



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Alexssander Siqueira Lima

Algoritmos de Otimização de Rotas para Controle Remoto de UAVs usando a Rede 5G

Curitiba

2024

Alexssander Siqueira Lima

Algoritmos de Otimização de Rotas para Controle Remoto de UAVs usando a Rede 5G

Trabalho de graduação apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II (TE348) do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo E. Pellenz

**Curitiba
2024**

Agradecimentos

São muitos os agradecimentos que devo dedicar durante essa jornada. Pessoas as quais foram de fundamental importância para manter sempre júbilo ao enfrentar os desafios.

À minha companheira Kaoana, pelo apoio, zelo e motivação. Nunca conseguirei ressaltar o suficiente que seu companheirismo foi essencial durante a toda trajetória.

Ao meu pai Valdir, pelo auxílio ininterrupto, compreensão e parceria. E pela honra de estudar nas mesmas salas que outrora estudou, quarenta anos atrás.

À minha mãe, Eloisa, pela fé, motivação e incentivos. Agradeço por tentar sempre apoiar, sendo apoio este tanto material quanto imaterial.

Aos meus sobrinhos, Miguel e Daniel, pela compreensão que nem sempre eu podia brincar devido aos compromissos acadêmicos.

Aos meus sogros, Mazinho e Rose, pelas prosas, histórias e birras.

Aos meus amigos, Vinicius e Gabriel, pela motivação, inúmeras vezes contrário ao método ortodoxo.

E inumeros outros amigos e parentes, o qual devo citar alguns como Willian, Adriana, Kiara, Thaynara, Eduardo Caldart, Eduardo Henrique, Paulo, Thiago, Abreu Vitor e Gepeto. Aos professores, funcionários e colegas da UFPR que participaram da minha formação e aos pais e parentes próximos que auxiliaram no decorrer do curso.

Em especial ao Prof. Dr. Marcelo E. Pellenz pelo apoio dado durante o curso e durante o desenvolvimento do trabalho, estando sempre disponível para apresentar melhorias, além de sempre se disponibilizar para sanar qualquer dúvida e questionamento.

*At some point, everything's
gonna go south on you.
Everything's going to go south
and you're going to say, this is
it. This is how I end. Now you
can either accept that, or you
can get to work. That's all it is.
You just begin. You do the math.
You solve one problem... and
you solve the next one... and
then the next. And If you solve
enough problems, you get to
come home.*

Andy Weir, *The Martian*

Resumo

Este trabalho propõe um estudo de sistema de otimização de rotas para UAVs, veículos aéreos não tripulados, na cidade de Curitiba utilizando a infraestrutura fornecida pela rede móvel 5G no contexto de cidades inteligentes. Visando aproveitar a demanda por soluções tecnológicas, o trabalho propõe a utilização remota de UAVs além da linha de visão integrando dados de cobertura 5G e dados de georreferenciamento para planejar rotas otimizadas. Por meio da compilação dos dados da rede de cobertura das torres 5G em Curitiba junto a dados geográficos das construções obtidos do OpenStreetMap e como elas interferem na propagação, será obtido um modelo que representa a cobertura da transmissão da rede 5G em Curitiba por meio da construção de um modelo de propagação de sinal baseado em Ray Tracing. Com esse modelo que representa um gêmeo digital, foi construído um modelo computacional a partir da teoria de grafos para representar a conectividade da rede, o que possibilitou o uso de algoritmos clássicos de otimização de rotas. Para tal, foram avaliados os algoritmos de Dijkstra, Bellman-Ford e Floyd-Warshall. Devido a sua eficiência em grafos ponderados com valores positivos, foi selecionado o algoritmo de Dijkstra. Com o intuito de demonstrar a viabilidade do modelo proposto, foi realizada a comparação entre rotas otimizadas para o menor trajeto e o melhor sinal. Ao priorizar o melhor sinal, é garantido o aumento da segurança e confiabilidade da conexão às custas da eficiência energética. Para validar os resultados, foram utilizadas as ferramentas de simulação de código aberto QGroundControl e Gazebo. Em contextos de aplicações em cidades inteligentes, é possível concluir que o algoritmo proposto é eficaz principalmente em cenários que demandam grandes transmissões de dados, resposta rápida e confiabilidade da conexão. Trabalhos futuros podem explorar a validação prática em condições reais com intenção de comprovar o modelo sob influências de intempéries climáticas, e a otimização visando também a autonomia e os recursos energéticos.

Palavras-chave: *Cidades Inteligentes, Redes Móveis 5G, UAVs, Teoria de Grafos, Algoritmos de Otimização.*

Abstract

This work proposes a study of a route optimization system for UAVs in the city of Curitiba using the infrastructure made available by the 5G mobile network in the context of smart cities. With the intent to take advantage of the demand for technological solutions, the study suggests the remote use of UAVs beyond the line of sight by integrating 5G coverage data and georeferencing data to plan optimized routes. By compiling 5G network coverage data from cell sites in Curitiba with geographic data of buildings obtained from OpenStreetMap and analyzing how they interfere with signal propagation, a model representing the 5G network coverage in Curitiba will be developed through the construction of a signal propagation model based on ray tracing. Using this model, which acts as a digital twin, a computational model was built based on graph theory to represent network connectivity, enabling the use of classical route optimization algorithms. For this purpose, the Dijkstra, Bellman-Ford, and Floyd-Warshall algorithms were evaluated. Due to its efficiency in weighted graphs with positive values, the Dijkstra algorithm was selected. To demonstrate the feasibility of the proposed model, a comparison was made between optimized routes for the shortest path and the best signal. By prioritizing the best signal, the model ensures increased safety and reliability of the connection at the cost of energy efficiency. In order to validate the results, the open-source simulation tools QGroundControl and Gazebo were used. In the context of smart city applications, it is possible to conclude that the proposed algorithm is effective, especially in scenarios that demand large data transmissions, quick response times, and reliable connections. Future work may explore practical validation under real-world conditions to verify the model under the influence of adverse weather conditions, as well as optimization focused on autonomy and energy resources.

Key-words: *Smart Cities, Mobile Network 5G, UAVs, Graph Theory, Optimization Algorithms.*

Lista de ilustrações

Figura 1 – Drone de entregas da AMBEV	8
Figura 2 – Evolução dos usos das tecnologias de Celular no Brasil.	11
Figura 3 – Exemplo Dígrafo	15
Figura 4 – Exemplo Dígrafo para o algoritmo de Dijkstra.	17
Figura 5 – Exemplo Dígrafo para o algoritmo de Bellman-Ford.	18
Figura 6 – Exemplo Dígrafo para o algoritmo de Floyd-Warshall.	19
Figura 7 – Planejamento de Missão de Mapeamento Ambiental QGroundControl.	21
Figura 8 – Diagrama de Blocos da Arquitetura Proposta.	28
Figura 9 – Dados Obtidos da Anatel	30
Figura 10 – Mapa com Dados Geográficos	32
Figura 11 – Mapa para Exportação de Dados OSM.	33
Figura 12 – Mapa com Novos Limites.	34
Figura 13 – Mapa com Dados Geográficos e Antenas.	35
Figura 14 – Padrão de Diretividade da Radiação em 3D.	37
Figura 15 – Comparativo da menor distância física e seguindo o RSRP.	40
Figura 16 – Histograma da distância e do sinal médio dos trajetos.	40
Figura 17 – Exemplo de JSON com <i>Waypoints</i>	42
Figura 18 – Simulador de estação de controle de solo QGroundControl.	43
Figura 19 – Simulador de UAV e ambiente 3D Gazebo.	43
Figura 20 – Mapa de calor da relação logarítmica de potência absoluta Claro.	44
Figura 21 – Mapa de calor da relação logarítmica de potência absoluta Telefônica.	45
Figura 22 – Mapa de calor da relação logarítmica de potência absoluta Tim.	45
Figura 23 – Grid de Sinal da Operadora Tim, resolução de 100 pontos.	46
Figura 24 – Grid de Sinal da Operadora Claro, resolução de 100 pontos.	47
Figura 25 – Grid de Sinal da Operadora Telefônica, resolução de 100 pontos.	47
Figura 26 – Grafo construído dos Grids de Sinal da Claro de 20m, 40m, 60m e 80m.	48
Figura 27 – Comparativo de Caminhos Simulados.	49
Figura 28 – Histograma dos Caminhos Simulados Operadora Claro.	50
Figura 29 – Histograma dos Caminhos Simulados Operadora Tim.	50
Figura 30 – Histograma dos Caminhos Simulados Operadora Telefônica.	51
Figura 31 – Histograma dos Caminhos Simulados Todas Operadoras.	51
Figura 32 – Final da simulação do percurso de menor distância.	52
Figura 33 – Diagrama do Algoritmo de Rotas Otimizadas no cenário 5G.	53

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resumo de Evolução das Tecnologias Móveis.	11
Tabela 2 – Resumo de Tecnologias da Rede Móvel 5G.	13
Tabela 3 – Exemplo de iterações do Algoritmo de Dijkstra dado o grafo da Figura 4	17
Tabela 4 – Exemplo de iterações do algoritmo de Bellman-Ford dado o grafo da Figura 7.	19
Tabela 5 – Exemplo de matriz de distâncias do algoritmo de Floyd-Warshall dado o grafo da Figura 6.	20
Tabela 6 – Exemplo de mensagens trocadas entre o QGroundControl e o UAV . .	22
Tabela 7 – Resumo dos sensores GPS, IMU e LIDAR	23
Tabela 8 – Comparativo entre Artigos elencando principais tópicos.	27
Tabela 9 – Comparativo dos Algoritmos de Otimização de Rotas em Grafos. . . .	38
Tabela 10 – Comparativo de Coordenadas Geográficas das iterações.	39
Tabela 11 – Relação de unidades de transmissão.	45

Lista de abreviaturas e siglas

ONU	- Organização das Nações Unidas
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IoT	- Internet of Things
UAV	- Unmanned Aerial Vehicle
5G	- Quinta Geração de Redes Móveis
LTE	- Long-Term Evolution
C2	- Command and Control Infrastructure
RPA	- Remote Piloted Aircraft
RPS	- Remotely Piloted Station
BVLOS	- Beyond Visual Line of Sight
VLOS	- Visual Line of Sight
ANAC	- Agência Nacional de Aviação Civil
URLLC	- Ultra-Reliable Low Latency Communication
eMBB	- Enhanced Mobile Broadband
eMTC	- Enhanced Machine Type Communication
QoS	- Quality of Service
mmWave	- Millimeter Wave
3GPP	- 3rd Generation Partnership Project
VHF	- Very High Frequency
DMR	- Digital Mobile Radio
NR	- New Radio
CDMA	- Code Division Multiple Access
TDMA	- Time Division Multiple Access
GSM	- Global System for Mobile Communications

UMTS	- Universal Mobile Telecommunication System
WCDMA	- Wideband Code Division Multiple Access
HSPA	- High-Speed Packet Access
MIMO	- Multiple Input Multiple Output
WiMAX	- Worldwide Interoperability for Microwave Access
LTE-A	- Long-Term Evolution Advanced
RSRP	- Reference Signal Received Power
OSM	- OpenStreetMap
GPS	- Global Positioning System
IMU	- Inertial Measurement Unit
LIDAR	- Light Detection and Ranging
MAVLink	- Micro Air Vehicle Link
JSON	- JavaScript Object Notation

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo Geral	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Estrutura do Documento	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1	Smart Cities	4
2.1.1	Definição das Cidades Inteligentes	4
2.1.2	Serviços Providos pelas Cidades Inteligentes	4
2.1.3	Desafios das Cidades Inteligentes	5
2.2	UAVs nas Cidades Inteligentes	6
2.2.1	Oportunidades de Uso de UAVs nas Smart Cities	6
2.2.2	Desafios no Uso de UAVs nas Smart Cities	8
2.3	Controles Além da Linha de Visão do Operador	10
2.4	Fundamentos de Redes 5G	11
2.4.1	Faixas de Operação do 5G	13
2.5	Fundamentos de Grafos	14
2.5.1	Características dos Grafos	14
2.5.2	Problema do caminho mínimo	16
2.5.3	Algoritmo de Dijkstra	17
2.5.4	Algoritmo de Bellman-Ford	18
2.5.5	Algoritmo de Floyd-Warshall	19
2.6	QGroundControl	20
2.7	MAVLink	21
3	ESTADO DA ARTE	24
3.1	BVLOS	24
3.2	UAVs nas redes Móveis 5G	24
3.3	Otimização de Rotas por Aprendizado de Máquina	25
4	ARQUITETURA PROPOSTA	28
4.1	Coletar Dados de Transmissão da Anatel (Bloco 1)	28
4.2	Análise e Filtro de dados NR (Bloco 2)	29
4.3	Processamento dos Dados (Bloco 3)	31

4.4	Região de Interesse e Dados de Georreferenciamento (Bloco 4) . . .	31
4.5	Integração da Topologia da Rede 5G com os Dados Geográficos (Bloco 5)	32
4.6	Calculo da Cobertura do Sinal com Método de Propagação por Ray Tracing (Bloco 6)	35
4.7	Conversão do Sinal 5G em Matriz de Adjacência ponderando de acordo com o RSRP 5G (Bloco 7)	37
4.8	Análise e Filtro dos Algoritmos de Otimização (Bloco 8)	38
4.9	Implementação e Avaliação da Técnica de Otimização no Grafo Obtido (Bloco 9)	39
4.10	Integração à Protocolos de Comunicação Aberto e Padrão de UAVs (Bloco 10)	41
5	RESULTADOS	44
6	CONCLUSÃO	54
6.1	Considerações Gerais	54
6.2	Considerações Sobre os Objetivos Específicos	54
6.3	Sugestão de Trabalhos Futuros	55
	REFERÊNCIAS	56

1 Introdução

A questão da urbanização da população mundial e sustentabilidade global são desafios cada vez mais latentes no século XXI. De acordo com dados da Organização das Nações Unidas (ONU), 54% da população mundial vivia em áreas urbanas em 2014, e há projeção de que os moradores de espaços urbanos aumentem para 66% em 2050. (ONU, 2011). No Brasil, embora as primeiras cidades surgissem no período colonial, só a partir da segunda metade do século XX que houve a intensificação da urbanização, causados pelo êxodo rural decorrente modernização do campo e a industrialização, resultando que na década de 1970 mais da metade da população brasileira vivem na cidade. Segundo um estudo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) realizado em 2017, as áreas consideradas urbanas no Brasil representam menos de 1% do território nacional e concentram 160 milhões de pessoas, ou seja, 84,3% da população brasileira. (REYNOL, 2019).

O crescimento acelerado das cidades e seu consumo desproporcional de recursos físicos e sociais são insustentáveis, causando problemas ecológicos e ambientais, transformando-nas em espaços pouco auxiliados pelas políticas públicas, vítimas de infraestrutura limitada e planejamento ineficiente. Uma das alternativas estudadas que pode auxiliar nas ineficiências abordadas no parágrafo é o conceito de Cidades Inteligentes. A tecnologia é a principal fonte propulsora para a construção de espaços urbanos sustentáveis, diretamente ligado à urbanização, mobilidade, gestão de resíduos sólidos, planejamento urbano, inclusão social e promoção dos direitos humanos. É uma cidade que integra investimentos em capital humano e social junto a modernas infraestruturas tecnológicas, com uma gestão sábia dos recursos naturais por meio de uma governança participativa. (CARAGLIU; BO; NIJKAMP, 2011)

Num cenário de cidade inteligente, muitos dos objetos físicos podem ser considerados também como inteligentes, devido a propriedade de processamento próprio, computação e comunicação entre eles. Essa evolução da infraestrutura urbana permite a coleta de grandes volumes de dados dos recursos pertinentes a sociedade, como eletricidade, consumo de água, qualidade do ar, mobilidade urbana, possibilitando oportunidade de melhorias na administração pública. Com esses dados, é passível de se implementar técnicas de análise de dados e aprendizado de máquina para prover o desenvolvimento urbano, evitando problemas como poluição, pandemias, trânsito e violência. A transformação de qualquer cidade em uma *Smart City* habilitará o uso de tecnologias como *IoT* e *Cloud Computing*, possibilitando a ampla utilização de veículos aéreos não tripulados (UAV).

Nesse contexto, esse trabalho procurou analisar a inserção do conceito de UAVs no contexto Smart Cities, usufruindo das vantagens tecnológicas para atingir novos patamares de utilização dos UAVs. Foi estudada a necessidade de desatrelar a limitação dos UAVs

serem controlados até o limite visual do piloto, operado de uma base estática no solo, possibilitado ao fazer uso da tecnologia de rede 5G, o que assegura a comunicação do piloto remoto com a máquina, garantindo uma latência de poucos milissegundos e probabilidade de erro baixa.

1.1 Motivação

Este projeto foi motivado com o intuito de viabilizar, desenvolver e incentivar a implementação de UAVs no contexto de cidades inteligentes, utilizando a rede 5G para aplicações de UAVs em setores comerciais, segurança e infraestrutura. Com o intuito de agregar valor a utilização de UAVs, além de otimizar rotas e possibilitar a melhora de processos de entregas, segurança e monitoramento, podendo ser utilizado como base para construção de projetos com maior complexidade e diferentes regras de negócio.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar algoritmos otimizados para navegação de UAVs no contexto da cidade de Curitiba.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Mapear oportunidades de aplicações de cidades inteligentes que requerem UAVs com controle BLOS.
2. Identificar, analisar e modelar a rede de cobertura real das torres 5G em Curitiba e região Metropolitana.
3. Avaliar algoritmos de otimização de rotas para garantir qualidade da comunicação dos UAVs.
4. Propor estratégias de navegação segura para UAVs através da rede 5G.
5. Fomentar soluções para novos serviços em *Smart Cities* com suporte de UAVs.

1.3 Estrutura do Documento

A estrutura deste trabalho é constituída em: introdução sobre o assunto no Capítulo 1, o Capítulo 2 consiste em uma revisão da literatura nas diferentes áreas relacionadas, como a explicação das definições, desafios e protocolos utilizados. No Capítulo 3, é apresentada uma breve revisão do estado da arte, dissertando sobre artigos que fundamentam sobre o tema proposto. Em sequência é discutido no Capítulo 4 a arquitetura proposta, que embasa nossas escolhas para coleta de dados, informações e caminhos de simulações. O Capítulo 5 apresenta os resultados para as abordagens de modelagem e dos ambientes testados. O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo são abordadas pesquisas para soluções cidades inteligentes, diferentes definições do uso do protocolo de comunicação e processos utilizados dentro deste trabalho de conclusão de curso. Além disso, serão contemplados diferentes modelos e sistemas de localização utilizados em aplicações comerciais e industriais.

2.1 Smart Cities

2.1.1 Definição das Cidades Inteligentes

A definição de cidades inteligentes é algo amplo, pois ao pesquisá-las na literatura científica e nos relatórios técnicos é possível de observar diversos termos empregados em contextos similares, tais como: cidades cabeadas (*wired cities*), cidades do conhecimento (*knowledge cities*), cidades inteligentes (*intelligent cities*), cidades digitais (*digital cities*), cidades verdes (*green cities*) entre outros termos (VARGAS, 2024). Estas cidades usualmente associam mudanças políticas, econômicas e socioculturais às transformações viabilizadas pela tecnologia da informação e comunicação. (HOLLANDS, 2008).

O conceito melhor aplicado no contexto desse trabalho é o de cidade inteligente se trata de novas tecnologias e suas aplicações no contexto urbano (KUIKKANIEMI et al., 2011), onde se utiliza diversos tipos de sensores eletrônicos, tecnologias de informação e comunicação (TIC) para a coleta e retenção de dados. (CUNHA et al., 2016) Com o propósito de criar um ambiente sustentável e eficiente, os dados adquiridos são utilizados para melhorar a qualidade de vida dos cidadãos através do gerenciamento eficiente de recursos e serviços, e também através da integração da tecnologia avançada em diversas áreas tais quais o transporte, geração e distribuição de energia, infraestrutura, segurança e serviços públicos. (MEDIUM, 2023)

2.1.2 Serviços Providos pelas Cidades Inteligentes

1. **Infraestrutura de Tecnologia de Informação e Comunicação:** Para possibilitar a coleta e análise de informações em tempo real, é necessário redes de comunicação de alta velocidade, sensores integrados no padrão IoT (Internet das Coisas) e plataforma de gestão e retenção de dados.
2. **Energia Inteligente:** Modelo que envolve todo o processo de geração, transmissão e distribuição de energia, na qual é otimizado o controle e operacionalidade através de dispositivos inteligentes de modo a fornecer energia de maneira eficiente aos

diversos pontos consumidores, recolhendo dados e informações em todas as etapas proporcionando transparência e aumento da confiabilidade.

3. **Mobilidade inteligente:** Otimização da logística e de transportes urbanos embasado nas condições do tráfego e consumo energético. Gerindo e apresentando informações dinâmicas com diferentes meios de comunicação aos passageiros e condutores, com intenção de melhorar a eficiência do transporte. Garantir a sustentabilidade aos transportes públicos através de combustíveis menos poluentes.
4. **Gestão de Resíduos e Recursos:** Coleta e reciclagem eficiente de lixo e gestão de recursos hídricos tanto no fornecimento quanto no reuso.
5. **Segurança e Vigilância:** Tecnologias de monitoramento e de vigilância com o propósito de garantir a segurança pública.
6. **Saúde e Bem-Estar:** Serviços de telemedicina para prevenir, diagnosticar e disponibilizar a assistência médica, monitoramento remoto de pacientes. Oferecer a todos os cidadãos o acesso a um sistema de saúde eficiente, caracterizado por instalações físicas e serviços adequados.
7. **Governo Eletrônico:** Plataformas eletrônicas interativas que permitem uma governança mais transparente e participativa através do envolvimento dos cidadãos em questões governamentais.

Todos os elementos se interagem, o que proporciona uma visão futurística na qual a tecnologia é utilizada para criar sociedades mais eficientes, sustentáveis e habitáveis, trazendo benefícios a todo o ecossistema urbano. (PESSOA, 2024)

2.1.3 Desafios das Cidades Inteligentes

- **Conectividade:** A captura e retenção de dados só são capazes se for fornecido uma infraestrutura capaz de prover cobertura de sinal com qualidade, com conexão adequada para os sensores distribuídos na região urbana. Caso contrário, não há garantia na qualidade dos dados fornecidos, podendo haver oscilação do serviço comprometendo a eficiência dos sensores.
- **Padronização dos dados:** Podendo impactar na acurácia caso não estejam em uma mesma escala, dados provindos de diferentes fontes podem causar erros na interpretação, acarretando ações erradas.
- **Governança de Dados:** Com o fluxo intenso de dados, se faz necessário de órgãos ou empresas que manipulem e tratem os dados de maneira ética e eficaz, tomando cuidados especiais por muitas vezes se tratar da privacidade dos cidadãos e seus direitos de liberdade.

2.2 UAVs nas Cidades Inteligentes

Foi observado que o uso dos UAVs cresceu exponencialmente no contexto de smart cities devido à capacidade de coletar dados de forma eficiente e versátil (KHALIFA; NOORA, 2023). Popularmente conhecidos como drones, a arquitetura de um UAV consiste de um sistema de controle, que é o sistema principal que rege o funcionamento dos outros sistemas, sistema de monitoramento, sistema de processamento e o sistema de pouso. Embora o mercado de UAVs ainda está se desenvolvendo e sendo incorporado a novas atividades, o custo e a complexidade da construção e interação dos elementos da arquitetura de UAV ainda é um fator inviabilizante para muitas das aplicações civis.(UN-HABITAT, 2024b)

A principal vantagem dos veículos aéreos não tripulados em relação aos veículos tripulados é a facilidade no uso, devido a simplicidade no ato de decolar, se deslocar e pousar. (SCIENCE, 2023) A versatilidade, eficiência e capacidade de coleta de dados em tempo real estimulam o desenvolvimento de cidades inteligentes.(DRONELIFE, 2024) Em um espaço urbano cada vez mais complexo, a flexibilidade em executar tarefas difíceis e suporte para captação de imagens de alta resolução e autonomia de voo são os principais fatores que incentivam o ampliado uso dos UAVs como recursos em cidades inteligentes, gerando diversas oportunidades que são extremamente benéficas para o desenvolvimento e crescimento econômico. (REPLY, 2024)

2.2.1 Oportunidades de Uso de UAVs nas Smart Cities

1. **Topografia Geoespacial:** Uma das novas tendências das aplicações de veículos aéreos não tripulados dentro do contexto de cidades inteligentes, se beneficia da confiabilidade provinda do design de alguns UAVs para integrar sensores para captar dados geoespaciais, da topologia terrestre e do sistema de informação geográfica (GIS), que são responsáveis por analisar, gerenciar e representar informações geográfica.
2. **Controle de Segurança Civil:** Ao integrar os drones com protocolos de comunicação em tempo real é possível a transmissão de vídeo ao vivo permitem a distribuição de informações aos departamentos de polícia e de bombeiros em tempo real para uma resposta rápida aos acidentes e incidentes, possibilitando alterar a promoção de segurança pública de reativa para proativa, diminuindo custos e aumentando a eficiência de operações.
3. **Serviços de entrega e retirada:** Incorporando uma estrutura capaz de transportar encomendas, já há o uso desse serviço por diversas empresas de entrega. Realizando a viagem entre centros de distribuição locais, os UAVs se deslocam entre *droneport* (área para pouso e decolagem de drones) de diferentes regiões, onde o drone realizará

o pouso e desacoplamento da mercadoria, a qual será retirada por um colaborador, o qual irá direcionar a encomenda ao destino, conforme explicitado na Imagem 1.

4. **Controle e Monitoramento de Desastres Naturais:** Em situações de desastres como incêndios, enchentes e terremotos, os UAVs auxiliam autoridades no controle de situações de emergência com eficácia. Responsáveis por analisar a situação adequadamente de um ponto inatingível por meios comuns aos humanos, ajudam a atingir novos patamares de eficiência ao lidar com desastres naturais.
5. **Manejo Ambiental:** Assim como na questão dos serviços de entregas, os UAVs podem substituir os meios comuns de fertilização das culturas, sendo mais eficiente por utilizar sensores que captam e analisam a quantidade ótima do uso das substâncias e do crescimento das plantas, otimizando a utilização dos recursos hídricos e minimizando os danos ambientais. Esse uso, embora comumente associado ao setor agrícola, é também amplamente utilizado no manejo de áreas ambientais dentro de centros urbanos, como parques, jardins e hortas comunitárias, que exigem cuidados tão dinâmicos como grandes regiões agrícolas.
6. **Processamento Big Data:** Uma das preposições das cidades inteligentes é o grande fluxo e variedade de dados que são obtidos da área urbana, e o processamento adequado requerem tecnologias diferentes como:
 - a) Integração com Sistemas de Informação Geográfica.
 - b) Processamento de dados de séries temporais.
 - c) Ampla utilização da estrutura de equipamentos.
 - d) Combinação de modelos e simulações.

A integração de UAVs com as necessidades citadas podem ser obtidas ou ao menos facilitadas graças à facilidade, velocidade e precisão no compartilhamento de dados. (GSMA, 2024)

Desta maneira, o impacto positivo dos UAVs não são notados apenas na eficiência operacional do espaço urbano, mas também para questões socioambientais, como a sustentabilidade e melhoria da qualidade de vida da população. (UN-HABITAT, 2024a)

Figura 1 – Drone de entregas da AMBEV



Fonte: AMBEV, 2021

2.2.2 Desafios no Uso de UAVs nas Smart Cities

1. **Ética e Privacidade:** Segundo a Lei nº 13.690/2018 (TEMER, 2018), que estabelece as diretrizes para a política de segurança pública e defesa social no Brasil, o uso de drones deve ser feito de forma a respeitar os direitos fundamentais dos cidadãos, em especial o direito à privacidade e à intimidade. Mesmo em espaços públicos, o cidadão tem direito à privacidade, e seu consentimento deve ser obtido para a coleta de dados pessoais, que segundo a Lei Geral de Proteção de Dados, esses dados só podem ser coletados e tratados para finalidades específicas e legítimas, além de serem armazenados de forma segura e confidencial. O maior desafio a necessidade do tratamento especial na aquisição de dados para não ferir os direitos primordiais dos cidadãos, adotando medidas de anonimidade ou expurgo dos dados confidenciais.
2. **Custos:** A complexidade para usos específicos, construção de lugares de pouso e decolagem, capacitação de profissionais para o uso adequado e integração de sistemas são os fatores que elevam os custos para especificação e construções de UAVs que funcionam adequadamente no contexto que são inseridos.
3. **Licenciamento e Legislação:** A legislação e fiscalização de UAVs no Brasil é realizado pela ANAC, Agência Nacional de Aviação Civil, a qual não permite o uso acima de 120 metros de altura, próximo a aeroportos ou helipontos, em regiões com aglomeração de pessoas e sempre no raio de visão do operador, pontos que podem inviabilizar alguns usos propostos de UAVs em cidades inteligentes.
4. **MiddleWare adaptáveis:** *MiddleWare* é a camada oculta de tradução, que permite a comunicação e o gerenciamento de dados para aplicativos e sistemas distribuídos.

Necessários para a operação eficaz e sem interrupções bruscas, é um desafio desenvolver *middlewares* adaptáveis o suficiente ao implementar muitos elementos integrados ao drone, como câmeras e módulos de comunicação, e que seja possível resgatar os dados do sensor ou a imagem gerada em tempo real.

5. **Sistemas à prova de falhas:** Para garantir a segurança no caso de eventos de falha em operação, perda de todas as comunicações entre o drone e o centro de comunicações, com intuito de prevenir acidentes e que seja capaz de tomar ações evasivas se necessário.

2.3 Controles Além da Linha de Visão do Operador

Os voos BVLOS (*Beyond Visual Line of Sight*) são o próximo passo para o controle de UAVs para que atinjam a sua máxima eficiência em diversos segmentos da sociedade. Ao executarem sua função sem que o piloto mantenha contato visual com a aeronave ou sem a necessidade de observadores e operadores auxiliares, podem alcançar longas distâncias de forma controlada, segura e eficiente. ((FAA), 2023) É um ganho de eficiência e otimização quando comparada ao voo VLOS (*Visual Line of Sight*). Como voam mais longe, os drones coletam mais informações com menos decolagens e pousos, aumentando a relação custo-benefício, especialmente quando executam as mesmas tarefas que comumente seriam realizadas por um avião ou helicóptero.

Além disso, é demandado uma carga menor de intervenção humano, graças a característica de projeto, engenharia e automações de seguranças implementadas nos drones, tais como uma rede de comunicação confiável para enlace C2(Comunicação e Controle) entre RPA (drone) e RPS (estação de pilotagem remota). ((EASA), 2023) Para utilização nesse modo, as rotas são previamente programadas no sistema e acompanhadas em tempo real por um piloto ou equipe de solo, que se utiliza da telemetria para monitoração em tempo real ao longo de toda operação. Caso necessário, um operador pode assumir o controle da aeronave ou disparar ações de segurança automatizadas, como finalizar a execução do voo ou retorno para a base do drone. Essas características otimizam a utilização dos drones em alguns segmentos. Em operações de obtenção de dados topográficos, delivery de produtos em geral, inspeções em linhas de transmissão ou até em missões de busca e resgate, é possível adquirir mais informações sendo restrito somente a capacidade de voo do UAV, ao invés do alcance humano.

No entanto, o modo de operação do drone em BVLOS não é algo passível de ser executado livremente, pois é compulsório que fabricantes e operadores sigam a certificação específica junto a ANAC, que regulariza e legisla a operação de drones no Brasil. O Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial nº 94E, de 3 de abril de 2023, especifica as regras de operação de drones no país, impondo limites ao voo dos equipamentos fora da linha de visão do piloto. Para operação BVLOS no Brasil, é necessário que:

1. Apresentar informações e alertas relevantes sobre a condição da aeronave para o piloto remoto.
2. Possuir um sistema de navegação com desempenho e confiabilidade suficientes para garantir a segurança da operação.
3. Possuir capacidade de recuperação de emergências.
4. Possuir um sistema adequado de iluminação da aeronave.

2.4 Fundamentos de Redes 5G

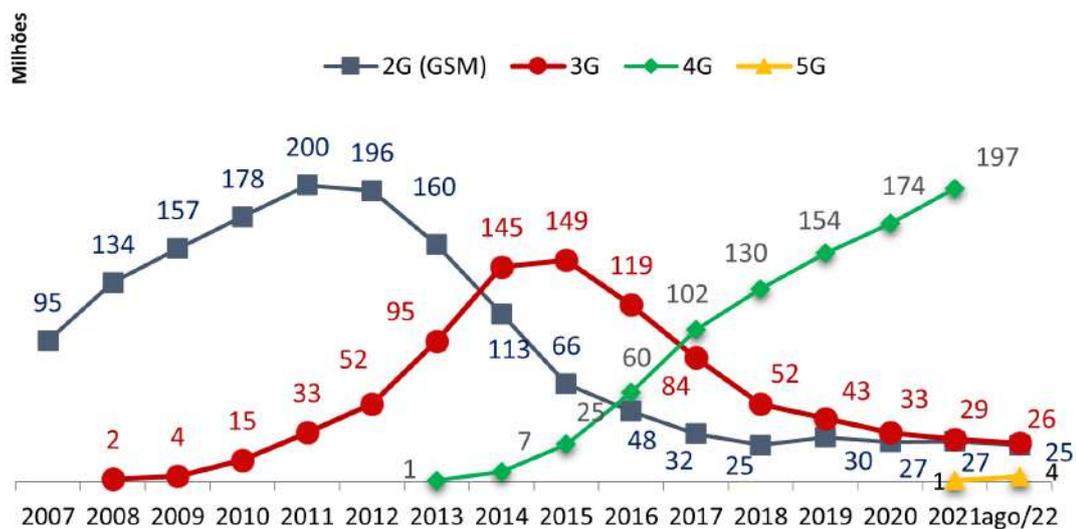
O conjunto de dispositivos portáteis inteligentes com acesso à banda larga está cada vez maior e junto com o crescimento de aplicativos que consomem muito dessa banda larga já está ultrapassando os limites de sistema de celulares (TEHRANI; UYSAL; YANIKOMEROGLU, 2014). Sendo assim, a próxima geração propõe suprir a necessidade de redes mais rápidas e de maior capacidade. No Brasil um marco na utilização de celulares no Brasil foi em 2014, graças a copa do mundo sediada no Brasil, houve um intenso incentivo para a implementação da infraestrutura capaz de proporcionar redes 4G no território nacional, conforme é possível de verificar na figura 2. Aproximadamente a cada 10 anos surge uma nova geração de sistema de celulares, sendo a penúltima implementação em 2011 com o sistema 4G. (TECNOBLOG, 2023)

Tabela 1 – Resumo de Evolução das Tecnologias Móveis.

Geração	Ano	Tecnologia Implementada
1G	1981	Conectividade móvel com serviço de voz
2G	1992	Utilização de sistemas digitais e envio de mensagens
3G	2001	Comunicação otimizada, conectividade mais rápida
4G	2011	Sistema de comunicação com alta capacidade de transmissão

Fonte: Adaptado de (DANGE et al., 2021)

Figura 2 – Evolução dos usos das tecnologias de Celular no Brasil.



Fonte: Teleco, 2024.

A quinta geração é o pilar da transformação digital graças as melhorias nas antigas redes móveis, que é responsável por implementar três novos serviços para os usuários.(ROCHOL, 2018)

- eMBB: Uma das principais categorias de uso que foram desenvolvidas e definidas para o uso das redes 5G, a banda larga móvel aprimorada (*Enhanced Mobile Broadband*), é focada em ofertar velocidades de transmissão de dados mais altas, estabelecer uma maior capacidade de rede e possibilitar ao usuário o acesso a uma banda larga móvel melhorada. (SOHAIB et al., 2023). Sendo uma evolução direta do 4G LTE, apresenta melhorias nas capacidade de banda larga móvel, por ser projetado para atender as demandas de conectividade e consumo de dados em dispositivos móveis.

Projetado para atender especificações na utilização da transmissão de vídeos em altas resoluções, realidades virtuais e aumentadas, tem seu uso otimizado quando há necessidade de conectividade em áreas densamente povoadas, por oferecer altas velocidades de download e upload e a capacidade de suportar muitos usuários simultaneamente. Há um custo energético alto em relação às demais tecnologias de conexões, possuindo um tempo de resposta entre 10 e 100 ms.

- eMTC: Evolução direta da tecnologia implementada nas redes móveis 4G LTE-M, a evolução de longo prazo para máquinas, (*Long Term Evolution for Machines*), tem como principal foco implementar a comunicação entre máquinas e dispositivos da Internet das Coisas, dispositivos estes que requerem baixa largura de banda, menor consumo energético e conectividade constante e confiável, reduzindo os custos energéticos de conexão. É operado com uma largura de banda de até 1,4 MHz, o que otimiza para aplicações que necessitam maior capacidade de transmissão de dados. Uma das principais características é a possibilidade de locomoção dos dispositivos conectados a essa tecnologia, sendo eficaz para rastreamento de veículos e outros ativos em movimentos, que necessitam também de transmissão de dados em tempo real. É capaz de suportar inúmeros dispositivos em altas áreas de cobertura, com o custo de uma largura de banda limitada, adequada para pequenos pacotes de dados.
- URLLC: A comunicação de ultra confiabilidade e baixa latência, onde o principal foco é a confiabilidade e a latência de menos de 1 milissegundo. Sendo desenvolvida e aplicada em situações onde atrasos ou falhas podem gerar consequências graves, preza pro garantir a comunicação em tempo real, como casos de controle remoto de máquinas ou veículos autônomos. Esse estilo de comunicação permite a técnica do Fatiamento de Rede (*Network Slicing*), onde partes da rede sejam configuradas para requisitos específicos, priorizando a baixa latência e alta confiabilidade, reduzindo a necessidade de retransmissões. Uma das técnicas utilizadas é a combinação de diferentes bandas de frequência, de modo a oferecer maior largura de banda e minimizar variações do desempenho.

É uma tecnologia que consome muita energia para manter a comunicação constante a custas de velocidade, sendo também otimizada para poucos dispositivos simultaneamente devido a necessidade de investimento em infraestrutura.

As comparações entre as tecnologias 5G foram sumarizadas na tabela 2.

Tabela 2 – Resumo de Tecnologias da Rede Móvel 5G.

	eMBB	eMTC	URLLC
Objetivo principal	Alta velocidade e capacidade de rede	IoT	Real Time
Velocidade de dados	Muito alta	Baixa	Moderada
Latência	Moderada	Alta	Muito baixa
Confiabilidade	Alta	Moderada	Muito alta
Número de dispositivos	Milhares por km ²	Milhões por km ²	Limitado
Consumo de energia	Alto	Muito baixo	Moderado
Casos de uso	Streaming VR/AR	Sensores IoT Wearables	Carros autônomos Cirurgias remotas
Cobertura	Download rápido	Rastreamento	Controle industrial
	Moderada	Alta	Limitada

Fonte: Adaptado de (DANGE et al., 2021).

Problemas que impossibilitariam a utilização de UAVs no modo BVLOS, como taxa de transferência baixa, perdas de pacote, vulnerabilidade a interferência são remediados com as características de projeto da tecnologia 5G, visto que é necessário uma latência de poucos milissegundos e uma probabilidade de erro menor de 10^{-3} , requisitos garantidos pela URLLC.

2.4.1 Faixas de Operação do 5G

As faixas de frequência utilizadas para operação do 5G são divididas em faixa baixa, média e alta. Diferenciadas pelo alcance, capacidade e velocidade, garantem que a tecnologia 5G possa atender uma variedade de situações e usos. (SHAIBU et al., 2023) Abaixo estão descritas as faixas de operação da rede móvel 5G.

- **Faixa Baixa:** Sendo utilizado nas faixas de 600 MHz, 700 MHz e 800 MHz, estipulando um limite de até 1 GHz, possuem maior alcance, corroborando para cobrir uma área mais ampla e facilitando a infiltração em obstáculos e estruturas. Embora ofereça velocidades mais rápidas que a tecnologia antecessora 4G, é a menor velocidade dentre as faixas do 5G, sendo ótimas para áreas suburbanas e rurais, onde é priorizado uma cobertura ampla acima da velocidade. No Brasil, a frequência de 700 MHz é utilizada por ser ideal na cobertura ampla e de áreas rurais.
- **Faixa Média:** Operando entre as frequências de 1 GHz e 6 GHz, como exemplo as faixas de 2,5 GHz, 3,5 GHz e 4,9 GHz, utilizam uma combinação de área de cobertura e capacidade, ofertando velocidades significativamente maiores que a faixa baixa, onde é possível alcançar velocidade de até 1 Gbps. É utilizado majoritariamente em áreas urbanas, onde é necessário um equilíbrio entre área de cobertura e desempenho,

sendo a faixa de 3,5 GHz uma das mais utilizadas mundialmente, considerada a faixa principal para implementação inicial da tecnologia móvel 5G. No território nacional, é amplamente utilizado as faixas de 2,3 GHz, a qual oferece uma proporção adequada entre alcance e capacidade de dados, e 3,5 GHz que é focada em alta velocidade e baixa latência.

- **Faixa Alta:** Capaz de oferecer velocidades superiores a 10 Gbps, o que permite redes com vários dispositivos, e aplicações de realidade virtual, são operadas em faixas de frequência acima de 24 GHz. São ondas milimétricas que possuem alcance limitado, podendo facilmente serem bloqueados por obstáculos inerentes a vida urbana, até mesmo intempéries climáticas como uma chuva forte. Tem seu uso otimizado em locais de alta densidade de pessoas, como aeroportos, estádios e espaços internos, por possuírem limites geográficos reduzidos. No Brasil, a faixa de 26 GHz está em fase inicial de implementação. (DANGE et al., 2021).

2.5 Fundamentos de Grafos

A Teoria de Grafos é amplamente infundida e aplicada, a qual é utilizada para resolver e modelar problemas complexos, analisando relações entre objetos, otimizando situações e auxiliando a entender estruturas e padrões. É estruturada analisando relações denotadas por $G(V, E)$, onde V é um conjunto não vazio de elementos denominados de vértices ou nós, e E corresponde a arestas, que constituem num subconjunto de pares não ordenados de V . (WILSON, 1998)

$$G(V, E) \tag{2.1}$$

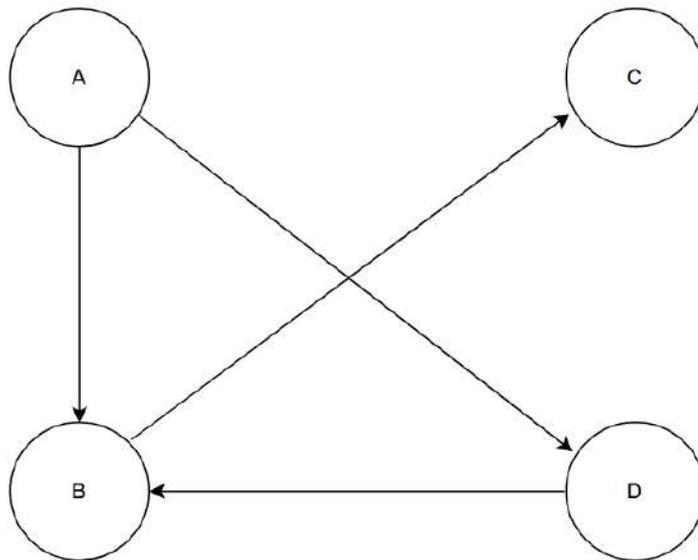
2.5.1 Características dos Grafos

1. **Direção:** Sendo o principal atributo na hora de classificar os grafos, é dividido em:
 - a) **Grafos Direcionados:** também denominados como Dígrafos, são construídos de uma maneira em que:
 - um conjunto V de vértices não nulo;
 - um conjunto E de arestas;
 - mapas $s, t : E \rightarrow V$, onde $s(e)$ é a fonte e $t(e)$ é o alvo da aresta direcionada;
 - b) **Grafos Não Direcionados:** representados só como grafos, são estruturados por:
 - um conjunto V de vértices não nulo;
 - um conjunto E de arestas;

- uma função $w : E \rightarrow P(V)$ que associa a cada aresta um subconjunto de dois ou de um elemento de V , interpretado como os pontos terminais da aresta;
2. Ponderação: quando segrega os grafos por possuir ou não um custo entre dois vértices.
 3. Conectividade: diferenciando um grafo se todos os pontos estão conectados, representando um grafo conexo, ou se existem subgrafos desconexos, mostrando grafos não conexos.

O Grafo pode ser representado por um diagrama no qual cada círculo representa um vértice e para cada aresta é desenhado um arco conectando as extremidades, podendo representar um dígrafo caso haja uma representação de sentido no arco ou um grafo não direcionado se não houver representação do sentido, tal qual representado na Figura 3.

Figura 3 – Exemplo Dígrafo



Fonte: Adaptada pelo Autor, 2024.

O mesmo grafo da Figura 3 pode ser representados algebricamente pelo conjunto de seus vértices e arestas, tais quais nas equações 2.2 e 2.3.

$$V = \{A, B, C, D\}; \quad (2.2)$$

$$E = \{\{A, B\}, \{A, D\}, \{B, C\}, \{D, B\}\}; \quad (2.3)$$

É possível representar um grafo por uma matriz de adjacência de um grafo, na qual é construído uma matriz de um grafo G com n vértices, na qual é denotada a matriz A conforme o sistema de equações a seguir:

$$\begin{cases} A[i][j] \neq 0, \text{ caso haja caminho entre } A[i] \text{ e } A[j] \\ A[i][j] = 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$$

Passível de construir a matriz conforme a matriz a seguir.

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz adjacente ao grafo da Figura 3

2.5.2 Problema do caminho mínimo

Uma das aplicações do teorema de grafos, o Problema do Caminho Mínimo é um problema de otimização que busca encontrar o caminho mais curto entre dois vértices em um grafo. É um algoritmo de procura, cuja aplicação não se rende somente a achar o menor caminho em problemas geográficos, mas também em localizar o caminho mais confiável, tais como em redes de comunicações. Pode ser dividido em cinco tipos, de acordo com o nó de destino e as características do percurso:

- Caminho mínimo entre dois nós, onde se determina o nó de início e fim desejando conhecer o menor caminho entre eles;
- Caminho mínimo que contemple todos os nós, no qual se deseja um caminho que passe por todos os nós, exemplo clássico do problema caixeiro-viajante;
- Caminho mínimo n , onde se é dado outras soluções para um trajeto entre o nó de início e fim além da otimizada;
- Caminho mínimo em tempo real, em que agrega condições estocásticas, construindo cadeias de Markov;
- Caminho mínimo em um determinado caminho, no qual restringe o grafo em subgrafos desejados.

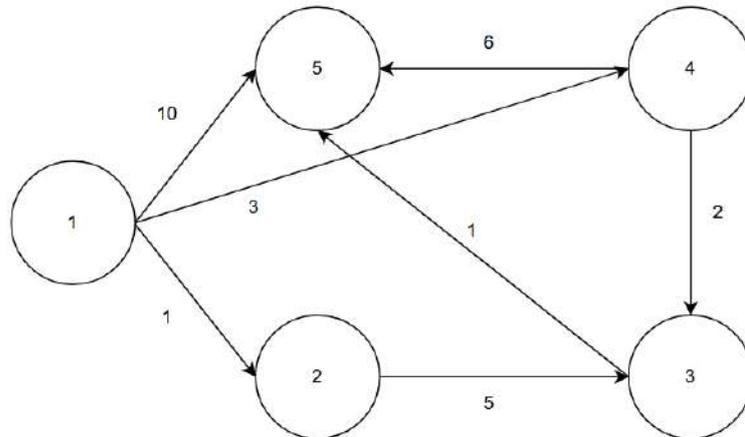
Para solucionar o problema do caminho mínimo, três algoritmos foram propostos por diferentes autores, cada um contemplando grafos com características diferentes.

2.5.3 Algoritmo de Dijkstra

O algoritmo de Dijkstra é utilizado configurando um nó como origem, e calculando todas as distancias desse nó até todos os outros nós no grafo, incrementando nó a nó, discriminando uma árvore de menor caminho, conforme o algoritmo a seguir:

- Passo 1: Inicialização do vetor distancia $D[i]$, que representa a distancia do ponto de origem V até o ponto V_i . Se houver um arco entre os dois vértices, então $D[i]$ recebe o valor do peso do arco; Se não houver o arco, $D[i]$ recebe infinito;
- Passo 2: Localizar um nó V_j , o qual é adjacente e possui a menor distancia ao nó V ;
- Passo 3: Localizar um nó V_k , o qual é adjacente e possui a menor distancia ao nó V_j , e atribuir $D[j] = \text{Min}(D[j], D[i] + \text{peso de } V_j \text{ até } V_k)$;
- Passo 4: Repetir passo 3 até chegar ao nó de destino;

Figura 4 – Exemplo Dígrafo para o algoritmo de Dijkstra.



Fonte: Adaptado pelo Autor, 2024.

Iteração	V	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5
0	1	1	∞	3	10
1	1,2	1	6	3	10
2	1,2,3	1	5	3	9
3	1,2,3,4	1	5	3	6
4	1,2,3,4,5	1	5	3	6

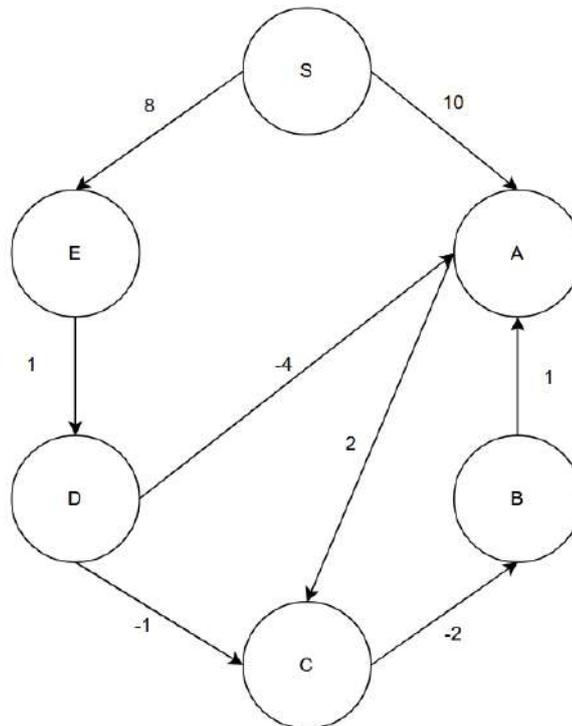
Tabela 3 – Exemplo de iterações do Algoritmo de Dijkstra dado o grafo da Figura 4

2.5.4 Algoritmo de Bellman-Ford

O algoritmo de Bellman-Ford foi proposto para grafos onde há arestas com valores negativos. Utilizando uma estratégia similar a do algoritmo de Dijkstra, realizando sucessivas aproximações de distancias até chegar a árvore da solução, porém a diferença é que em Bellman-Ford não há uma fila de prioridades, calculando o menor caminho do nó de origem até todos os outros nós:

- Passo 1: Inicialização do vetor distancia $D[i]$, que representa a distancia do ponto de origem V até o ponto V_i ;
- $W(m, n)$ representa o custo do vértice $E(m, n)$, e E é o menor caminho entre (m, n) . Para cada vértice $E(m, n) : Se D[m] + w(m, n) < D[n]$ então $D[n] = D[m] + w(u, v)$;
- Dado i o numero de vértices, haverá $i - 1$ iterações. Se a operação no item 2 não atualizar $D[i]$, o menor caminho já foi achado ou alguns nós não podem ser atingidos. Se não, continue as iterações;
- Verificar se há um ciclo negativo, onde a soma dos custos é menor que 0. Se $D[u] + w(u, v) < D[v]$, há um ciclo negativo, inabilitando achar o menor caminho.

Figura 5 – Exemplo Dígrafo para o algoritmo de Bellman-Ford.



Fonte: Adaptado pelo Autor, 2024.

Iteração	S	A	B	C	D	E
0	0	∞	∞	∞	∞	∞
1	0	10	10	12	9	8
2	0	5	10	8	9	8
3	0	5	5	7	9	8
4	0	5	5	7	9	8

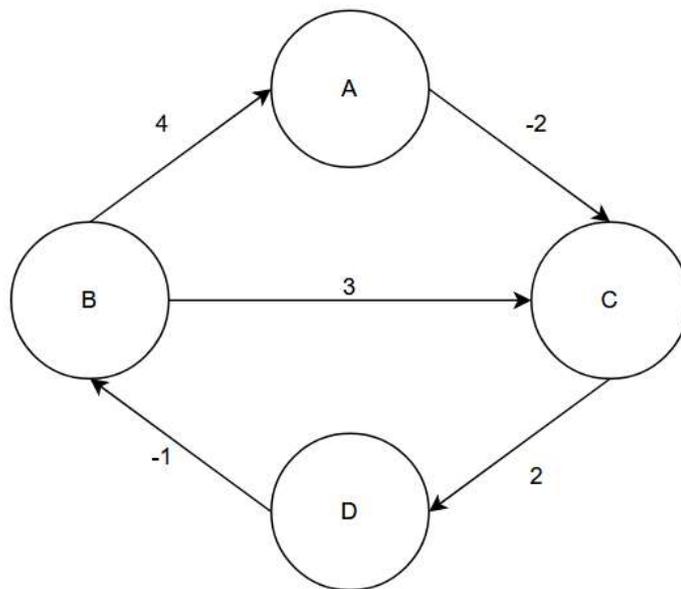
Tabela 4 – Exemplo de iterações do algoritmo de Bellman-Ford dado o grafo da Figura 7.

2.5.5 Algoritmo de Floyd-Warshall

O algoritmo de Floyd-Warshall compara todos os possíveis caminhos do grafo entre cada par de vértices, calculando assim o menor caminho entre todos os nós.

- Passo 1: Achar dois nós dentro da rede do grafo e insere cada vértice entre os dois nós como intermediários.
- Passo 2: Comparar a distancia original com a nova distancia entre os dois nós, assumindo a menor distancia como o menor caminho possível
- Passo 3: Alocar n matrizes $S(1), S(2), \dots, S(n)$ por iterações, no qual cada elemento na ultima matriz $S(n)$ representa a menor distancia entre os dois pontos.
- Passo 4: Determinar a menor distancia entre dois pontos através da soma dos elementos em cada linha de $S(n)$, onde uma ou mais rotas podem ser adquiridas ao comparar os resultados das somas.

Figura 6 – Exemplo Dígrafo para o algoritmo de Floyd-Warshall.



Fonte: Adaptado pelo Autor, 2024.

	A	B	C	D
A	0	-1	-2	0
B	4	0	2	4
C	5	1	0	2
D	3	-1	1	0

Tabela 5 – Exemplo de matriz de distâncias do algoritmo de Floyd-Warshall dado o grafo da Figura 6.

Para determinar a rota mais eficiente entre um ponto inicial e um ponto de destino, foi decidido a utilização do software de cálculo MATLAB[®] juntamente da função "shortestpath" em ambientes tridimensionais. A teoria de grafos é essencial para a aplicação da função escolhida, pois ela é a base para modelar o problema, criando a matriz de adjacência composta por nós e arestas, que representam os pontos e conexões no espaço. Graças a esse artefato, é possível implementar o algoritmo de Dijkstra, pois este percorre os nós do grafo de forma interativa, atualizando as distâncias acumuladas e priorizando o nó com menor custo para alcançar o destino. Essa abordagem de otimização toma decisões locais em cada etapa, escolhendo a melhor opção disponível no momento.

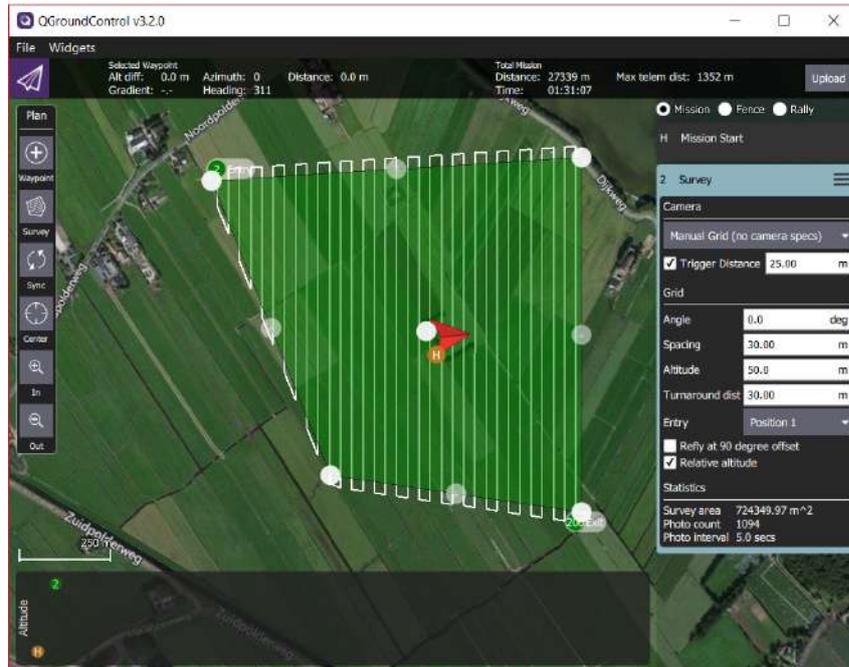
2.6 QGroundControl

Uma das principais ferramentas de código aberto disponíveis para simular uma estação de controle terrestre e operar UAVs, o QGroundControl é uma ferramenta adaptada para vários sistemas operacionais. Projetado com uma interface acessível e intuitiva, é amplamente utilizado em aplicações comerciais, acadêmicas e de pesquisa devido à versatilidade e compatibilidade a protocolos de piloto automático (RAMIREZ-ATENCIA; CAMACHO, 2018).

Por ser um software de código aberto, as maiores referências ao QGroundControl são através de fóruns e distribuída pela plataforma de desenvolvimento colaborativo em nuvem com sistema de controle de versões chamado GitHub, o qual permite que vários contribuintes da comunidade global de consumidores e desenvolvedores façam diversas melhorias, personalizações e integração com outros sistemas.

O software permite criar e editar missões de voo com pontos de passagem, denominados *waypoints*, que são configurados com coordenadas geográficas e comandos específicos. Quando executado em UAVs reais ou simulados, o QGroundControl exibe dados telemétricos, como altitude, velocidade, posição GPS e status da bateria, além de possibilitar configurações adicionais, como parâmetros de piloto automático, modos de voo e calibração dos sensores. A comunicação entre UAVs reais ou simulados e o simulador de estação de controle terrestre QGroundControl é intermediado pelo protocolo de comunicação MAVLink.

Figura 7 – Planejamento de Missão de Mapeamento Ambiental QGroundControl.



Fonte: (HAMISH, 2017).

2.7 MAVLink

Com o intuito de ser um protocolo leve e eficiente, o MAVLink foi projetado para a comunicação entre veículos não tripulados e sistemas de controle. Através de um sistema híbrido de transporte de telemetria de enfileiramento de mensagens (MQTT) e comunicação ponto a ponto, o protocolo permite entre dispositivos conectados a troca facilitada de dados de telemetria, comandos de controle e informações de missão (HAMISH, 2024). Capaz de controlar até 255 estações de controle ou veículos, as mensagens são codificadas na linguagem de marcação Extensible Markup Language (XML), o que permite a integração em diferentes aplicações e aumenta a eficiência. Na segunda versão, foi introduzido a assinatura de mensagens para evitar ataques de falsificação.

Tabela 6 – Exemplo de mensagens trocadas entre o QGroundControl e o UAV

Tipo de Mensagem	Descrição
HEARTBEAT	Mensagem enviada periodicamente para indicar que o drone e o QGC estão ativos.
GPS_RAW_INT	Dados brutos do GPS, como latitude, longitude e altitude.
ATTITUDE	Dados de atitude do drone (rolagem, inclinação e guinada).
MISSION_ITEM	Envia um waypoint ou comando de missão ao drone.
COMMAND_LONG	Envia comandos específicos, como "Retornar ao Ponto de Partida".
BATTERY_STATUS	Informações sobre o nível de bateria e consumo de energia.
PARAM_REQUEST_READ	Solicita a leitura de um parâmetro do piloto automático.
PARAM_SET	Define um novo valor para um parâmetro do piloto automático.

FONTE: Adaptado de (MAVLINK, 2024)

Essas mensagens são processadas automaticamente pelo QGroundControl, que as traduz para informações visuais ou comandos executados pelo drone.

Exemplo de missão utilizando o QGroundControl para controle de um UAV:

1. O operador conecta o QGroundControl ao drone via rádio telemetria.
2. O QGroundControl envia mensagens MAVLink para configurar o drone, como calibração de sensores e definição de parâmetros.
3. O operador planeja uma missão no QGroundControl, definindo waypoints e comandos.
4. O QGroundControl envia a missão ao drone usando mensagens MISSION_ITEM.
5. Durante o voo, o drone envia mensagens de telemetria (ex.: GPS_RAW_INT, ATTITUDE) ao QGroundControl, que exibe os dados em tempo real.
6. Se necessário, o operador pode enviar comandos manuais, como "Retornar ao Ponto de Partida", usando mensagens COMMAND_LONG.

Projetado para oferecer uma plataforma robusta para testar robôs em cenários complexos no qual é importante a comunicação com sensores e controles de robôs, e é vital considerar a física dos objetos, o Gazebo é um simulador de código aberto que possibilita simular ambientes tridimensionais com realismo. Utilizando conjunto de bibliotecas que simplificam aplicações com gráficos em tempo real, tal como o *ODE*, *Bullet*, *Simbody*

e *DART*, motores que simulam interações físicas realistas tais como colisões, gravidade, atrito e dinâmica de corpos rígidos. Com intuito de aumentar o realismo dessas interações, o Gazebo também permite criar cenários detalhados considerando elementos de ambiente como terrenos, edifícios, além de integrar iluminação, sombras e texturas.

Quando necessário, o simulador pode também reproduzir o comportamento e telemetria de sensores, os quais podem ser configurados para replicar o comportamento real e enviar os respectivos dados. É necessário configurar um UAV com um firmware compatível com o MAVLink, o qual vai comunicar com o QGroundControl e enviar todos os dados de telemetria requisitados pela estação de controle terrestre, como GPS, Sistema de Posicionamento Global, IMU, Unidade de Medidas Inerciais, e LIDAR, Detecção e Alcance de Luz. Os sensores e suas utilizações são referenciadas conforme a Tabela 7

Tabela 7 – Resumo dos sensores GPS, IMU e LIDAR

Sensor	Tipo de Dados	Vantagens
GPS	Posição global	Alta precisão em áreas abertas
IMU	Aceleração, rotação, orientação	Alta taxa de atualização Operação em qualquer ambiente
LIDAR	Distância, nuvem de pontos 3D	Alta precisão em mapeamento Detecção de obstáculos

FONTE: Adaptado de (LI et al., 2021).

Ao combinar as três ferramentas QGroundControl, MAVLink e Gazebo, foi possível gerar um método adequado para simular e testar drones em ambientes virtuais. É possível garantir a comunicação do drone e o QGroundControl via protocolo MAVLink, enquanto o Gazebo proporciona a simulação física em ambientes tridimensionais.

3 Estado da Arte

Para entender todo o contexto de otimização de rotas, buscou-se uma avaliação de referências em artigos que discorrem sobre o tema, resumidos na sessão a seguir.

3.1 BVLOS

Neste artigo de (WANG et al., 2019), é investigado tanto os benefícios quanto os desafios na utilização de redes celulares de ondas milimétricas na utilização de UAVs em um contexto BVLOS. As qualidades propostas da tecnologias foram mensuradas afim de verificar se todos os requisitos para garantir a confiabilidade e latência da comunicação sem fio entre o UAV e a BS. Os autores estimaram a propagação de ondas milimétricas através da modelagem da formação do feixe, artefatos estes que foram unidos a probabilidades de controle na linha de visão do operador, afim de analisar o desempenho das conexões mm-Wave, realizado sob três cenários diferentes considerando a mitigação do sinal por interferência. Neste artigo, foi concluído que a cooperação entre as BS são críticas para a pilotagem adequada de UAVs no contexto da tecnologia mm-Wave, e é possível atender os requisitos de URLLC caso haja cooperação entre as BS, possibilitando latência menor que 1 ms e probabilidade de erro de 10^{-5} .

Com intuito de revisar as tecnologias atuais de Sistemas Aéreos Não Tripulados para operações BVLOS, o artigo (POLITI et al., 2021) ressalta os principais desafios da operação BVLOS, tais quais o planejamento e navegação de rotas, comunicação, detecção de objetos e prevenção de colisões e segurança. É elencado as necessidades tecnológicas para expandir a operação BVLOS em um geral, ressaltando a necessidade de uma comunicação robusta e de questões legais e humanas, comentando sobre a proteção ambiental e sobre o direito a privacidade de dados. Os autores concluem explicitando sobre os avanços tecnológicos que estão dando inicio ao processo da navegação de UAVs BVLOS os sistemas autônomos e semi-autônomos, conexões de comando e controle robustas, segurança coletiva, sensores avançados para navegação e coleta de dados e armazenamento e distribuição de energia eficientes.

3.2 UAVs nas redes Móveis 5G

Com o intuito de detalhar o problema de planejamento de rotas tridimensionais para UAVs conectados em redes móveis 5G, o artigo (XIE; XIAO; LYU, 2021) considera como os padrões de radiação das antenas impactam na conectividade. A discussão tem como base o ciclo de vida operacional do UAV, consistindo num local de decolagem inicial,

um local de destino final, o tempo de voo e uma perspectiva de interrupção de comunicação, o que pretendem anular com um trajeto adequado que evita regiões de sinal fraco. Foi construído um mapa de cobertura 3D que estima a probabilidade esperada de interrupção de conexão em cada local, que foi utilizado para propor um algoritmo de aprendizado por reforço profundo afim de projetar a trajetória localmente ótima do UAV. Foi concluído que o algoritmo proposto é eficaz no planejamento de rotas e evita áreas de interrupção de conectividade, assim como foi comprovado que a modelagem tridimensional, embora mais complexa computacionalmente que uma modelagem bidimensional, foi de vital importância para a simulação e desenvolvimento da proposição.

A discussão do artigo proposto (ABOHASHISH; RIZK; ELSEDIMY, 2023) decorre em cima da otimização da trajetória de UAV em redes 5G utilizando como base técnicas de otimização baseada em aprendizado por reforço, como a técnica de Monte Carlo e Programação Dinâmica para aumentar a utilização de recursos. Visando a maior economia de bateria, o artigo foca na auto-regulação do drone, ajustando o balanceamento da carga de modo a otimizar a interação com o ambiente, afim de maximizar a performance durante o trajeto, o que depende de uma comunicação robusta de baixa latência. Para isso, foram utilizado abordagens com modelos de otimização e sem os modelos, resultando em simulações que mostram que o modelo proposto supera os métodos existentes nas diversas configurações de parâmetros.

3.3 Otimização de Rotas por Aprendizado de Máquina

Afim de minimizar a distância calculada nos trajetos pelos UAVs e focar na evasão de obstáculos por UAVs em ambientes tridimensionais, o artigo (TU; JUANG, 2023) elabora sobre uma nova estratégia de otimização do percurso para UAVs. Para isso, é feita a comparação de dois métodos de aprendizagem por reforço, Q-Learning Simples e SARSA (*State-Action-Reward-State-Action*). Utilizando de sistemas de simulação, foi notado que os UAVs foram capazes de evitar obstáculos e áreas de ventos fortes, melhorando a eficiência das rotas. Foi demonstrado que a utilização do método de Q-Learning, por estar iterativamente atualizando as regras de recompensa, obteve melhores performance, diminuindo pela metade o tempo de processamento e o tamanho do trajeto em até um terço, por fornecer ao UAV opções de ações discretas para evitar os obstáculos.

O artigo (SOUTO et al., 2023) propõe a revisão da otimização da trajetória para UAVs quando conectados na rede móvel 5G através de um *framework* de aprendizado por reforço. Desejando uma trajetória em que a eficiência energética do UAV seja otimizada, o modelo utiliza como variáveis para atribuição de recompensa a distancia percorrida como principal fator, os obstáculos no percurso e como o impacto do vento foi minimizado. Os algoritmos de aprendizado por reforço nessa simulação foram Q-Learning, SARSA, Q-Learning com decaimento e também um modelo livre de aprendizado por reforço, utilizando também sensores ultrassônicos para obstáculos e medições filtradas. Os resultados da simulação demonstram a eficácia do esquema proposto sob diferentes caminhos e durações de voo, mostrando uma melhoria significativa em comparação com métodos existentes.

Tabela 8 – Comparativo entre Artigos elencando principais tópicos.

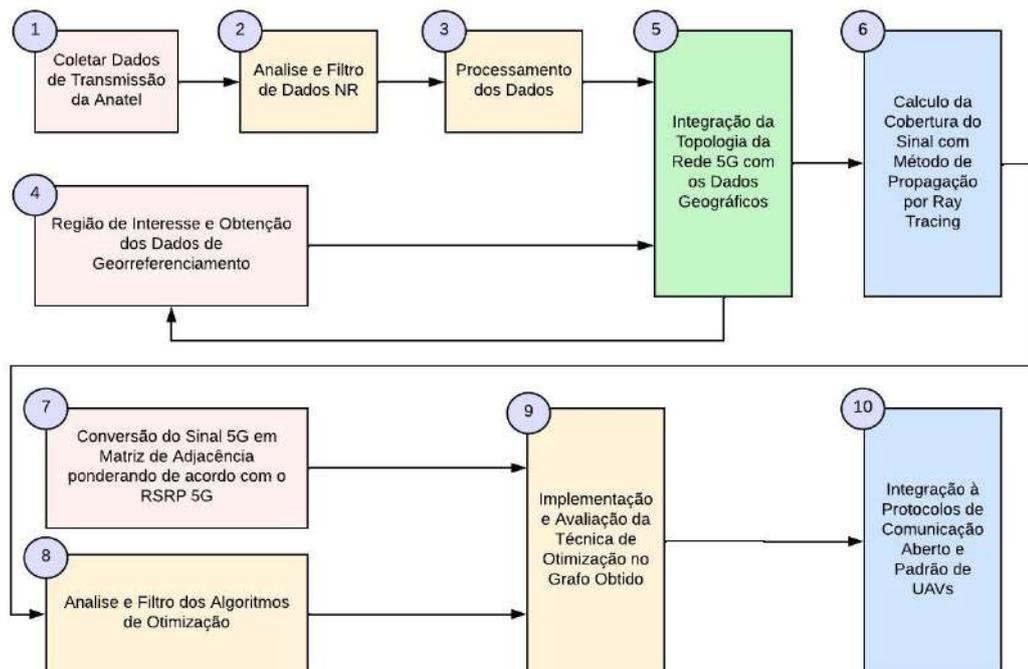
NOME DO ARTIGO	AUTORES	SMART CITIES	BVLOS	5G	Algoritmos de Otimização
Beyond Visual Line of Sight Piloting of UAVs Using Millimeter-Wave Cellular Networks.	Peng Wang, Mustafa Ozger, Cicek Cavdar, Marina Petrova.	Não cita	UAVs no contexto BVLOS através da comunicação entre BS	UAVs utilizando URLLC	Não utiliza
A survey of UAS technologies to enable Beyond Visual Line Of Sight (BVLOS) operations.	Elena Politi, Ilias Panagiotopoulos, Iraklis Varlamis, George Dimitraopoulos.	Preocupação com proteção ambiental, direito a privacidade de dados e segurança coletiva	UAVs no contexto BVLOS com sistemas autônomos e semi-autônomos	Não cita	Não utiliza
Connectivity-Aware 3D UAV Path Design With Deep Reinforcement Learning.	Hao Xie, Dingcheng Yang, Lin Xiao, Jiangbin Lyu.	Não cita	Não utiliza	Trajeto do UAV calculado para evitar a interrupção de sinal	Algoritmo de aprendizado profundo para cálculo da rota com menor probabilidade de desconexão
Trajectory optimization for UAV-assisted relay over 5G networks based on reinforcement learning framework.	Sarah M. M. Abohashish, Rawya Y. Rizk, E. I. Elsedimy.	Não cita	Não utiliza	Utiliza para calcular a rota que otimiza interação com o ambiente	Utiliza para aumentar a eficiência da utilização dos recursos do UAV
UAV Path Planning and Obstacle Avoidance Based on Reinforcement Learning in 3D Environments.	Guan Ting Tu, Jih-Gau Juang.	Não cita	Não utiliza	Não utiliza	Comparativo de métodos de aprendizagem por reforço para evitar obstáculos e melhorar eficiência de rotas
UAV Path Planning Optimization Strategy: Considerations of Urban Morphology, Microclimate, and Energy Efficiency Using Q-Learning Algorithm.	Anderson Souto, Rodrigo Alfaia, Evelin Cardoso, Jasmine Araujo, Carlos Francês.	Não cita	Não utiliza	Não utiliza	Comparativo de métodos de aprendizagem por reforço para evitar obstáculos e identificar áreas com intempéries ambientais, otimizando recursos de UAVs

FONTE: Adaptado pelo Autor, 2024.

4 Arquitetura Proposta

Neste capítulo, apresentamos a arquitetura proposta para a otimização de rotas de UAVs em cidades inteligentes, descrevendo o processo e as decisões iniciando pela construção de uma réplica digital do modelo de propagação 5G em Curitiba, até a implementação do algoritmo destinado a otimizar o planejamento e a execução de rotas de UAVs. Após a implementação do algoritmo, é possível realizar a integração dos resultados à uma simulação utilizando protocolos de comunicação padrão de veículos aéreos não tripulados, conforme representado na Figura 8. O processo é dividido em dez etapas principais, que se conectam de forma sequencial e lógica.

Figura 8 – Diagrama de Blocos da Arquitetura Proposta.



FONTE: Autor, 2024.

4.1 Coletar Dados de Transmissão da Anatel (Bloco 1)

A Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) disponibiliza uma coletânea de dados sobre antenas de telecomunicações no Brasil, que auxiliam no entendimento da infraestrutura de telecomunicações do país. O ponto de partida do projeto foi a aquisição dos dados de transmissão de Curitiba, fornecidos pela Anatel (ANATEL, 2024). Contendo todos os dados de emissão do país, se fez necessário filtrar pelo estado, e posteriormente pela cidade, afim de gerar um arquivo CSV (*Comma-separated values*) adequado. Após a

obtenção das informações das antenas da região de Curitiba, o processo de tratamento dos dados foi iniciado pela conversão do arquivo em formato CSV em um formato Microsoft Excel, afim de facilitar eventuais necessidades de filtro, tomando um cuidado particular para não perder nenhuma informação por conversão de tipo de dado.

4.2 Análise e Filtro de dados NR (Bloco 2)

Devido a utilização desses pontos de transmissão para várias tecnologias de comunicação, houve uma nova necessidade de filtro, retirando sinais que não são interessantes ao desenvolvimento do escopo, tais como os sinais VHF (*Very High Frequency*), DMR (*Digital Mobile Radio*) e LTE, focando somente na tecnologia que corresponde a transmissão do sinal 5G, a NR (*New Radio*), reduzindo de 105891 pontos de transmissão para 3093. A rede 5G em Curitiba é constituída por três companhias, a Claro, Telefônica e a Tim. O arquivo original contém um total de 38 campos, conforme ilustrado na Figura 9. Muitas informações não são necessárias para a análise, como por exemplo o número de série do equipamento transmissor e a última data de vistoria. Houve a necessidade de um novo filtro, dividindo os dados de cada empresa em três arquivos do tipo XLXS, afim de identificar a área de transmissão de cada uma das redes disponíveis na cidade e gerar um resultado parcial.

Figura 9 – Dados Obtidos da Anatel

Operadora	UF	Município	Endereço (Rua, Nº, Comp., Bairro)	Bairro	Faixa Estação	Subfaixa Estação	Gereração	Tecnologia	(5G) Tipo de Tecnologia	FreqTxMHz	FreqRxMHz	Latitude decimal	Longitude decimal
CLARO	PR	Curitiba	R ARTHUR MANOEL IVERSEN, 2347,	ALTO BOQUEIRAO	3500	3300-3400	5G	NR	SA-NSA	3350	3350	-25.52875	-49.23231
CLARO	PR	Curitiba	R JOANINA OLIVEIRA DE ANDRADE, 26,	UBERABA	3500	3300-3400	5G	NR	SA-NSA	3350	3350	-25.49551	-49.20518
CLARO	PR	Curitiba	R TOBIAS DE MACEDO JUNIOR, 1036,	SANTO INACIO	3500	3300-3400	5G	NR	SA-NSA	3350	3350	-25.42708	-49.32931
VIVO	PR	Curitiba	RUA MANOEL DE SOUZA DIAS NEGRÃO - Nº 1825, 1825,	Vila Izabel	3500	3400-3500	5G	NR	SA-NSA	3450	3450	-25.385028	-49.257889
VIVO	PR	Curitiba	RUA JUDITH MANOSSO 13, S/N,	BUTIATUVINHA	3500	3400-3500	5G	NR	SA-NSA	3450	3450	-25.396031	-49.345419
VIVO	PR	Curitiba	AVENIDA MANOEL RIBAS, 115, S/N, -	MERCÊS	3500	3400-3500	5G	NR	SA-NSA	3450	3450	-25.424675	-49.2808
VIVO	PR	Curitiba	RUA PEDRO ELOI DE SOUZA S/N, S/N,	DESCONHECIDO	3500	3400-3500	5G	NR	SA-NSA	3450	3450	-25.414969	-49.208061
CLARO	PR	Curitiba	R GENERAL MARIO TOURINHO, 2194,	MOSSUNGUE	2300	Lote E 5G	5G	NR	SA-NSA	2325	2325	-25.43381	-49.31016
CLARO	PR	Curitiba	R LOURIVAL SCHILIPAK, 67,	GUABIROTUBA	3500	3300-3400	5G	NR	SA-NSA	3350	3350	-25.46845	-49.24079
VIVO	PR	Curitiba	RUA JOÃO LEAL, 301,	SÃO LOURENÇO	3500	3400-3500	5G	NR	SA-NSA	3450	3450	-25.3811	-49.264708
VIVO	PR	Curitiba	RUA WALDEMAR KOST 1087, S/N,	Hauer	3500	3400-3500	5G	NR	SA-NSA	3450	3450	-25.484361	-49.249581
CLARO	PR	Curitiba	AV PRESIDENTE GETULIO VARGAS, 2932,	AGUA VERDE	3500	3300-3400	5G	NR	SA-NSA	3350	3350	-25.45055	-49.28726
VIVO	PR	Curitiba	AVENIDA PRESIDENTE ARTHUR DA SILVA BERNARDES, 1142, S/N, -	PORTÃO	3500	3400-3500	5G	NR	SA-NSA	3450	3450	-25.462383	-49.302033
VIVO	PR	Curitiba	RUA LÚCIO RASERA, 674,	CURITIBA	3500	3400-3500	5G	NR	SA-NSA	3450	3450	-25.49043	-49.30376
CLARO	PR	Curitiba	RUA CAPITÃO LEONIDAS MARQUES, 565,	UBERABA	3500	3300-3400	5G	NR	SA-NSA	3350	3350	-25.47014	-49.21785
TIM	PR	Curitiba	RUA HELENA ANDRETTA DE OLIVEIRA, 113,	UBERABA	3500	3500-3600	5G	NR	SA-NSA	3550	3550	-25.485831	-49.221131
TIM	PR	Curitiba	RUA UBALDINO DO AMARAL, 63,	ALTO DA GLORIA	1800	SE8	5G	NR	NSA	1737.5	1832.5	-25.421361	-49.259167
TIM	PR	Curitiba	RUA LOTE, 38,	CENTRO	3500	3500-3600	5G	NR	SA-NSA	3550	3550	-25.423611	-49.228547
TIM	PR	Curitiba	AVENIDA NOSSA SENHORA DA LUZ, 1800,	CENTRO	3500	3500-3600	5G	NR	SA-NSA	3550	3550	-25.418611	-49.241111
TIM	PR	Curitiba	RUA PEDRO COLLERE, 819,	VILA IZABEL	3500	3500-3600	5G	NR	SA-NSA	3550	3550	-25.462472	-49.298806
VIVO	PR	Curitiba	AVENIDA VICTOR FERREIRA DO AMARAL, 2653,	CURITIBA	3500	3400-3500	5G	NR	SA-NSA	3450	3450	-25.428661	-49.215711
VIVO	PR	Curitiba	RUA ALDA BASSETTI BERTHOLDI 1216 - CAMPO DE SANTANA, S/N,	CURITIBA	3500	3400-3500	5G	NR	SA-NSA	3450	3450	-25.59121	-49.33204
TIM	PR	Curitiba	RUA JOÃO GUERINO FABRI, S/N, CALURU	CALURU	3500	3500-3600	5G	NR	SA-NSA	3550	3550	-25.455769	-49.22225
TIM	PR	Curitiba	RUA ANNE FRANK, 5103,	BOQUEIRAO	3500	3500-3600	5G	NR	SA-NSA	3550	3550	-25.509639	-49.232089
CLARO	PR	Curitiba	RUA MARECHAL DECODORO, 1375,	CENTRO	2300	Lote E 5G	5G	NR	SA-NSA	2325	2325	-25.42706	-49.25983
VIVO	PR	Curitiba	AVENIDA SETE DE SETEMBRO, 4698,	BATEL	3500	3400-3500	5G	NR	SA-NSA	3450	3450	-25.44395	-49.2839
VIVO	PR	Curitiba	RUA ANTÔNIO SAROTE, 181, S/N,	CURITIBA	3500	3400-3500	5G	NR	SA-NSA	3450	3450	-25.56155	-49.31352
VIVO	PR	Curitiba	RUA HERCE FERNANDES Nº PREDIAL 543, S/N,	CURITIBA	3500	3400-3500	5G	NR	SA-NSA	3450	3450	-25.50026	-49.34781
VIVO	PR	Curitiba	RUA FELIBINO PASSOS, 140, RBR-NÃO	CURITIBA	3500	3400-3500	5G	NR	SA-NSA	3450	3450	-25.38575	-49.216489
VIVO	PR	Curitiba	RUA JOÃO SIKORA ESQUINA RUA HERMÍNIO NIC, S/N,	CURITIBA	3500	3400-3500	5G	NR	SA-NSA	3450	3450	-25.54977	-49.29003
VIVO	PR	Curitiba	RUA MAUÁ, 425,	CENTRO	3500	3400-3500	5G	NR	SA-NSA	3450	3450	-25.421917	-49.2595
VIVO	PR	Curitiba	RUA FRANCISCO DALLALIBERA, 1505, RBR-NÃO	CURITIBA	3500	3400-3500	5G	NR	SA-NSA	3450	3450	-25.39313	-49.3333
VIVO	PR	Curitiba	RUA MARIANO TORRES, S/N, RBR-NÃO	CENTRO	3500	3400-3500	5G	NR	SA-NSA	3450	3450	-25.434419	-49.261061

FONTE: Autor, 2024.

4.3 Processamento dos Dados (Bloco 3)

O uso das informações dispostas foi através da importação dos valores do XLXS para uma matrix no Matlab[®] através da função *readtable*, onde posteriormente foi associado os dados desejados, convertendo-os ao tipo e atribuindo-os a um vetor para melhor manuseabilidade e economia de memória. A própria função realiza o trabalho de inferir o tipo de variável disposto em cada coluna, o que evita a perda de dados para informações importantes, tais quais latitude e longitude. Devido ao propósito de mapear a propagação do sinal 5G, os dados extraídos do arquivo XLXS foram transferidas para outras variáveis alocadas no Matlab[®]. Com isso, foi possível manter a clareza e organização do código por melhorar a legibilidade e modular a utilização dessas variáveis, foi garantido a eficiência computacional por possibilitar o acesso direto aos dados e reduzir a sobrecarga de memória e processamento ao manipular grandes tabelas, além de facilitar a manipulação e habilitar a reutilização dos dados de maneira prática. De todos os itens dispostos nas planilhas provisionados pela Anatel, foram retirados e atribuídos a outras variáveis os seguintes dados:

- Latitude;
- Longitude;
- Altura da Antena;
- Frequência de transmissão;
- Potência de transmissão;
- Angulo da Antena;
- Azimute.

4.4 Região de Interesse e Dados de Georreferenciamento (Bloco 4)

Para o mapeamento geográfico com objetos foi utilizado a solução internacional de código aberto OpenStreetMap (OSM, 2024), que é um projeto colaborativo da internet que utiliza a técnica de *crowdsourcing* (GHEZZI et al., 2017), modelo de terceirização aberto e compartilhado, para disponibilizar dados geoespaciais para qualquer um com acesso.

O projeto foi iniciado em 2004, o mapa inicial foi construído por voluntários enquanto desenvolviam atividades recreativas com uma unidade GPS de mão e anotações, que eram posteriormente introduzidos na base de dados. Posteriormente, empresas como Yahoo e Bing disponibilizaram seu acervo de mapeamento para a base de dados, incrementando os limites do mapeamento. Há ocasiões em que os voluntários organizam

festas de mapeamento afim de mapear rapidamente uma determinada região. Todos os mapas, dados e metadados são abertos, disponíveis sob a licença Open Data Base License. Majoritariamente, os dados são inseridos pela comunidade em forma de doações, porém os dados são formalmente operados pela OpenStreetMap Foundation em nome da comunidade de mapeadores, sendo disponibilizados no formato OSM. Para utilizar o arquivo OSM na simulação do Matlab[®], foi utilizada a função *siteviewer* passando como referência os argumentos *Buildings*, representando que deseja os dados geográficos com as construções, *Basemap*, representando o plano de fundo conforme o arquivo OSM, *Satellite*, para mostrar o mapa conforme imagens de satellite, e o "Mapa.osm", contendo os dados geográficos obtidos do OpenStreetMap, conforme a Figura 10.

Figura 10 – Mapa com Dados Geográficos

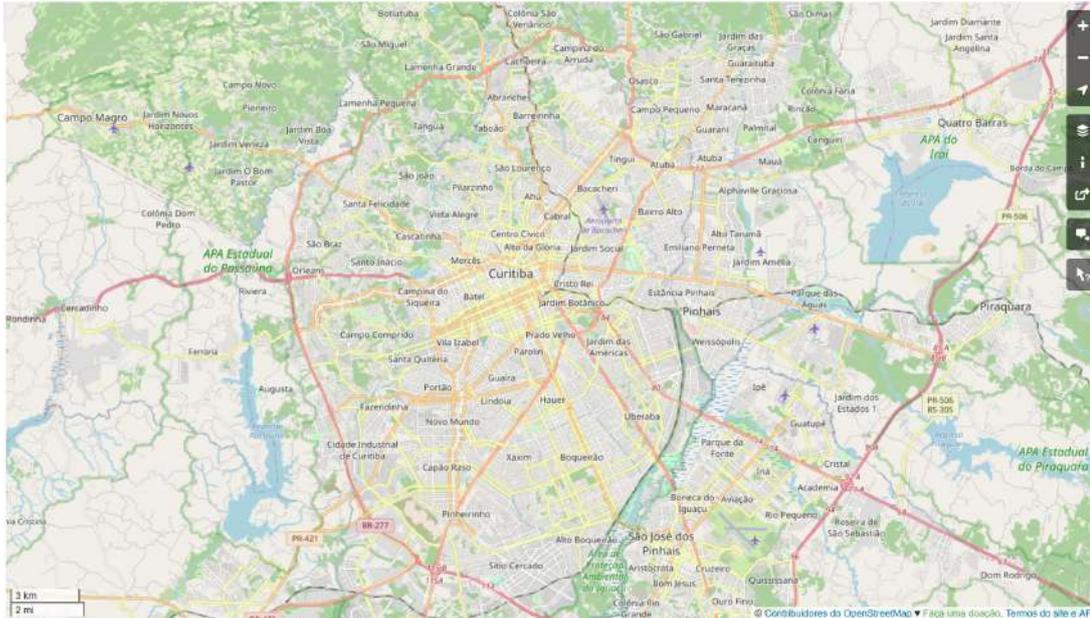


Fonte: (OSM, 2024).

4.5 Integração da Topologia da Rede 5G com os Dados Geográficos (Bloco 5)

A ideia inicial seria utilizar dados OSM de toda a região metropolitana de Curitiba para serem utilizados na simulação, incluindo algumas cidades da região metropolitana, como Pinhais, São José dos Pinhais, Campo Magro e Quatro Barras, conforme ilustrado na Figura 11. Devido a limitações de exportação do OpenStreetMap (OSM, 2024), se fez necessário exportar menos dados, englobando apenas a região central de Curitiba. Esta região central da cidade já gera uma arquivo de dados com 275MB.

Figura 11 – Mapa para Exportação de Dados OSM.



Fonte: (OSM, 2024).

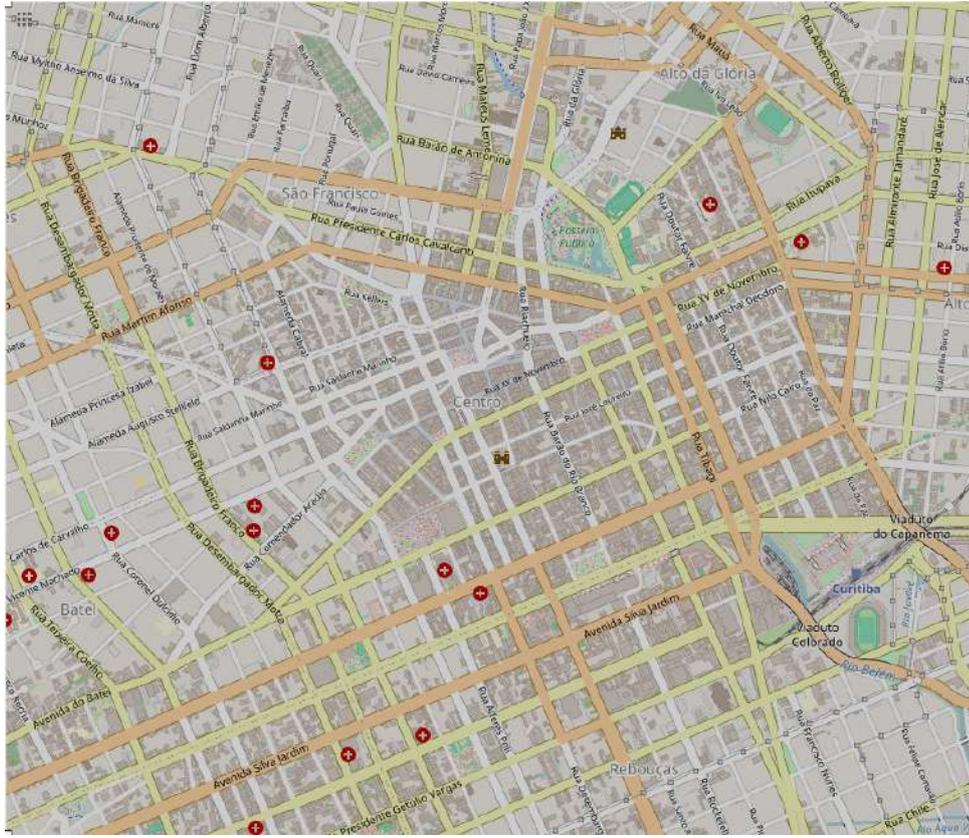
Após o primeiro obstáculo, foi reparado que coligir o arquivo geoespacial de Curitiba e região metropolitana com os dados adquiridos das antenas, e junto desse novo mapa simular a propagação do sinal 5G requer um poder de processamento muito acima dos computadores tradicionais, inviabilizando o escopo inicial do trabalho. Para superar esse recém descoberto desafio, foi levantado duas hipóteses:

1. Reduzir os limites geográficos da simulação, exigindo menor poder de processamento;
2. Terceirizar o processamento para empresas focadas em simulações pesadas;

Como os pacotes de teste grátis das empresas que cedem poderes de processamento não foram o suficiente para execução da simulação, foi decidido diminuir o escopo dos limites geográficos a serem simulados. Após algumas tentativas, foi decidido um novo intervalo tanto para os limites de dados geográficos quanto às antenas selecionadas para o mapeamento da cobertura 5G, utilizando todos os dados geográficos e infraestruturas de telecomunicações dentro dos intervalos -25.4469 e -25.4144 de latitude, -49.2899 e -49.2514 de longitude, chegando ao arquivo OSM conforme figura 12, focando majoritariamente no centro de Curitiba.

Desta forma, limitamos um novo intervalo tanto para os limites de dados geográficos quanto para as antenas selecionadas para o mapeamento da cobertura 5G, utilizando todos os dados geográficos e infraestruturas de telecomunicações dentro dos intervalos -25.4469 e -25.4144 de latitude, -49.2899 e -49.2514 de longitude, chegando ao arquivo OSM conforme Figura 12, focando no centro de Curitiba. Ao simular o novo arquivo com os

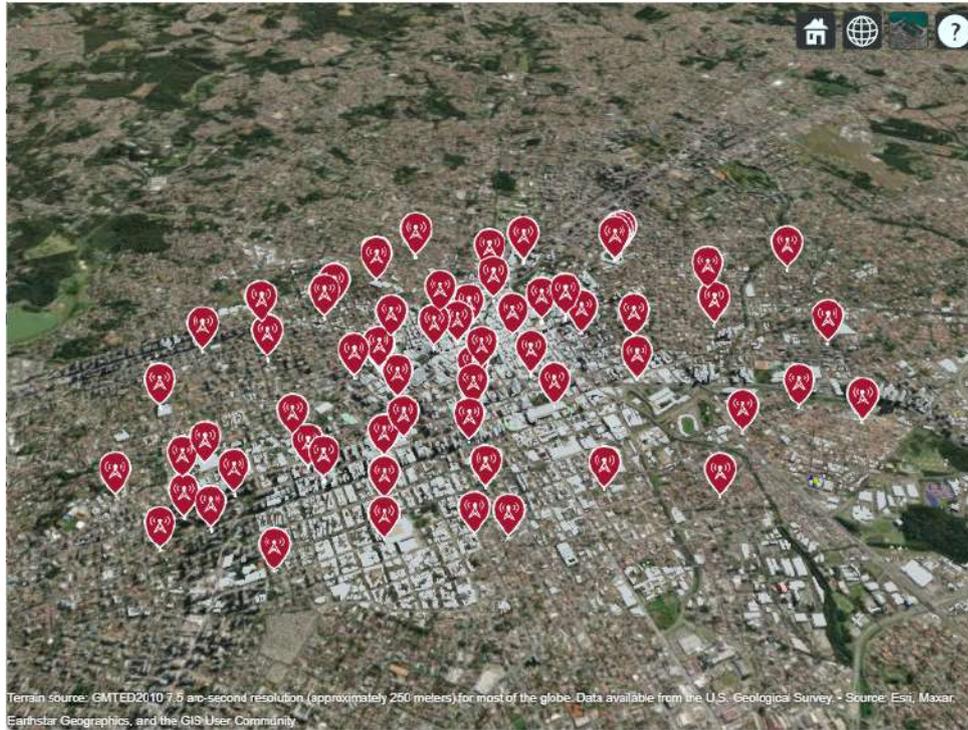
Figura 12 – Mapa com Novos Limites.



Fonte: (OSM, 2024).

dados de antenas novamente filtrados, obtemos o mapa com as antenas, conforme ilustrado na Figura 13, considerando apenas uma operadora.

Figura 13 – Mapa com Dados Geográficos e Antenas.



Fonte: (OSM, 2024).

4.6 Cálculo da Cobertura do Sinal com Método de Propagação por Ray Tracing (Bloco 6)

O modelo de propagação da antena influencia de maneira significativa o desempenho da comunicação entre o UAV e as estações rádio base do 5G. O modelo de simulação utiliza o modelo de propagação especificado pelo 3GPP (3GPP, 2024). A radiação do arranjo é composta pela combinação ponderada dos padrões de antenas simples, onde se leva em consideração o ângulo de elevação e ângulo de azimute, que é definido como ângulo entre a projeção da antena até o norte geográfico. Os padrões de radiação do arranjo de antenas são equacionados na horizontal por 4.1 e na vertical por 4.2.

$$AE, V(\theta) = -\min\left(12 \left(\frac{\theta - 90^\circ}{\theta_{3dB}}\right)^2, SLA_V\right) \quad (4.1)$$

$$AE, H(\phi) = -\min\left(12 \left(\frac{\phi}{\phi_{3dB}}\right)^2, A_m\right) \quad (4.2)$$

Onde:

- θ é o ângulo de elevação.
- ϕ é o ângulo de azimute, em relação à linha perpendicular ao plano do arranjo de antenas.

- SLA_V é o limite do lóbulo lateral (30 dB).
- A_m é a relação Frente/Verso (30 dB).
- θ_{3dB} e ϕ_{3dB} são as larguras de feixe de 3 dB, que são 65° de acordo com o padrão 3GPP.

Desta maneira, é possível calcular o ganho da antena tridimensional ao combinar os padrões vertical e horizontal, conforme disposto na equação 4.3 na qual o G_{max} representa ganho direcional máximo do elemento da antena, e A_E representa o ganho.

$$AE, H(\theta, \phi) = G_{max} - \min\{-(AE, V(\theta) = AE, H(\phi)), A_m\} \quad (4.3)$$

Ao somar o padrão único do fator de arranjo $AF(\theta, \phi)$, representado na equação 4.4, define a equação do ganho do arranjo 4.5, onde ρ é o coeficiente de correlação, \mathbf{a} é o vetor de amplitude e \mathbf{w} representa o vetor de formação do feixe, que contém o direcionamento do lóbulo principal emitido pelo UAV.

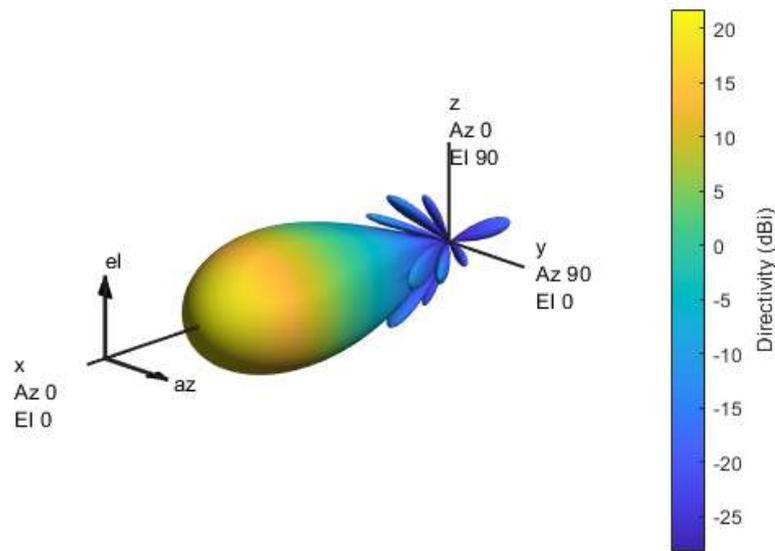
$$AF(\theta, \phi) = 10 \log_{10}[1 + \rho(|\mathbf{a} \cdot \mathbf{w}^T|^2 - 1)] \quad (4.4)$$

$$G_{Array}(\theta, \phi) = A_E(\theta, \phi) + AF(\theta, \phi) \quad (4.5)$$

Em casos onde o UAV faz a conexão com uma estação base específica, a técnica de formação do feixe direciona o lóbulo principal da antena, correspondente ao maior ganho de sinal, diretamente para o UAV, o qual é assumido estar numa posição definida pelos ângulos (θ_s, ϕ_s) , procedimento focado em otimizar a comunicação ao concentrar o sinal na direção do veículo aéreo.

Usando a combinação dos *toolboxes Antenna Toolbox, Communication Toolbox* e *RF blockset*, disponíveis pelo Matlab[®] e responsável por facilitar a modelagem de propagação de sinais RF, foi possível estabelecer a diretividade da radiação, que corresponde ao parâmetro de uma antena que mede o grau em que a radiação emitida é concentrada em uma única direção, a qual foi disposta conforme a Figura 14, chegando a uma imagem bem próxima ao simulado de acordo com os padrões do 3GPP.

Figura 14 – Padrão de Diretividade da Radiação em 3D.



Fonte: Autor, 2024.

4.7 Conversão do Sinal 5G em Matriz de Adjacência ponderando de acordo com o RSRP 5G (Bloco 7)

Utilizando os recursos adquiridos na etapa de construção do modelo de propagação por *ray tracing*, foi possível estimar a potência recebida do sinal de referência RSRP (*Reference Signal Received Power*) na região de interesse obtida no passo 5, integração da topologia da rede 5G com dados geográficos, resultando na criação de um *grid virtual* de pontos. Desta forma é possível simular como os sinais da rede móvel 5G se propagam e interagem com o ambiente, levando em consideração para cálculo as reflexões, difrações e outros fenômenos. Com isso, foi gerado um modelo que apresenta em diferentes altitudes relativas do solo como é o nível de cobertura do sinal, sendo o passo inicial para construção da matriz de adjacência.

Esses dados foram todos convertidos e exportados para um padrão Matlab, o qual foi realizado um novo procedimento de atribuição a variáveis locais, preparando-os para conversão em dados geodésicos com a função *wgs84Ellipsoid*. Essa função converte os dados anteriormente de coordenadas geográficas para parâmetros geodésicos baseados no sistema de referência WGS 84, o qual é referência para modelos de GPS, afim de facilitar cálculos de distância e direção.

Após obter os dados geodésicos, os quais foram passados como parâmetros para a função *geodetic2enu*, responsável por converter os dados em coordenadas locais ENU

(*East, North, Up*), crucial para a construção da matriz de adjacência por facilitar a análise de proximidade e conectividade entre os pontos.

Com isso, a matriz de adjacência foi construída com base nas coordenadas ENU, onde a conexão entre dois pontos é representada por um elemento na matriz. A proximidade entre os pontos foi essencial para definir as conexões diretas, refletindo assim numa estrutura que modela a rede 5G através do Grafo. Afim de determinar o melhor caminho, se fez necessário uma retificação entre as ponderações do grafo, antes determinado pela distância física, foi realizada de tal maneira que o módulo do RSRP fosse considerado como peso do nó em questão, o que resultou numa matriz de adjacência com ponderações diferentes e maiores que zero.

4.8 Análise e Filtro dos Algoritmos de Otimização (Bloco 8)

Para essa análise, foram considerados os algoritmos clássicos para encontrar rotas e caminhos em grafos. De início, já foram descartados os algoritmos de Busca em Largura (*Breadth-First Search*) e Busca em Profundidade (*Depth-First Search*). O algoritmo de busca em profundidade foi por ter como finalidade explorar grafos e encontrar componentes conectados, enquanto o algoritmo de busca em largura é usado para encontrar o caminho mais curto em termos de número de arestas em grafos não ponderados, restando assim os algoritmos de Dijkstra (JAVAID, 2013), Bellman-Ford (KEMPEPATIL, 2023) e Floyd-Warshall (RAMADIANI; BUKHORI; DENGGEN, 2018). Para efeitos comparativos, foram elencadas as características pertinentes à busca de rotas, que consistem em complexidade de tempo, o qual relaciona o tempo necessário para encontrar a rota com o tamanho da entrada, complexidade de espaço, cuja função é calcular a quantidade de memória requerida durante a execução, e se o algoritmo é capaz de lidar com valores de ponderação negativos, resultando na comparação da Tabela 9.

Tabela 9 – Comparativo dos Algoritmos de Otimização de Rotas em Grafos.

	Algoritmo de Dijkstra	Algoritmo de Bellman-Ford	Algoritmo de Floyd-Warshall
Complexidade de Espaço	$O(M)$	$O(M)$	$O(N^2)$
Complexidade de Tempo	$O(N^2)$	$O(MN)$	$O(M^3)$
Ponderação Negativa	Não	Sim	Sim

M corresponde ao número de arestas
N corresponde ao número de vértices

Fonte: Adaptado de (KAIRANBAY M. MAT JANI, 2013).

Levando em consideração as características da matriz de adjacência obtida no tópico anterior, que são ponderações diferentes e maiores que zero, o algoritmo melhor otimizado para achar o menor caminho é o algoritmo de Dijkstra.

4.9 Implementação e Avaliação da Técnica de Otimização no Grafo Obtido (Bloco 9)

Para a avaliação do algoritmo proposto, foi implementado também uma matriz de adjacência com os valores iguais a distância entre as coordenadas geográficas dos vértices, afim de encontrar a menor distância métrica para um caminho do UAV. Para a execução do algoritmo de Dijkstra em cima de ambas as matrizes de adjacência, foi utilizada a função do Matlab[®] *shortestpath*, a qual requer um nó de origem, um nó de destino, a matriz de adjacência e o algoritmo desejado, o que resultou o trajeto conforme a Figura 15. Os nós selecionados foram o nó 1, correspondente as coordenadas de latitude -25.4469 e longitude -49.2899, e o nó 2000, equivalente as coordenadas de latitude -25.44066263 e longitude -49.2514, dando uma sequência de nós. Na Tabela 10 é apresentado a comparação de nós entre o melhor caminho com base na distância euclidiana, enquanto o segundo representa os nós no trajeto em que prioriza a melhor potência recebida do sinal de referência (RSRP). A Tabela 10 foi construída com o propósito de demonstrar a evolução de cada rota e compará-las a cada iteração.

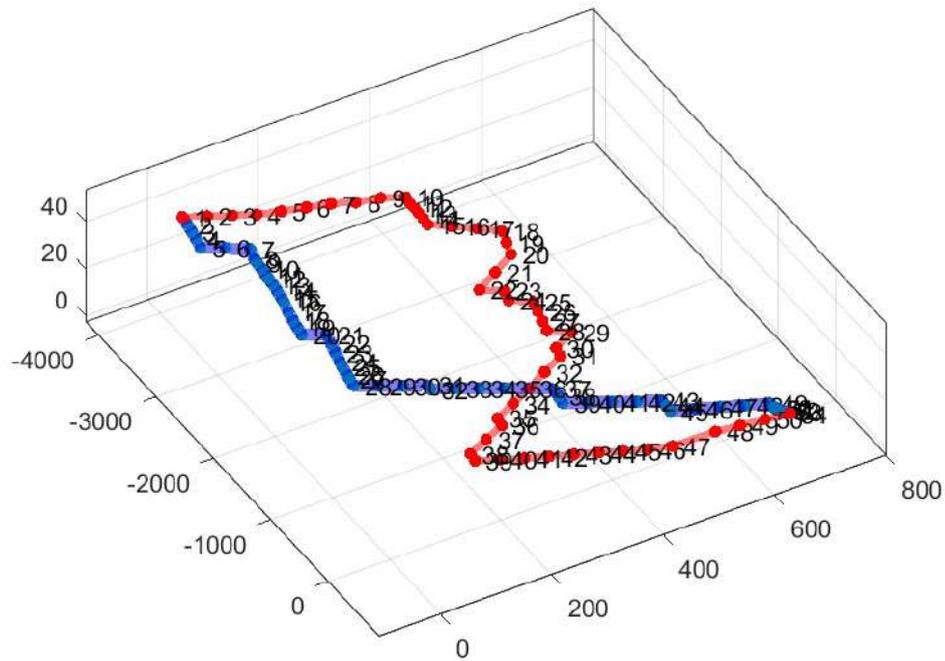
Com o intuito de fundamentar melhor a avaliação, foi extraído o histograma da distância e do sinal médio no caminho do UAV, conforme a Figura 16.

Tabela 10 – Comparativo de Coordenadas Geográficas das iterações.

Iteração	Nó	Latitude	Longitude	Altura	RSRP	Rota
0	1	-25,4469	-49,2899	958,96	-47,09	Ambos
1	3	-25,4469	-49,2891	957,89	-40,15	Distância
	103	-25,4457	-49,2891	958,202	-37,96	RSRP
2	5	-25,4469	-49,2883	956,816	-39,21	Distância
	10205	-25,4462	-49,2883	977,439	-35,78	RSRP
			...			
53	1998	-25,4406	-49,2521	915,955	-52,52	Distância
	2196	-25,44	-49,2529	915,123	-52,83	RSRP
54	2000	-25,4406	-49,2514	917,237	-52,72	Distância
	2098	-25,4403	-49,2521	916,194	-52,71	RSRP
55	2000	-25,4406	-49,2514	917,237	-52,72	Ambos

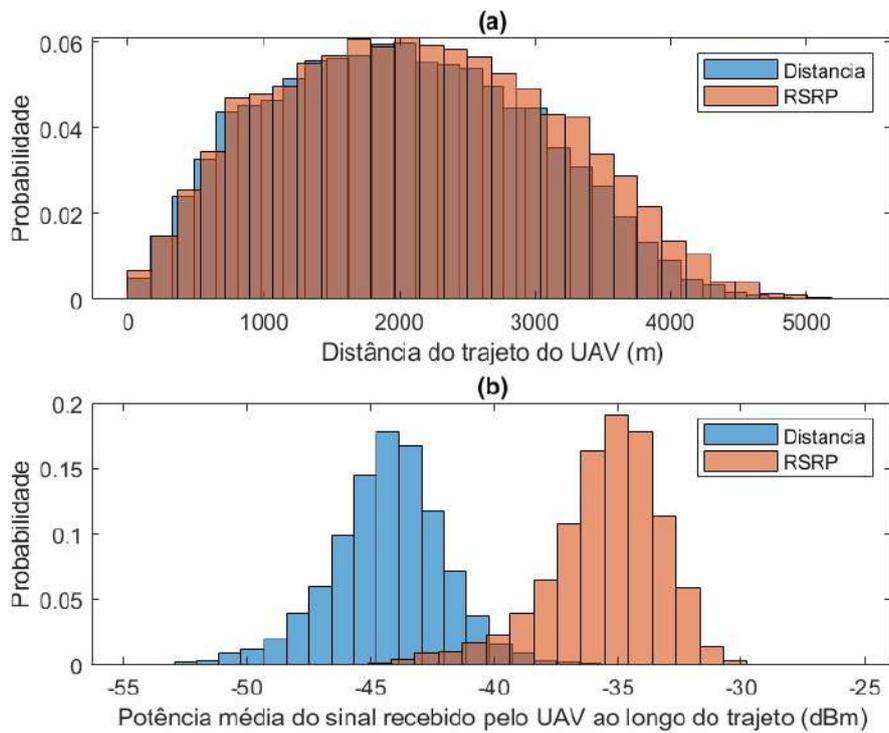
Fonte: O Autor, 2024.

Figura 15 – Comparativo da menor distância física e seguindo o RSRP.



Fonte: O Autor, 2024.

Figura 16 – Histograma da distância e do sinal médio dos trajetos.



Fonte: O Autor, 2024.

4.10 Integração à Protocolos de Comunicação Aberto e Padrão de UAVs (Bloco 10)

Utilizando a relação dos nós para o caminho que foi obtido no passo anterior, é possível realizar a conversão para um formato de representação interna para coordenadas geográficas, afim de que os dados possam ser utilizados em sistemas de navegação real. Foi criado um arquivo no formato JSON (*JavaScript Object Notation*) com a extensão PLAN (*Plan File Format*), conforme Figura 17, o qual incluiu as coordenadas num formato de *waypoints*, que contém as coordenadas de latitude, longitude, altitude e ações específicas a serem executadas em cada ponto.

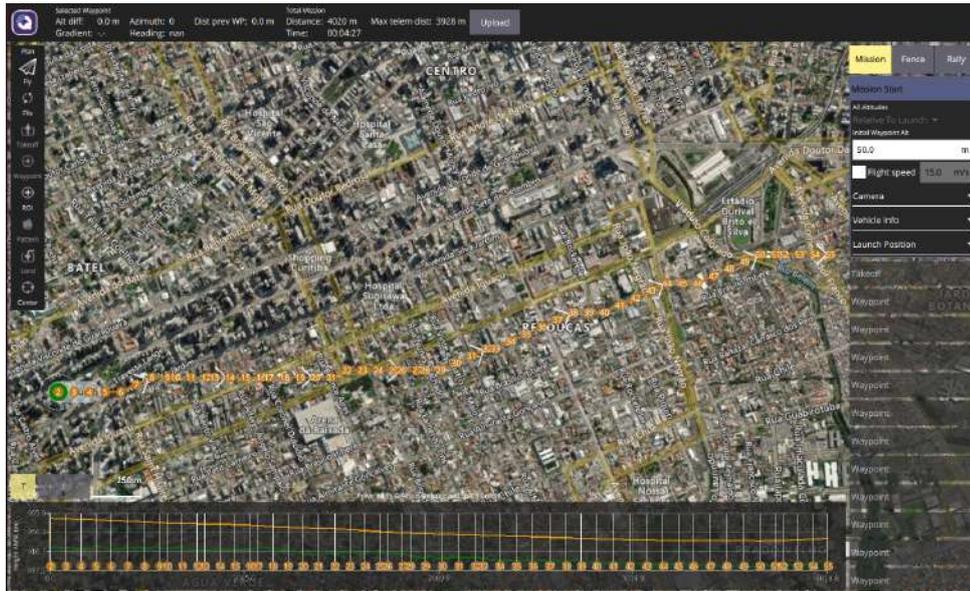
Em posse do arquivo com extensão .plan devidamente formatado, é possível de inseri-lo no software QGroundControl, que constitui numa estação de controle de solo de código aberto utilizado para monitorar veículos aéreos, terrestres e aquáticos e outros veículos autônomos, ideal para o planejamento de missões complexas via *waypoints* por fornecer dados de telemetria em tempo real do veículo. Para simular um UAV, foi utilizado o software Gazebo, um simulador de robótica que possibilita a criação de um ambiente 3D afim de testar o comportamento de veículos autônomos. A comunicação entre o QGroundControl e o Gazebo foi facilitado pelo protocolo de comunicação para veículos aéreos não tripulados MAVLink, o que possibilitou a troca de dados de telemetria e comandos de controle entre ambiente e o UAV simulado, provido pelo Gazebo, e a estação de controle de solo, reproduzido pelo QGroundControl.

Figura 17 – Exemplo de JSON com *Waypoints*.

```
{
  "fileType": "Plan",
  "geoFence": {
    "circles": [],
    "polygons": [],
    "version": 2
  },
  "groundStation": "QGGroundControl",
  "mission": {
    "cruiseSpeed": 15,
    "firmwareType": 12,
    "globalPlanAltitudeMode": 1,
    "hoverSpeed": 5,
    "items": [
      {
        "AMSLAltAboveTerrain": 10,
        "Altitude": 10,
        "AltitudeMode": 1,
        "autoContinue": true,
        "command": 22,
        "doJumpId": 1,
        "frame": 3,
        "params": [0,0,0,0,-25.4469,-49.2899,10],"type": "SimpleItem"},
      {
        "AMSLAltAboveTerrain": 58.96507317, "Altitude":58.96507317,
        "AltitudeMode": 1,
        "autoContinue": true,
        "command": 16,
        "doJumpId": 2,
        "frame": 3,
        "params": [0,0,0,0,-25.4469,-49.2899,58.965073174823],"type": "SimpleItem"}
    ],
    "plannedHomePosition": [
      -25.4469,
      -49.2899,
      927
    ],
    "vehicleType": 0,
    "version": 2
  },
  "version": 1
}
```

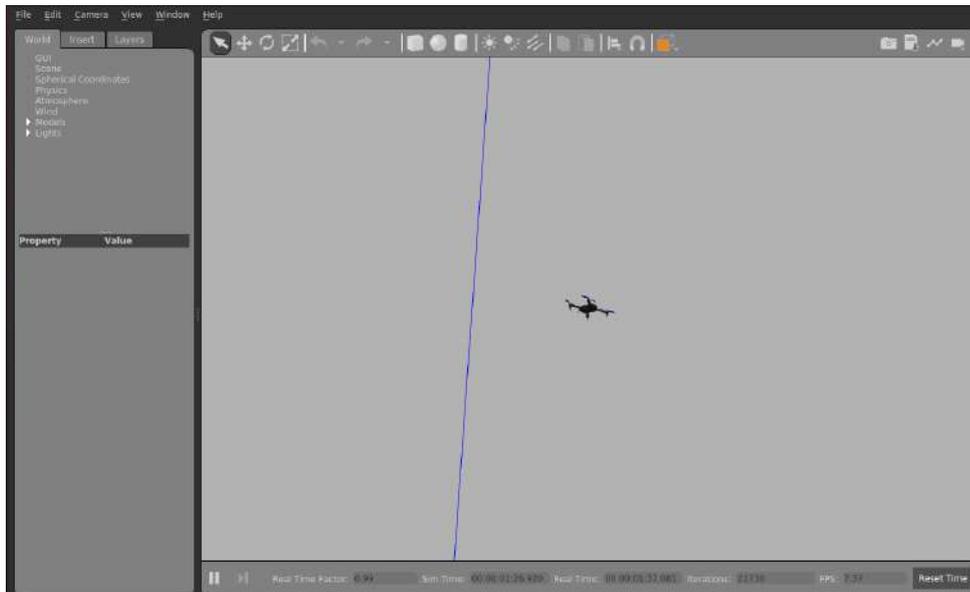
Fonte: O Autor, 2024.

Figura 18 – Simulador de estação de controle de solo QGroundControl.



Fonte: O Autor, 2024.

Figura 19 – Simulador de UAV e ambiente 3D Gazebo.



Fonte: O Autor, 2024.

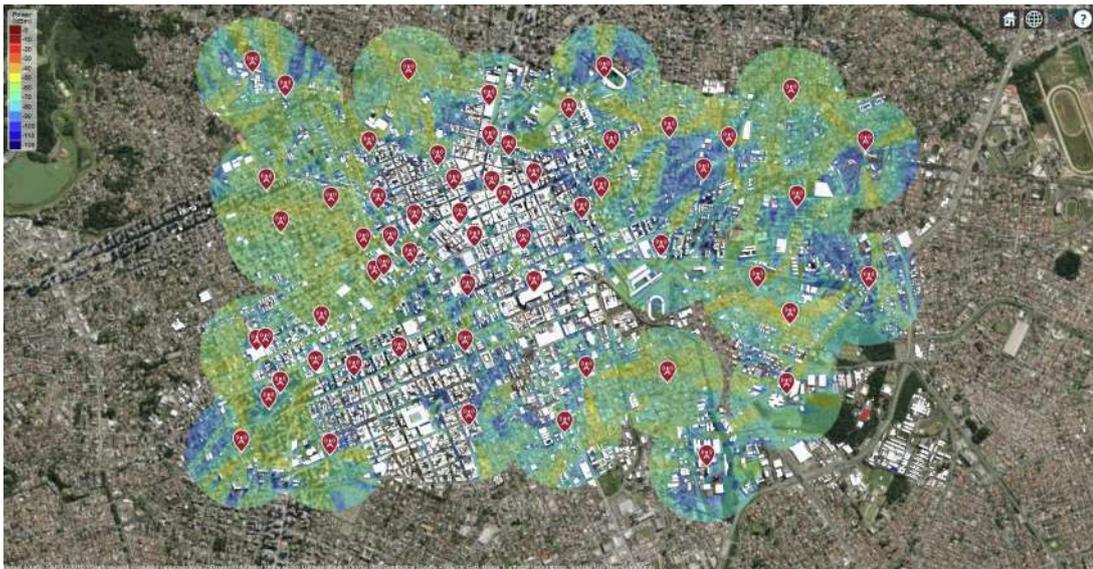
5 Resultados

Durante o desenvolvimento do trabalho, a equipe foi capaz de construir e validar o mapeamento da cobertura 5G no centro de Curitiba, implementar e avaliar o algoritmo de otimização de rotas proposto e compilar a rotina estabelecida para ser implementado em outros contextos.

No contexto de modelos de cobertura 5G, foram utilizadas três simulações distintas para construção do mapa de calor. Uma simulação para cada grupo de dados de cada empresa, foram gerados 3 resultados ao total, constituindo em um mapa de potência de sinal para cada operadora.

Os mapas de calor apresentados a seguir correspondem às médias da relação de potência relativo às operadoras Claro, Telefônica e Tim, respectivamente.

Figura 20 – Mapa de calor da relação logarítmica de potência absoluta Claro.



Fonte: o Autor, 2024.

Figura 21 – Mapa de calor da relação logarítmica de potência absoluta Telefônica.



Fonte: o Autor, 2024.

Figura 22 – Mapa de calor da relação logarítmica de potência absoluta Tim.



Fonte: o Autor, 2024.

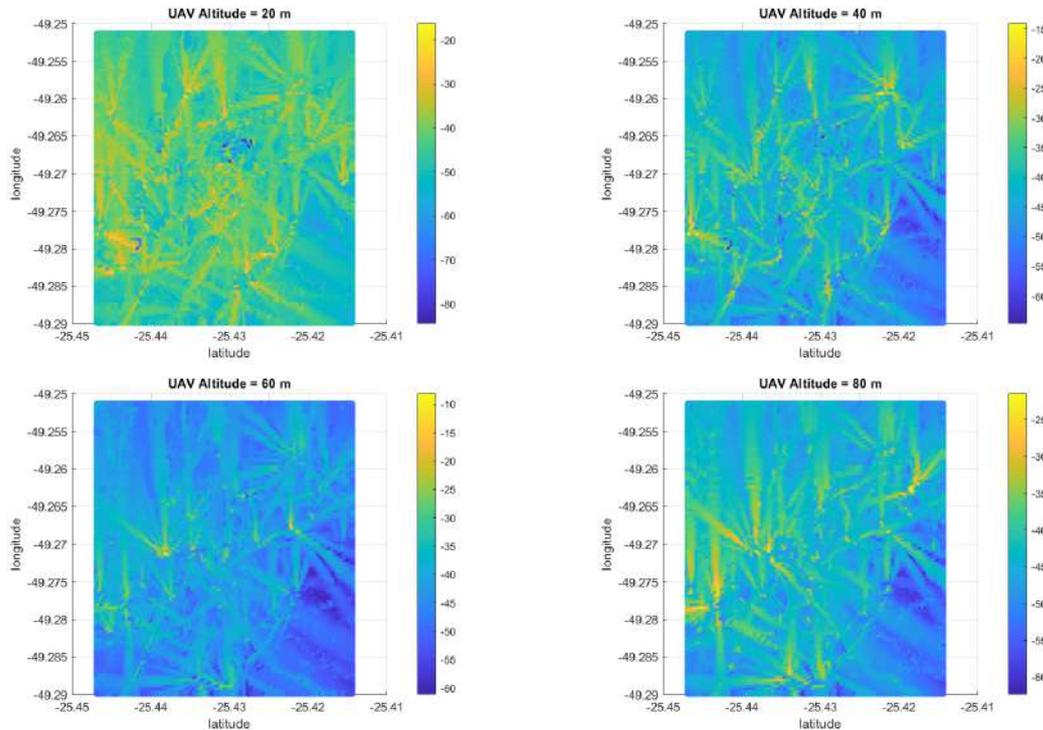
Tabela 11 – Relação de unidades de transmissão.

Empresas	Pontos de Transmissão
Claro	1024
Telefônica	407
Tim	1662

Fonte: O Autor: 2024.

Afim de facilitar os cálculos e conversões, foi delimitado a área de interesse, os quais foram exportados os valores extraídos na figura 20, 21 e 22, para uma grade de pontos, conforme explicitado nas imagens 23, 24 e 25.

Figura 23 – Grid de Sinal da Operadora Tim, resolução de 100 pontos.

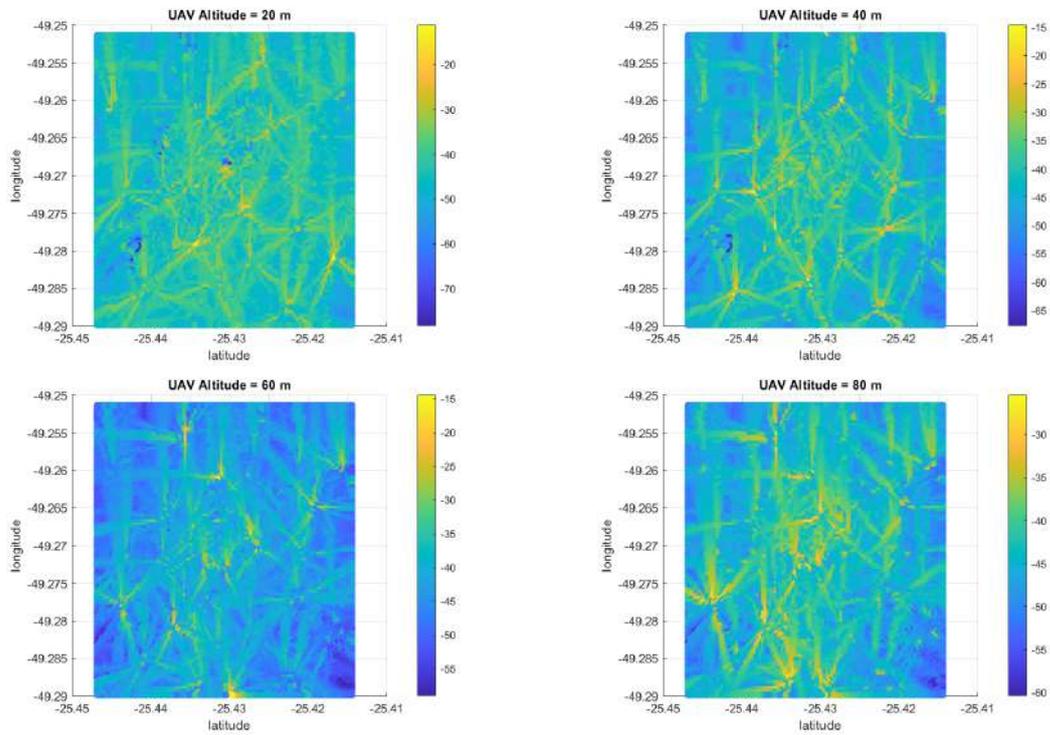


FONTE: O Autor, 2024.

Usando os artefatos gerados nos passos anteriores, foi possível a construção de recurso que constitui na representação dos dados na forma de um grafo, onde o número de nós corresponde ao tamanho da área analisada e da resolução da grade.

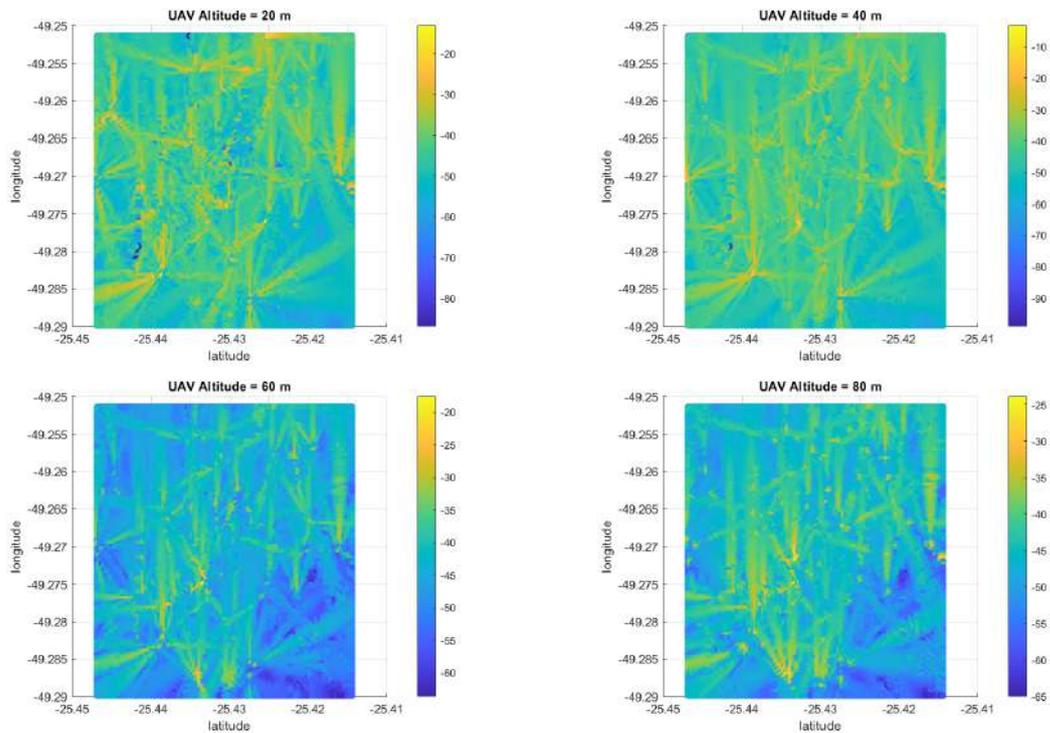
Afim de diminuir a complexidade computacional, foi considerado um conjunto finito e discreto de altitudes para o voo do UAV, construindo assim grafos de camada única para cada altitude. Ao associar essas malhas de grafos de malha unitária é possível construir um grafo multicamadas, tal qual representado na Figura 26, associando conexões entre camadas adjacentes, que representam diferentes altitudes de voo, construindo assim uma matriz de adjacência apta para prosseguimento de cálculos.

Figura 24 – Grid de Sinal da Operadora Claro, resolução de 100 pontos.



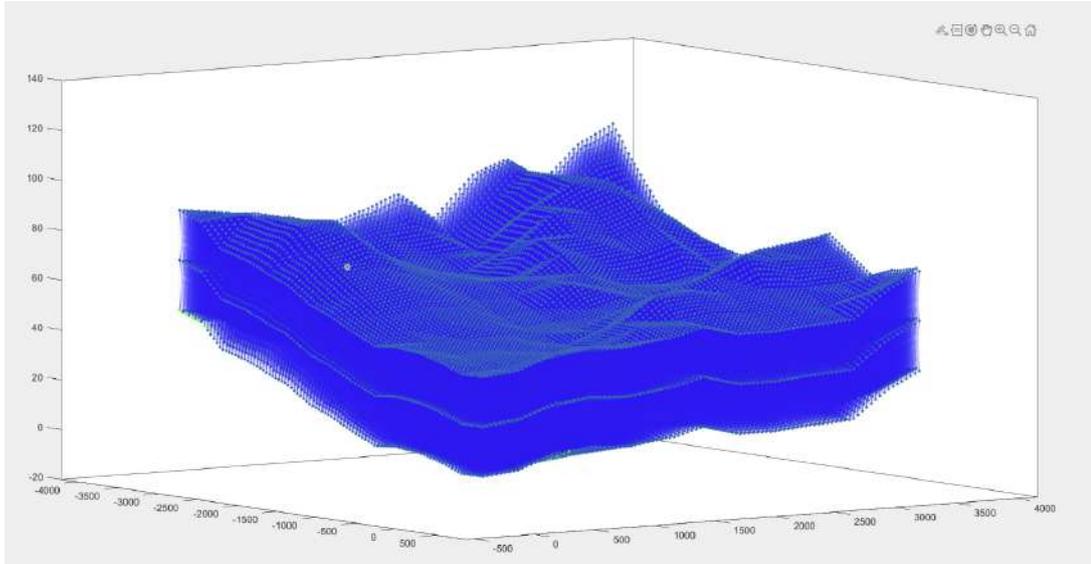
FONTE: O Autor, 2024.

Figura 25 – Grid de Sinal da Operadora Telefônica, resolução de 100 pontos.



FONTE: O Autor, 2024.

Figura 26 – Grafo construído dos Grids de Sinal da Claro de 20m, 40m, 60m e 80m.

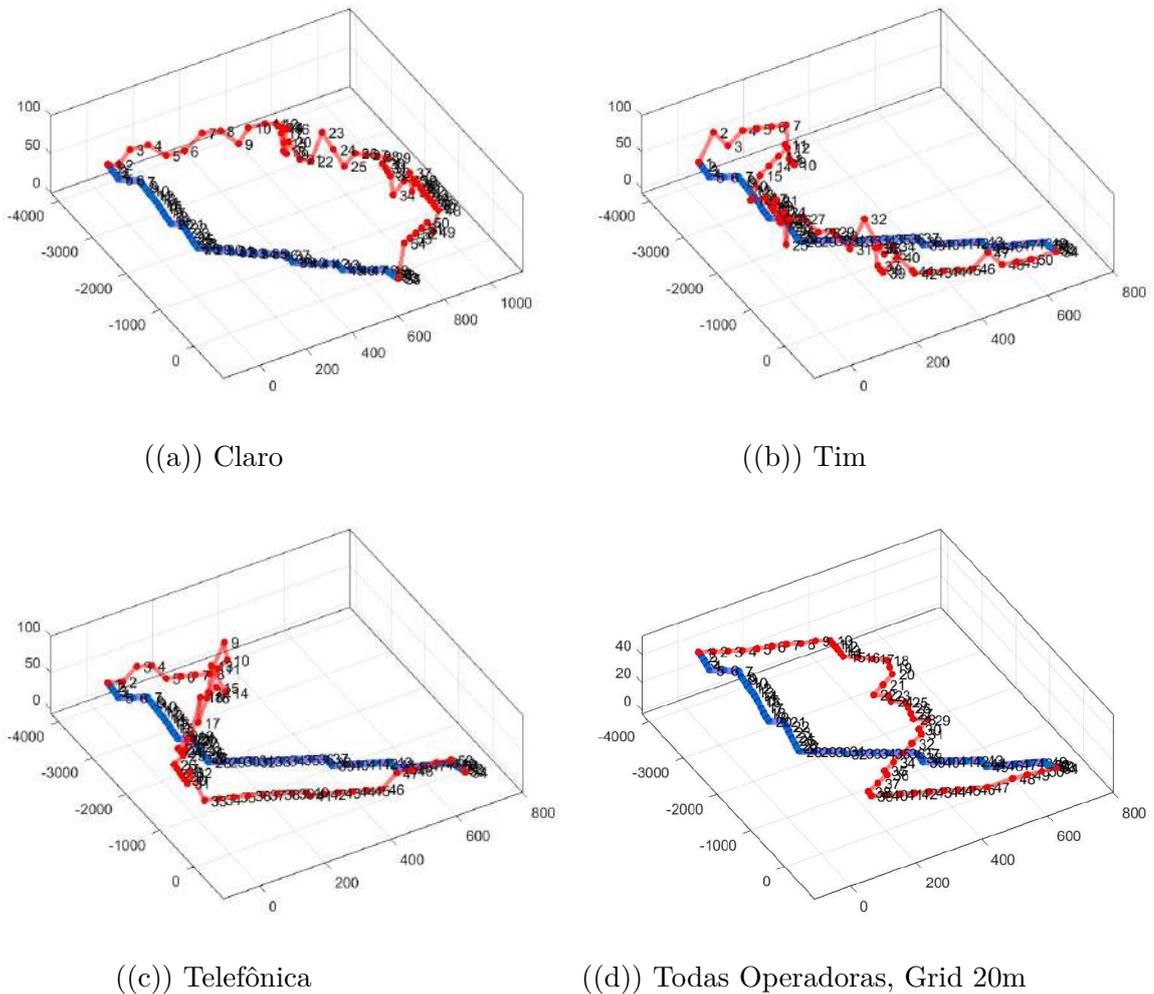


Fonte: o Autor, 2024.

Com o grafo e a malha de adjacência devidamente ponderados e relacionados à devida operadora de transmissão de sinal, é possível calcular o trajeto otimizado entre dois nós selecionados. Para a análise e o comparativo, inicialmente foi selecionado a distância entre a coordenada $[-25.4406, -49.2899]$ e $[-25.4406, -49.2514]$, que ao serem convertidos à notação de nós correspondem respectivamente ao nó 1 e ao nó 2000. A rota foi planejada para todas as operadoras utilizando as camadas de 20m, 40m e 60m.

Devido a alta complexidade computacional, as rotas só puderam ser simuladas utilizando três camadas de altitude. Uma quarta simulação, utilizando os grids correspondente à 20m de cada operadora também foi executada, possibilitando analisar se uma operação com mais operadoras possui um rendimento maior, compensando o chaveamento de conexão entre diversas fontes de sinal móvel 5G. Assim, foi possível obter os resultados da simulações conforme a Figura 27, na qual a menor distância entre os nós do grafo é representado pela curva azul e a melhor distância considerando o RSRP é representada em vermelho.

Figura 27 – Comparativo de Caminhos Simulados.

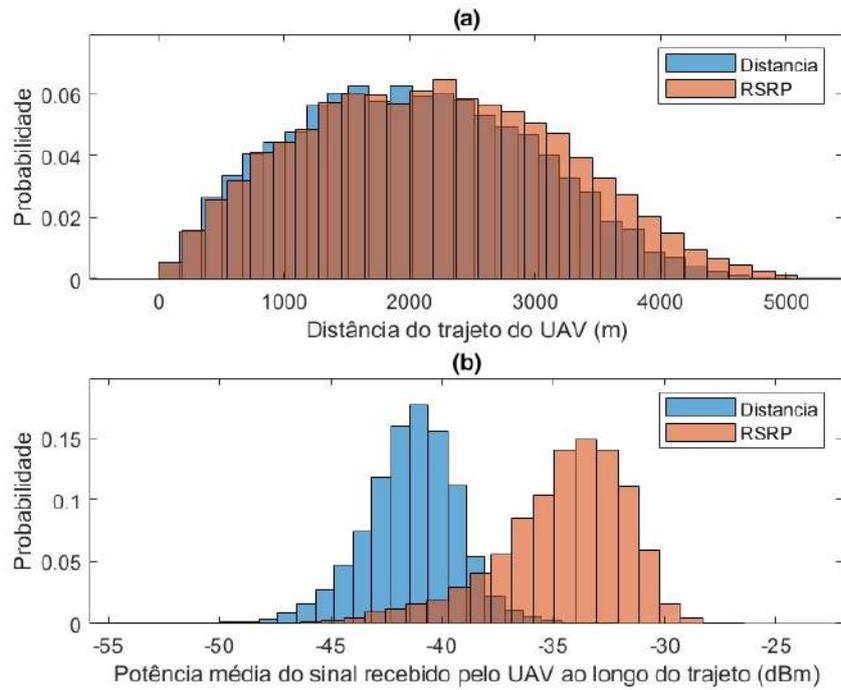


FONTE: O Autor, 2024.

Para uma análise do algoritmo proposto mais objetiva, foi realizada uma simulação pegando diversos pontos de origem e destino afim de inserí-los no algoritmo de Dijkstra e retirar a distribuição de frequência das métricas de RSRP e distância em cima dos modelos propostos, conforme ilustrado nas Figuras 28, 29, 30 e 31. Inicialmente, é possível observar que há um aumento no trajeto, pois o UAV busca o melhor sinal o que tende comprometer e aumentar a distância de voo.

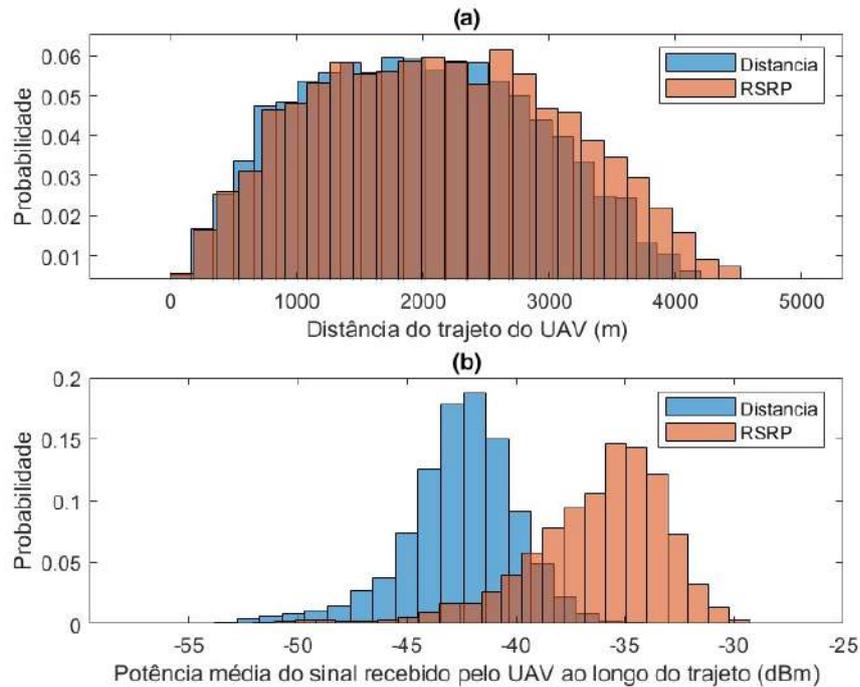
Analisando a potência média recebida ao longo das rotas, é possível ilustrar e diferenciar ambas as estratégias. A potência média recebida é maior em todas as simulações onde foi priorizada, visto que a média da potência nos trajetos que priorizaram a menor distância foi de $-42,5$ dBm e nos trajetos que priorizaram o melhor sinal foi de $-34,66$ dBm, obtendo uma potência 5,69 vezes maior, o que melhora a segurança no voo graças a maior garantia de conexão.

Figura 28 – Histograma dos Caminhos Simulados Operadora Claro.



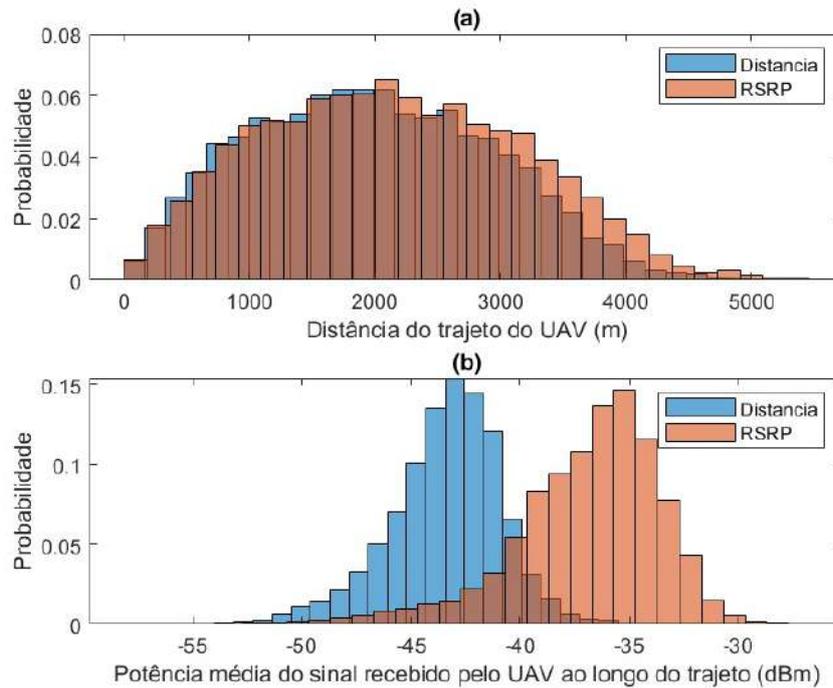
Fonte: o Autor, 2024.

Figura 29 – Histograma dos Caminhos Simulados Operadora Tim.



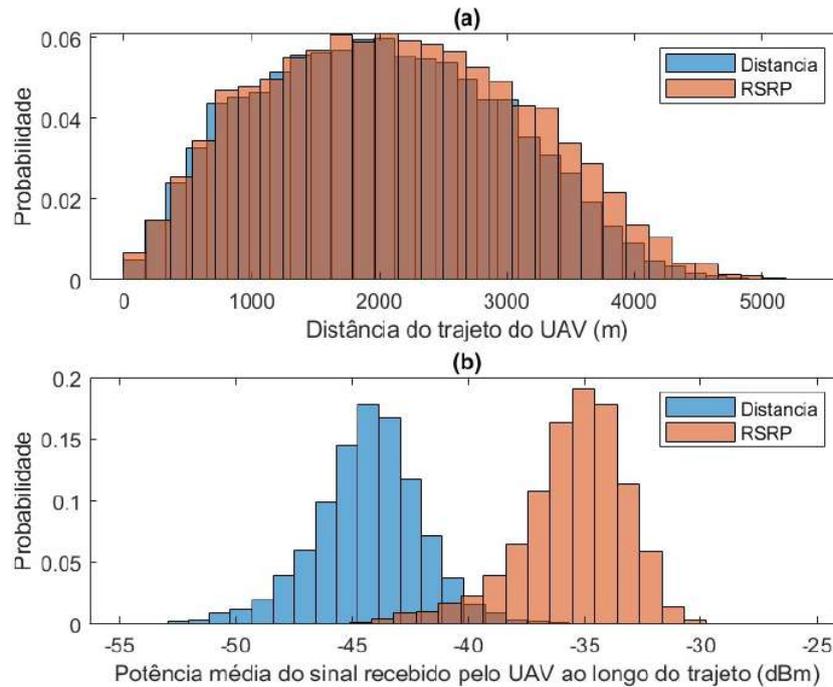
Fonte: o Autor, 2024.

Figura 30 – Histograma dos Caminhos Simulados Operadora Telefônica.



Fonte: o Autor, 2024.

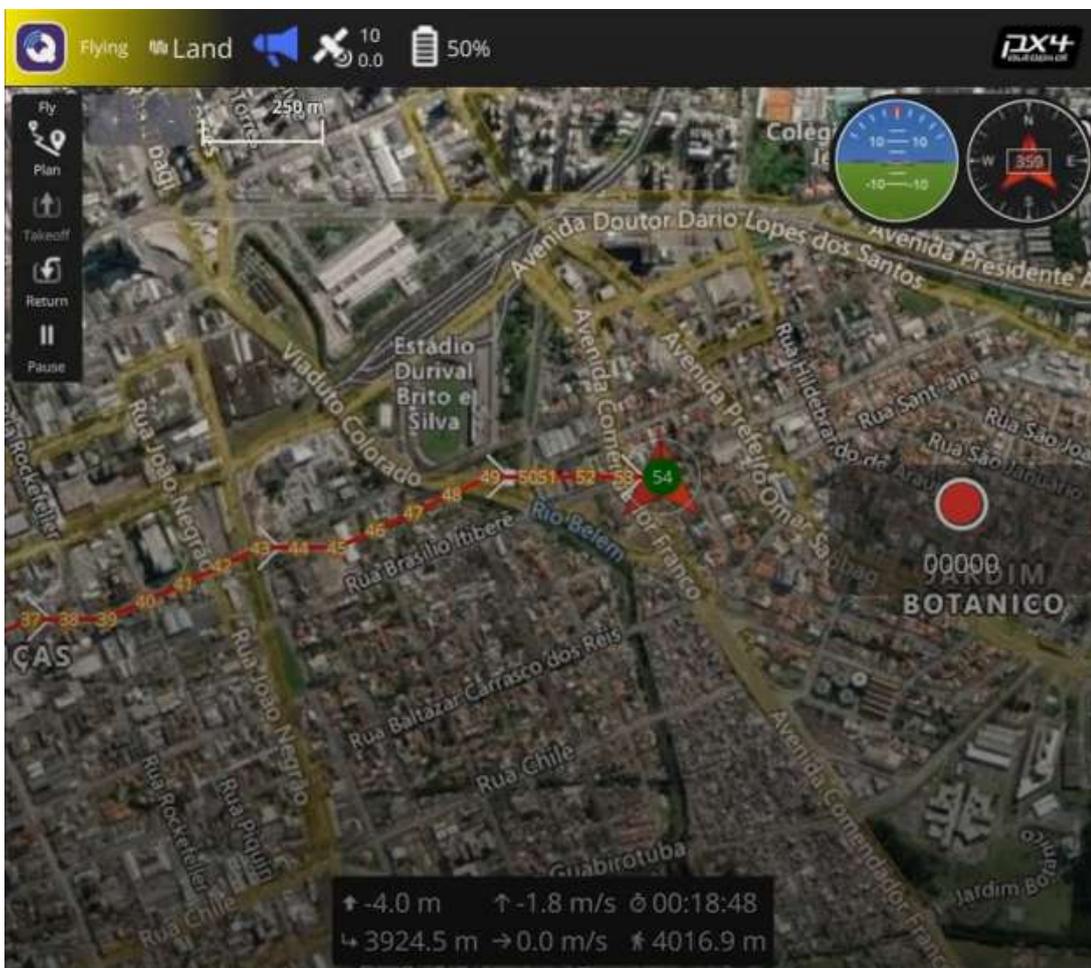
Figura 31 – Histograma dos Caminhos Simulados Todas Operadoras.



Fonte: o Autor, 2024.

Extraindo os nós dispostos na Figura 27 e convertendo-os de volta para coordenadas geográficas, foi possível integra-las em uma simulação de controle de voo utilizando do software QGroundControl, que interage no software de simulação de drones Gazebo através do protocolo de comunicação MAVLink. Em ambos os casos, o tempo do percurso do drone foi próximo a 19 minutos para o drone subir a 60 metros em relação ao solo, altura do primeiro nó da malha do grafo, percorrer em torno de 4 quilômetros numa rota determinada por 54 nós no caminho que foca a menor distância e 55 nós no caminho que prioriza o melhor sinal, e descer novamente a nível do solo, demonstrando que houve uma diferença menor de 1 minuto entre as rotas planejadas.

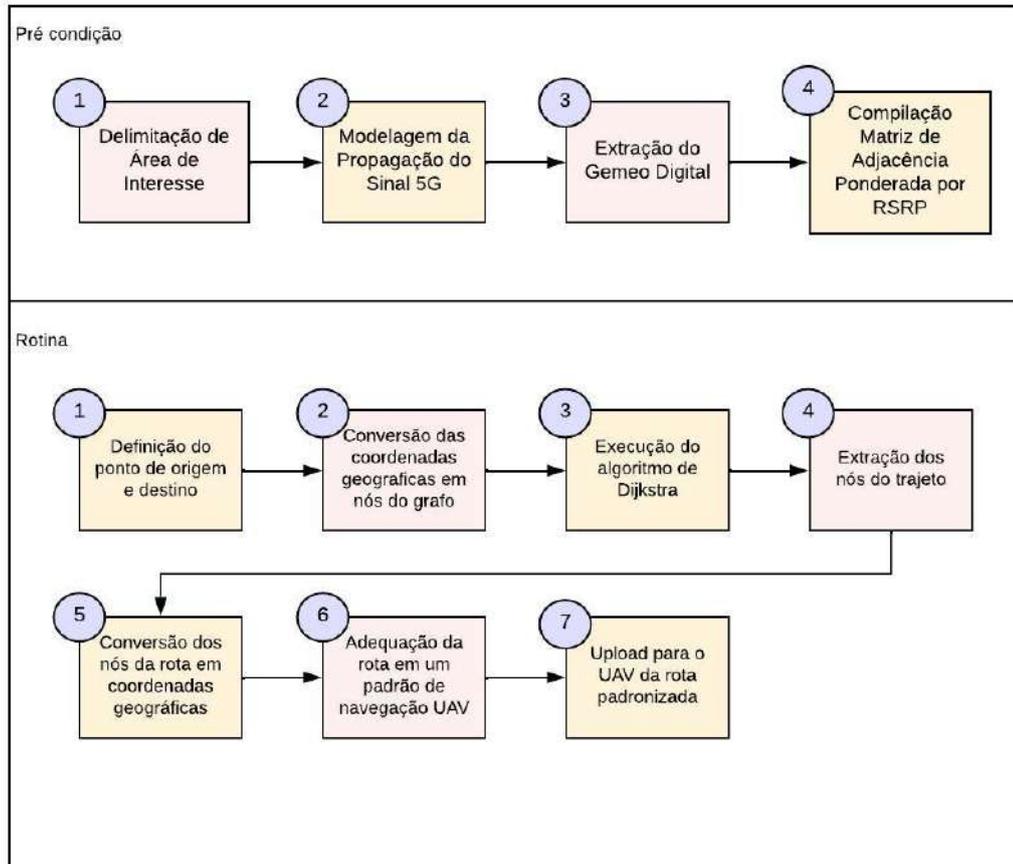
Figura 32 – Final da simulação do percurso de menor distância.



Fonte: o Autor, 2024.

Analisando todos os artefatos e simulações geradas, é possível extrair os passos de um algoritmo para otimização de rotas em cima de redes móveis 5G para quaisquer localidades onde é possível construir um gêmeo digital do sinal de propagação do 5G, explicitado na Figura 33.

Figura 33 – Diagrama do Algoritmo de Rotas Otimizadas no cenário 5G.



Fonte: o Autor, 2024.

6 Conclusão

6.1 Considerações Gerais

O trabalho tem como objetivo analisar técnicas de otimização de rotas para desenvolver um algoritmo que auxilie o controle remoto de UAVs utilizando como base para infraestrutura a rede 5G, visando a operação fora do raio de visão do operador. Como esse trabalho foi dividido em duas etapas, a primeira focou majoritariamente em analisar e revisar os conceitos necessários para a inicialização do trabalho e gerar os artefatos necessários para as próximas validações. Dispondo dos artefatos necessários, tornou-se viável a simulação do algoritmo de otimização proposto, habilitando a criação dos artefatos afim de comparar e validar a proposição de um algoritmo de rotas com base em redes móveis 5G.

6.2 Considerações Sobre os Objetivos Específicos

No contexto dos objetivos específicos do trabalho, a equipe obteve êxito em mapear as oportunidades de aplicações dos UAVs no controle BLOS, definido e apresentado na Sessão 2, e identificado a rede de cobertura real das torres 5G em Curitiba ao extrair os dados disponibilizados pela ANATEL. A modelagem prevista inicialmente teve de ser refatorada por limites de processamento, originalmente limitava às divisas geográficas do município de Curitiba, foi recalculada para focar o centro de Curitiba e bairros adjacentes. Para incorporar na simulação a área designada no início, seria necessário um poder de processamento maior. Ao coligir os dados recém redefinidos das antenas com os dados geoespaciais captados na ferramenta de código aberto OpenStreetMap, e analisados inicialmente para identificar as melhores distribuições de potência via mapa de calor. Para

Para efeitos de avaliações, foram considerados os algoritmos de Dijkstra, Bellman-Ford e Floyd-Warshall, os quais são recomendados para situações específicas e distintas. Foi constatado que o algoritmo de Dijkstra é o mais adequado no contexto apresentado pelo trabalho devido ao menor tempo de processamento, sendo utilizado para as simulações e extração de resultados.

A avaliação da técnica proposta foi através de um método de simulação estocástica, gerando nós de origem e destino aleatórios possibilitando extrair a distribuição da frequência do sinal recebido, dispostos em histogramas. Ao perceber que o sinal médio recebido foi de -35 dBm, o que valida a conectividade, possibilitando situações que exigem transmissão de dados em tempo real, como vídeo de alta definição ou controle remoto preciso. Um sinal forte também ajuda a minimizar a latência e a melhorar a confiabilidade da conexão,

fatores críticos para a operação segura e eficiente de UAVs, garantindo a utilização dos UAVs em Smart Cities.

6.3 Sugestão de Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, é sugerido analisar o comportamento dos UAVs num exercício prático em diversas situações, tais como intempéries climáticas, com intenção de validar a robustez do modelo proposto. O trabalho focou em maximizar a potência da conexão durante o plano de voo, comprometendo ou relevando diversos outros fatores inerentes à uma missão de voo de um UAV, e com isso, durante o desenvolvimento foi cogitado alguns pontos que poderiam ser melhor explorados:

- Validação Prática em Cenários reais: Embora o gêmeo digital extraído nos primeiros passos represente fielmente a malha da rede 5G, realizar experimentos práticos com UAVs em ambientes urbanos reais poderiam avaliar o quão robusto o modelo proposto é em condições reais com fatores como ocasionais interferências de sinal, obstáculos urbanos esporádicos e limitações de hardware. Além disso, diferentes cidades e regiões, com suas respectivas densidades populacionais singulares, possibilitariam quantificar o quão genérico e adaptável o algoritmo proposto é.
- Otimização de rotas em cenários climáticos extremos: Outro fator que foi desprezado durante a simulação são as intempéries climáticas, tais como chuva, vento forte, neblina e amplitudes térmicas bruscas, o que interfere na conectividade e no desempenho dos UAVs. Com isso, é possível analisar e desenvolver estratégias que mitiguem fatores externos abruptos, garantindo a robustez do modelo proposto.
- Investigar o impacto da troca de antenas: Uma das simulações do algoritmo proposto prevê a troca de conexão entre diferentes operadoras, porém não analisa como as transições entre diferentes antenas ou estações base afetam a estabilidade da comunicação. Com isso, é possível analisar algoritmos de *handover* (troca de antenas) eficientes afim de garantir uma conectividade mais robusta e contínua no trajeto calculado para o UAV.
- Legislação e Ética nos dados coletados pelos UAVs: Analisar, e investigar as questões éticas que envolvem a privacidade e a segurança dos dados coletados por UAVs. É possível estudar soluções de governança de dados e investigar técnicas de anonimização e criptografia adequadas à Lei Geral de Proteção de Dados, o que garante o uso ético, seguro e de acordo com os direitos fundamentais dos indivíduos.

Referências

- 3GPP. *3rd Generation Partnership Project*. 2024. <https://www.3gpp.org/> Acesso em: 12/04/2024.
- ABOHASHISH, S. M. M.; RIZK, R. Y.; ELSEDIMY, E. I. Trajectory optimization for uav-assisted relay over 5g networks based on reinforcement learning framework. *Wireless Com Network*, 2023.
- ANATEL. *Dados de propagação de antenas no Brasil*. 2024. <<https://sistemas.anatel.gov.br/se/public/view/b/licenciamento.php?view=licenciamento>. Acesso em: 05/03/2024>.
- CARAGLIU, A.; BO, C. D.; NIJKAMP, P. *Smart Cities in Europe*. 2011. Journal of Urban Technology.
- CUNHA, M. A. et al. *Smart cities: transformação digital de cidades*. 2016. <<https://hdl.handle.net/10438/18386>>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- DANGE, S. et al. A review on 5g technology: Evolution, features and challenges. *Asian Journal of Science and Applied Technology*, 2021.
- DRONELIFE. *How BVLOS Operations are Shaping Smart Cities in 2024*. 2024. <<https://dronelife.com/2024/01/15/bvlos-operations-smart-cities/>>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- (EASA), E. U. A. S. A. *Guidelines for BVLOS Operations in Urban Environments*. 2023. <<https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/bvlos-guidelines>>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- (FAA), F. A. A. *Beyond Visual Line of Sight (BVLOS) Operations*. 2023. <https://www.faa.gov/uas/advanced_operations/beyond_visual_line_of_sight>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- GHEZZI, A. et al. Crowdsourcing: a review and suggestions for future research. *International Journal of Management Reviews*, 2017.
- GSMA. *5G and BVLOS: Enabling Drone Operations in Smart Cities*. 2024. <<https://www.gsma.com/5g-bvlos-drones-smart-cities>>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- HAMISH. *QGroundControl*. 2017. Accessed on December 01, 2024. Disponível em: <<https://qgroundcontrol.com/qgroundcontrol-3-2-released/>>.
- HAMISH, W. *MAVLink*. 2024. Accessed on December 01, 2024. Disponível em: <<https://mavlink.io/en/>>.
- HOLLANDS, R. G. *Will the real smart city please stand up? Intelligent, progressive or entrepreneurial?* 2008. City: Analysis of Urban Trend, Culture, Theory, Policy, Action, 12(3), 303–320.
- JAVAID, A. Understanding dijkstra algorithm. *SSRN Electronic Journal*, 2013.

KAIRANBAY M. MAT JANI, H. A review and evaluations of shortest path algorithms. *International Journal of Scientific Technology Research*, 2013.

KEMPEPATIL, R. Advanced study of shortest route problem and its applications bellman-ford algorithm. *IJS DR*, 2023.

KHALIFA, A.; NOORA, F. A new shift in implementing unmanned aerial vehicles (uavs) in the safety and security of smart cities: A systematic literature review. *MDPI*, 2023.

KUIKKANIEMI, K. et al. *From space to stage: how interactive screens will change urban life*. 2011. IEEE Computer Society.

LI, N. et al. Real-time 3d-lidar, mmw radar and gps/imu fusion based vehicle detection and tracking in unstructured environment. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2021.

MAVLINK. *MAVLink Messaging*. 2024. <<https://docs.px4.io/main/en/middleware/mavlink.html>>. Acesso em: 05/12/2024.

MEDIUM. *O que são as cidades inteligentes e porque elas são uma alternativa para o futuro*. 2023. <<https://medium.com/reportagens-5g-jornalismo-digital-facom-ufjf/o-que-s%C3%A3o-as-cidades-inteligentes-e-porque-elas-s%C3%A3o-uma-alternativa-para-o-futuro-7c651ffadda0>>. Acesso em: 13 dez. 2024.

ONU, U. E. *Cidades de amanhã desafios, visões e perspectivas*. 2011. <https://ec.europa.eu/regional_policy/information-sources/publications/reports/2011/cities-of-tomorrow-challenges-visions-ways-forward_pt>. Acesso em: 01/06/2024>.

OSM. *Open Street Map*. 2024. <<https://www.openstreetmap.org>. Acesso em: 03/03/2024>.

PESSOA, U. F. *O 5G na Mobilidade das Cidades Inteligentes*. 2024. <https://bdigital.ufp.pt/bitstream/10284/12790/1/apre_18marco2024UFP.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2024.

POLITI, E. et al. A survey of uas technologies to enable beyond visual line of sight (bvlos) operations. *7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, 2021.

RAMADIANI, D.; BUKHORI, A.; DENGGEN, N. Floyd-warshall algorithm to determine the shortest path based on android. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018.

RAMIREZ-ATENCIA, C.; CAMACHO, D. Extending qgroundcontrol for automated mission planning of uavs. *Sensors*, 2018.

REPLY. *A importância do 5G para a cidade inteligente e o seu impacto*. 2024. <<https://www.reply.com/pt/telco-and-media/5g-smart-cities>>. Acesso em: 13 dez. 2024.

REYNOL, F. *Mais de 80% da população brasileira habita 0,63% do território nacional*. 2019. <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/28840923/mais-de-80-da-populacao-brasileira-habita-063-do-territorio-nacional>>. Acesso em: 01/06/2024>.

- ROCHOL, J. *Sistemas de Comunicação Sem Fio - Conceitos e Aplicações: Volume 24*. [S.l.]: Bookman, 2018.
- SCIENCE, S. *Melhorando o Planejamento de Rotas com Nova Heurística*. 2023. <<https://simplescience.ai/pt/2023-02-05-melhorando-o-planejamento-de-rotas-com-nova-heuristica--ageozy>>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- SHAIBU, F. E. et al. Performance of path loss models over mid-band and high-band channels for 5g communication networks: A review. *Future Internet*, 2023.
- SOHAIB, R. M. et al. Intelligent resource management for embb and urllc in 5g and beyond wireless networks. *IEEE Access*, vol. 11, 2023.
- SOUTO, A. et al. Uav path planning optimization strategy: Considerations of urban morphology, microclimate, and energy efficiency using q-learning algorithm. *Drones*, 2023.
- TECNOBLOG. *O que é 5G? Saiba como funciona e as vantagens da 5ª geração de redes móveis*. 2023. <<https://tecnoblog.net/responde/o-que-e-5g/>>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- TEHRANI, M.; UYSAL, M.; YANIKOMEROGLU, H. Device-to-device communication in 5g cellular networks: challenges, solutions, and future directions. *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 86-92, 2014.
- TEMER, M. *Lei nº 13.690/2018*. 2018. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2015-2018/2018/lei/l13690.html. Acesso em : 22/05/2024.
- TU, G.; JUANG, J. Uav path planning optimization strategy: Considerations of urban morphology, microclimate, and energy efficiency using q-learning algorithm. *Actuators*, 2023.
- UN-HABITAT. *Integrating BVLOS Drone Operations into Smart City Frameworks*. 2024. <<https://unhabitat.org/bvlos-drones-smart-cities>>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- UN-HABITAT. *World Smart Cities Outlook 2024*. 2024. <<https://unhabitat.org/world-smart-cities-outlook-2024>>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- VARGAS, E. *O que esperar das Cidades Inteligentes no Brasil em 2024?* 2024. <<https://cryptoid.com.br/criptografia-identificacao-digital-id-biometria/o-que-esperar-das-cidades-inteligentes-no-brasil-em-2024/>>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- WANG, P. et al. Beyond visual line of sight piloting of uavs using millimeter-wave cellular networks. *IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC): Track 3: Mobile and Wireless Networks*, 2019.
- WILSON, R. *Introduction to Graph Theory, 4ª Edição*. [S.l.]: LONGMAN, 1998.
- XIE, H.; XIAO, L.; LYU, J. Connectivity-aware 3d uav path design with deep reinforcement learning. *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, VOL. 70, NO. 12, 2021.