. (CLAUSSEN, 2007), (CLAUSSEN, 2008), (BAI; CHEN, 2013) e (AGIWAL; ROY; SAXENA, 2016) destacam que, apesar do problema da interferência, a estratégia co-canal tem melhor custo

benefício quando comparada à estratégia de canais dedicados. No caso co-canal, o uso de recursos de frequência, o *handover* e a seleção de célula são mais eficientes, no entanto a interferência deve ser devidamente tratada a fim de minimizar a degradação da qualidade do sinal.

### 3.3 Contribuições da proposta no estado da arte

Embora vários estudos já tenham sido propostos para solucionar o problema do posicionamento de UAVs, entende-se que essa temática é muito atual e não está esgotada. Do levantamento de trabalhos correlatos, nota-se que por vezes a complexidade de alguns modelos, bem como algumas suposições restritivas e limitações, tornam difícil a implementação prática de tais modelos em cenários reais.

A fim de oferecer uma nova alternativa na lista de potenciais soluções para resolver a problemática abordada, esta tese busca fornecer uma solução robusta, escalável e distribuída para o problema do posicionamento de células voadoras em redes móveis 5G auto-organizáveis. A abordagem proposta é baseada na teoria dos Autômatos Celulares para modelar o controle distribuído da topologia da rede, na qual cada UAV toma sua decisão baseado nas informações coletadas localmente e compartilhada por outros UAVs numa determinada vizinhança.

Isto porque os Autômatos Celulares se destacam pela simplicidade de simulação e são uma ferramenta matemática bastante útil para modelar o comportamento de sistemas complexos reais. No esquema proposto, cada UAV é um agente tomador de decisão e o efeito coletivo dessas decisões, também chamado de comportamento emergente, leva a um comportamento global, que, por sua vez, permite que o sistema como um todo seja auto-organizado.

A tomada de decisão distribuída é baseada na distribuição local de potenciais usuários da rede e nos obstáculos detectados por cada UAV (por exemplo, por meio de visão computacional), e na troca mínima de informações entre UAVs vizinhos. Para isso, propõe-se um novo Autômato Celular Multicamada (MCA, *Multilayered Cellular Automata*), no qual cada camada modela uma parte do sistema. Na abordagem proposta, o novo MCA é formado por três camadas bidimensionais sobrepostas, que trocam informações entre si. O objetivo principal é fornecer uma solução de menor complexidade que resolva o posicionamento eficiente de múltiplos UAVs em situações de sobrecarga da rede terrestre, a fim de maximizar o número de usuários atendidos pela rede, com garantia de qualidade de serviço, e portanto minimizar o número de UEs sem serviço.

O método proposto considera a interferência co-canal, as restrições de recursos da rede em termos da limitação da capacidade do *backhaul* e da largura de banda, bem como os requisitos das aplicações dos usuários em termos da vazão mínima no *downlink*.

Na abordagem, considera-se que os usuários são *outdoor* e móveis. O método proposto é dinâmico e capaz de responder às mudanças nas características do ambiente e da rede. Os resultados demonstraram que o método de posicionamento proposto é escalável, ágil e estável para responder em tempo real à mudanças urgentes na rede.

As principais contribuições da proposta frente ao estado da arte são sumarizadas a seguir:

- Oferece um esquema de controle distribuído, com troca mínima de informações entre UAVs vizinhos, no qual o controle do sistema é feito localmente a partir de diferentes pontos da rede.
- O sistema é descrito para suportar múltiplos UAVs e múltiplos usuários, é escalável e flexível.
- Dentro do contexto das redes móveis auto-organizáveis, a abordagem é capaz de detectar mudanças no ambiente e na rede e, baseado nisso, cada UAV toma decisões inteligentes a fim de minimizar ou maximizar os efeitos dessas mudanças.
- Considera usuários com diferentes requisitos de QoS e mobilidade.
- Considera restrições de recursos de rádio (em termos de *resources blocks* disponíveis) e *backhaul*.
- Considera interferência co-canal.
- A modelagem é baseada na teoria dos Autômatos Celulares. Até onde a autora pesquisou, tal solução é inédita para este tipo de problema até o presente momento.
- Propõe um novo Autômato Celular Multicamada para solucionar o problema do posicionamento de células voadoras em redes móveis 5G auto-organizáveis, oferecendo *insights* importantes para a implementação prática em aplicações reais.

### 3.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou o estado da arte das mais diversas técnicas e métodos para resolver o problema do posicionamento eficiente de UAVs em sistemas de comunicação sem fio. O estudo do estado da arte também possibilitou localizar lacunas e limitações importantes a serem superadas, a fim de prover soluções cada vez mais realistas. A partir desta análise, foi possível localizar as contribuições desta tese a fim de minimizar as limitações identificadas.

# 4 Metodologia proposta

## 4.1 Considerações Iniciais

O estudo e desenvolvimento de protocolos, arquiteturas e mecanismos que viabilizem a implantação das redes móveis da próxima geração são áreas de constante investigação pela comunidade científica. Este capítulo apresenta uma metodologia geral de alto nível para predição e tomada de decisão do posicionamento de células voadoras carregadas por UAVs em redes móveis 5G auto-organizáveis, por meio de um método baseado em um novo Autômato Celular Multicamada.

Conforme o Capítulo 3 deste documento, uma grande variedade de técnicas e métodos têm sido desenvolvidos para resolver o problema do posicionamento eficiente de UAVs em redes sem fio. Apesar disso, pode-se dizer que as soluções voltadas para o contexto das redes móveis auto-organizáveis ainda são escassas.

O conceito de redes auto-organizáveis (SON, *Self-organizing Network*) foi introduzido pelo 3GPP na versão 8 e foi expandido nas versões subsequentes. A principal ideia por trás desse conceito é trazer inteligência e capacidade autônoma de adaptação para dentro da rede, diminuindo assim o envolvimento humano, enquanto melhora o desempenho em termos de capacidade da rede, cobertura e qualidade de serviço (MOYSEN; GIUPPONI, 2018). Para (ASGHAR et al., 2019), os principais objetivos da SON são:

- Melhorar a capacidade da rede, cobertura e experiência de atendimento ao cliente, melhorando o desempenho da rede;
- Reduzir as despesas de capital e operacionais (CAPEX/OPEX);
- Apresentar adaptabilidade autônoma e inteligente nas redes celulares por meio das propriedades de autocura, auto-otimização e autoconfiguração;
- Melhorar a eficiência espectral das Redes de Acesso por Rádio (RANs) de última geração.

Segundo (ALIU et al., 2012), as principais características da SON são: escalabilidade, estabilidade e agilidade. A escalabilidade diz respeito à complexidade da solução, que deve permitir o crescimento da rede sem limitações. Já a estabilidade refere-se à transição do estado atual da rede para um estado futuro (estável), que deve acontecer dentro de um intervalo de tempo finito e viável, com o mínimo de oscilações. Finalmente, a agilidade descreve a capacidade da SON em responder (tomar uma decisão) a mudanças na rede.

Essa resposta geralmente é baseada em algum limiar a fim de garantir a estabilidade da rede.

Uma das funcionalidades do método proposto nesta tese é permitir o controle distribuído da rede. Na abordagem proposta, cada UAV é um ponto de controle. Em outras palavras, cada UAV toma decisão sobre o seu posicionamento no cenário de acordo com as informações coletadas localmente (número de potenciais usuários em sua vizinhança) e por meio de troca mínima de informações com outros UAVs dentro de um raio de cobertura pré-determinado (sobre localização atual, *status*). A Fig. 5 apresenta um esquema de alto nível que ilustra a condução do processo de posicionamento de células voadoras na metodologia proposta.

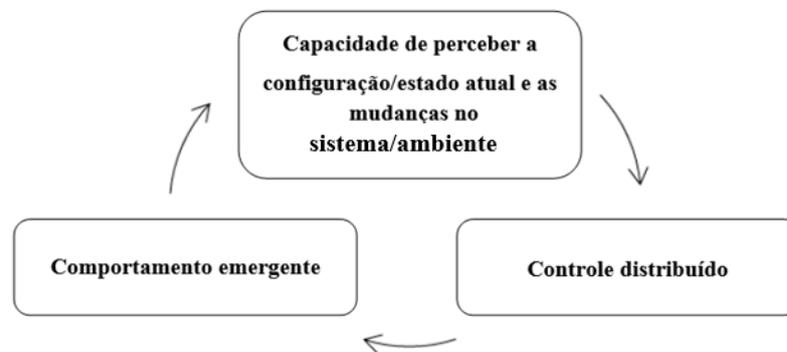


Figura 5 – Esquema para o posicionamento de células voadoras.

## 4.2 Autômato Celular Multicamada para posicionamento de células voadoras em redes móveis 5G auto-organizáveis

Nesta tese, propõe-se uma abordagem distribuída para o posicionamento de células voadoras com base em um novo Autômato Celular Multicamada (MCA, *Multilayered Cellular Automata*). Para isto, formulou-se um autômato celular tridimensional, formado por três camadas bidimensionais sobrepostas, conforme ilustrado na Fig. 6. Cada camada modela uma parte do sistema e são formadas por elementos idênticos. As camadas trocam informações entre si a fim de encontrar, de forma distribuída, um posicionamento eficiente para um enxame de UAVs, visando maximizar o número de usuários cobertos pela rede. Os usuários são distribuídos aleatoriamente no cenário, com diferentes requisitos de QoS (em termos de vazão mínima no *downlink*) e mobilidade. Os UAVs têm recursos limitados em termos de recursos de rádio (dado em número de *resources blocks* disponíveis) e capacidade de *backhaul*.

A ideia básica por trás da decisão de cada UAV é simples: posicioná-lo em regiões

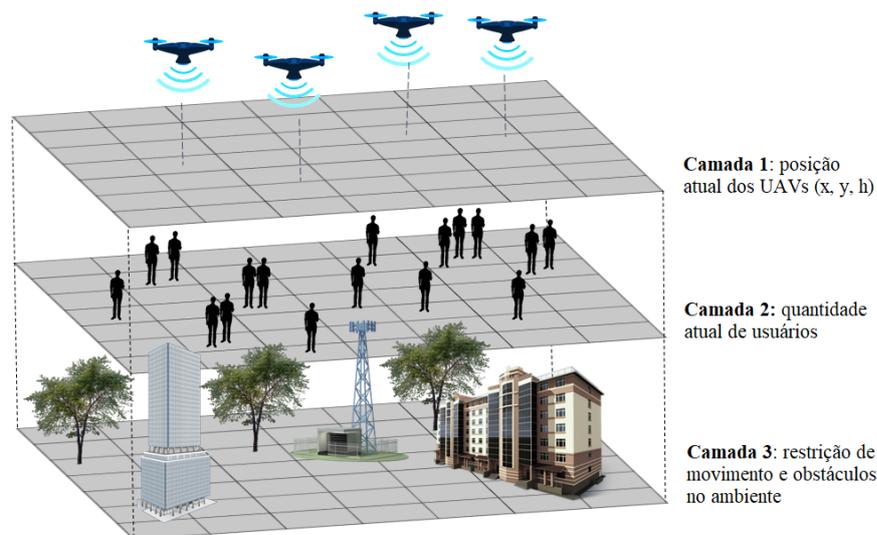


Figura 6 – Novo Autômato Celular Multicamadas para posicionamento de células voadoras em Redes 5G Auto-Organizáveis.

onde haja mais usuários a serem cobertos e menos UAVs disponíveis. Para localizar os usuários no solo, assume-se que cada UAV carrega uma câmera e um sistema de detecção de pessoas. A câmera captura imagens dentro de uma área de cobertura e detecta potenciais usuários (pessoas) por meio de um método de visão computacional, baseado, por exemplo, em técnicas de aprendizado profundo (também conhecido como *deep learning*).

Do ponto de vista prático da implantação, assume-se que os UAVs estão equipados com capacidade (a bordo) de detectar e evitar colisões (*Detect-and-Avoid*), com visão radial de 360 graus, a fim de evitar colisões com outros UAVs próximos e obstáculos no terreno. Tal estratégia é baseada em trabalhos como o apresentado em (CHEN; GONZÁLEZ-PRELCIC; HEATH, 2020). No trabalho, os autores propuseram um sistema de navegação baseado em detecção de objetos e aprendizado por reforço profundo (DRL, *Deep Reinforcement Learning*), que explora dados de detecção obtidos por uma câmera monocular montada no UAV.

Nesta tese, os UAVs trocam informações de posicionamento com outros UAVs localizados dentro de um raio de comunicação pré-determinado. Considera-se também que todos os UAVs voam na mesma altitude. Para transmitir e receber sinais, todos os UAVs e UEs são equipados com antenas omnidirecionais e interfaces de rádio. Na simulação do sistema, assume-se que as interfaces de rádio são compatíveis com o padrão LTE (*Long Term Evolution*), como no trabalho (ULLAH et al., 2019). Além disso, os UAVs são equipados com interfaces de microondas (mW) (KLAINÉ et al., 2018) a fim de estabelecer links sem fio com a estação base terrestre (macrocélula), provedora do *backhaul* sem fio, e outros UAVs dentro do raio de comunicação. As principais características do modelo proposto são ilustradas na Fig. 7.

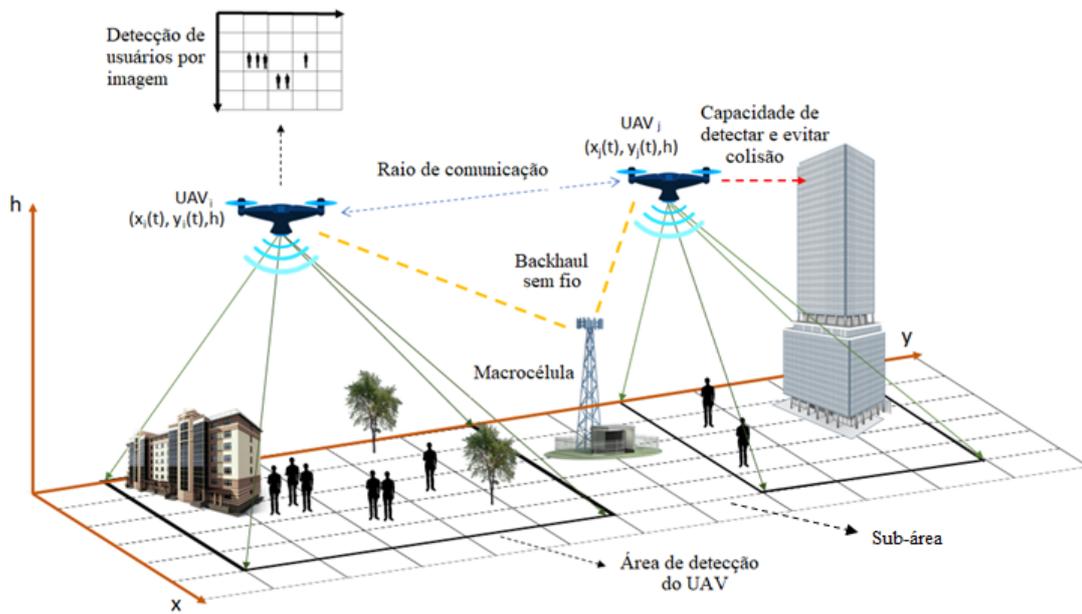


Figura 7 – Sistema de redes móveis auxiliadas por UAV - Modelo proposto.

Conforme mencionado anteriormente, o objetivo do algoritmo é mover cada UAV para a direção na qual existe menos UAVs (fornecidos pela Camada 1) para atender o maior número de usuários a serem conectados (fornecidos pela Camada 2), dadas as restrições de movimentação e do terreno (fornecidas pela Camada 3), a fim de maximizar o número de usuários cobertos pela rede de estações base disponíveis. O novo autômato celular multicamada é definido como uma lista de cinco elementos  $(L, \Delta, S, F, N)$ , onde  $\Delta$  é o conjunto de camadas.

### 4.2.1 Estrutura

Considera-se um autômato celular tridimensional, formado por três camadas bidimensionais sobrepostas. A estrutura de cada camada corresponde a uma matriz de células quadradas. Cada célula corresponde a uma sub-área da área total do cenário considerado, como ilustra a Fig. 7. Para todas as camadas, adota-se uma condição de limite nula. Em outras palavras, as células da borda são configuradas com estado lógico igual a zero.

### 4.2.2 Camadas

O autômato celular proposto possui três camadas, conforme ilustrado na Fig. 6. A camada 1 mapeia a posição atual  $(x, y, h)$  dos UAVs, onde  $h$  é a altitude. Cada célula na Camada 2 mapeia o número atual de usuários no terreno correspondente a cada sub-área. Finalmente, a camada 3 mapeia os obstáculos da área considerada e as informações de restrição de movimento de cada UAV, indicando para quais células na vizinhança o UAV

pode ou não mover-se, por questões de segurança ou por questões operacionais.

### 4.2.3 Estados

Os estados são definidos de acordo com a camada. Na camada 1, uma célula de valor 1 indica a presença de um UAV na célula. Célula com valor 0 indica o oposto. Assume-se que cada célula não pode ser ocupada por mais de um UAV. Os estados na Camada 2 correspondem ao número inteiro de usuários mapeados para cada célula até um certo limiar  $\eta$ . Para o número de usuários acima do limiar, o valor do limiar é adotado. Observe que os estados na Camada 2 mudam de acordo com a mobilidade dos usuários, uma vez que a mobilidade altera a distribuição de usuários no solo. Na Camada 3, uma célula com valor 1 indica que a movimentação para essa célula é permitida. Um valor maior que 0 e menor que 1 é atribuído às células para as quais o movimento é permitido, mas restrito (ou seja, células que são vizinhas de mais de um UAV simultaneamente), enquanto as células com valor 0 indicam que o movimento para elas é estritamente proibido. O conjunto de estados de cada camada são:

- $\vartheta$  é um conjunto finito de estados  $\vartheta(\phi, t) = \{\vartheta_1(\phi, t), \vartheta_2(\phi, t)\}$  na camada 1, onde  $\vartheta_1(\phi, t) = 1$  se a célula  $\phi$  no tempo  $t$  é ocupada por um UAV e  $\vartheta_1(\phi, t) = 0$ , se é o oposto.
- Na camada 2,  $\kappa$  é um conjunto finito de estados  $\kappa(\phi, t) = \{\kappa_1(\phi, t), \kappa_2(\phi, t), \dots, \kappa_\eta(\phi, t)\}$  atribuídos à célula  $\phi$  de acordo com o número de usuários que ocupam cada célula no tempo  $t$ , até o limiar  $\eta$ .
- $\Lambda$  é um conjunto finito de estados  $\Lambda(\phi, t) = \{\Lambda_1(\phi, t), \Lambda_2(\phi, t), \Lambda_3(\phi, t)\}$  na camada 3, onde  $\Lambda_1(\phi, t) = 1$  se o movimento para a célula  $\phi$  no tempo  $t$  é permitido;  $\Lambda_2(\phi, t) = 0$ , se o movimento para a célula  $\phi$  é estritamente proibido no tempo  $t$ ; e  $0 < \Lambda_3(\phi, t) < 1$  se o movimento para a célula  $\phi$  no tempo  $t$  é permitido porém restrito.

### 4.2.4 Vizinhança

Para todas as camadas, assume-se uma vizinhança de Moore, consistindo de uma célula central e oito células vizinhas circundantes, de raio 1, conforme ilustrado na Fig. 2(a). As oito células vizinhas ao redor estão associadas às oito coordenadas: Norte (N), Sul (S), Leste (L), Oeste (O), Nordeste (NE), Noroeste (NO), Sudeste (SE) e Sudoeste (SO), como mostra a Fig. 8(a). Assim, cada UAV pode mover-se para qualquer direção de movimento (N, S, L, O, NE, NO, SE e SO) ou continuar na mesma célula ("permanecer"). Além disso, uma célula  $\phi$  na posição  $(x, y)$  na camada 1 corresponde à célula  $\phi$  na mesma posição nas camadas 2 e 3.

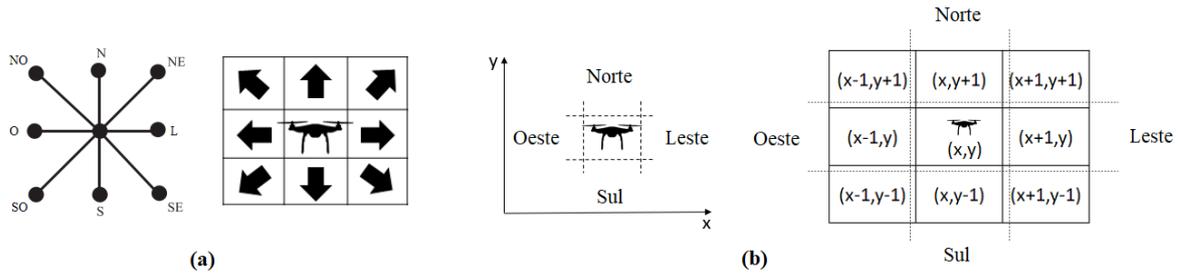


Figura 8 – Possíveis direções de movimento. (a) Direções. (b) Orientações.

### 4.2.5 Funções de transição de estado

As mudanças de estado ocorrem de acordo com o estado atual da célula central e de suas oito células vizinhas, de acordo com as regras de transição. Em termos gerais: (i) o UAV deve mover-se para onde há menos UAVs disponíveis e mais usuários a serem cobertos; (ii) a nova posição não se encontra ocupada por outro UAV; (iii) a nova posição requer a existência de pelo menos um UAV ou macrocélula dentro do raio de comunicação, a fim de manter a conectividade da rede.

O algoritmo de posicionamento proposto possui duas fases. Na primeira fase, cada UAV calcula sua posição futura (célula vizinha). Já na segunda fase, ele decide se deve mover-se para aquela posição ou não.

### 4.2.6 Primeira fase - Para onde ir?

O algoritmo inicia com a adição de uma borda nula à todas as camadas. Em outras palavras, todas as células da borda são configuradas com estado igual a zero. Na Camada 1, as células ocupadas por UAV são definidas para o estado  $\vartheta_1$ , e as células não ocupadas por UAV são atribuído ao estado  $\vartheta_2$ . Os estados na Camada 2 são atualizados de acordo com o número de usuários que ocupam cada célula no momento  $t$ , até o valor limite  $\eta$ . Finalmente, a Camada 3 é atualizada de acordo com o ambiente e com o mapeamento das células vizinhas correspondentes à célula  $\phi$  na Camada 1. Portanto, o estado  $\Lambda_3$  é atribuído às células que estão na vizinhança correspondente (na Camada 1) de mais de um UAV, visando evitar que um UAV fique imediatamente próximo a outro, a fim de minimizar o nível de interferência. As células para as quais o UAV não pode mover-se, como aquelas que correspondem a obstáculos ou células que já estão ocupadas por outro UAV, são definidas para o estado  $\Lambda_2$ . O estado  $\Lambda_1$  é atribuído a todas as outras células, para as quais o UAV pode mover-se sem restrição.

Cada UAV voa a uma altitude fixa ( $h$ ) e pode mover-se para qualquer direção de movimento (N, S, L, O, NE, NO, SE, SO e 'permanecer') no plano horizontal nos eixos  $x$  e  $y$ , conforme ilustrado na Fig. 8. Por exemplo, se uma decisão levar o UAV para fora dos limites do cenário, ele deve permanecer na mesma posição. A decisão é distribuída e

acontece da seguinte forma.

Para decidir para qual direção (N, S, L, O, NE, NO, SE, SO e 'permanecer') o UAV deve mover-se, o algoritmo calcula um peso  $\omega$  para a orientação do movimento onde há menos UAVs e mais usuários a serem cobertos. Dada a posição atual  $(x, y)$  do UAV no plano horizontal na camada 1, o UAV considera a quantidade  $\lambda$  de UAVs que estão dentro de seu raio de comunicação  $\delta$ , em cada uma das quatro orientações (Norte, Sul, Leste e Oeste) mostradas na Fig. 8(b). O algoritmo calcula a quantidade de UAVs em cada uma das quatro orientações conforme as expressões (4.1), (4.2), (4.3) e (4.4) a seguir.

$$\lambda_{Norte} = \{\vartheta((x-1, y+1), t) + \dots + \vartheta((x-\delta, y+\delta), t)\} + \{\vartheta((x, y+1), t) + \dots + \vartheta((x, y+\delta), t)\} + \{\vartheta((x+1, y+1), t) + \dots + \vartheta((x+\delta, y+\delta), t)\} \quad (4.1)$$

$$\lambda_{Sul} = \{\vartheta((x-1, y-1), t) + \dots + \vartheta((x-\delta, y-\delta), t)\} + \{\vartheta((x, y-1), t) + \dots + \vartheta((x, y-\delta), t)\} + \{\vartheta((x+1, y-1), t) + \dots + \vartheta((x+\delta, y-\delta), t)\} \quad (4.2)$$

$$\lambda_{Leste} = \{\vartheta((x+1, y+1), t) + \dots + \vartheta((x+\delta, y+\delta), t)\} + \{\vartheta((x+1, y), t) + \dots + \vartheta((x+\delta, y), t)\} + \{\vartheta((x+1, y-1), t) + \dots + \vartheta((x+\delta, y-\delta), t)\} \quad (4.3)$$

$$\lambda_{Oeste} = \{\vartheta((x-1, y+1), t) + \dots + \vartheta((x-\delta, y+\delta), t)\} + \{\vartheta((x-1, y), t) + \dots + \vartheta((x-\delta, y), t)\} + \{\vartheta((x-1, y-1), t) + \dots + \vartheta((x-\delta, y-\delta), t)\} \quad (4.4)$$

Em seguida, o algoritmo calcula a quantidade  $\Psi$  de usuários que estão em sua vizinhança de raio 1 em cada uma das quatro orientações (Norte, Sul, Leste e Oeste) na camada 2 correspondente, conforme as expressões (4.5), (4.6), (4.7) e (4.8) a seguir:

$$\Psi_{Norte} = \kappa((x-1, y+1), t) + \kappa((x, y+1), t) + \kappa((x+1, y+1), t) \quad (4.5)$$

$$\Psi_{Sul} = \kappa((x-1, y-1), t) + \kappa((x, y-1), t) + \kappa((x+1, y-1), t) \quad (4.6)$$

$$\Psi_{Leste} = \kappa((x+1, y+1), t) + \kappa((x+1, y), t) + \kappa((x+1, y-1), t) \quad (4.7)$$

$$\Psi_{Oeste} = \kappa((x-1, y+1), t) + \kappa((x-1, y), t) + \kappa((x-1, y-1), t) \quad (4.8)$$

De posse desses valores, o algoritmo calcula a razão  $\lambda/\Psi$  para cada orientação (Norte, Sul, Leste e Oeste) e atribui um peso  $\omega > 1$  para a orientação com o menor valor de razão. Define-se um peso  $\omega = 1$  para as demais orientações. Ressalta-se que os valores do peso funcionam também como um ajuste fino no modelo a fim de tornar a mudança de células de UAV mais rápida ou mais lenta.

Em seguida, os pesos são associados a cada direção (N, S, L, O, NE, NO, SE e SO), de forma que a orientação Leste corresponda às direções NE, L e SE; a orientação Oeste corresponde às direções NO, O e SO; a orientação Norte corresponde às direções NO, N e NE; e a orientação Sul corresponde às direções SO, S e SE, conforme ilustrado na Fig. 7.

A fim de calcular para qual direção (N, S, L, O, NE, NO, SE, SO e 'permanecer'), aqui denominada de  $\Upsilon$ , o UAV deve mover-se nos eixos  $x$  e  $y$ , o algoritmo calcula o produto  $\Upsilon$  do peso  $\omega$  naquela direção com a quantidade de usuários  $\kappa$  (estado na camada 2) e a restrição de movimento  $\Lambda$  (estado na camada 3), como expresso em (4.9).

$$\Upsilon = \omega\kappa\Lambda \quad (4.9)$$

Por exemplo, se o peso da orientação Norte tem o valor mais alto, o produto  $\Upsilon_{NE}$  na direção NE é:

$$\Upsilon_{NE} = \omega_N\kappa((x+1, y+1), t)\Lambda((x+1, y+1), t) \quad (4.10)$$

Para  $\Upsilon_{permanecer}$ , o algoritmo considera um peso  $\omega = 1$ ,  $\kappa(\phi, t)$  é o estado atual da célula corrente na camada 2 e  $\Lambda$  é igual a 1, já que o UAV já ocupa esta célula. Finalmente, a tomada de decisão sobre a futura posição do UAV no tempo  $(t+1)$  é dada de acordo com as regras de transição discutidas a seguir.

- **Regra 1:** a posição futura do UAV deve ser aquela com o maior produto  $\Upsilon$ .
- **Regra 2:** se duas ou mais direções têm o mesmo valor de  $\Upsilon$ , a escolha entre elas é aleatória.

Se não houver usuários ( $\kappa = 0$ ) em nenhuma direção, aplica-se as seguintes regras:

- **Regra 3:** o UAV deve mover-se para qualquer direção na orientação na qual há menos UAVs (dentro do raio de comunicação  $\delta$ ).

- **Regra 4:** se não houver UAV em nenhuma orientação ( $\lambda = 0$ ) (dentro do raio de comunicação  $\delta$ ) ou se todas as direções tiverem a mesma quantidade de UAVs, então o UAV não deve mover-se. Em outras palavras, o UAV permanece na mesma posição.

Essas regras são semelhantes às regras consideradas em (CHOUDHURY; SALOMAA; AKL, 2012b), (CHOUDHURY; SALOMAA; AKL, 2012a) e (CHOUDHURY; SALOMAA; AKL, 2015). E assim, encerra-se a primeira fase do algoritmo.

#### 4.2.7 Segunda fase - É possível ir?

Na segunda fase, o UAV move-se de acordo com a direção encontrada na primeira fase se, e somente se:

- **Regra 5:** a nova posição não encontra-se ocupada por outro UAV. Para isto, o algoritmo verifica se na camada 1 existe um UAV ocupando a direção escolhida de acordo com a primeira fase. Se existir, o UAV deve permanecer na mesma posição.
- **Regra 6:** deve existir pelo menos um UAV ou estação base terrestre (macrocélula) dentro do raio de comunicação na nova posição escolhida de acordo com a primeira fase, a fim de manter a conectividade da rede. O algoritmo verifica se a direção escolhida permite a existência de pelo menos um UAV ou macrocélula dentro do raio de comunicação  $\delta$ . Caso contrário, o UAV deve permanecer na mesma posição.

Vale ressaltar que nesta abordagem o controle é distribuído. Cada UAV toma sua decisão baseado nas informações coletadas localmente e também trocadas por outros UAVs dentro de um raio de comunicação. As informações trocadas entre UAVs incluem a posição geográfica atual e o status de operação do UAV, comentado na subseção 4.2.9 deste capítulo. O cálculo termina quando todos os UAVs executam as regras locais e definem a posição que ocuparão no tempo  $t + 1$ . Feito isto, o UAV está pronto para mover-se para a posição computada pelo algoritmo.

A fim de evitar colisões em um cenário real, propõe-se uma estratégia de deslocamento de UAVs descrita na subseção "Sobre prevenção de colisão" neste capítulo. Depois que todos os UAVs executam a estratégia de deslocamento, os estados na Camada 1 são atualizados de acordo com as novas posições ocupadas pelos UAVs. A Camada 3 é atualizada de acordo com a nova Camada 1 e também de acordo com os obstáculos locais detectados pelos UAVs na nova posição. Note que a Camada 2 apresenta a distribuição dos usuários no cenário e só será atualizada a fim de dar caráter de mobilidade aos usuários ao longo da simulação, modificando assim o número de usuários que ocupam cada célula.

Vale ressaltar que o algoritmo proposto não sofre efeito da velocidade de deslocamento dos UAVs. Isto porque, em termos do algoritmo, para a tomada de decisão,

considera-se que o tempo total de simulação é dividido em episódios. Por sua vez, cada episódio corresponde a uma fotografia capturada do cenário no tempo  $t$ . Ou seja, durante a computação do algoritmo, os usuários e os UAVs são considerados estáticos na posição. O algoritmo por sua vez evolui ao longo das iterações contidas em cada episódio. O Algoritmo 1 sumariza a solução proposta.

---

**Algorithm 1:** Solução proposta
 

---

```

Iniciar os parâmetros da simulação e as posições da macrocélula, UAVs e usuários;
Iniciar camadas;
for Cada episódio do
  Obter parâmetros  $\lambda, \Psi, \omega, \kappa, \Lambda, \Upsilon$ ;
  while Critério de parada não alcançado do
    UAV seleciona a próxima posição de acordo com as Regras 1, 2, 3 e 4;
    if Regras 5 e 6 são satisfeitas then
      | UAV se desloca para a próxima posição
    else
      | UAV permanece na mesma posição
    end
  end
  Alocar usuários;
  Armazenar métricas;
  Atualizar camadas;
end

```

---

## 4.2.8 Critérios de Parada

No algoritmo proposto, a simulação é dividida em episódios. Considera-se um episódio como um intervalo de tempo de simulação. Por exemplo, se a simulação corresponde a 100 segundos, um episódio corresponde a 1 segundo de simulação. Portanto, tem-se 100 episódios ao todo. Além disso, considera-se um episódio como uma fotografia do cenário. A mobilidade dos usuários e UAVs é levada em consideração apenas entre os episódios. Por outro lado, cada episódio é dividido em iterações. Durante as iterações de um episódio, os usuários são considerados estáticos, enquanto os UAVs tentam encontrar a melhor posição de acordo com o algoritmo do autômato celular multicamada. Os critérios de parada do algoritmo são baseados em duas condições:

- **Critério 1:** o algoritmo alcançou o número máximo de iterações por episódio; ou
- **Critério 2:** a quantidade de usuários nas células vizinhas (Métrica do MCA  $\zeta$ ) não aumentou em um determinado número de iterações (10% do máximo de iterações permitidas).

Quando um dos critérios é encontrado, o UAV pára de computar a posição até o próximo episódio. A métrica do MCA é expressa como:

$$\zeta = \sum_{i=1}^D \left( \sum_{j=1}^{\iota} \kappa \right) \quad (4.11)$$

Onde  $D$  é o conjunto de todos os UAVs no cenário,  $\iota$  é o tamanho da vizinhança e  $\kappa$  é o número de usuários em cada célula vizinha. Numa implementação real, porém, não há a noção de episódios, assim os UAVs podem realizar o algoritmo de posicionamento em determinados intervalos de tempo, por exemplo, e mover-se de acordo com as condições naquele intervalo.

### 4.2.9 Sobre a prevenção de colisão

Do ponto de vista prático, assume-se que todos os UAVs são equipados com a capacidade de detectar e evitar colisões com outros UAVs e obstáculos de terreno, por meio de *hardwares* e *softwares* a bordo. Assume-se também que após calcular a nova posição, o UAV executa uma estratégia de deslocamento, a fim de evitar colisões com outros UAVs durante o vôo para a nova posição. Para isso, nesta proposta considera-se que há quatro *status* de sinalização (em termos de deslocamento) que o UAV envia e recebe para outros UAVs dentro de seu raio de comunicação, são eles: "em computação", "pronto para deslocar", "estacionado" e "em deslocamento".

No mecanismo proposto, o UAV só pode iniciar a estratégia de deslocamento quando todos os outros UAVs dentro do seu raio de comunicação sinalizarem que estão com *status* "pronto para deslocar" ou "estacionado". Esta é a condição necessária para iniciar a estratégia de deslocamento. Isto porque entende-se que, embora operem em paralelo, cada UAV pode levar um tempo relativamente diferente para terminar a computação da próxima posição. Vale destacar que o cálculo da nova posição foi baseado na posição atual até aquele momento.

Assim, enquanto o UAV está computando a nova posição, ele sinaliza que está "em computação". Ao finalizar a decisão sobre a nova posição, ele passa a sinalizar que está "pronto para deslocar". Quando a condição para iniciar a estratégia de deslocamento for atendida, o UAV começará as tentativas de iniciar o deslocamento. Neste ponto, considera-se um esquema inspirado no protocolo CSMA/CA do IEEE 802.11. Nesta estratégia, um UAV que deseja mover-se deve inicialmente "sentir" se não há outro UAV se deslocando na vizinhança, ou seja, se outro UAV está "em deslocamento". Se não houver outro UAV "em deslocamento", o UAV passa a sinalizar que está "em deslocamento" e começa a mover-se para a nova posição. Isto é feito para que outro UAV dentro do raio de comunicação não se mova ao mesmo tempo, evitando colisões.

Ao longo do deslocamento, o UAV continua a enviar mensagens de sinalização "em deslocamento". Ao chegar na nova posição, o UAV passa a sinalizar que está "estacionado" e passa a relatar a nova posição. Outros UAVs farão a mesma estratégia até que todos os UAVs terminem a fase de deslocamento.

Note que o UAV só se move em sua vizinhança imediata e está equipado com um sistema a bordo para evitar colisão. Além disso, o UAV relata seu *status*, bem como sua posição atual. Assim, se a nova posição computada for ocupada por outro UAV com *status* "estacionado", o UAV permanece na mesma posição e passa a sinalizar que está "estacionado". Se a nova posição for ocupada por outro UAV com *status* "pronto para deslocar", o UAV não se move e permanece no estado "pronto para deslocar" e aguarda algum tempo para verificar novamente, até que a nova posição esteja livre ou ocupada por outro UAV com *status* "estacionado".

Quando um UAV está "estacionado" e todos os UAVs dentro de seu raio de comunicação também sinalizam que estão "estacionados", o UAV é autorizado a iniciar a computação da nova posição e começa a sinalizar que está "em computação", reiniciando o ciclo. Vale ressaltar que a estratégia de deslocamento acontece dentro dos limites do raio de comunicação dos UAVs, portanto é possível que mais de um UAV se mova ao mesmo tempo na rede, mas não colidem por estarem a uma distância segura (maior do que o alcance de comunicação dos UAVs). No mesmo contexto, outra alternativa seria alterar as altitudes de voo dos UAVs em caso de potencial colisão, conforme proposto em (SÁNCHEZ-GARCÍA; REINA; TORAL, 2019) e (HAUERT et al., 2008).

#### 4.2.10 Sobre as limitações de energia

Ao contrário das redes terrestres, um desafio ao implantar UAVs em redes de comunicação é a capacidade limitada de armazenamento de energia. Segundo (KOUHDARAGH et al., 2020), os principais gastos de energia de UAVs carregando estações base são devidos às operações de voo da aeronave (ou seja, pairar e deslocar) e o gasto com os equipamentos transmissores e receptores de rádio. O UAV deve também fornecer energia para alimentar os equipamentos de computação. Uma alternativa interessante para superar esse desafio foi proposta por (MEKIKIS; ANTONOPOULOS, 2019). No trabalho, os autores sugeriram o uso de estações de recarga de energia (de fonte fotovoltaica) distribuídas em locais estratégicos da cidade. Assim, sempre que um UAV estivesse com nível de bateria abaixo de um limite crítico, ele poderia ser recarregado na estação de recarga mais próxima e voltar ao serviço na sequência.

Portanto, o consumo de bateria do UAV também é um fator importante a ser considerado, devido às restrições de bateria já comentadas. No entanto, este controle sobre o escalonamento de UAVs no tempo não faz parte do escopo desta tese. Desta forma, na metodologia proposta, assume-se que caso um UAV esteja com nível crítico de bateria, este

será imediatamente substituído por outro UAV na mesma posição, sempre que possível. Caso não haja disponibilidade, o UAV deve retornar à base de controle e a rede deve se auto-organizar. Mais uma vez, uma discussão mais profunda sobre o tema fica reservada para trabalhos futuros.

### 4.3 Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma nova abordagem baseada na teoria de autômatos celulares para resolver o problema do posicionamento eficiente de UAVs em sistemas de comunicação sem fio. Para tal, propôs-se um novo autômato celular multicamada, descrito em detalhes, no qual cada camada modela uma parte do sistema.

Ressalta-se que para tornar realidade todos os novos serviços incluídos no padrão 5G e posteriores, cada vez mais inteligência precisa ser implantada na rede, a fim de habilitar redes autônomas e flexíveis. A metodologia proposta neste capítulo encontra-se dentro deste contexto e inicia com a descoberta de anomalias na rede, que fogem do padrão esperado para determinados locais, ou mesmo disparadas por situações de emergência ou eventos programados. A partir das informações afirmativas a respeito da sobrecarga ou interrupção de serviço, um enxame de UAVs é deslocado para a região de interesse, a fim de formar uma rede temporária de emergência. Cada UAV é um ponto de controle distribuído e responsável pelo seu próprio posicionamento, conforme o esquema descrito ao longo deste capítulo. A auto-organização da rede ocorre a partir do efeito coletivo dessas decisões locais. A rede de emergência tem caráter temporário e deve permanecer enquanto as condições que a motivaram forem mantidas.

# 5 Avaliação de Desempenho

## 5.1 Considerações Iniciais

Este capítulo inicia com a apresentação das principais considerações acerca do modelo do sistema. Na sequência, serão descritas as métricas de desempenho, o cenário de simulação, bem como os parâmetros utilizados, e os algoritmos implementados para fins de comparação. Por fim, serão discutidos os resultados obtidos a partir de simulação discreta.

## 5.2 Modelo do Sistema

O modelo do sistema inclui a implantação de uma rede temporária, inteligente, móvel e adaptável, por meio do uso de *smallcells* montadas em UAVs, funcionando como células voadoras, a fim de complementar uma rede móvel terrestre quando esta é desafiada por condições anormais durante sua operação, como situações de sobrecarga ou interrupção de serviço.

A rede é composta por uma estação base terrestre de alta potência (macrocélula), que tem como finalidade prover cobertura e tráfego de dados, e neste contexto também é a responsável por fornecer links de *backhaul* sem fio para os UAVs, a fim de aumentar a capacidade da rede, bem como a qualidade de serviço (QoS) dos usuários na região de interesse. No modelo, considera-se as restrições da rede em termos da capacidade máxima do *backhaul* e dos recursos de rádio (*resources blocks* disponíveis). Os usuários da rede possuem características distintas de mobilidade e requisitos de QoS em termos da vazão mínima no *downlink*.

Para conectar-se à rede da operadora, os UAVs são conectados à macrocélula por meio de links de *backhaul* sem fio. Assume-se que tais links são dedicados e baseados na tecnologia de microondas, como em (KLAINÉ et al., 2018). Vale destacar que os UAVs não têm uma conexão de *backhaul* direta com a operadora, portanto, o tráfego dos UAVs é roteado para a macrocélula e, em então para o núcleo da rede. Semelhante a cenários simulados em (KLAINÉ et al., 2018) e (MERWADAY; GUVENC, 2015), considera-se que uma parcela da largura de banda do *backhaul* sem fio é dedicada para realizar funções de controle com a macrocélula e outros UAVs dentro de um raio de comunicação. Isto porque no modelo, os UAVs trocam informações de posição e *status* com outros UAVs dentro desse alcance. Todos os UAVs são equipados com capacidade de detectar e evitar colisão com outros UAVs e obstáculos no terreno, tal como construções, vegetação e serras.

Na abordagem proposta, para localizar potenciais usuários no solo e realizar a

heurística de posicionamento, assume-se que cada UAV carrega uma câmera e um sistema de detecção de pessoas. A câmera captura imagens dentro de uma área de cobertura e um *software* detecta usuários por meio de um método de visão computacional, baseado, por exemplo, em uma técnica de *deep learning*. Embora esta contribuição (algoritmo de localização de usuários móveis no solo) não faça parte do escopo desta tese, tal estratégia é baseada em trabalhos como o apresentado em (AKRAM et al., 2020). Nele, os autores propõem uma técnica de visão computacional eficiente para identificar áreas com alta densidade de usuários de baixa mobilidade ou estacionários. Os autores adotam uma abordagem adaptativa para identificar as áreas potenciais de alta concentração de usuários. Isso é feito usando um processo dividido em várias etapas, que inclui a aquisição de imagens, a classificação e a estimativa da densidade de multidão.

No presente modelo, parte-se do pressuposto de que o sistema de classificação de imagens também é capaz de identificar pessoas portando equipamento de usuário (UE), como celulares, *tablets* e *notebooks*, e, portanto, são potenciais usuários da rede móvel. Essa abordagem é mais adequada em situações nas quais os usuários estão se locomovendo livremente no terreno, em uma área aberta, como ruas, praças e avenidas. Por outro lado, em situações nas quais os usuários estão dentro de ambientes fechados, ou seja, fora da visão do UAV, esta abordagem não é adequada. Por isso, ressalta-se que a abordagem proposta não é limitada a tecnologias de visão computacional e outros mecanismos de descoberta de usuários podem ser utilizados, como o baseado em tecnologias de comunicação sem fio. De acordo com (SÁNCHEZ-GARCÍA; REINA; TORAL, 2019), os padrões IEEE 802.11 são candidatos potenciais para implementar esses métodos. Uma ilustração do modelo proposto pode ser encontrada na Fig. 7 deste documento.

Em sistemas de comunicação sem fio, os sinais são transmitidas entre uma antena transmissora (TX) e uma antena receptora (RX) por meio de ondas eletromagnéticas (OEM). À medida que essas ondas se propagam no ambiente, elas sofrem perda de propagação, ou seja, sofrem redução de potência. Neste trabalho, considera-se o modelo COST 231 Walfisch-Ikegami (ALQUDAH, 2013) para estimar a perda de propagação entre a estação base da macrocélula e o UE em áreas urbanas. O modelo combina os modelos Ikegami e Walfisch-Bertoni com os resultados das medições feitas na cidade de Estocolmo (Suécia) para frequências na faixa de 800 a 2000 MHz e é restrito a terrenos urbanos planos. Leva em consideração a obstrução causada pela altura dos prédios e da largura da rua, bem como outros fatores relacionados ao ambiente urbano. Para modelar o canal UAV-Solo, considera-se links LoS e links NLoS, estes ocasionalmente bloqueados devido a obstáculos como edifícios, morfologia do terreno, outros UAVs, folhagens, etc.

Considere um UAV localizado a uma altitude de  $h$  metros, transmitindo sinais para um UE no solo. Para estimar a perda de propagação entre o UAV e o UE, adota-se um modelo amplamente explorado em cenários semelhantes, detalhado em (MOZAFFARI

et al., 2015). O modelo considera componentes de linha de visada (LOS) e não linha de visada (NLOS) junto com suas probabilidades de ocorrência, separadamente. Portanto, além da perda de propagação no espaço livre, diferentes valores de perda de propagação são atribuídos aos links LOS e NLOS. A Fig. 9 ilustra a área de cobertura de um UAV localizado a uma altitude  $h$  e um usuário terrestre num raio  $R$  a partir de um ponto correspondente à projeção da cobertura do UAV no solo.

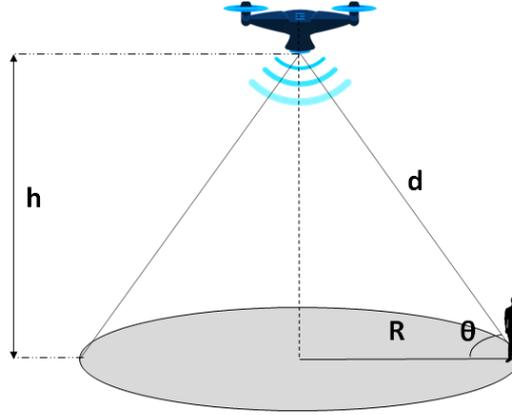


Figura 9 – Área de cobertura do UAV.

A distância  $d$  entre o UAV e o usuário terrestre é dada por (5.1):

$$d = \sqrt{R^2 + h^2} \quad (5.1)$$

O ângulo de elevação  $\theta$  (em radianos) do UAV em relação ao usuário terrestre é expresso como (5.2):

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{h}{R} \right) \quad (5.2)$$

A perda de propagação (PL) para links LOS e NLOS são, respectivamente, expressos por (5.3) e (5.4):

$$PL_{LoS} \text{ (dB)} = 20 \log \left( \frac{4\pi f_c d}{c} \right) + \xi_{LoS} \quad (5.3)$$

$$PL_{NLoS} \text{ (dB)} = 20 \log \left( \frac{4\pi f_c d}{c} \right) + \xi_{NLoS} \quad (5.4)$$

Onde  $\xi_{LoS}$  e  $\xi_{NLoS}$  são a perda média adicional para a perda de propagação no espaço livre, considerando links LoS e NLoS, respectivamente, e dependem do ambiente,  $f_c$  é a frequência da portadora,  $c$  é a velocidade da luz e  $d$  é a distância entre o UAV e o

usuário terrestre. A probabilidade de ter conexões LOS em um ângulo de elevação de  $\theta$  é dada por (5.5):

$$P(\text{LoS}) = \frac{1}{1 + \alpha \exp\left(-\beta \left[\frac{180}{\pi}\theta - \alpha\right]\right)} \quad (5.5)$$

Onde  $\alpha$  e  $\beta$  são valores constantes que dependem do ambiente considerado (rural, urbano, urbano denso, etc.). Além disso, a probabilidade de NLOS é calculada como (5.6).

$$P(\text{NLoS}) = 1 - P(\text{LoS}) \quad (5.6)$$

Finalmente, a perda de propagação é dada em termos da altitude do UAV e o raio de cobertura, expresso em (5.7).

$$PL(R, h) = P(\text{LoS})PL_{\text{LoS}} + P(\text{NLoS})PL_{\text{NLoS}} \quad (5.7)$$

Considere  $U$  o conjunto de usuários  $U = \{1, 2, \dots, N_u\}$ .  $N_u$  é a quantidade total de usuários solitando serviço da rede móvel.  $B$  é o conjunto de todas as estações base  $B = \{1, 2, \dots, N_b\}$ , onde  $N_b$  é a quantidade total de estações base no cenário, incluindo macrocélulas e células voadoras. A potência de sinal recebida (em dB), pelo usuário  $i \in U$ , da estação base  $j \in B$  é denotado por  $\text{PRX}_{i,j}$ . Calcula-se  $\text{PRX}_{i,j} = \text{PTX}_m - \text{PL}_m$ , se  $j$  é uma macrocélula, e  $\text{PRX}_{i,j} = \text{PTX}_d - \text{PL}_d$ , se  $j$  é uma célula voadora, onde  $\text{PTX}_m$  e  $\text{PTX}_d$  são as potências transmitidas (em dBm) pela macrocélula e células voadoras, respectivamente. Da mesma forma,  $\text{PL}_m$  é a perda de propagação entre a macrocélula e o UE e  $\text{PL}_d$  é a perda de propagação entre a célula voadora e o UE.

De acordo com (GOLDSMITH, 2005), a razão sinal-interferência mais ruído (SINR) é calculada como (5.8).

$$\text{SINR}_{i,j} = \frac{\text{PRX}_{i,j}}{\varrho + \sum_{k=1, k \neq j}^{N_b} \text{PRX}_{i,k}} \quad (5.8)$$

Onde  $\text{SINR}_{i,j}$  é o par UE e estação base, e  $\varrho$  é a potência do ruído. Para calcular a SINR, PRX e ruído são expressos na forma linear.

Considere BW como a largura de banda (em Hz). A fórmula de capacidade do canal de Shannon (GOLDSMITH, 2005) é usada para calcular a taxa de transmissão  $T_{i,j}$  para um usuário  $i$  alocado a uma estação base  $j$ , em bits por segundo, expressa em (5.9).

$$T_{i,j} = \text{BW} \log_2(1 + \text{SINR}_{i,j}) \quad (5.9)$$

De acordo com (JABER et al., 2016), a vazão ( $\mu_j$ ) no *backhaul* sem fio, que conecta o UAV à estação base terrestre, é calculada com base na soma da vazão atingível de todos

os usuários servidos pelo UAV  $j$ , multiplicada por um fator de sobrecarga  $O_j$ , que depende da tecnologia e arquitetura de rede. Vale ressaltar que isto faz com que a vazão no *backhaul* seja superior a soma da vazão atingível por todos os usuários associados naquele UAV. Assim, a vazão no *backhaul* é expressa por (5.10).

$$\mu_j = \sum_{j=1}^{U_d} T_{i,j} O_j \quad (5.10)$$

Onde  $U_d$  é a quantidade total de usuários servidos pelo UAV  $j$  naquele intervalo de tempo e  $T_{i,j}$  é a vazão atingível do usuário  $i$  associado ao UAV  $j$ . Uma estratégia semelhante é considerada em (KLAINÉ et al., 2018).

### 5.2.1 Sobre a associação de usuários e alocação de recursos

Neste trabalho, os usuários são associados a estação base que oferece a melhor qualidade de sinal, de acordo com a SINR experimentada. Além disso, considera-se também as restrições de capacidade do *backhaul* disponível durante o processo de associação e se há recursos de rádio disponível suficiente para atender o requisito de QoS da aplicação do usuário.

A tentativa de associação e alocação de recursos de um usuário  $i$  na estação base  $j$  acontece de maneira ordenada, de acordo com a SINR mais alta. O usuário  $i$  é associado a estação  $j$  se, e somente se:

- Se a  $SINR_{i,j}$  do usuário  $i$  estiver acima de um determinado limiar. Isto porque o caso contrário pode comprometer a demodulação correta do sinal.
- Se a estação base  $j$  tem blocos de recursos (RBs, *resources blocks*) disponíveis. Um RB corresponde à menor unidade de recursos que pode ser alocada para um UE no LTE. O 3GPP define o número total de RBs de acordo com a largura de banda. Em outras palavras, o UE acessa o espectro da rede por meio dos RBs.
- Se a estação base tem disponível a quantidade de RBs suficiente para atender o requisito de QoS da aplicação do usuário (dado em termos da vazão mínima no *downlink*). Esse cálculo é baseado na SINR e na vazão pretendida, assumindo que um RB corresponde a 180 kHz (utilizou-se a expressão (5.9) para calcular a quantidade de RBs).
- Se a capacidade máxima da vazão no *backhaul* da estação base  $j$  não é excedida com esta ação.

Se um ou mais critérios não forem atendidos, uma nova estação base será testada e assim sucessivamente. Se todas as tentativas falharem, considera-se o usuário fora de serviço.

Na simulação, a associação dos UEs acontece sempre que há um novo posicionamento de UAVs.

### 5.2.2 Sobre o efeito Doppler

Entre os efeitos do canal, o efeito Doppler é causado pelo deslocamento relativo entre a fonte de ondas e um observador, neste caso entre o UAV e a estação terrestre (Hou; Wang, 2019). De acordo com (Khawaja et al., 2019), devido o deslocamento do UAV, há mudanças de frequência Doppler que depende especialmente da velocidade do UAV. Em velocidades baixas, o efeito da propagação Doppler é normalmente insignificante em comparação com a frequência da portadora (Khawaja et al., 2019). Neste trabalho, assume-se uma velocidade máxima do UAV de 15 m/s, como em (SÁNCHEZ-GARCÍA; REINA; TORAL, 2019). Este valor depende do tipo de UAV e por este motivo, foi configurado para a velocidade média de um UAV padrão (SÁNCHEZ-GARCÍA; REINA; TORAL, 2019).

Vale destacar que, em um cenário real, os UAVs podem realizar o algoritmo de posicionamento em determinados intervalos de tempo. Portanto, espera-se que o nó aéreo seja estacionário (ou quase sempre) no espaço por um determinado intervalo de tempo. Muitas das medições do canal UAV-solo na literatura foram realizadas com aeronaves de asa fixa, com velocidades máximas variando de 17 m/s a 293 m/s (Khawaja et al., 2019). Portanto, para fins de simplicidade e considerando que a velocidade do UAV neste trabalho é relativamente baixa, seu efeito não seria significativo ou mesmo poderia ser perfeitamente compensado, assim como nos estudos (ZENG; ZHANG; LIM, 2016) e (LYU; ZENG; ZHANG, 2018). Por estes motivos, neste trabalho, não considera-se o impacto do efeito Doppler no desempenho da rede.

## 5.3 Métricas de desempenho

A fim de avaliar a estratégia proposta e comparar seu desempenho com outros métodos de posicionamento, as seguintes métricas serão consideradas: Porcentagem de usuários fora de serviço, Vazão global da rede no *downlink*, Porcentagem de usuários satisfeitos (em outras palavras, com requisito de vazão no *downlink* atendido), Porcentagem de usuários servidos por UAVs, Porcentagem de usuários servidos pela macrocélula, Razão de cobertura e Vazão no *backhaul*.

Usuários que solicitaram acesso ao espectro da rede porém não conseguiram ser associados a nenhuma estação base são considerados fora de serviço. A **porcentagem de**

**usuários fora de serviço**  $N_o$  é fornecida por (5.11).

$$N_o = 100 \left( \frac{N_u - \sum_{j=1}^{N_b} \Omega_j}{N_u} \right) \quad (5.11)$$

Onde  $\Omega$  é a quantidade total de usuários servidos pela estação base  $j$ ,  $N_b$  é a quantidade total de estações base no cenário,  $N_u$  é a quantidade total de usuários e  $N_o$  é a porcentagem de usuários fora de serviço.

Calcula-se a **vazão global da rede no *downlink***  $T_t$  como a soma da vazão de todos os usuários atendidos pelo sistema (usuários com serviço). Em outras palavras, é a soma de todas as vazões individuais atingíveis  $T_i$ , expressa por (5.12).

$$T_t = \sum_{i=1}^{N_u} T_i \quad (5.12)$$

A **porcentagem de usuários satisfeitos**  $\rho$  é calculada em termos do número total ( $N_r$ ) de usuários com vazão igual ou superior ao seu requisito e o número total de usuários  $N_u$ . ( $N_r$ ) é calculado considerando o conjunto ( $\tau_i$ ) de todos os usuários atendidos pela rede que têm vazão atingível ( $T_i$ ) igual ou superior ao requisito de sua aplicação, de modo que  $i \in \varphi$  e  $\varphi$  é o conjunto de usuários com  $T_i \geq \tau_i$ . Esta porcentagem é dada por (5.13).

$$\rho = 100 \frac{N_r}{N_u} \quad (5.13)$$

Neste trabalho, se um usuário não estiver associado a nenhuma estação base, o usuário é considerado insatisfeito e sua vazão é considerada nula.

Considerando todos os usuários associados a qualquer estação base, a **porcentagem de usuários servidos por UAVs**  $\Omega_u$  é calculada considerando todos os usuários associados a uma estação base voadora, enquanto a **porcentagem de usuários servidos por macrocélulas**  $\Omega_m$  é computada considerando todos os usuários conectados a macrocélulas.

$$\Omega_u = 100 \frac{\sum_{j=1}^{N_d} \Omega_j}{N_u} \quad (5.14)$$

$$\Omega_m = 100 \frac{\sum_{j=1}^{N_m} \Omega_j}{N_u} \quad (5.15)$$

Onde  $N_d$  é o número total de UAVs e  $N_m$  é o número total de macrocélulas no cenário.

Calcula-se a **razão de cobertura**  $N_c$  como a razão entre a quantidade total de usuários associados a qualquer estação base e a quantidade total de usuários. O percentual da razão de cobertura é expresso por (5.16).

$$N_c = 100 \frac{N_u - N_o}{N_u} \quad (5.16)$$

Finalmente, considerando a limitação da capacidade do *backhaul* sem fio em termos da vazão, calcula-se a **vazão no backhaul** como (5.10). Neste trabalho, a vazão real que o usuário consome do *backhaul* é considerada 30% maior do que sua vazão atingível. Logo, considera-se  $O_j$  igual a 1.3. Uma estratégia semelhante é considerada em (KLAINÉ et al., 2018).

A escolha das métricas foi realizada de forma a permitir que o método de posicionamento proposto pudesse ser avaliado em termos das restrições de *backhaul* e de recursos de rádio (RBs) e da satisfação dos usuários em termos do requisito de QoS considerado. Além disso, busca-se avaliar se o método proposto consegue maximizar a quantidade de usuários servidos pela rede (em outras palavras, minimizar o número de usuários fora de serviço). As métricas descritas nesta seção foram baseadas nos trabalhos de (KURIBAYASHI et al., 2020), (KLAINÉ et al., 2018), (ZHAO et al., 2018) e (ROHDE; PUTZKE; WIETFELD, 2013).

## 5.4 Cenário de simulação

(SHI et al., 2018a) destaca que a implantação ótima de UAVs é um problema do tipo NP-difícil. Em vista disso, muitos estudos têm apresentado algoritmos heurísticos para resolver este problema. Apesar de não garantir uma solução ótima para o problema, um algoritmo heurístico é capaz de encontrar uma solução de qualidade, em um tempo adequado.

Neste trabalho, considera-se um Algoritmo Genético (GA) e um esquema de posicionamento fixo para fins de comparação com o Autômato Celular Multicamada (MCA) proposto. O AG é umas das técnicas de busca mais utilizadas na ciência da computação para encontrar soluções aproximadas (sub-ótimas) em problemas de otimização. No esquema de posicionamento fixo, os UAVs são posicionados aleatoriamente no cenário no início da simulação e permanecem na mesma posição até o final da simulação. Tal esquema também foi utilizado para comparar com um método baseado em Q-Learning em (KLAINÉ et al., 2018). Por outro lado, nos esquemas baseados no MCA e no AG, os UAVs podem posicionar-se dinamicamente no cenário ao longo da simulação.

### 5.4.1 Método baseado em Algoritmo Genético

Conforme discutido no Capítulo 2 desta tese, o Algoritmo Genético é uma técnica de otimização inspirada no processo da evolução natural dos seres vivos. Da mesma forma que os organismos vivos podem adaptar-se ao seu ambiente ao longo de gerações, as soluções no AG também podem adaptar-se a uma função de aptidão em um processo iterativo, usando técnicas como seleção de pais, mutação e cruzamento.

Para implementar o algoritmo genético, dividiu-se a área de simulação em uma grade de células quadradas de 100mx100m. Assume-se que uma célula não pode ser ocupada por mais de um UAV. O valor de cada célula  $C$  corresponde ao número de usuários que ocupam a célula no tempo  $t$ . No algoritmo, uma célula  $C$  ocupa a posição  $(x, y)$  na grade.

No AG proposto, considera-se uma população de tamanho  $P$ . Cada indivíduo da população é formado por um cromossomo de tamanho  $N$ .  $N$  é o número total de UAVs no cenário. Cada gene do cromossomo é um número inteiro e corresponde a posição  $(x, y)$  de um determinado UAV na grade. O conjunto de  $N$  genes do cromossomo caracterizam uma solução possível para o problema.

Assim, utiliza-se o AG para simular a evolução de uma população de  $N$  UAVs que otimiza sua posição a fim de adaptar-se a uma função de aptidão. A função de aptidão proposta é baseada na mesma ideia do MCA. A função busca maximizar o número de usuários distribuídos na célula  $C(x_i, y_i)$  atualmente ocupada pelo UAV  $i$  e nas suas oito células imediatamente vizinhas (N, S, L, O, NE, NO, SE, SO), como na Fig. 8. Assim, a função de aptidão busca maximizar a função a seguir:

$$F_{\text{aptidão}} = \sum_{i=1}^N \{C(x_i, y_i) + C_N + C_S + C_L + C_O + C_{NE} + C_{NO} + C_{SE} + C_{SO}\} \quad (5.17)$$

Neste trabalho, o AG é parametrizado da seguinte forma: o tamanho da população  $P$  é fixa em 200 indivíduos; o número de cromossomos de cada indivíduo é 10, 20 ou 30, de acordo com o número de UAVs considerado no cenário avaliado. A seleção de pais utiliza o método da roleta. A taxa de cruzamento é 0,8 e a taxa de mutação é 0,1. Após testes exaustivos, definiu-se o número máximo de gerações como 1000 gerações.

Como critério de parada considerou-se: (i) o algoritmo atingiu o número máximo de gerações; (ii) quando o *fitness* da solução não melhora durante 100 gerações consecutivas. Quando o algoritmo atinge qualquer um dos dois critérios, o algoritmo finaliza a execução. A solução final corresponde a posição que cada um dos UAVs deve ocupar na grade.

## 5.4.2 Parâmetros do cenário

Para avaliar o desempenho da proposta, utilizou-se técnica de simulação computacional. Nesta tese, um ambiente de simulação discreta foi implementado utilizando o *software* MATLAB. O cenário implementado busca simular o contexto discutido nos capítulos anteriores desta tese, que partem da descoberta (pela operadora) de anomalias na rede, que fogem do padrão esperado para determinados locais, ou mesmo disparadas por situações de emergência ou eventos programados.

Assim, considera-se um cenário no qual existe uma rede terrestre funcional, composta de uma macrocélula. Assume-se que a operadora da rede identificou que a macrocélula encontra-se sobrecarregada e por isso envia um enxame de UAVs para a região de interesse, a fim de aumentar a capacidade da rede e a qualidade de serviço dos usuários, enquanto a demanda por serviços de rede volte ao padrão normal ou enquanto for de interesse da operadora.

Sobre o posicionamento dos UAVs no cenário, três abordagens foram testadas: abordagem utilizando Autômato Celular Multicamda (MCA), abordagem utilizando Algoritmo Genético (AG) e uma abordagem baseada em um esquema de posicionamento fixo. Os detalhes de cada abordagem foram discutidos anteriormente ao longo desta tese.

Considera-se uma área de simulação de 2.000m x 2.000m. Dentro desta área, uma macrocélula é implantada no centro da área de simulação. Diversos cenários são avaliados variando o número de UAVs e usuários ativos. O número de UAVs varia de 10 à 30, enquanto o número de usuários ativos varia de 50 à 400. Assume-se que todos os usuários do cenário são ativos. Considera-se que um usuário ativo é aquele que tem uma demanda de dados no *downlink* para ser atendida pela rede móvel. Todos os UAVs do cenário voam a uma altitude fixa. No início da simulação, os UAVs são posicionados aleatoriamente no plano horizontal  $(x, y)$  do cenário.

No início da simulação, os usuários são distribuídos no cenário com base numa função de distribuição aleatória. Os usuários possuem requisito de QoS distintos, dado em termos da vazão mínima no *downlink*. O intervalo varia de 0,5 à 2 Mbps. O tráfego das aplicações são do tipo *Constant Bit Rate* (CBR). O deslocamento dos usuários no cenário é de acordo com o modelo de mobilidade "random waypoint" (HYYTIÄ; VIRTAMO, 2007). No modelo, a velocidade de cada usuário é configurada aleatoriamente em uma faixa que varia de 0 à 13,89 m/s. Na simulação, a geração de números pseudo-aleatórios segue uma distribuição uniforme.

O modelo COST 231 Walfisch-Ikegami (ALQUDAH, 2013) é usado para modelar a perda de propagação do sinal da macrocélula para os UEs terrestres. Um ambiente sub-urbano é considerado. O modelo do canal UAV-solo é detalhado em (MOZAFFARI et al., 2015) e usado para modelar a perda de propagação dos UAVs para os UEs terrestres.

Assume-se que a macrocélula bem como os UAVs utilizam o mesmo conjunto de frequências para operar e, portanto, há interferência co-canal entre eles. Um fator de reuso de 1 é adotado. Ou seja, toda a banda é utilizada em todas as células. Na simulação, a associação de usuários às estações base e a alocação de recursos se dá conforme o método discutido na subseção 5.2.1 desta tese.

Assume-se que as interfaces de rádio da macrocélula e dos UAVs são compatíveis com o padrão LTE, o que justifica também o uso da frequência da portadora em 2 GHz, como é realizado em trabalhos correlatos como em (KLAINÉ et al., 2018). Alguns pesquisadores enfatizam que as bandas 5G inferiores são ideais para implantação antecipada, devido às suas propriedades vantajosas, incluindo propagação de onda e largura de banda disponível. Além disso, algumas bandas de frequência consideradas baixas, com intervalo iniciando em 2 GHz, estão sendo consideradas para testes iniciais de redes 5G (LOMBARDI, 2018).

Considera-se que a macrocélula e os UAVs são limitados em termos de recursos de rádio e *backhaul*. A largura de banda (BW) da macrocélula e dos UAVs é de 20 MHz, o que corresponde a 100 blocos de recursos (RBs), de acordo com o padrão LTE. Além disso, os UAVs são equipados com interfaces de microondas (mW) a fim de estabelecer links sem fio com a macrocélula, provedora do *backhaul* sem fio, e outros UAVs dentro de raio de comunicação. A capacidade do *backhaul* sem fio entre o UAV e a macrocélula é de 37,5 Mbps, enquanto o *backhaul* que liga a macrocélula ao núcleo da rede é do tipo ideal. Configuração semelhante foi praticada em (KLAINÉ et al., 2018).

A área total de simulação é dividida em sub-áreas (células quadradas) de tamanhos iguais (100m x 100m). No plano horizontal, uma sub-área não pode ser ocupada por mais de um UAV. Além disso, o UAV ocupa o centro da célula quadrada. O espaço aéreo é discretizado tal como o solo e os UAVs podem mover-se em passos de 100m e voam a uma altitude fixa de 100m de altura. A Tabela 3 apresenta os principais parâmetros da simulação. Os parâmetros foram obtidos de (KLAINÉ et al., 2018) e (ZHAO et al., 2018). Após exaustivos testes, a Tabela 4 resume os principais parâmetros adotados no Autômato Celular Multicamada.

Tabela 3 – Parâmetros da simulação.

Parâmetro	Valor
Frequência da portadora	2 GHz
Potência do ruído espectral	-174 dBm/Hz
Número de Macrocélulas / UAVs / UEs	1 / 10-30 / 50-400
Largura de banda da Macrocélula / UAV	20 MHz / 20 MHz
Largura de banda da subportadora	180 KHz
Potência de transmissão da Macrocélula / UAV	40 dBm / 23 dBm
Altura da antena na Macrocélula	30 m

Altitude do UAV	100 m
Área de simulação	2000 m x 2000 m
Capacidade máxima do <i>backhaul</i> da Macro célula / UAV	100 Gbps / 37,5 Mbps
Limiar da SINR	-7 dB
Tipo de ambiente	Sub-urbano
Modelo de propagação macro célula-UE	COST 231 Walfisch- Ikegami
ws / wb / hb / fi / los / zona	20 / 30 / 20 / 90/ 0 / 0
Modelo de propagação UAV-UE	baseado em (MOZAFFARI et al., 2015)
$\alpha$	9,6
$\beta$	0,28
Perda média adicional sob LoS	1 dB
Perda média adicional sob NLoS	20 dB
Tipo de tráfego	Taxa de bit constante (CBR)
Intervalo de requisito mínimo de vazão no <i>downlink</i>	0,5 - 2 Mbps
Modelo de mobilidade dos usuários	Random waypoint
Intervalo de velocidade dos usuários	0 - 13,89 m/s
Máximo de usuários servidos por um UAV	20
Tempo de simulação	100 s
Número de episódios por simulação	100
Número de simulações independentes por cenário	50

Tabela 4 – Parâmetros do Autômato Celular Multicamada.

Parâmetro	Valor
Passo do UAV no eixo $x$	100 m
Passo do UAV no eixo $y$	100 m
Tipo de vizinhança / raio / número de células na vizinhança	Vizinhança de Moore / 1 / 9
Tipo de estrutura / tipo de célula	Grade / quadrada
Número de camadas / tipo de camada	3 / 2-D
Máximo número de iterações por episódio	100
Raio de comunicação dos UAVs	1000 m
Raio de detecção dos UAVs	250 m

Para cada cenário, foram executadas 50 simulações independentes. Cada simulação foi executada com uma semente de geração de números aleatórios diferente e corresponde

a um tempo real de 100 segundos. A simulação foi discretizada em segundos, de acordo com o modelo de mobilidade dos usuários. Assim, a posição dos usuários varia a cada segundo no cenário. Cada simulação foi dividida em 100 episódios. Considera-se que um episódio corresponde a 1 segundo da simulação. Assim, um episódio é uma fotografia do cenário naquele segundo, conforme discutido no Capítulo 4 desta tese. Os métodos de posicionamento são disparados a cada episódio da simulação. A solução é então aplicada no cenário. Feito isto, os usuários são associados e os recursos são alocados conforme o requisito de QoS e SINR (conforme a subseção 5.2.1 desta tese). Finalmente, as métricas de desempenho da rede são registradas. Isto é repetido para todos os episódios da simulação e os resultados numéricos são analisados estatisticamente a partir das diferentes execuções.

Sobre a simulação do Autômato Celular Multicamada proposto, a Camada 2 mapeia a distribuição dos usuários no cenário, enquanto a Camada 3 é responsável por mapear a vizinhança dos UAVs (de acordo com a topologia mapeada na Camada 1), incluindo outros UAVs e obstáculos do terreno, cuja altitude pode oferecer risco de colisão para os UAVs, que voam a uma altitude fixa. Na simulação do algoritmo, valores "zero" são atribuídas às células que contém tais obstáculos ou UAVs, indicando que não é permitido o deslocamento para estas células. Como no ambiente de simulação o deslocamento dos UAVs foi discretizado no espaço e no tempo, o mecanismo de prevenção de colisão discutido na Seção 4.2.9 não se aplica, já que os UAVs "desviam" dessas células proibidas ao longo da simulação.

## 5.5 Resultados Numéricos

Nesta Seção serão discutidos os principais resultados obtidos a partir da aplicação de três algoritmos de posicionamento: (i) Autômato Celular Multicamada (MCA, *Multilayered Cellular Automata*), (ii) Algoritmo Genético (AG) e (iii) posicionamento fixo. Vale ressaltar que os algoritmos MCA e AG permitem que os UAVs sejam posicionados dinamicamente ao longo da simulação, a fim de adaptar-se a distribuição de usuários no solo. Por outro lado, no algoritmo (iii), os UAVs são posicionados aleatoriamente no início da simulação e permanecem na mesma posição até o fim da simulação. Vale ressaltar que a mobilidade dos usuários se dá de um episódio para outro. Para ilustrar, a Fig. 10 mostra um exemplo da simulação realizada.

A Fig. 10(a) mostra um cenário que conta com uma macrocélula implantada no centro da área considerada e uma distribuição aleatória de 100 usuários ativos e 10 UAVs, no primeiro episódio. A Fig. 10(b) mostra a associação inicial dos usuários às estações base. A Fig. 10(c) ilustra o processo dinâmico do método MCA que resulta no posicionamento dos UAVs de acordo com a posição dos usuários no solo ao longo dos episódios. A Fig. 10(d) mostra a implantação final dos UAVs no cenário e a associação dos usuários, em

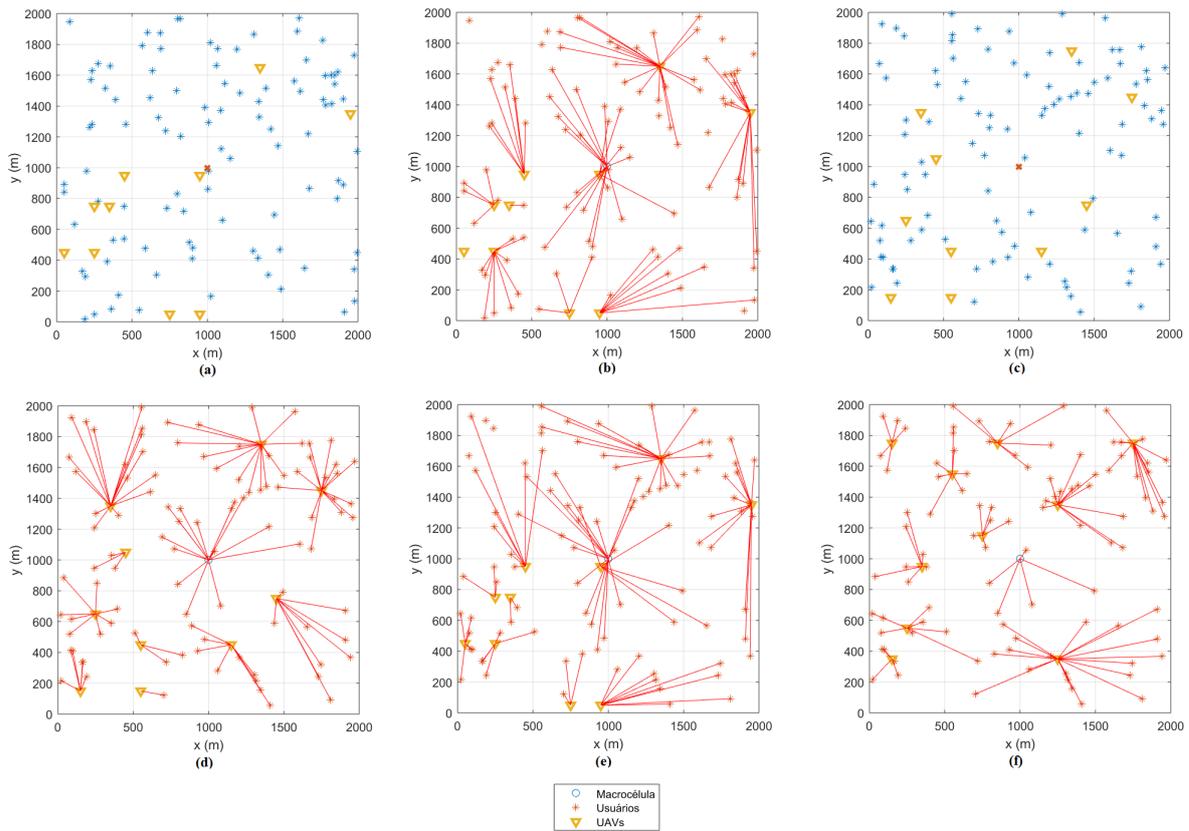


Figura 10 – Exemplo do cenário de simulação. (a) Cenário de implantação aleatória, episódio 1. (b) Alocação inicial, episódio 1. (c) Posicionamento final com o método MCA, episódio 100. (d) Alocação final com o método MCA, episódio 100. (e) Alocação final com o método de posicionamento fixo, episódio 100. (f) Alocação final com o método do AG, episódio 100.

relação ao episódio 100, considerando o MCA. A Fig. 10(e) apresenta a alocação final considerando o posicionamento fixo. Por fim, a Fig. 10(f) apresenta a implantação final dos UAVs, bem como a associação dos usuários em relação ao episódio 100 da simulação, considerando o método AG.

Da Fig. 10(d) observa-se que todos os usuários do cenário estão associados a alguma estação base e qualquer UAV está associado a não mais do que 20 usuários (o limite predefinido). Todos os UAVs estão dentro da faixa de comunicação permitida. A Fig. 10(e) mostra o mesmo cenário considerando que os UAVs permanecem na mesma posição inicial. Dela pode-se observar que 5% dos usuários ativos estão fora de serviço (não estão associados a nenhuma estação base). Na Fig. 10(f) é possível observar que todos os usuários estão associados a uma estação base com o método AG.

Como exemplo do impacto da adição de UAVs e do posicionamento dos mesmos no desempenho da rede, a Fig. 11 ilustra a expectativa máxima da SINR (razão sinal-interferência mais ruído) (em dB), calculada analiticamente, ao longo do cenário

apresentado na Fig. 10, considerando os três métodos de posicionamento diferentes. Ao avaliar os resultados de uma implantação de rede celular, é comum analisar os parâmetros da SINR na região de interesse. Para isto, uma das alternativas é usar mapas de calor para apresentar graficamente a expectativa máxima da SINR (em dB). Os resultados podem ser interpretados como um mapa de intensidade de sinal, que é bastante semelhante à um mapa de cobertura, mas apresenta a SINR considerando a posição das estações transmissoras em relação a todos os pontos do cenário e não apenas aos pontos nos quais os usuários se encontram. Quanto maior o valor da SINR, melhor será a qualidade de sinal do usuário, a vazão atingível e a estabilidade da comunicação.

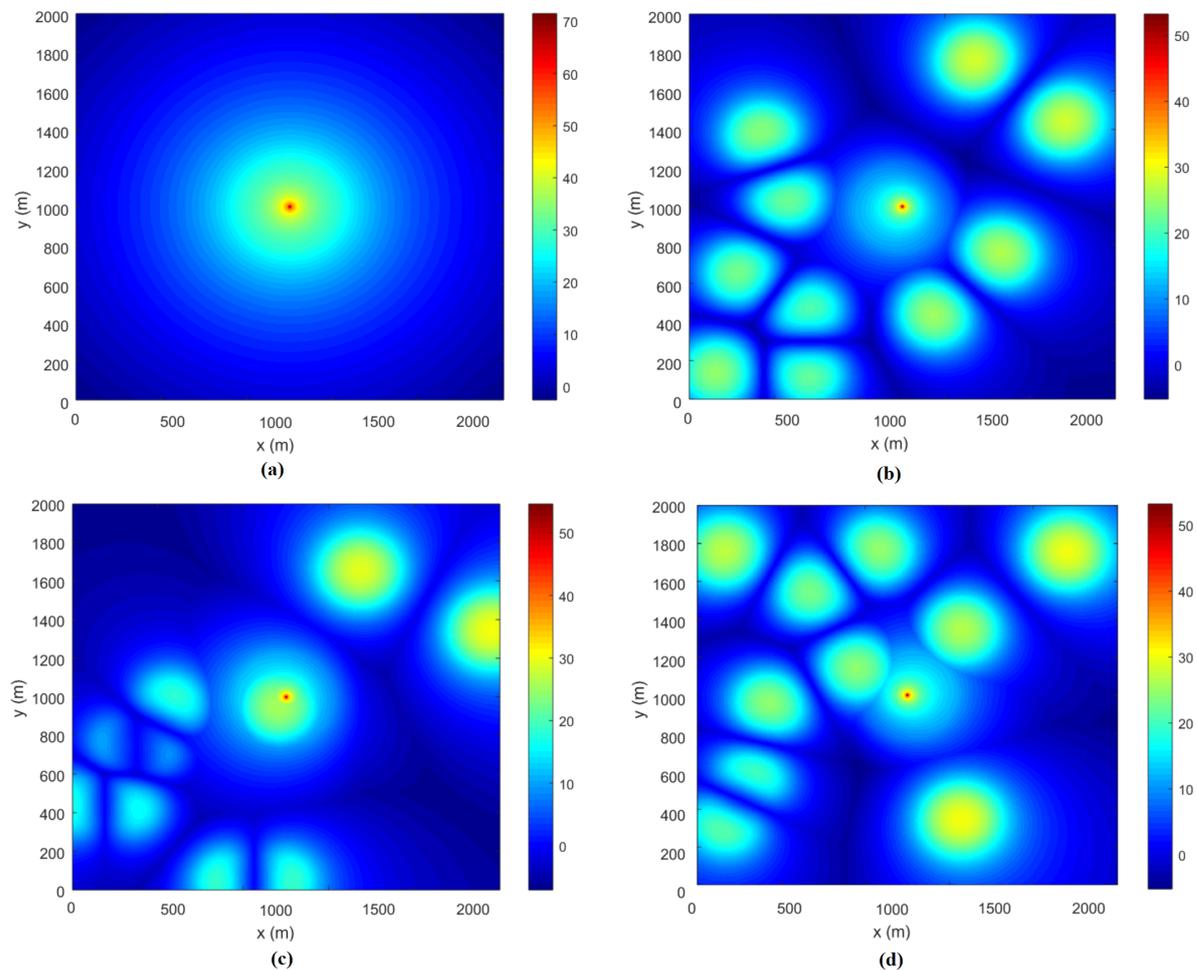


Figura 11 – Expectativa da SINR (em dB) ao longo do cenário: (a) apenas macrocélula fixa no centro. (b) método MCA. (c) método de posicionamento fixo. (d) método AG.

A Fig. 11(a) mostra o desempenho quando há apenas uma macrocélula implantada no centro do cenário, enquanto as figuras 11(b), 11(c) e 11(d) ilustram o desempenho quando no mesmo cenário são implantados 10 UAVs, considerando a implantação mostrada nas figuras 10(d), 10(e) e 10(f), com os métodos MCA, posicionamento fixo e AG, respectivamente. Note que as posições dos UAVs no cenário não apenas influenciam na

cobertura da área de interesse, mas também impactam na interferência percebida em um determinado ponto.

A Fig. 12 ajuda a interpretar os resultados. O percentil é uma medida estatística usada para dividir uma amostra de valores, ordenados em ordem crescente, em cem partes. Na Fig. 12 observa-se do 5º ao 95º percentil, intervalo comum nas análises. O 50º percentil refere-se ao valor mediano das amostras. Ou seja, metade dos valores encontrados estão abaixo desse valor, enquanto a outra metade está acima desse valor. Note que em geral a expectativa da SINR no cenário sem UAVs (apenas macrocélula) é melhor, pois neste caso não há problema de interferência. Vale ressaltar que neste trabalho a macrocélula e os UAVs compartilham o mesmo conjunto de frequências com um fator de reuso de 1, ou seja há interferência co-canal entre as estações base, sejam elas terrestre ou voadoras. UAVs e macrocélulas interferem entre si degradando o nível do sinal recebido. Essa atenuação depende do número de novos transmissores implantados no cenário e da distância entre eles, pois a intensidade do sinal diminui com a distância.

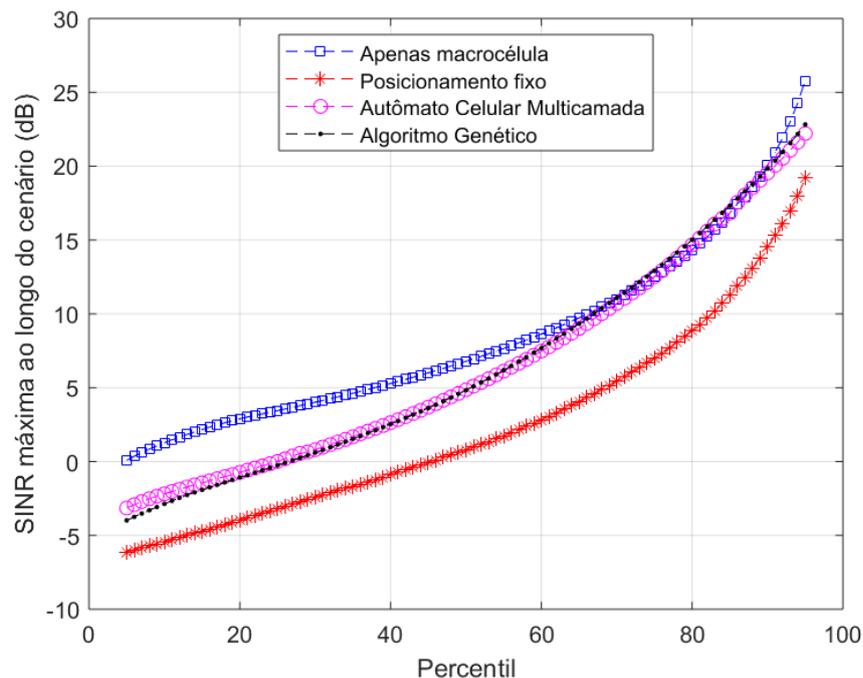


Figura 12 – Distribuição de percentil sobre a expectativa da SINR máxima.

Vale ressaltar que a interferência impõe desafios na demodulação do sinal no receptor. Uma SINR abaixo do limiar no receptor pode comprometer a demodulação correta do sinal recebido. Se por um lado o cenário com apenas uma macrocélula apresenta na maioria das vezes uma melhor expectativa da SINR, por outro lado a capacidade da rede é muito limitada, como mostra a Fig. 13. Da Fig. 12 é possível notar que 5% das amostras estão abaixo de 0,08, -6,12, -3,14 e -3,98 dB nos cenários A (apenas macrocélula), B (posicionamento fixo), C (Autômato Celular Multicamada) e D (algoritmo Genético),

respectivamente. O valor médio é 6,79, 0,79, 4,85 e 4,83 dB, enquanto 75% das amostras estão abaixo de 12,51, 7,0, 12,52 e 14,05 dB, respectivamente, nos cenários A, B, C e D. Isso ocorre porque os UAVs são melhor posicionados nos cenários C e D em comparação com o cenário B.

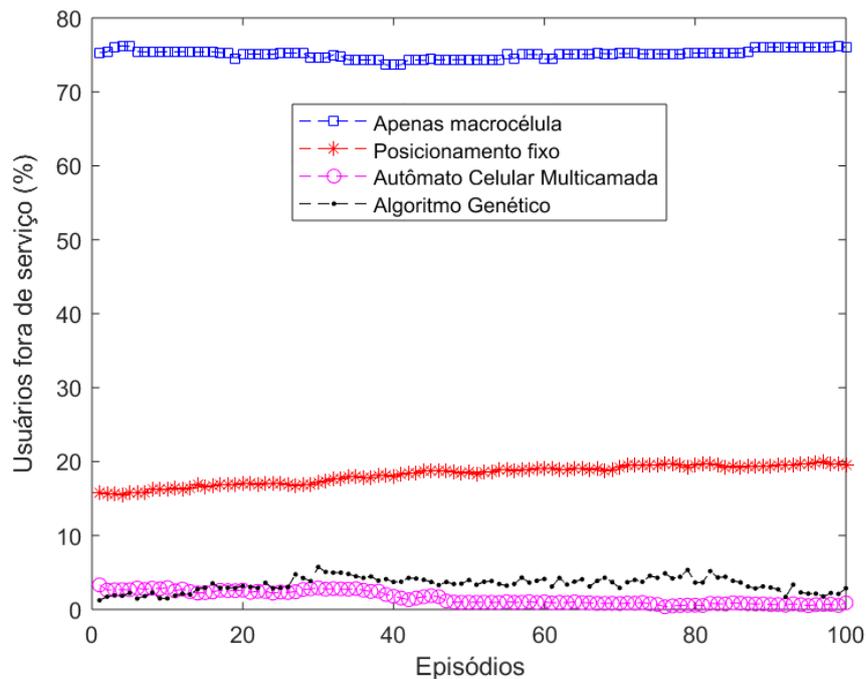


Figura 13 – Porcentagem de usuários fora de serviço por episódio (100 Usuários, 10 UAVs).

Embora o controle da interferência diretamente na programação do algoritmo MCA seja bastante discreto, o objetivo do algoritmo de posicionar os UAVs na direção onde há mais usuários a serem servidos e menos UAVs disponíveis, e diminuir as chances de posicionar um UAV na vizinhança imediata de outro UAV (na camada 3, atribui-se um valor maior que 0 e menor que 1 a essas células), faz com que haja uma tendência na qual os UAVs evitem mover-se para sub-áreas muito próximas de outros UAVs, diminuindo a interferência, melhorando a qualidade de sinal percebida pelo usuário e a eficiência espectral.

Apesar do problema da interferência, implantar estações base voadoras adicionais no cenário gera uma capacidade extra, essencial em situações de sobrecarga da rede terrestre. A Fig. 13 mostra claramente o impacto desta capacidade extra apresentando o número médio de usuários ativos fora de serviço ao longo dos episódios da simulação, para cada um dos métodos considerados. Como pode ser observado, ambos os algoritmos MCA e AG apresentam os melhores resultados, culminando em 1,57% e 3,65% de usuários fora de serviço ao longo dos 100 episódios, em média. No método de posicionamento fixo, essa média é 18,25%, enquanto no cenário onde há apenas uma macrocélula, em média 75% dos usuários não consegue acessar o espectro da rede.

A qualidade de serviço (QoS) exigida pelas aplicações dos usuários pode ser medida usando os chamados parâmetros de QoS. Um dos mais comumente avaliados é a vazão, que indica a taxa de transmissão de dados em bits em um determinado intervalo de tempo. Para fins de ilustração, a Fig. 14 mostra os resultados usando mapas de calor para a expectativa da máxima vazão atingível para os cenários da Fig. 11: cenários A (apenas macrocélula), B (posicionamento fixo), C (Autômato Celular Multicamada) e D (Algoritmo Genético), respectivamente. Para isso, calcula-se a máxima vazão atingível usando a fórmula da capacidade do canal de Shannon, expressa na equação (5.9), considerando a largura de banda e a SINR. Da Fig. 15 é possível notar que 5% das amostras estão abaixo de 18, 5, 10 e 8,73 Mbps, nos cenários A, B, C e D, respectivamente. O valor mediano das amostras são 45,54 Mbps, 20,49 Mbps, 36,39 Mbps e 36,27 Mbps, enquanto 75% das amostras estão abaixo de 76, 46, 76 e 78 Mbps, nos cenários A, B, C e D, respectivamente.

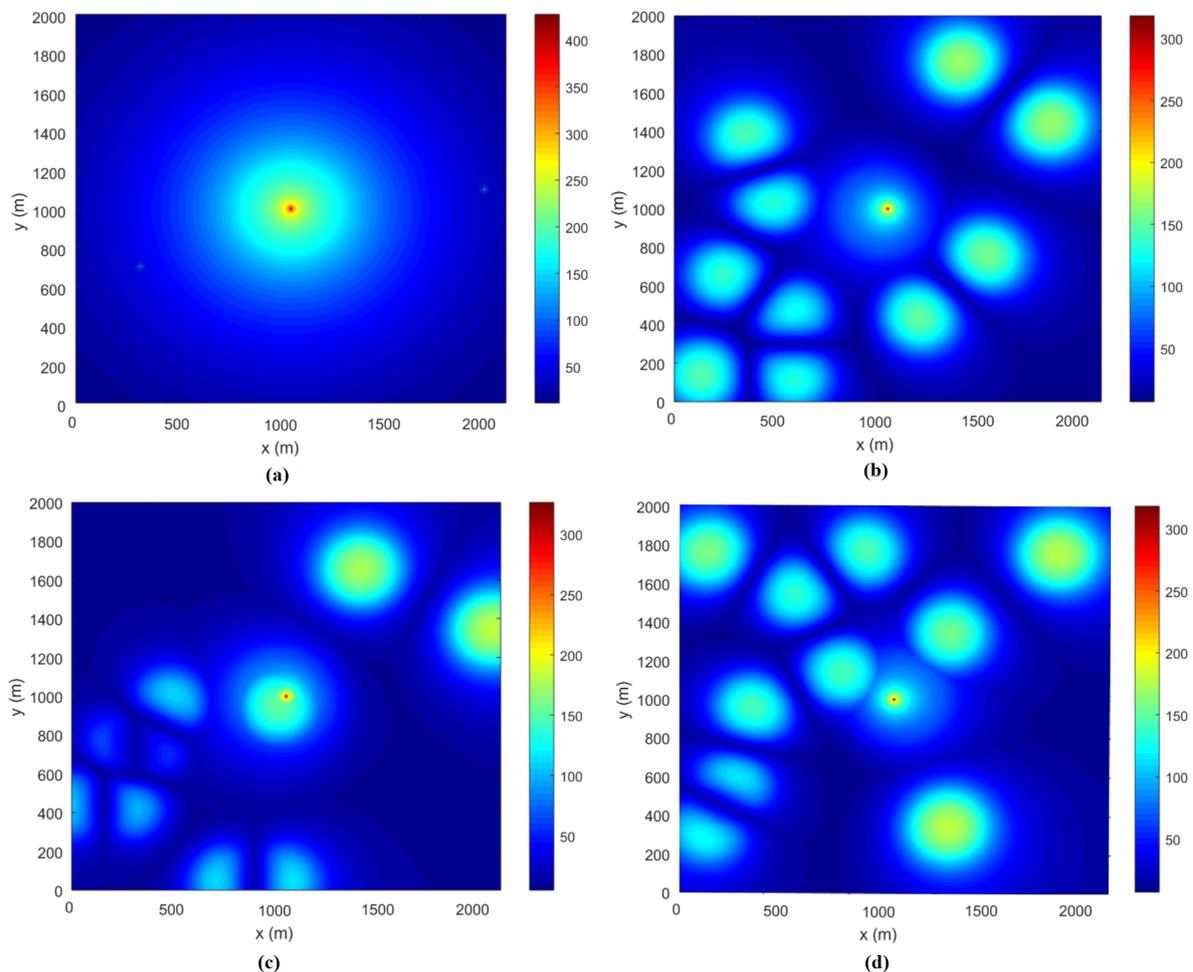


Figura 14 – Expectativa da máxima vazão atingível (em Mbps) ao longo do cenário: (a) apenas macrocélula fixa no centro. (b) método MCA. (c) método de posicionamento fixo. (d) método AG.

Nota-se que o cenário A (apenas macrocélula) apresenta uma expectativa de vazão melhor em comparação com os cenários B, C e D. Apesar disso, a capacidade da rede é

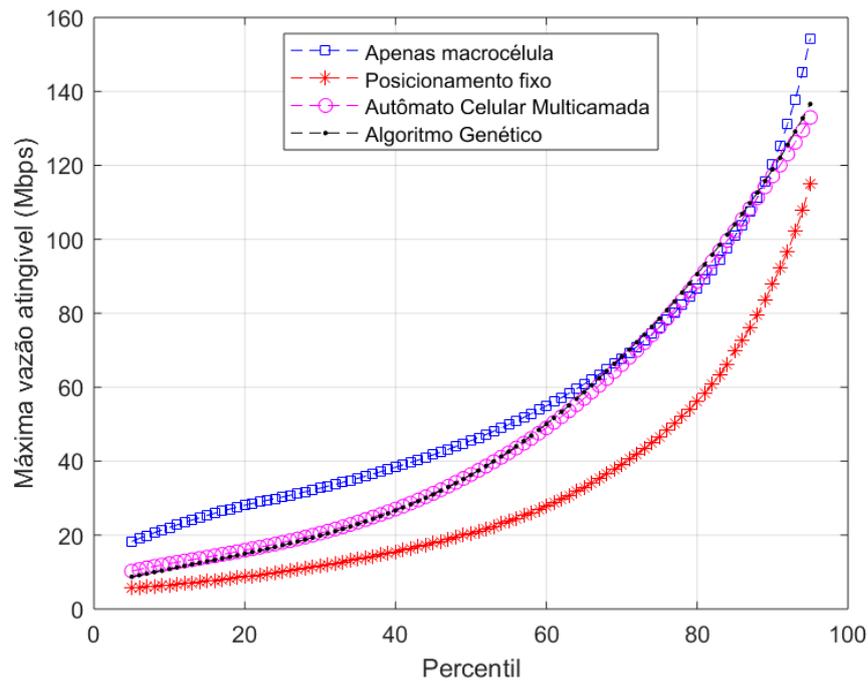


Figura 15 – Distribuição de percentil sobre a expectativa da máxima vazão atingível.

muito limitada neste cenário, conforme a Fig. 13. Além disso, a expectativa de vazão está diretamente relacionada à expectativa da SINR e, portanto, sofre os efeitos da interferência, que é induzida pela implantação de estações base voadoras na rede celular.

A Fig. 16 apresenta a média da vazão global da rede por episódio no *downlink*. Em média, tem-se 41,51 Mbps, 149,33 Mbps, 330,80 Mbps e 346,43 Mbps para os cenários A (apenas macrocélula), B (posicionamento fixo), C (Autômato Celular Multicamada) e D (Algoritmo Genético), respectivamente. Note que os métodos MCA e AG têm um desempenho melhor em comparação com os demais métodos testados. Isso ocorre porque a capacidade da rede é aumentada quando os UAVs são posicionados de maneira mais eficiente, aumentando a eficiência espectral da rede quando comparado ao Cenário B. Pode-se observar também que a melhora da vazão com o método MCA em relação ao posicionamento fixo, ao longo de todos os episódios, em média varia de 37% a 56%, visto que a posição inicial dos UAVs é a mesma em ambos os métodos. A diferença é que no método MCA, os UAVs buscam mover-se de acordo com a distribuição de usuários e outros UAVs no cenário, enquanto no Cenário B, os UAVs permanecem na mesma posição ao longo de toda a simulação. A melhoria da vazão do método AG em relação ao posicionamento fixo varia de 36% a 49%.

A porcentagem média de usuários satisfeitos por episódio é mostrada na Fig. 17. Considera-se satisfeito o usuário que tem o requisito de QoS atendido e neste trabalho, esse requisito é dado em termos da vazão mínima no *downlink*. Vale lembrar que, de acordo com a política de alocação de recursos adotada nesta tese, o usuário só será associado a uma

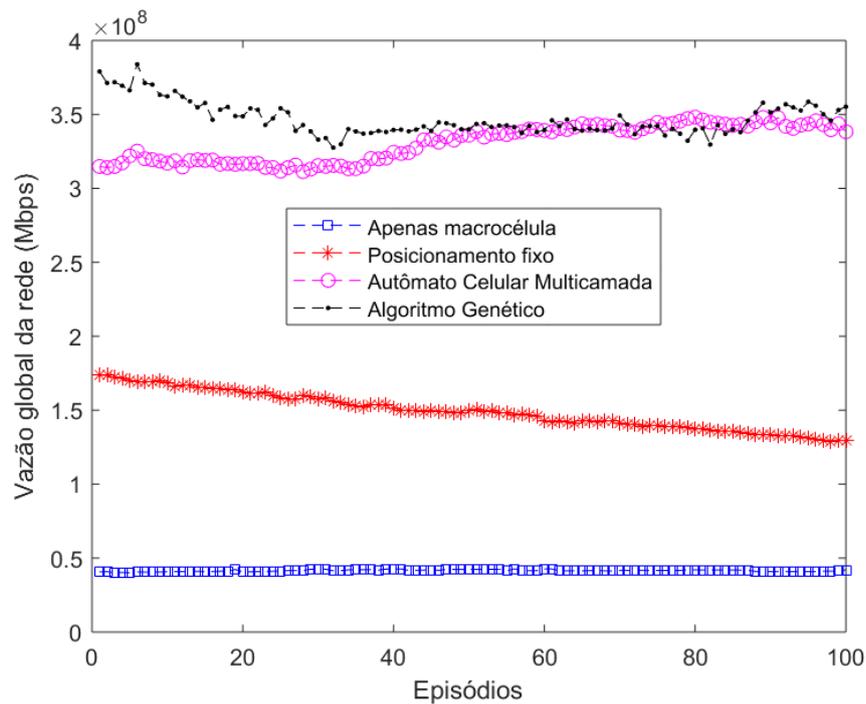


Figura 16 – Média da vazão global da rede por episódio (100 Usuários, 10 UAVs).

estação base se esta possuir a quantidade de RBs suficiente para atender o seu requisito de vazão. Como pode ser visto, os métodos MCA e AG são os que apresentam melhor desempenho em relação aos demais. Os resultados mostram que 98,43% e 96,35% dos usuários são satisfeitos quando aplica-se os métodos MCA e AG no cenário, respectivamente. Isso ocorre principalmente porque os usuários fora de serviço são considerados insatisfeitos, enquanto os usuários associados são considerados satisfeitos, de acordo com a política de associação e alocação de recursos adotada.

As Figuras 18 e 19 apresentam a média de usuários servidos por UAVs e pela macrocélula, respectivamente. Os resultados reforçam a importância de utilizar um método de posicionamento dinâmico e inteligente. Note que, mesmo com a adição de UAVs na rede, mantê-los fixos pode resultar em um desempenho ruim da rede. Os resultados numéricos mostram que há um aumento de 24% de usuários servidos por UAVs ao utilizar o método MCA. Com o método AG, esse aumento é de 23%. Da Fig. 19 também é possível observar que um posicionamento eficiente pode aumentar as chances de *offload* de usuários da macrocélula, mesmo tendo os mesmos recursos disponíveis de largura de banda e UAVs.

Para verificar a escalabilidade e estabilidade das soluções, a Fig. 20 e a Tab. 5 mostram a média da razão de cobertura de usuários com os métodos de posicionamento fixo, MCA e AG, respectivamente, considerando diferentes cenários: (a) 50 usuários, 10 UAVs, (b) 100 usuários, 10 UAVs, (c) 150 usuários, 10 UAVs, (d) 200 usuários, 20 UAVs, (e) 250 usuários, 20 UAVs, (f) 300 usuários, 20 UAVs, (g) 300 usuários, 30 UAVs, (h) 350 usuários, 30 UAVs e (i) 400 usuários, 30 UAVs. Para dar suporte à análise da agilidade da

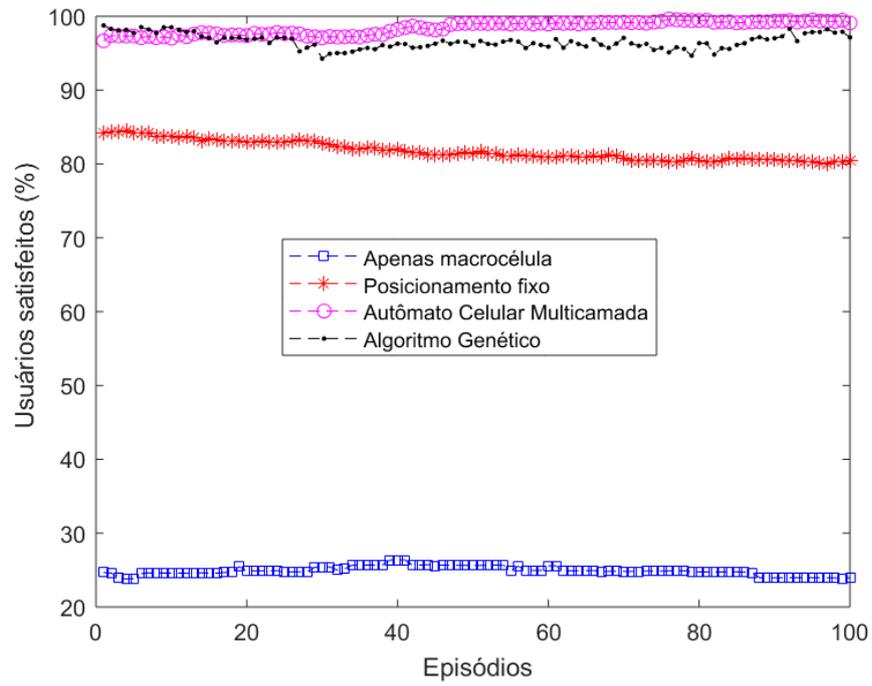


Figura 17 – Porcentagem média de usuários satisfeitos por episódio (100 Usuários, 10 UAVs).

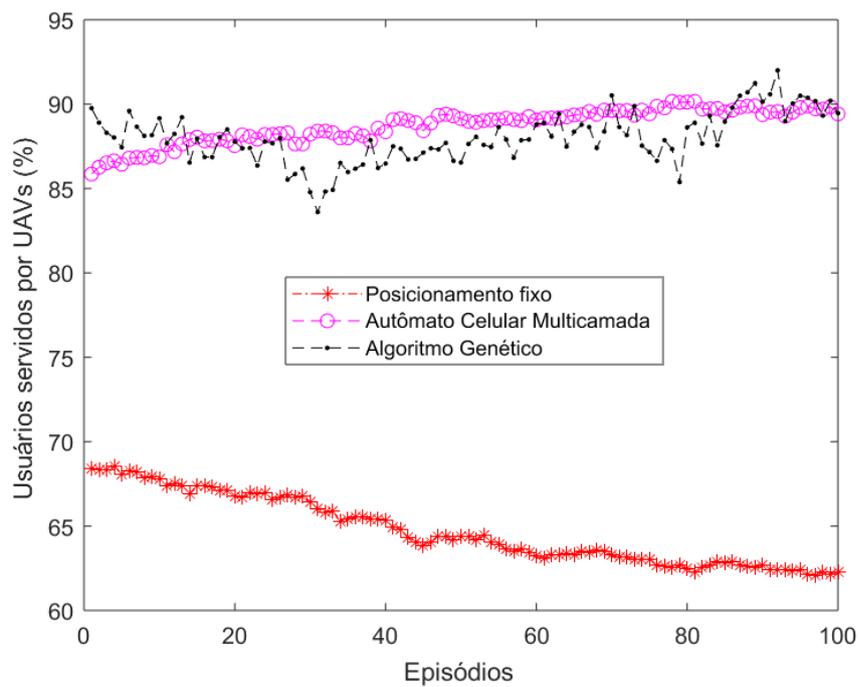


Figura 18 – Porcentagem média de usuários servidos por UAVs por episódio (100 usuários, 10 UAVs).

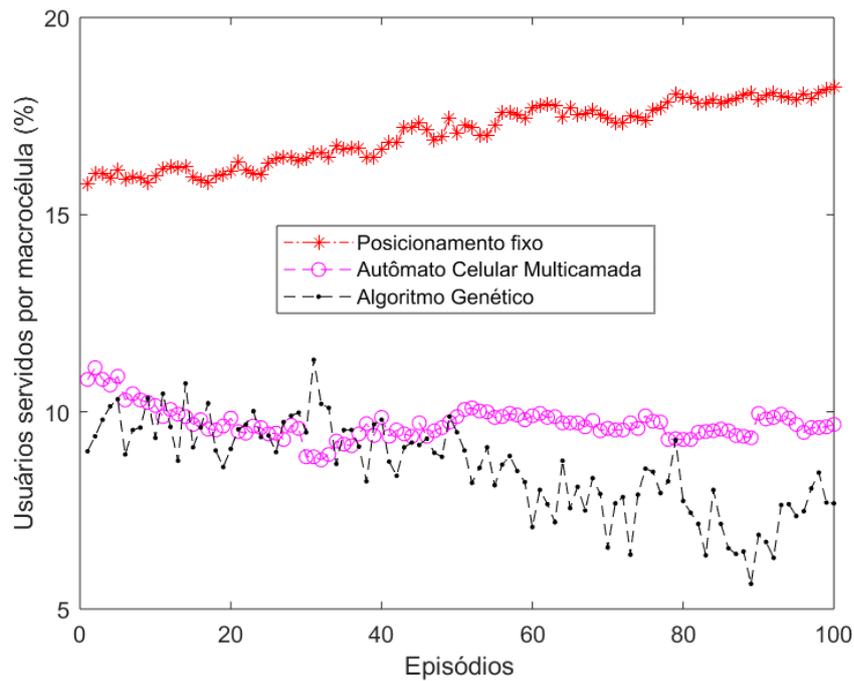


Figura 19 – Porcentagem média de usuários servidos pela macrocélula (100 usuários, 10 UAVs).

Tabela 5 – Razão de cobertura de usuários (%).

Cenário		Posicionamento fixo		Autômato Celular Multicamada		Algoritmo Genético	
UAVs	Usuários	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
10	50	98,37	0,20	99,72	0,10	99,64	0,55
10	100	81,74	1,26	98,43	0,88	96,35	1,31
10	150	66,88	2,76	90,30	1,72	95,54	2,14
20	200	75,66	3,05	95,64	0,38	94,73	2,68
20	250	68,77	5,08	93,04	0,57	89,57	3,16
20	300	58,07	5,17	88,22	0,90	88,33	2,85
30	300	71,05	5,71	93,96	0,47	96,43	1,33
30	350	63,51	6,40	91,18	1,50	95,13	1,50
30	400	56,80	7,00	88,99	0,92	90,79	2,43

solução, a Tab. 6 mostra a média de iterações por episódio a fim de atingir os critérios de parada. Assume-se a razão de cobertura como a razão do número de usuários associados a qualquer estação base no cenário em relação ao número total de usuários no cenário. Da Fig. 20 é possível notar que os métodos MCA e AG têm desempenho superior ao método de posicionamento fixo em todos os cenários avaliados. Isto ocorre pois as soluções obtidas por meio dos algoritmos MCA e o AG podem adaptar-se às mudanças na rede, por exemplo em relação a distribuição dos usuários no solo a cada episódio.

A partir das tabelas 5 e 6 é possível observar que os algoritmos MCA e AG apresentam soluções de melhor qualidade, no entanto, o algoritmo baseado em autômato celular multicamada converge significativamente mais rápido. Enquanto o MCA leva menos de 14 iterações, em média, para atingir os critérios de parada em todos os cenários

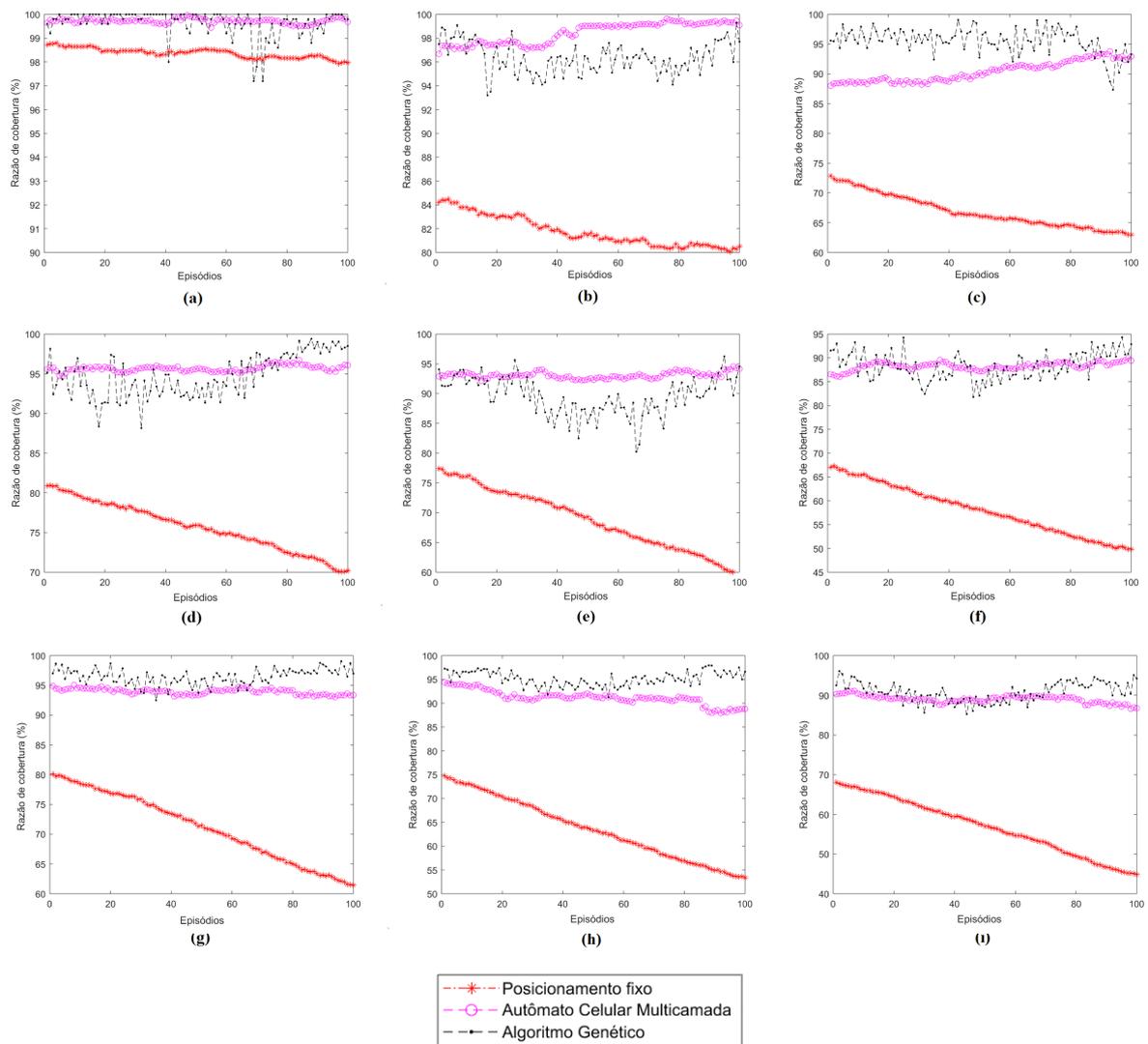


Figura 20 – Média da razão de cobertura de usuários em diferentes cenários. (a) 50 usuários, 10 UAVs, (b) 100 usuários, 10 UAVs, (c) 150 usuários, 10 UAVs, (d) 200 usuários, 20 UAVs, (e) 250 usuários, 20 UAVs, (f) 300 usuários, 20 UAVs, (g) 300 usuários, 30 UAVS, (h) 350 usuários, 30 UAVS e (i) 400 usuários, 30 UAVs.

Tabela 6 – Número médio de iterações para atingir o critério de parada.

Cenário		Autômato Celular Multicamada		Algoritmo Genético	
		Iterações por episódio		Gerações por episódio	
UAVs	Usuários	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
10	50	13,00	0,03	382	65
10	100	13,01	0,04	561	92
10	150	13,01	0,04	635	91
20	200	13,04	0,14	983	13
20	250	13,04	0,18	986	11
20	300	13,05	0,13	987	9
30	300	13,03	0,16	992	4
30	350	13,05	0,15	995	3
30	400	13,04	0,15	996	3

considerados, o AG leva em média 835 gerações, considerando todos os cenários. Vale ressaltar que trata-se da média por episódio já que na simulação a mobilidade dos usuários ocorre entre os episódios e portanto a cada novo episódio o algoritmo de posicionamento é chamado para adaptar-se a nova distribuição. Além disso, observa-se que quanto maior a escala do cenário, maior o número de gerações necessárias para o AG para atingir o critério de parada. Isto ocorre principalmente porque o tamanho do cromossomo do AG aumenta conforme aumenta o número de UAVs no cenário.

O AG, ao contrário do MCA, utiliza uma abordagem centralizada, enquanto o MCA é distribuído. Assim, independente do tamanho do cenário, cada UAV é um ponto de controle, cujos parâmetros não dependem da escala do cenário. Os resultados demonstraram que ambas as soluções são bastante competitivas entre si em termos de desempenho da rede. Por outro lado, da Tab. 6, nota-se que o MCA leva 59 vezes menos iterações para atingir o mesmo desempenho em comparação ao AG. Pelos critérios de parada adotados, pode-se dizer que o MCA leva em média 4 iterações para encontrar o máximo local, apresentando-se como um algoritmo bastante ágil.

As figuras 21 e 22 apresentam uma representação gráfica da evolução dos algoritmos MCA e AG ao longo das iterações e episódios, respectivamente. Na Fig. 21, é possível observar que o primeiro episódio é aquele que necessita de mais iterações para convergir, devido à aleatoriedade da iniciação do cenário. Mesmo assim, converge rapidamente, em menos de 30 iterações na média. Outros episódios são ainda mais rápidos, em menos de 15 iterações, isso porque a mudança na posição dos usuários de um episódio para outro não é muito brusca. Vale ressaltar que o desempenho do algoritmo proposto depende bastante da posição inicial dos UAVs no cenário, mas a solução tende a se auto-organizar ao longo da simulação. Da Fig. 22, nota-se que a mesma análise não cabe para o AG devido à própria natureza do algoritmo, já que uma nova população de tamanho  $P$  é testada a cada novo episódio e o processo evolutivo do AG é reiniciado.

A Tab. 7 também apresenta a média da vazão no *backhaul* sem fio dos UAVs considerando o método MCA. O mais importante a notar é que a capacidade do *backhaul* não é excedida, mesmo em cenários de maior escala, com maior densidade de usuários no solo. O desvio padrão ajuda a mostrar que a vazão no *backhaul* está bem abaixo da capacidade máxima configurada. A média por UAV foi de 24,27 Mbps considerando todos os cenários. Além disso, pode-se inferir que a capacidade do *backhaul* não foi o gargalo da rede, mas sim a SINR. Isto porque quanto maior o nível de interferência, menor a SINR e mais RBs serão necessários para atender o requisito de vazão do usuário no *downlink*. Dada a limitação de recursos de rádio (em número de RBs), é possível observar que em cenários mais densos em termos de número de usuários por UAV, há uma razão de cobertura menor. Finalmente, de todos os resultados numéricos discutidos nesta seção, o MCA se apresenta como um método escalável, ágil e estável para responder em tempo real a mudanças

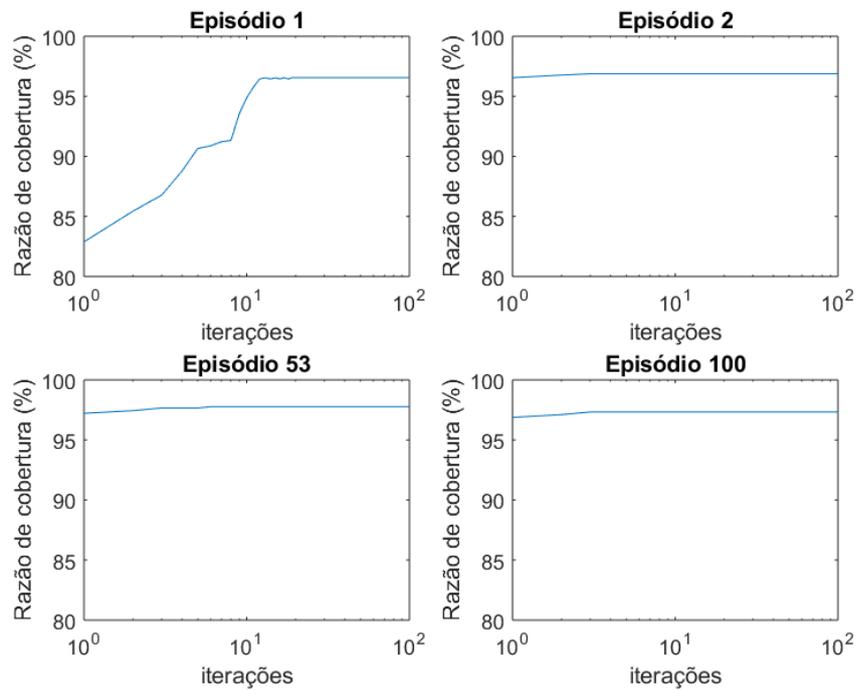


Figura 21 – Representação gráfica da evolução do MCA ao longo de iterações e episódios (100 usuários, 10 UAVs).

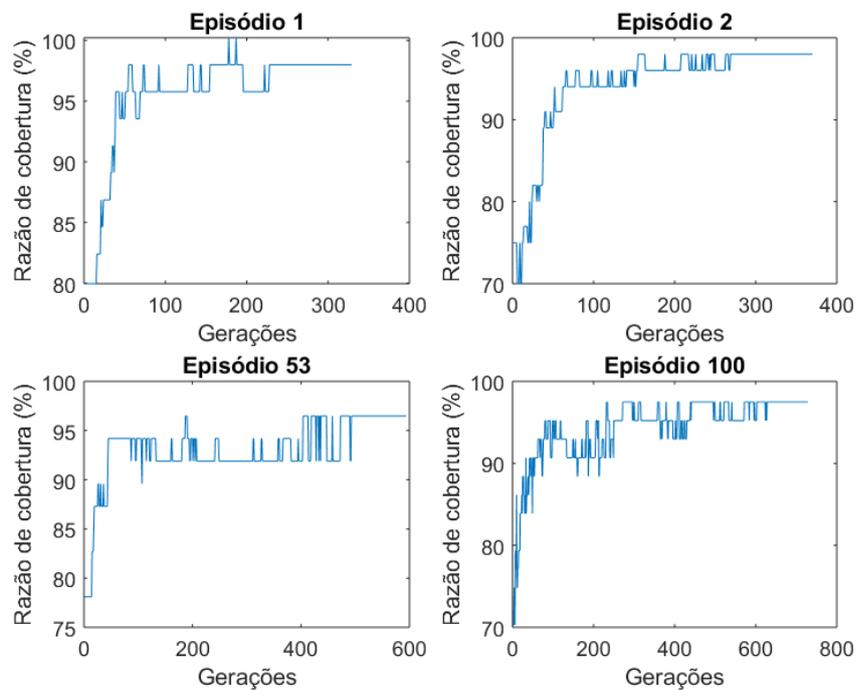


Figura 22 – Representação gráfica da evolução do AG ao longo de gerações e episódios (100 usuários, 10 UAVs).

Tabela 7 – Vazão no *backhaul* sem fio.

Cenário		Vazão (Gbps)	
UAVs	Usuários	Média	Desvio Padrão
10	50	0,232	0,017
10	100	0,280	0,024
10	150	0,205	0,021
20	200	0,494	0,068
20	250	0,483	0,023
20	300	0,504	0,032
30	300	0,533	0,073
30	350	0,569	0,053
30	400	0,579	0,087

urgentes na rede de forma eficiente e distribuída.

### 5.5.1 Análise empírica da complexidade dos algoritmos

Neste trabalho, as simulações foram realizadas em um sistema computacional com processamento de 2,5 GHz (4 CPUs), 8 GB de RAM e 4 MB de memória cache. Todos os algoritmos avaliados nesta tese foram testados sob as mesmas condições e cenários. Sobre o MCA, o tempo médio de execução do algoritmo foi de 33 milissegundos, conforme mostrado na Tab. 8. Com o AG, o tempo médio de execução de um episódio foi de 4,92 segundos. Portanto, o algoritmo proposto é 1478 mais rápido que o AG para resolver o mesmo problema. Além do tempo de execução, a decisão centralizada do AG faz com que o *overhead* na rede seja maior em comparação com o MCA. A carga computacional mostrada aqui corresponde ao esforço computacional necessário para calcular a implantação eficiente de um enxame de UAV no cenário de interesse de acordo com a distribuição de usuários no solo. As figuras 23 e 24 mostram o tempo de execução quando o número de usuários no cenário é fixado em 100 e ao variar o número de UAVs (10, 15, 20 e 30 UAVs) usando os algoritmos MCA e AG, respectivamente.

Da Fig. 23 é possível inferir que ao multiplicar o número de UAVs por 2, o tempo de execução é multiplicado por 2,5 em média, e ao multiplicar o número de UAVs por 3, o tempo de execução é multiplicado em 4 em média. Na Tab. 8, ao fixar o número de UAVs em um determinado número (10, 20 ou 30) e multiplicar o número de usuários no cenário por  $n$ , nota-se que o tempo de execução aumenta por um fator inferior a  $n$ . Assim, é possível concluir que para o algoritmo MCA a variável "número de UAVs" é mais determinante para o tempo de execução do que a variável "número de usuários". Esta análise também permite inferir empiricamente que a complexidade do algoritmo MCA em termos do número de usuários não é constante, mas é menos complexa do que o caso linear. Em termos de número de UAVs, entretanto, apresenta maior complexidade do que o caso linear, mas menor do que o caso quadrático.

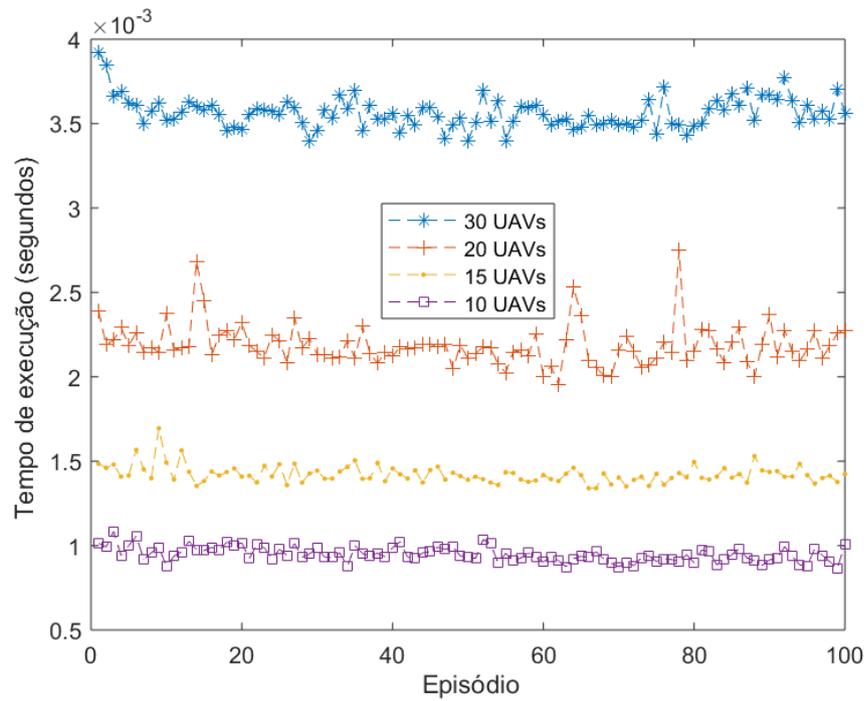


Figura 23 – Tempo de execução da evolução do algoritmo MCA ao longo dos episódios.

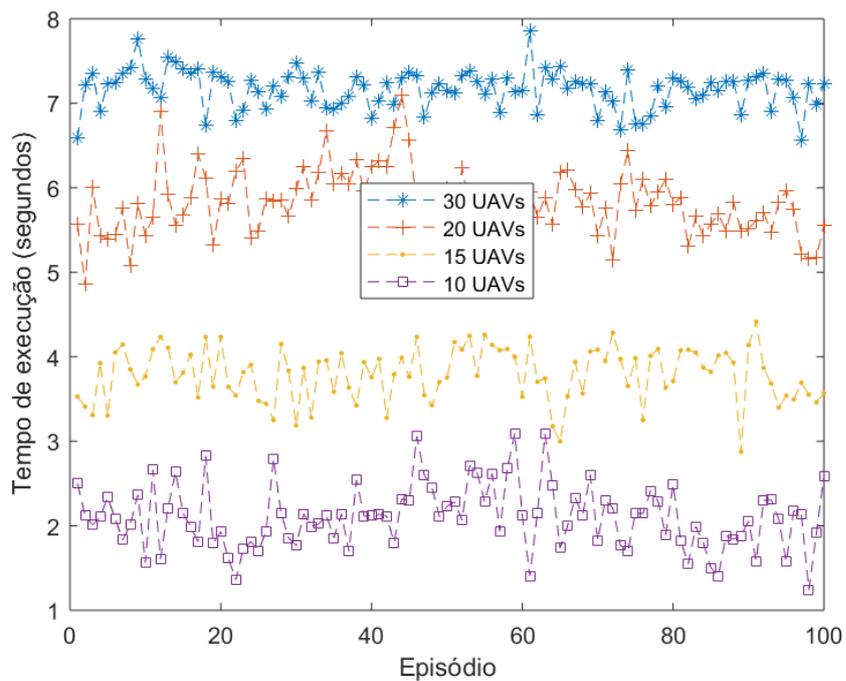


Figura 24 – Tempo de execução da evolução do algoritmo AG ao longo dos episódios.

Tabela 8 – Tempo de execução considerando diferentes cenários.

Cenário		Autômato Celular Multicamada		Algoritmo Genético	
		Tempo de execução (s)		Tempo de execução (s)	
UAVs	Usuários	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
10	50	0,0014	0,0002	1,810	0,340
10	100	0,0014	0,0002	2,100	0,380
10	150	0,0015	0,0002	2,110	0,300
20	200	0,0029	0,0003	5,300	0,080
20	250	0,0031	0,0007	5,760	0,190
20	300	0,0038	0,0003	6,260	0,240
30	300	0,0049	0,0004	6,910	0,100
30	350	0,0050	0,0006	6,950	0,100
30	400	0,0060	0,0000	7,180	0,070

## 5.6 Considerações Finais

Este capítulo apresentou a avaliação de desempenho do algoritmo proposto nesta tese para o posicionamento eficiente de células voadoras em redes móveis 5G auto-organizáveis. A avaliação do método proposto ocorreu por meio de simulação computacional discreta. Os resultados demonstraram que, mesmo diante da simplicidade da ideia por trás da modelagem por meio da teoria de autômatos celulares, o método proposto apresentou resultados bem superiores ao método de posicionamento fixo, que basicamente implanta aleatoriamente os UAVs ao longo do cenário e estes permanecem na mesma posição ao longo de toda a simulação, ao mesmo tempo que a abordagem proposta apresentou resultados bastante competitivos em relação ao método baseado em algoritmo genético.

Vale ressaltar que, ao contrário do algoritmo genético, o autômato celular não é um algoritmo otimizador por natureza, mas sim uma técnica de modelagem matemática utilizada para simular propriedades dos sistemas complexos, nos quais regras aplicadas localmente frequentemente levam a um comportamento global. Esses (micro) efeitos coletivos surgem da interação entre componentes (ou agentes) simples numa vizinhança local, dando origem a um comportamento emergente. A riqueza dessas interações, porém, muitas vezes permite a auto-organização do sistema como um todo.

Tais características motivaram a investigação de um algoritmo baseado em autômato celular para resolver o problema do posicionamento de UAVs em redes móveis auto-organizáveis. Devido a complexidade do modelo do sistema, a aplicação mais comum do autômato celular 2D (de uma camada) não seria adequada (dado o elevado número de estados e regras necessários para caracterizar o sistema). Assim, optou-se pela proposição de um novo autômato celular multicamada, no qual cada camada modela uma parte do sistema (ao invés de usar apenas uma camada para simular o sistema como um todo). Mesmo diante das limitações da técnica, os resultados obtidos foram bastante satisfatórios e contribuem no estado da arte do tema, oferecendo *insights* importantes para resolver o problema da implantação eficiente de UAVs em sistemas de comunicação.

Sobre as limitações do estudo até o presente momento, destaca-se que no modelo implementado atualmente, a altitude dos UAVs é fixa. Essa suposição é um tanto restritiva porque, em certas situações, o desempenho da rede pode ser melhorado ajustando a altitude dos UAVs. Da mesma maneira, considerou-se apenas usuários *outdoor*. Apesar disso, tais suposições não comprometem a análise dos resultados e a discussão levantada nesta tese, uma vez que o objetivo principal do estudo foi alcançado. Vale ressaltar que o modelo proposto é totalmente flexível e adequado para incluir, em trabalhos futuros, novas análises e variáveis a fim de mitigar as limitações atuais e torná-lo mais eficiente e robusto.

## 6 Conclusão

Nesta tese, uma nova metodologia foi proposta para contribuir com o desafio de implantar estações base carregadas por UAVs, atuando como células voadoras, em sistemas de comunicação sem fio. A proposta é baseada em um novo autômato celular multicamada para determinar o posicionamento eficiente de um enxame de UAVs para complementar a capacidade de uma rede móvel celular terrestre, explorando o conceito da mobilidade dos UAVs e assim a possibilidade de adaptar a posição das células voadoras de acordo com a distribuição dos usuários no solo. O objetivo principal é maximizar o número de usuários servidos pela rede.

Na abordagem proposta, cada UAV é um ponto de controle distribuído e responsável pelo seu próprio posicionamento na rede. A modelagem por meio da técnica de autômatos celulares parte de uma ideia simples, na qual cada UAV busca mover-se para sub-áreas onde há mais usuários a serem servidos e menos UAVs disponíveis. A tomada de decisão é baseada na coleta de informações locais e na troca mínima de informações entre UAVs vizinhos. O efeito coletivo dessas decisões locais levam ao comportamento global da rede e sua auto-organização.

O método proposto foi comparado com dois outros métodos: (i) método de posicionamento fixo e (ii) método baseado em algoritmo genético. Também verificou-se o impacto que a adição de novas células voadoras tem no desempenho de uma rede móvel sem fio composta por uma única estação base de alta potência (macrocélula). A avaliação de desempenho foi realizada por meio de simulação computacional discreta.

Os resultados demonstraram que os métodos baseados em autômato celular multicamada e algoritmo genético têm desempenho muito superior ao método do posicionamento fixo. Isto ocorre devido ao aumento da eficiência espectral da rede quando os UAVs são posicionados de maneira mais eficiente, aumentando ainda mais a capacidade da rede e a qualidade do sinal recebido quando comparado ao método de posicionamento fixo, que é estático e implanta aleatoriamente UAVs na região de interesse. Isto porque apesar de aumentar a capacidade da rede, o aproveitamento dos recursos (largura de banda, *backhaul*, UAVs) é bastante limitado nestas condições.

Também foi possível concluir que as posições dos UAVs no cenário não apenas influenciam na razão de cobertura da área de interesse, mas também impactam na interferência percebida em um determinado ponto do cenário, gerando efeitos no uso do espectro disponível. Observou-se também que, apesar de não se tratar de um algoritmo intrinsecamente otimizador, e de apresentar resultados numéricos bastante competitivos em relação ao algoritmo genético, o autômato celular multicamada teve muitas vezes

desempenho ligeiramente superior em comparação ao algoritmo genético em relação às métricas avaliadas.

Uma das vantagens da proposta é o baixo custo computacional, já que a auto-organização surge a partir de um padrão emergente baseado na aplicação de regras simples em uma vizinhança definida. Além disso, apesar da avaliação do autômato celular multicamada e do algoritmo genético ter demonstrado desempenho competitivo, o autômato celular multicamada apresentou redução de tempo de execução bastante significativa em relação a solução baseada em algoritmo genético. As análises empíricas sobre a complexidade da solução baseada em autômato celular, a metodologia de tomada de decisão distribuída, e a capacidade de responder em tempo real às mudanças urgentes na rede, fornecem *insights* importantes sobre a possibilidade da aplicação da metodologia proposta como solução candidata a ser explorada no planejamento e operação de cenários de tráfego futuros, como, por exemplo, banda larga móvel melhorada (eMBB) e a super exploração da internet das coisas.

As principais contribuições desta tese até o momento são:

- A investigação de soluções que guiem a instalação eficiente de redes não terrestres dentro do contexto das redes 5G e posteriores, contribuindo principalmente na discussão sobre a capacidade da rede em suportar novos cenários de implantação e o atendimento a diversos segmentos de mercado.
- O desenvolvimento de uma nova estratégia de controle de posicionamento de um enxame de UAVs em sistemas de comunicação sem fio. Na estratégia proposta, a tomada de decisão é distribuída, na qual cada UAV é um ponto de controle na rede e responsável pelo seu próprio posicionamento. A abordagem é baseada na coleta de informações locais e exige a troca mínima de informações entre UAVs vizinhos.
- A proposição de uma metodologia escalável e adaptável, capaz de incorporar novos elementos e variáveis, de acordo com o objetivo ou caso de interesse. O sistema é descrito para suportar múltiplos UAVs e múltiplos usuários, diferentes características de mobilidade e requisito de QoS. Além disso, o modelo considera restrições de recursos de espectro e *backhaul* e interferência co-canal.
- A elaboração de um método de posicionamento de enxame de UAVs baseado na teoria dos Autômatos Celulares, que para o melhor do conhecimento da autora é inédito para este tipo de problema.
- A formulação e implementação de um novo Autômato Celular Multicamada para resolver o problema da implantação eficiente de múltiplos UAVs em sistemas de comunicação sem fio. O algoritmo é de baixo custo computacional, e apresentou soluções ágeis, escaláveis e estáveis.

- A proposição de um mecanismo para evitar colisões entre UAVs durante o reposicionamento dos UAVs na rede. Tal estratégia foi pensada de um ponto de vista prático e é baseada na troca de informações de localização atual e *status* dos UAVs.
- A implementação de um ambiente de simulação discreta no *software* MATLAB, indispensável para a modelagem do sistema, parametrização e avaliação de desempenho do método proposto.
- A divulgação de resultados a partir da publicação de trabalhos em periódicos e conferências nacionais e internacionais, ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

## 6.1 Publicações

Principais publicações relacionadas à área de telecomunicações ao longo do desenvolvimento desta tese:

- (i) **CARDOSO, EVELIN HELENA SILVA**; DE ARAUJO, JASMINE PRISCYLA LEITE; DE CARVALHO, SOLON VENANCIO; VIJAYKUMAR, NANDAMUDI; FRANCÉS, CARLOS RENATO LISBOA. Novel Multilayered Cellular Automata for Flying Cells Positioning on 5G Cellular Self-Organising Networks. *IEEE Access*, v. 8, p. 227076-227099, 2020.
- (ii) **CARDOSO, EVELIN**; NATALINO, CARLOS; ALFAIA, RODRIGO; SOUTO, ANDERSON; ARAÚJO, JASMINE; FRANCÊS, RENATO; CHIARAVIGLIO, LUCA; MONTI, PAOLO.. A Heuristic Approach for the Design of UAV-Based Disaster Relief in Optical Metro Networks. In 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bari, Italy, 2020.
- (iii) SILVA FILHO, F. G. S.; **CARDOSO, E. H. S.**; ARAUJO, J. P. L.; FRANCÊS, C. R. L.. Adaptação De Modelos Empíricos De Propagacao Utilizando Redes Neurais Artificiais. In: IX CONFERÊNCIA NACIONAL EM COMUNICAÇÕES, REDES E SEGURANÇA DA INFORMAÇÃO, 2019, Petrolina. Anais da IX Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação, 2019.
- (iv) SILVA, KETYLLEN; BECVAR, Z; **CARDOSO, EVELIN**; FRANCÊS, C. R. L.. Self-tuning Handover Algorithm Based on Fuzzy Logic in Mobile Networks with Dense Small Cells. In: IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2018, Barcelona. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2018.
- (v) SILVA FILHO, F. G. S.; **CARDOSO, E. H. S.**; ARAUJO, J. P. L.; FRANCÊS, C. R. L.. Caracterização da Perda de Propagação Outdoor em Ambiente Urbano Densamente Arborizado. In: VIII Conferencia Nacional em Comunicações, Redes e

Segurança da Informação, 2018, Salvador. Anais da VIII Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação, 2018. v. 1. p. 17-18.

- (vi) **CARDOSO, EVELIN**; SILVA, KETYLLEN ; FRANCES, RENATO. Intelligent handover procedure for heterogeneous LTE networks using fuzzy logic. In: 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2017, Valencia. 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2017. p. 2163-2168.

Outras publicações importantes:

- (i) **CARDOSO, EVELIN HELENA SILVA**; SILVA, MARCELINO SILVA DA; DE ALBUQUERQUE FELIX JUNIOR, FRANCISCO EGUINALDO; DE CARVALHO, SOLON VENANCIO; DE CARVALHO, ANDRE CARLOS PONCE DE LEON FERREIRA; VIJAYKUMAR, NANDAMUDI; FRANCES, CARLOS RENATO LISBOA. Characterizing the Impact of Social Inequality on COVID-19 Propagation in Developing Countries. IEEE Access, v. 8, p. 172563-172580, 2020.
- (ii) VEIGA E SILVA, LENA; DE ANDRADE ABI HARB, MARIA DA PENHA; TEIXEIRA BARBOSA DOS SANTOS, AUREA MILENE; DE MATTOS TEIXEIRA, CARLOS ANDRÉ; MACEDO GOMES, VITOR HUGO; **SILVA CARDOSO, EVELIN HELENA**; S DA SILVA, MARCELINO; VIJAYKUMAR, N L; VENÂNCIO CARVALHO, SOLON; PONCE DE LEON FERREIRA DE CARVALHO, ANDRÉ; LISBOA FRANCES, CARLOS RENATO. COVID-19 Mortality Underreporting in Brazil: Analysis of Data From Government Internet Portals. JOURNAL OF MEDICAL INTERNET RESEARCH, v. 22, p. e21413, 2020.
- (iii) VEIGA E SILVA, LENA; DE ANDRADE ABI HARB, MARIA DA PENHA; TEIXEIRA, C. A. M; TEIXEIRA BARBOSA DOS SANTOS, AUREA MILENE; MACEDO GOMES, VITOR HUGO; **CARDOSO, EVELIN**; S DA SILVA, MARCELINO; VENÂNCIO CARVALHO, SOLON; VIJAYKUMAR, N L; PONCE DE LEON FERREIRA DE CARVALHO, ANDRÉ; FRANCES, C. R. L.. Um Estudo Sobre Subnotificação de Mortalidade por COVID-19 na Cidade de Manaus. Computação Brasil: Revista da Sociedade Brasileira de Computação, Porto Alegre - RS, p. 16 - 19, 01 set. 2020.

## 6.2 Trabalhos futuros

Como possíveis desdobramentos desta tese, destaca-se:

- A realização de novos estudos, como a adição de novas tecnologias e padrões ao modelo do sistema, tais como Wi-Fi, a fim de aumentar as possibilidades de conectividade aos usuários móveis, permitindo que estes façam uso de duas ou mais interfaces de rede, permitindo ao usuário uma oportunidade inteligente de acesso, conforme a disponibilidade e qualidade da rede, por exemplo.
- No modelo implementado atualmente, a altitude dos UAVs é fixa. Essa suposição é um tanto restritiva porque, em certas situações, o desempenho do sistema pode ser melhorado ajustando a altitude. Considera-se fortemente realizar ajustes no modelo e método de posicionamento a fim de possibilitar que os UAVs voem a altitudes distintas e analisar o impacto desta incorporação.
- Incluir novas alternativas de descoberta de usuários no terreno pelo UAV, a fim de suportar, por exemplo, situações nas quais os usuários estejam em ambientes fechados, fora do alcance de visão do UAV.
- Incluir a possibilidade de associação de um usuário a mais de um UAV ao mesmo tempo.
- Considera-se fortemente realizar ajustes no modelo do sistema a fim de incluir faixas de frequências mais altas e tecnologias tais como *massive* MIMO e *beamforming*.
- A elaboração de um mecanismo para estimação do número mínimo de UAVs necessários para atender a região de interesse. Considera-se incluir no modelo do sistema parâmetros acerca do tempo de vida útil da bateria e o escalonamento dinâmico de UAVs ao longo da simulação.
- Definição de novos cenários de interesse. Por exemplo, no modelo implementado atualmente, todos os usuários da rede são *outdoor*. Considera-se fortemente realizar ajustes a fim de modelar a existência e o atendimento de usuários *indoor*, tal como usuários que se encontrem em ambientes fechados, tais como prédios comerciais e residenciais.
- Considera-se a possibilidade de aumentar a complexidade do modelo do autômato celular multicamada, a fim de incorporar novas decisões, tal como o posicionamento do UAV na dimensão vertical.
- A realização de estudos mais profundos sobre o consumo da bateria do UAV e a proposição de mecanismos que levem ao consumo mais eficiente de energia; a incorporação de novas métricas de desempenho que permitam a avaliação da qualidade de experiência dos usuários; a exploração de novos modelos de propagação; e a avaliação da sensibilidade do desempenho da rede em termos dos parâmetros da simulação.

- O comportamento dinâmico e mudanças rápidas de mobilidade e topologia em redes formadas por UAVs torna o roteamento bastante desafiador. Considera-se a realização de estudos mais profundos acerca do tema.
- A realização de novas simulações utilizando outras técnicas de inteligência computacional, tais como Q-learning e otimização por enxame de partículas. Paralelo a isso, considera-se estudar o quão distante as soluções sub-ótimas (apresentadas neste estudo) estão da solução ótima.

### 6.3 Dificuldades encontradas

Vale ressaltar que o desenvolvimento deste trabalho foi desafiador em todos os sentidos: pessoal, profissional e acadêmico.

Do ponto de vista acadêmico, sua realização exigiu habilidades em diversas áreas do conhecimento. Por exemplo, da computação, no que tange à programação de um novo simulador de rede, a fim de reproduzir o modelo do sistema estudado e a implementação dos métodos de posicionamento descritos no Capítulo 4 deste documento; de telecomunicações, já que trata-se de um problema desta área, e exigiu um amplo estudo sobre os componentes da rede, conceitos e tecnologias envolvidas nesta tese, a fim de permitir a elaboração do modelo do sistema, bem como a análise crítica a respeito do comportamento da rede e resultados obtidos; da matemática e estatística, já que os autômatos celulares são uma técnica de modelagem matemática e a formulação de um novo autômato celular multicamada exigiu muitos esforços neste sentido; além disso, a discussão, apresentação e divulgação dos resultados desta tese só foi possível a partir da validação estatística dos mesmos. Também é possível citar que:

- A tese está situada sobre um novo paradigma de redes, com a exploração do conceito de redes não terrestres na complementação das redes terrestres tradicionais. Não foi possível, no entanto, adquirir equipamentos para a realização de *testbeds* e experimentos em campo. Desta forma, a demonstração do método proposto se deu por meio de simulação.
- O desenvolvimento de um novo simulador de rede usando o *software* MATLAB exigiu o estudo constante de sua linguagem de programação, funções, etc.
- A avaliação de desempenho envolveu 3 métodos de posicionamento e, pelo menos, 10 cenários diferentes. A fim de validar estatisticamente os resultados, cada par (método x cenário) foi executado pelo menos 50 vezes (usando sementes diferentes), o que gerou um grande volume de dados e demandou um consumo considerável de tempo para obter, tratar e analisar os resultados.

- 
- A criação e composição do modelo do sistema fim-a-fim, deste a caracterização dos componentes da rede, a caracterização do canal UAV-UAV, UAV-Solo, UAV-Macrocélula; mobilidade e aplicação dos usuários, até a automatização da execução dos cenários e do armazenamento e tratamento dos dados gerados.
  - A dificuldade de conciliar todos os aspectos que se referem ao desenvolvimento pleno da tese com os compromissos profissionais.
  - Todas as dificuldades do âmbito pessoal, especialmente no último ano do desenvolvimento desta tese, em meio às limitações e desafios impostos pela pandemia de COVID-19.

# Referências

- 3GPP. *3GPP TR 36.777: Technical specification group radio access network: study on enhanced LTE support for aerial vehicles Version 15.0.0*. [S.l.], 2017. Citado na página 12.
- 3GPP. *3GPP TR 38.913 V14.3.0 (2017-06): Study on scenarios and requirements for next generation access technologies*. [S.l.], 2017. Citado 3 vezes nas páginas 1, 2 e 6.
- 3GPP. *3GPP TR 21.915 V15.0.0 (2019-09): Release 15 Description*. [S.l.], 2019. Citado na página 5.
- 3GPP. *3GPP TS 22.261 version 15.7.0 Release 15: Service requirements for next generation new services and markets*. [S.l.], 2019. Citado na página 5.
- 3GPP. *3GPP TR 38.811 V15.3.0 (2020-07): Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks*. [S.l.], 2020. Citado 3 vezes nas páginas 1, 6 e 22.
- AGGARWAL, S.; KUMAR, N. Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges. *Computer Communications*, Elsevier, v. 149, p. 270–299, 2020. Citado na página 12.
- AGIWAL, M.; ROY, A.; SAXENA, N. Next generation 5g wireless networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 18, n. 3, p. 1617–1655, 2016. Citado na página 31.
- AKRAM, T. et al. Multicriteria uav base stations placement for disaster management. *IEEE Systems Journal*, IEEE, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 26, 31 e 48.
- AL-HOURANI, A.; KANDEEPAN, S.; LARDNER, S. Optimal lap altitude for maximum coverage. *IEEE Wireless Communications Letters*, IEEE, v. 3, n. 6, p. 569–572, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 29.
- ALI, M. A.; JAMALIPOUR, A. Uav placement and power allocation in uplink and downlink operations of cellular network. *IEEE Transactions on Communications*, IEEE, v. 68, n. 7, p. 4383–4393, 2020. Citado na página 31.
- ALIU, O. G. et al. A survey of self organisation in future cellular networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 15, n. 1, p. 336–361, 2012. Citado na página 34.
- ALIU, O. G.; MEHTA, M.; EVANS, B. G. A cellular automata approach towards self organisation in wireless cellular networks. In: VDE. *European Wireless 2013; 19th European Wireless Conference*. [S.l.], 2013. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 17.
- ALIU, O. G. et al. A new cellular-automata-based fractional frequency reuse scheme. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 64, n. 4, p. 1535–1547, 2014. Citado na página 15.
- ALQUDAH, Y. A. On the performance of cost 231 walfisch Ikegami model in deployed 3.5 ghz network. In: IEEE. *2013 The International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE)*. [S.l.], 2013. p. 524–527. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 56.

- ALZENAD, M.; EL-KEYI, A.; YANIKOMEROGLU, H. 3-d placement of an unmanned aerial vehicle base station for maximum coverage of users with different qos requirements. *IEEE Wireless Communications Letters*, IEEE, v. 7, n. 1, p. 38–41, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 29.
- ASGHAR, M. Z. et al. Assessment of deep learning methodology for self-organizing 5g networks. *Applied Sciences*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 15, p. 2975, 2019. Citado na página 34.
- BAI, Y.; CHEN, L. Hybrid spectrum arrangement and interference mitigation for coexistence between lte macrocellular and femtocell networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Springer, v. 2013, n. 1, p. 56, 2013. Citado na página 31.
- BERTRAN, E.; SÀNCHEZ-CERDÀ, A. On the tradeoff between electrical power consumption and flight performance in fixed-wing uav autopilots. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 65, n. 11, p. 8832–8840, 2016. Citado na página 13.
- BOR-YALINIZ, I.; SZYSZKOWICZ, S. S.; YANIKOMEROGLU, H. Environment-aware drone-base-station placements in modern metropolitans. *IEEE Wireless Communications Letters*, IEEE, v. 7, n. 3, p. 372–375, 2017. Citado na página 11.
- BOR-YALINIZ, R. I.; EL-KEYI, A.; YANIKOMEROGLU, H. Efficient 3-d placement of an aerial base station in next generation cellular networks. In: IEEE. *2016 IEEE international conference on communications (ICC)*. [S.l.], 2016. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 29.
- BOUCETTA, C. et al. Optimizing drone deployment for cellular communication coverage during crowded events. In: IEEE. *MILCOM 2019-2019 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*. [S.l.], 2019. p. 622–627. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 30.
- CARR, J. An introduction to genetic algorithms. *Senior Project*, v. 1, n. 40, p. 7, 2014. Citado na página 18.
- CHEN, T.; KAAFAR, M.; BORELI, R. The where and when of finding new friends: Analysis of a location-based social discovery network. In: *Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media*. [S.l.: s.n.], 2013. v. 7, n. 1. Citado na página 25.
- CHEN, Y.; FENG, W.; ZHENG, G. Optimum placement of uav as relays. *IEEE Communications Letters*, IEEE, v. 22, n. 2, p. 248–251, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- CHEN, Y.; GONZÁLEZ-PRELCIC, N.; HEATH, R. W. Collision-free uav navigation with a monocular camera using deep reinforcement learning. In: IEEE. *2020 IEEE 30th International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP)*. [S.l.], 2020. p. 1–6. Citado na página 36.
- CHOUDHURY, S.; SALOMAA, K.; AKL, S. G. Cellular automaton based motion planning algorithms for mobile sensor networks. In: SPRINGER. *International Conference on Theory and Practice of Natural Computing*. [S.l.], 2012. p. 108–120. Citado na página 42.

- CHOUDHURY, S.; SALOMAA, K.; AKL, S. G. A cellular automaton model for connectivity preserving deployment of mobile wireless sensors. In: IEEE. *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.], 2012. p. 6545–6549. Citado na página 42.
- CHOUDHURY, S.; SALOMAA, K.; AKL, S. G. Cellular automata and object monitoring in mobile wireless sensor networks. In: IEEE. *2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. [S.l.], 2015. p. 1344–1349. Citado na página 42.
- CISCO. *Cisco Visual Networking Index (VNI) Global and Americas/EMEAR Mobile Data Traffic Forecast, 2017–2022*. 2019. Disponível em: <[https://www.cisco.com/c/dam/m/en\\_us/network-intelligence/service-provider/digital-transformation/knowledge-network-webinars/pdfs/190320-mobility-ckn.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/m/en_us/network-intelligence/service-provider/digital-transformation/knowledge-network-webinars/pdfs/190320-mobility-ckn.pdf)>. Citado na página 1.
- CLAUSSEN, H. Performance of macro-and co-channel femtocells in a hierarchical cell structure. In: IEEE. *2007 IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. [S.l.], 2007. p. 1–5. Citado na página 31.
- CLAUSSEN, H. Co-channel operation of macro-and femtocells in a hierarchical cell structure. *International Journal of Wireless Information Networks*, Springer, v. 15, n. 3-4, p. 137–147, 2008. Citado na página 31.
- CUNHA, R. O. et al. Simulating large wireless sensor networks using cellular automata. In: IEEE. *38th Annual Simulation Symposium*. [S.l.], 2005. p. 323–330. Citado na página 15.
- ESPÍNOLA, M. et al. Contextual and hierarchical classification of satellite images based on cellular automata. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, IEEE, v. 53, n. 2, p. 795–809, 2014. Citado na página 15.
- FISHWICK, P. A. *Handbook of dynamic system modeling*. [S.l.]: CRC Press, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 9, 15, 16 e 17.
- GAO, S. *Bio-Inspired Computational Algorithms and Their Applications*. [S.l.]: BoD–Books on Demand, 2012. Citado na página 17.
- GOLBERG, D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. *Addion wesley*, v. 1989, n. 102, p. 36, 1989. Citado na página 20.
- GOLDSMITH, A. *Wireless communications*. [S.l.]: Cambridge university press, 2005. Citado na página 50.
- HAUERT, S. et al. Ant-based swarming with positionless micro air vehicles for communication relay. *Swarm Intelligence*, Springer, v. 2, n. 2-4, p. 167–188, 2008. Citado na página 45.
- HORNG, G.-J. Using cellular automata for parking recommendations in smart environments. *PLOS one*, Public Library of Science, v. 9, n. 8, p. e105973, 2014. Citado na página 15.
- HOSSEINALIPOUR, S.; RAHMATI, A.; DAI, H. Interference avoidance position planning in dual-hop and multi-hop uav relay networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, IEEE, v. 19, n. 11, p. 7033–7048, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 30.

- Hou, H.; Wang, L. Analysis on time-variant air-to-ground radio communication channel for rotary-wing uavs. In: *2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6. Citado na página 52.
- HU, Y. et al. Placement optimisation method for multi-uav relay communication. *IET Communications*, IET, v. 14, n. 6, p. 1005–1015, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 30.
- HUANG, H.; SAVKIN, A. V. A method for optimized deployment of unmanned aerial vehicles for maximum coverage and minimum interference in cellular networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 15, n. 5, p. 2638–2647, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 29.
- HYDHER, H. et al. Intelligent uav deployment for a disaster resilient wireless network. Preprints, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 31.
- HYTTIÄ, E.; VIRTAMO, J. Random waypoint mobility model in cellular networks. *Wireless Networks*, Springer, v. 13, n. 2, p. 177–188, 2007. Citado na página 56.
- ICAO. *Unmanned Aircraft Systems (UAS)*. [S.l.], 2011. Citado na página 7.
- IKEDA, P. A. Introdução aos algoritmos genéticos. 2009. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 21.
- JABER, M. et al. A distributed son-based user-centric backhaul provisioning scheme. *IEEE Access*, IEEE, v. 4, p. 2314–2330, 2016. Citado na página 50.
- KALANTARI, E. et al. Backhaul-aware robust 3d drone placement in 5g+ wireless networks. In: IEEE. *2017 IEEE international conference on communications workshops (ICC workshops)*. [S.l.], 2017. p. 109–114. Citado na página 24.
- KAVANAGH, S. What is enhanced mobile broadband (embb). URL: <https://5g.co.uk/guides/what-is-enhanced-mobile-broadband-embb>, 2019. Citado na página 1.
- Khawaja, W. et al. A survey of air-to-ground propagation channel modeling for unmanned aerial vehicles. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 21, n. 3, p. 2361–2391, 2019. Citado na página 52.
- KHUWAJA, A. A. et al. Optimum deployment of multiple uavs for coverage area maximization in the presence of co-channel interference. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 85203–85212, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 30.
- KLAINÉ, P. V. et al. Distributed drone base station positioning for emergency cellular networks using reinforcement learning. *Cognitive computation*, Springer, v. 10, n. 5, p. 790–804, 2018. Citado 7 vezes nas páginas 26, 30, 36, 47, 51, 54 e 57.
- KOUHDARAGH, V. et al. On the application of machine learning to the design of uav-based 5g radio access networks. *Electronics*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 4, p. 689, 2020. Citado na página 45.
- KURIBAYASHI, H. P. et al. Particle swarm-based cell range expansion for heterogeneous mobile networks. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 37021–37034, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 54.

- LAI, C.-C.; WANG, L.-C.; HAN, Z. The coverage overlapping problem of serving arbitrary crowds in 3d drone cellular networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, IEEE, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 31.
- LI, B.; FEI, Z.; ZHANG, Y. Uav communications for 5g and beyond: Recent advances and future trends. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 2241–2263, 2018. Citado na página 22.
- LI, B. et al. Secure uav communication networks over 5g. *IEEE Wireless Communications*, IEEE, v. 26, n. 5, p. 114–120, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.
- LINDEN, R. *Algoritmos genéticos (2a edição)*. [S.l.]: Brasport, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 20.
- LIU, G. et al. Efficient deployment of uavs for maximum wireless coverage using genetic algorithm. In: IEEE. *2018 IEEE 39th Sarnoff Symposium*. [S.l.], 2018. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 30.
- LOMBARDI, R. Microwave and millimetre-wave for 5g transport. *ETSI White Paper*, v. 25, 2018. Citado na página 57.
- LUKE, S. *Essentials of Metaheuristics*. second. [S.l.]: Lulu, 2013. Available for free at <http://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics/>. Citado na página 17.
- LYU, J.; ZENG, Y.; ZHANG, R. Uav-aided offloading for cellular hotspot. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, IEEE, v. 17, n. 6, p. 3988–4001, 2018. Citado na página 52.
- LYU, J. et al. Placement optimization of uav-mounted mobile base stations. *IEEE Communications Letters*, IEEE, v. 21, n. 3, p. 604–607, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 29.
- MEKIKIS, P.-V.; ANTONOPOULOS, A. Breaking the boundaries of aerial networks with charging stations. In: IEEE. *ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.], 2019. p. 1–6. Citado na página 45.
- MELOTTI, G. Aplicação de autômatos celulares em sistemas complexos: Um estudo de caso em espalhamento de epidemias. Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. Citado na página 14.
- MERWADAY, A.; GUVENC, I. Uav assisted heterogeneous networks for public safety communications. In: IEEE. *2015 IEEE wireless communications and networking conference workshops (WCNCW)*. [S.l.], 2015. p. 329–334. Citado na página 47.
- MESSOUS, M.-A.; SEDJELMACI, H.; SENOUCI, S.-M. Implementing an emerging mobility model for a fleet of uavs based on a fuzzy logic inference system. *Pervasive and Mobile Computing*, Elsevier, v. 42, p. 393–410, 2017. Citado na página 23.
- MITCHELL, M. Genetic algorithms: An overview. *Complexity*, Citeseer, v. 1, n. 1, p. 31–39, 1995. Citado na página 19.
- MITCHELL, M.; NEWMAN, M. Complex systems theory and evolution. *Encyclopedia of evolution*, Oxford, New York, NY, USA, v. 1, p. 1–5, 2002. Citado na página 14.

MOYSEN, J.; GIUPPONI, L. From 4g to 5g: Self-organized network management meets machine learning. *Computer Communications*, Elsevier, v. 129, p. 248–268, 2018. Citado na página 34.

MOZAFFARI, M. et al. Drone small cells in the clouds: Design, deployment and performance analysis. In: IEEE. *2015 IEEE global communications conference (GLOBECOM)*. [S.l.], 2015. p. 1–6. Citado 5 vezes nas páginas 24, 29, 49, 56 e 58.

MOZAFFARI, M. et al. A tutorial on uavs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems. *IEEE communications surveys & tutorials*, IEEE, v. 21, n. 3, p. 2334–2360, 2019. Citado na página 11.

NAYAK, D. R.; PATRA, P. K.; MAHAPATRA, A. A survey on two dimensional cellular automata and its application in image processing. *arXiv preprint arXiv:1407.7626*, 2014. Citado na página 16.

NEUMANN, J.; BURKS, A. W. et al. *Theory of self-reproducing automata*. [S.l.]: University of Illinois press Urbana, 1966. v. 1102024. Citado na página 15.

PEARCE, N.; MERLETTI, F. Complexity, simplicity, and epidemiology. *International journal of epidemiology*, Oxford University Press, v. 35, n. 3, p. 515–519, 2006. Citado na página 14.

RAHMAN, S. ur et al. Positioning of uavs for throughput maximization in software-defined disaster area uav communication networks. *Journal of Communications and Networks*, IEEE, v. 20, n. 5, p. 452–463, 2018. Citado na página 22.

RINALDI, F. et al. Non-terrestrial networks in 5g & beyond: A survey. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 165178–165200, 2020. Citado na página 22.

ROHDE, S.; PUTZKE, M.; WIETFELD, C. Ad hoc self-healing of ofdma networks using uav-based relays. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, v. 11, n. 7, p. 1893–1906, 2013. Citado na página 54.

RONDEAU, T. W.; BOSTIAN, C. W. *Artificial intelligence in wireless communications*. [S.l.]: Artech House, 2009. Citado na página 18.

SÁNCHEZ-GARCÍA, J.; REINA, D.; TORAL, S. A distributed pso-based exploration algorithm for a uav network assisting a disaster scenario. *Future Generation Computer Systems*, Elsevier, v. 90, p. 129–148, 2019. Citado 4 vezes nas páginas 23, 45, 48 e 52.

SERIES, M. Int vision–framework and overall objectives of the future development of int for 2020 and beyond. *Recommendation ITU*, v. 2083, 2015. Citado na página 1.

SHAKOOR, S. et al. Joint optimization of uav 3d placement and path loss factor for energy efficient maximal coverage. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, 2020. Citado 4 vezes nas páginas 13, 22, 25 e 30.

SHI, W. et al. Multiple drone-cell deployment analyses and optimization in drone assisted radio access networks. *IEEE Access*, IEEE, v. 6, p. 12518–12529, 2018. Citado na página 54.

- SHI, W. et al. Drone assisted vehicular networks: Architecture, challenges and opportunities. *IEEE Network*, IEEE, v. 32, n. 3, p. 130–137, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 10, 11 e 12.
- SKOROBOGATOV, G.; BARRADO, C.; SALAMÍ, E. Multiple uav systems: a survey. *Unmanned Systems*, World Scientific, v. 8, n. 02, p. 149–169, 2020. Citado na página 8.
- SONG, P. et al. Human behavior modeling for evacuation from classroom using cellular automata. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 98694–98701, 2019. Citado na página 15.
- TOMEU, A. J.; SALGUERO, A. G.; CAPEL, M. I. Speeding up tumor growth simulations using parallel programming and cellular automata. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 14, n. 11, p. 4611–4619, 2016. Citado na página 15.
- TONGUZ, O. K.; VIRIYASITAVAT, W.; BAI, F. Modeling urban traffic: a cellular automata approach. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 47, n. 5, p. 142–150, 2009. Citado na página 15.
- TSOMPANAS, M.-A. I. et al. Towards implementation of cellular automata in microbial fuel cells. *PloS one*, Public Library of Science San Francisco, CA USA, v. 12, n. 5, p. e0177528, 2017. Citado na página 15.
- ULLAH, H. et al. 5g communication: an overview of vehicle-to-everything, drones, and healthcare use-cases. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 37251–37268, 2019. Citado na página 36.
- VALIULAH, I.; MASOUROS, C. Multi-uav deployment for throughput maximization in the presence of co-channel interference. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, 2020. Citado na página 12.
- WATANABE, H. Development of wafer transfer simulator based on cellular automata. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, IEEE, v. 28, n. 3, p. 283–288, 2015. Citado na página 15.
- WOLFRAM, S. Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of modern physics*, APS, v. 55, n. 3, p. 601, 1983. Citado na página 15.
- WOLFRAM, S. Computation theory of cellular automata. *Communications in mathematical physics*, Springer, v. 96, n. 1, p. 15–57, 1984. Citado na página 15.
- WOLFRAM, S. *A new kind of science*. [S.l.]: Wolfram media Champaign, IL, 2002. v. 5. Citado na página 15.
- WOLFRAM, S. *Cellular automata and complexity: collected papers*. [S.l.]: CRC Press, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- ZENG, Y.; WU, Q.; ZHANG, R. Accessing from the sky: A tutorial on uav communications for 5g and beyond. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 107, n. 12, p. 2327–2375, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.
- ZENG, Y.; ZHANG, R.; LIM, T. J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 54, n. 5, p. 36–42, 2016. Citado na página 52.

- ZHAO, H. et al. Deployment algorithms for uav airborne networks toward on-demand coverage. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, IEEE, v. 36, n. 9, p. 2015–2031, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 57.
- ZHONG, X. et al. Joint optimization of relay deployment, channel allocation, and relay assignment for uavs-aided d2d networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, IEEE, v. 28, n. 2, p. 804–817, 2020. Citado 4 vezes nas páginas 23, 27, 28 e 30.
- ZHOU, F. et al. Capacity enhancement for hotspot area in 5g cellular networks using mmwave aerial base station. *IEEE Wireless Communications Letters*, IEEE, v. 8, n. 3, p. 677–680, 2019. Citado na página 31.